

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії чорних металів і ливарного виробництва

Пояснювальна записка
до випускної атестаційної роботи магістра

зі спеціальності 136 – Металургія
ОП «Ливарне виробництво чорних та кольорових металів і сплавів»

на тему:

**Розробка та дослідження технології виготовлення литих
виробів із композиційних матеріалів**

Виконав: студент групи ЛВ-24-1м
Керівник випускної роботи
Нормоконтролер
Завідувач кафедри

Деркач І.В.
Кассім Д.О.
Кассім Д.О.
Савельєв С.Г.

Кривий Ріг
2025 р.

ВІДОМОСТІ ОБСЯГУ МАТЕРІАЛІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	Примітка
				<u>Документація</u>		
A4		1	КНУ.РМ.136.25.500с-04 ПЗ	Пояснювальна записка		
				<u>Графічні матеріали</u>		
A4		2	КНУ.РМ.136.25.500с-04 ПР	Презентація		
A4		3				
A4		4				
A4		5				

					КНУ.РМ.136.25.500с-04 ВМ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВІДОМІСТЬ МАТЕРІАЛІВ		
Розроб.	Декач І.В.						
Перевір.	Кассім Д.О.						
Н. Контр.	Кассім Д.О.						
Затверд.	Савельєв С.Г.				ЛВ-24-1М		
					Лім.	Арк.	Акрушіє
						2	1

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Розробка та дослідження технології виготовлення литих виробів із композиційних матеріалів»: містить 76 сторінок основного тексту, 14 рис., 6 табл., ____ літературних посилань.

Робота представляє розробку та вивчення інноваційного технологічного процесу. Суть процесу полягає у виробництві литих деталей із застосуванням технології лиття за газифікованими моделями, яка доповнена армуванням литих конструкцій. Це армування досягається через цілеспрямоване розміщення армуючих елементів безпосередньо в порожнині форми або у внутрішньому просторі одноразової пінополістиролової моделі.

У дослідженні були задіяні методики фізичного моделювання процесів заповнення ливарних форм, а також аналітичні розрахунки для встановлення теплофізичних умов лиття. На підставі виявлених закономірностей, що стосуються фізико-хімічної взаємодії, газогідродинаміки та тепломасопереносу між рідким/тверднучим металом та гетерогенною армуючою фазою, були створені нові технологічні рішення. Ці рішення дозволяють отримувати виливки з контрольованою структурою та заданими властивостями, використовуючи сплави на основі кольорових та залізовуглецевих металів. Створені технології придатні для організації сучасного ливарного виробництва, здатного випускати точні виливки в діапазоні мас від 0,1 до 500 кг, гарантуючи при цьому високі стандарти екологічної безпеки.

ВИЛИВОК, АРМУЮЧІ ЕЛЕМЕНТИ, КОМП'ЮТЕРНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЛГМ – лиття за моделями, що газифікуються.

ЛАК – литі армовані конструкції.

ВДВ – виливки з диференційованими властивостями.

АЕ – армуючі елементи.

КВМ – коефіцієнт використання металу.

КМ – композиційні матеріали.

ЛКМ – литі композиційні матеріали.

ТМ – твердофазні методи.

РМ – рідко фазні методи.

МАЕ – макроармуючі елементи.

ДАЕ – дисперсноармуючі елементи.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 Технологічні процеси одержання литих заготовок з керованою структурою та властивостями.....	11
1.2 Особливості масопереносу при введенні добавок в рідкий розплав і їх розчиненні.....	12
1.3 Способи виробництва композиційних матеріалів на основі	18
литих сплавів і армованих виливків	18
2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ	22
3 КЕРУВАННЯ СТРУКТУРОЮ І ВЛАСТИВОСТЯМИ ВИЛИВКІВ МЕТОДОМ АРМУВАННЯ ЛИТИХ КОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОМ РОЗМІЩЕННЯ АРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ПОРОЖНИНІ ФОРМИ АБО ОДНОРАЗОВОЇ ПІНОПОЛІСТИРОЛОВОЇ МОДЕЛІ.....	26
4 ОСНОВНА ЧАСТИНА	34
4.1 Аналіз стану виготовлення композиційних матеріалів	34
4.2 Властивості композиційних матеріалів	41
4.3 Методи отримання композиційних матеріалів	44
5 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	50
5.1 Дослідження взаємодії армуючих частинок і матриці.....	50
5.2 Мікроструктура границі розподілу армуючих частинок з матрицею	51
5.3 Дослідження параметрів отримання композиційних виливків	58
6 ОЦІНКА СТАНУ УМОВ ПРАЦІ І БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧХ ПРОЦЕСІВ ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	65
7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	69
ВИСНОВКИ.....	75

ВСТУП

Сучасний етап розвитку ливарної справи вимагає від інженерної думки концентрації зусиль на формуванні абсолютно нових технологічних підходів та створенні литих конструкцій, які можуть забезпечити українському машинобудівному комплексу можливість виробляти обладнання наступних поколінь. Це обладнання повинно відповідати найвищим критеріям надійності, мати тривалий термін експлуатації, бути економним у використанні матеріалів та відповідати суворим вимогам екологічної безпеки. Фундаментальне значення ливарного виробництва як ключової заготівельної основи для машинобудування залишається непохитним: литі деталі складають від 50% до 70% загальної маси машин (іноді до 90% у верстатобудуванні) та близько 20% їхньої вартості. Методи лиття дозволяють створювати заготовки складної геометрії з чорних і кольорових сплавів, демонструючи високий коефіцієнт використання металу (від 75% до 98%), що підкреслює їхні безумовні технологічні переваги перед альтернативними методами отримання металевих заготовок.

Проте, постійне зростання експлуатаційних та технологічних вимог до литих виробів, що є неминучим наслідком еволюції сучасних механізмів, вимагає розробки таких методів, які дозволяють виробляти виливки з керованою структурою та заданими властивостями. Необхідність у таких виробках диктується потребою у комбінаціях специфічних характеристик, наприклад, поєднання пластичної, м'якої серцевини з виключно твердим зовнішнім шаром, або забезпечення підвищеної зносостійкості робочої поверхні за рахунок введення карбідних складових. Часто економічна чи технічна доцільність відсутня у виробництві цілого виливка з дорогих легованих матеріалів, якщо покращені властивості потрібні лише на окремих, функціонально важливих ділянках. Таким чином, актуальність набуває виробництво моно- та багатошарових, армованих литих заготовок, де

використовують прогресивні методи, здебільшого у піщаних формах, із залученням фізичних способів зміцнення.

Аналіз вітчизняного та світового досвіду показує, що традиційні методи виготовлення таких багат шарових, армованих та високоміцних заготовок із залізовуглецевих і кольорових сплавів сьогодні мають обмежену сферу застосування. Це створює суттєві перешкоди для повноцінної реалізації потенціалу використання в машинобудуванні литих виробів, які мають диференційовані властивості та функціональні шари, попри те, що саме такі виливки спроможні радикально підвищити якість, фізико-механічні та експлуатаційні характеристики кінцевих литих конструкцій. Крім того, існуючі технологічні процеси для виробництва виливків із підвищеними характеристиками часто залишаються енергоємними та матеріаломісткими, що не дозволяє досягти необхідної точності та знизити собівартість продукції до економічно оптимального рівня.

Серед усіх інноваційних ливарних технологій найбільш значний потенціал демонструє лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ). Ця технологія стає все більш популярною у світовій практиці для виробництва високоточних виливків, досягаючи обсягів понад 1 мільйон тонн щорічно. Популярність ЛГМ зумовлена низкою значних переваг: низькі витрати матеріалів та енергії, незначні капітальні вкладення при модернізації цехів, а також можливість зниження маси деталей при одночасному покращенні їхніх експлуатаційних характеристик. Важливою перевагою є також відсутність шкідливих технологічних операцій, що позитивно впливає як на культуру виробництва, так і на стан навколишнього середовища.

Технологія ЛГМ відкриває перспективний напрям для розробки моно- та багат шарових виливків із диференційованими властивостями (ВДВ). У цьому процесі пінополістиролова модель отримує унікальну функцію: вона виступає носієм для армувальних та охолоджувальних елементів (АЕ), а також імплантантів (модифікаторів, лігатур), які інтегруються безпосередньо в

розплав металу під час його формування та затвердіння у формі. Завдяки цій можливості — заздалегідь інтегрувати легуючі компоненти та різноманітні металеві чи неметалеві частки в пінополістиролову модель — технологія ЛГМ дозволяє частково контролювати процес кристалізації готових виробів через об'ємне або поверхнєве легування та модифікування розплаву безпосередньо у виливниці.

Ключовим способом підвищення експлуатаційних характеристик, зокрема зносостійкості виробів, є армування литих заготовок високомодульними елементами. Цей процес реалізується за допомогою ливарної технології рідкофазного суміщення, що включає дифузійне з'єднання компонентів. Методи отримання композиційних та армованих виливків, що передбачають використання дисперсної фази, поділяються на твердофазні (ТМ), рідкофазні (РМ) та методи осадження. Серед них рідкофазні технології, особливо ті, що застосовуються в сучасних методах лиття (як-от ЛГМ), мають значні переваги: вони дозволяють отримувати деталі з високим коефіцієнтом використання матеріалу (КВМ), мінімізувати теплосиловий вплив на крихкі компоненти, пропонують широкий вибір недорогих армуючих елементів та високу продуктивність.

При застосуванні технології ЛГМ у поєднанні з армуванням виникають нові багатокомпонентні системи, які раніше не були детально описані в теорії ливарних процесів: "метал–модель–імплантовані АЕ – форма" і "метал – АЕ – форма". Якість та стабільність властивостей литих армованих конструкцій (ЛАК) та виливків із диференційованими властивостями критично залежать від комплексу технологічних чинників, головним чином, від температурно-часових параметрів. На жаль, вплив цих параметрів на процеси формоутворення, структуроутворення та кінцеві функціональні властивості литих армованих матеріалів наразі вивчено недостатньо. Більше того, на сьогодні відсутні достатньо надійні та точні технологічні методики для розрахунку й оптимізації параметрів лиття з армувальними елементами, а

наявні математичні моделі гідродинамічних і теплофізичних процесів здебільшого носять емпіричний характер і мають обмежену сферу застосування.

Таким чином, для створення ефективних технологій, спрямованих на підвищення об'ємних та поверхневих функціональних характеристик литих виробів із залізовуглецевих і кольорових сплавів, а також для розрахунку й оптимізації параметрів їхнього виробництва, в рамках даного проєкту необхідно було вирішити комплекс науково-технічних і практичних завдань. Ці завдання включали дослідження впливу температурно-часових факторів на формування структури, механічних і триботехнічних характеристик ЛАК на основі мідних сплавів, а також визначення закономірностей затвердіння виливків, отриманих у вакуумованих формах з використанням газифікованих моделей та дисперсних імплантатів.

Як базову технологію для аналізу й подальшого удосконалення обрано саме лиття у форми з сухого кварцового піску за моделями, що газифікуються, де одноразові моделі слугують носіями для внутрішніх холодильників, армувальних елементів або дисперсних добавок (феросплавів, металевих порошків). Дослідження механізмів розподілу присадок, ефективності їхнього засвоєння та пошук методів для стабілізації цих показників є ключовими для розробки технологічного процесу виробництва виливків з контрольованою структурою. Ці зусилля, що базуються на застосуванні методів аналітичних розрахунків теплофізичних умов лиття та методик фізичного і математичного моделювання заповнення ливарних форм,, мають сформулювати теоретичну та технологічну основу для виготовлення литих виробів із керованою структурою та необхідними властивостями.

Успішна реалізація даної розробки, як показали результати досліджень, дозволяє створити нові технології отримання виливків із керованою структурою та властивостями на основі залізовуглецевих і кольорових сплавів. Ці технології, що ґрунтуються на встановленні закономірностей фізико-

хімічної взаємодії, газогідродинаміки та тепломасопереносу, дають змогу організувати сучасне ливарне виробництво для виготовлення точних виливків масою від 0,1 до 500 кг, забезпечуючи при цьому високий рівень екологічної безпеки. Таким чином, дослідження безпосередньо вирішують актуальну і важливу задачу щодо збільшення довговічності робочих поверхонь ріжучих та функціональних елементів у машинобудівній, гірничій та будівельній галузях народного господарства.

Ці розробки є своєрідним "технологічним ключем", який відчиняє двері до виробництва високопродуктивних матеріалів, що можуть витримувати екстремальні умови експлуатації, подібно до того, як сучасний багатофункціональний інструмент замінює цілий набір вузькоспеціалізованих приладів, забезпечуючи кращу ефективність і універсальність.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технологічні процеси одержання литих заготовок з керованою структурою та властивостями

Ливарне виробництво залишається ключовою та фундаментальною основою заготівельної ланки машинобудування і, за всіма прогнозами, утримуватиме своє провідне значення і в майбутньому. Литі деталі складають значну частину від загальної маси машин та механізмів, варіюючись від 50% до 70%, а у випадку верстатобудування їхня частка може сягати до 90%. Водночас, ці компоненти становлять приблизно 20% від загальної вартості кінцевого обладнання [1].

Методи лиття мають значні технологічні переваги порівняно з іншими способами отримання металевих заготовок, оскільки вони дають можливість створювати складні за формою та геометрією вироби з чорних і кольорових сплавів. Ці процеси забезпечують високий коефіцієнт використання металу (КВМ), що перебуває на рівні 75–98% [2]. Оскільки литі деталі функціонують під значними навантаженнями в різних механізмах і машинах, вони прямо впливають на точність роботи, загальну надійність та тривалість експлуатації всього обладнання.

Постійний розвиток сучасних машин і механізмів супроводжується безперервним збільшенням технологічних та експлуатаційних вимог, що висуваються до литих заготовок. Це зумовлює нагальну потребу у розробці та впровадженні методів виробництва виливків, які мають керовану структуру та заздалегідь задані властивості.

До таких специфічних інженерних рішень належить можливість створювати виливки, де поєднується м'яка серцевина з надзвичайно твердим зовнішнім шаром. Також актуальною є потреба у досягненні підвищеної зносостійкості робочої поверхні, що може бути забезпечена за рахунок присутності карбідних складових. В інших випадках, навпаки, може

вимагатися повна відсутність карбідних фаз у поверхневій зоні, якщо деталь потребує високої теплопровідності або стійкості до окалини.

Застосування підходів, що дозволяють формувати спеціальні, диференційовані властивості лише в окремих, чітко визначених зонах виробу, є технічно та економічно виправданим. У багатьох ситуаціях виготовлення цілого виливка з модифікованого або високолегованого металу є недоцільним, якщо покращені характеристики необхідні лише на локальних ділянках. Таким чином, технологічні процеси, які забезпечують керування структурою та властивостями, дозволяють оптимізувати використання дорогих матеріалів та підвищити функціональність виробів.

1.2 Особливості масопереносу при введенні добавок в рідкий розплав і їх розчиненні

Експлуатаційні характеристики металів, незалежно від того, чи йдеться про леговані, чи про модифіковані сплави, визначаються критично важливим показником — ефективністю засвоєння введених у рідкий розплав добавок. Для того щоб забезпечити максимально можливу інтеграцію присадок у структуру матеріалу та гарантувати їхній рівномірний розподіл, ключову роль відіграють процеси розчинення та дифузії домішок у рідкому металі. Примітно, що ці фундаментальні механізми діють також і в тих випадках, коли в литих виробах використовуються спеціалізовані вставки, такі як внутрішні холодильники або жеребійки [3].

Процес розчинення, що виникає при контакті твердої речовини (частинок або фрагментів) з металевим розплавом, підпорядковується чіткій послідовності. Спочатку атоми, що входять до складу твердого тіла, повинні перейти через межу поділу фаз і розчинитися безпосередньо в рідкій фазі. Якщо вихідна тверда речовина має температуру плавлення $T_{пл}$, яка нижча за температуру основного розплаву T_p , то фізичний перехід здійснюється

двоступенево: спочатку відбувається плавлення твердого тіла, а потім вже рідка речовина розчиняється у головному розплаві.

У більш складних системах, де температура плавлення твердого матеріалу $T_{пл}$ перевищує температуру розплаву T_p , але розплав містить відповідні хімічні домішки, на поверхні твердого компонента може відбуватися утворення нових хімічних сполук [3, 17]. Ключова вимога до цих новоутворених сполук полягає в тому, що їхня температура плавлення має бути нижчою за температуру розплаву T_p . Якщо ж сприятливі для розчинення легкоплавкі сполуки не формуються, тоді атоми, що розташовані на поверхні твердої частинки, переходять у розплав безпосередньо, минаючи стадію попереднього плавлення.

Навколо твердої частинки, яка перебуває в контакті з рідким металом, неминуче формується спеціалізований шар насиченого розчину. Цей шар характеризується високою концентрацією атомів речовини, що розчиняється. Подальше переміщення цих атомів з прикордонної зони у основну масу розплаву здійснюється шляхом дифузії через утворений дифузійний пограничний шар. Збагачений розчиненою речовиною рідкий метал потім поширюється по всьому об'єму металевій ванні [4]. Залежно від усіх фізико-хімічних умов, а також теплофізичних властивостей як розплаву, так і речовини, що вводиться, лімітуючими стадіями всього процесу можуть виступати: або фазовий перехід, або теплопередача, або масопередача. Варто підкреслити, що інтенсивність процесів тепло- і масопередачі додатково залежить від характеру та швидкості руху твердої частинки відносно навколишнього розплаву.

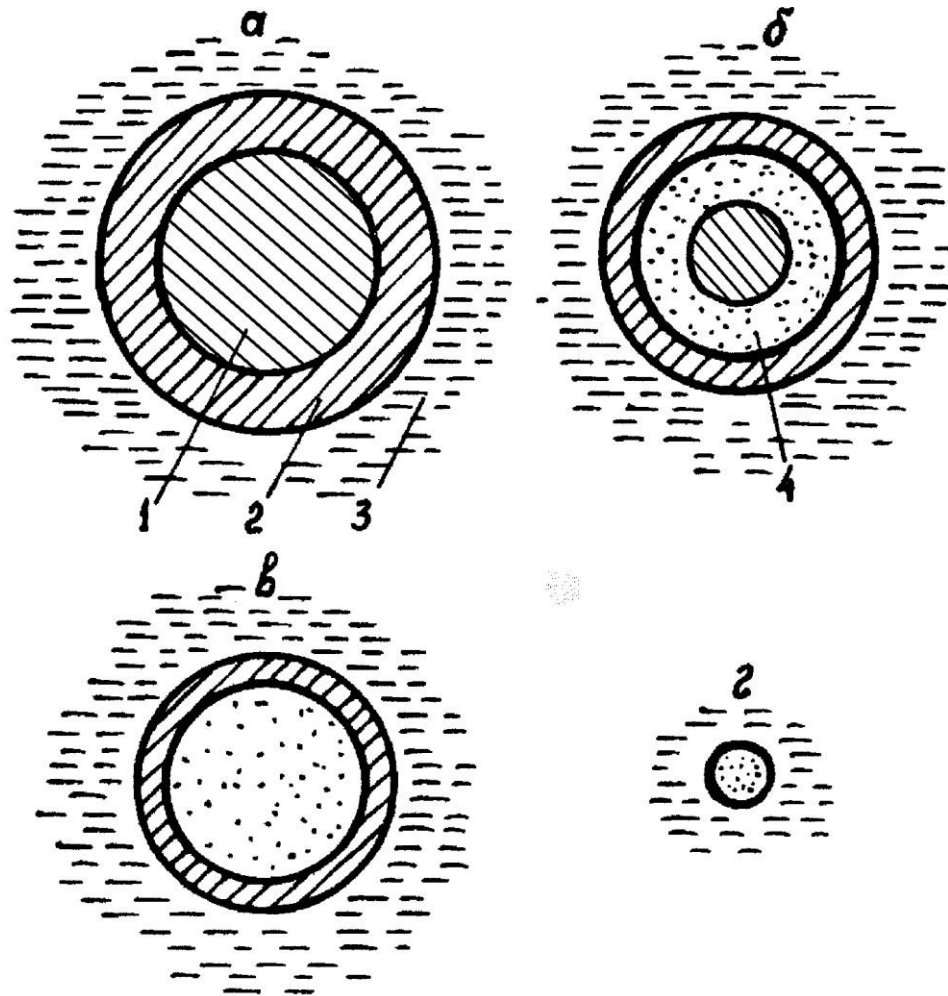
Коли йдеться про розчинення твердих легуючих матеріалів або феросплавів у залізовуглецевому розплаві, процес набуває специфічних рис. У цих реальних умовах початковим явищем є намерзання (наморожування) рідкого металу на поверхні шматка лігатури, що призводить до формування твердої кірки. Лише після цього відбувається розплавлення намерзлої кірки, а

потім — повне плавлення самої лігатури. Феномен намерзання виникає через те, що швидкість, з якою лігатура поглинає тепло для свого прогріву, виявляється вищою, ніж швидкість надходження цього тепла з розплаву. Визначальними чинниками інтенсивності цього явища є теплоємність, теплотворна здатність та температура плавлення лігатури.

В таких металургійних системах процес розчинення умовно поділяють на два основні етапи [5, 17]. Перший етап, названий тепловим, є домінантним за процесами теплопередачі. На цій стадії відбувається інтенсивне охолодження шарів металу, які прилягають до поверхні лігатури, що, своєю чергою, створює перешкоду для повноцінного розвитку дифузійних процесів. Другий етап, відповідно, є дифузійним і починається лише після того, як температура лігатури та рідкого металу вирівнюється. Під час процесу розчинення саме прикордонний шар виступає головною лімітуючою ланкою в системі теплообміну між легуючим компонентом та залізовуглецевим розплавом.

Явище гальмування зростання твердої кірки (скоринки) металу, намерзлої на лігатуру, знаходить своє пояснення у різкому падінні показників теплопровідності сплавів у момент їхнього переходу із твердого стану в рідкий. Це узгоджується із так званим законом Мотта [5]. Слід зазначити, що якщо лігатура характеризується нижчою температурою плавлення, це значно прискорює утворення рідкого шару, тим самим скорочуючи загальну тривалість теплового періоду. Прискорення процесу плавлення може бути досягнуто не лише шляхом підвищення температури рідкого металу та інтенсифікації його перемішування, але й завдяки тепловому ефекту, що виникає при розчиненні присадок у сплаві, а також шляхом зменшення розмірів шматків лігатури [6-9].

Якщо розглядати розчинення феросплаву, чия температура плавлення нижча за температуру залізовуглецевого сплаву, процес деталізується до трьох послідовних етапів (Рис. 1.1).



- а – г періоди розчинення;
 1–твердий феросплав;
 2– кірка твердого чавуну;
 3– рідкий чавун;
 4– рідкий феросплав

Рисунок 1.1 – Схема плавлення частинки легкоплавкого феросплаву в рідкому чавуні

Перший етап включає прогрівання феросплаву, під час якого на його поверхні формується кірка з намерзлого розплаву. Товщина цієї кірки може або зростати протягом всього періоду, або спочатку збільшуватися, а потім зменшуватися. Цей етап завершується, коли шматок феросплаву досягає своєї температури плавлення. Другий етап характеризується тим, що відбувається одночасне плавлення як зовнішньої кірки, так і самого феросплаву.

Завершення цього періоду настає або при повному розплавленні кірки, або при повному розплавленні феросплаву, якщо він до цього моменту ще перебуває під твердою кіркою. Фінальна, третя стадія, добігає кінця або після повного розплавлення шматка феросплаву, або, залежно від результатів другого періоду, після повного розплавлення кірки.

Важливою технологічною деталлю є те, що коли феросплав залишається замкненим всередині твердої оболонки (кірки), він повністю ізольований від прямого контакту з рідкою металевою ванною [10]. У таких умовах тривалість процесу розчинення залежить виключно від інтенсивності теплообміну. Якщо ж феросплав отримує безпосередній контакт із розплавом, на його розчинення починають одночасно впливати два фактори: теплообмін та масообмін. Під час плавлення, коли феросплав знаходиться у твердій оболонці, його внутрішній об'єм починає збільшуватися. Це зростання генерує внутрішній тиск. Досягнення тиском критичної позначки призводить до руйнування кірки, а вивільнення рідкого феросплаву з внутрішнього ядра форми значно прискорює загальний процес розчинення.

Дослідження впливу фракційного складу на швидкість розчинення показали, що для великих шматків усі описані явища є значно більш вираженими. Проте, при використанні дрібних шматків (з розміром менше 10–20 мм) відмінності у швидкостях плавлення між різними феросплавами практично нівелюються [11]. Загальна ефективність застосування будь-яких присадок вимагає забезпечення стабільно високого коефіцієнта засвоєння матеріалу. Окрім цього, необхідно гарантувати рівномірний розподіл концентрації легуючого елемента по всьому об'єму литої виливки.

У контексті вдосконалення методів масопереносу особливе місце посідає технологія лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ) [12]. Вона належить до прогресивних методів ливарництва, що набули значного поширення у промислово розвинених країнах і демонструють стійку динаміку росту. ЛГМ-технологія відкриває унікальні можливості, які є значно

зручнішими, ніж в інших технологічних процесах: вона дозволяє заздалегідь інтегрувати необхідні легуючі компоненти, а також різноманітні металеві чи неметалеві частки безпосередньо у пінополістиролову модель.

Використання таких моделей, які слугують носіями для попередньо введених домішок, дає можливість частково контролювати процес кристалізації готових виливків. Це досягається шляхом здійснення об'ємного або поверхневого легування та модифікування розплаву безпосередньо у ливарній формі. Кінцева мета полягає у створенні композиційних, економнолегованих або модифікованих виливків, структура яких регулюється для досягнення запланованих експлуатаційних характеристик. Використання ЛГМ, де модель виконує функцію носія для металевих і неметалевих добавок чи вставок, наразі перебуває на початковому етапі розвитку, але вже відкриває широкі перспективи для розширення потенціалу ливарних технологій.

Додаткова перевага ЛГМ, яка впливає на масоперенос, полягає в тому, що в момент заливання розплаву та термічної деструкції моделі у формі генерується відновлювальне газове середовище [13]. Це середовище сприяє суттєвому зниженню ступеня окислення введених присадок, що, своєю чергою, мінімізує їхні загальні втрати. Отже, під час розробки технологічного процесу для виробництва виливків із контрольованою структурою, критично важливим завданням є дослідження механізмів розподілу присадок у металі, встановлення ефективності їх засвоєння, а також пошук і впровадження методів для стабілізації цих показників.

Таким чином, масоперенос у ливарних процесах є не просто фізичним явищем, а комплексним процесом, який регулюється як тепловими, так і дифузійними умовами, вимагаючи точного балансу між температурою розплаву, властивостями добавок і навіть використанням інноваційних технологій, як-от ЛГМ, що перетворюють форму на активний елемент для контролю хімічного складу кінцевого виробу.

1.3 Способи виробництва композиційних матеріалів на основі литих сплавів і армованих виливків

Протягом останніх десятиліть композиційні матеріали (КМ) – зокрема, ті, що виготовляються за допомогою лиття (ЛКМ) – набули виняткової важливості та значного поширення [14]. Виробництво таких матеріалів базується на застосуванні різноманітних технологій, які передбачають рідкофазне поєднання металевої основи, відомої як матриця, з високоміцними армуючими компонентами. Ці армуючі елементи (АЕ) можуть мати різну морфологію та розміри, починаючи від макроскопічних часток (наприклад, шроту) і закінчуючи ультрадисперсними порошками. З точки зору геометрії, армуючі матеріали можуть бути одномірними (представлені стрижнями, волокнами, дротом чи гранулами) або двовимірними (такими як пластини, сітки чи фольга).

Загальноприйнята класифікація поділяє методи виготовлення композиційних матеріалів на три основні категорії: твердофазні (ТМ), рідкофазні (РМ) та методи осадження [15, 16].

Твердофазні технології передбачають двоступеневий процес: на першому етапі відбувається попереднє змішування армуючих елементів з матеріалом майбутньої матриці, а на другому — ця суміш піддається ущільненню (компактуванню) для отримання кінцевого виробу. Для компактування можуть бути використані такі процеси, як гаряче пресування, дифузійне зварювання, прокатка або екструзія. Твердофазні методи традиційно застосовуються для виробництва композитів, армованих високоміцними частками, а також безперервними або короткими волокнами, волоконними матами та сітками. У порівнянні з ливарними технологіями, ТМ надають інженерам значно ширший діапазон можливостей для варіації КМ, дозволяючи досягати широкого спектру фізико-механічних властивостей, оскільки вони практично не обмежують вибір матеріалів, кількості,

дисперсності чи морфології армуючих елементів. Зокрема, зварювання вибухом є основним методом для виготовлення шаруватих композитів.

Проте, ТМ мають і певні недоліки: вони створюють труднощі з досягненням рівномірного розподілу армуючих елементів по об'єму матриці на стадії підготовки шихти. Крім того, існує значний ризик механічного пошкодження тендітної волоконної арматури під час етапу компактування [17].

Рідкофазні технології, навпаки, демонструють низку вагомих переваг. Серед ключових – можливість виготовляти вироби з КМ, які потребують мінімальної подальшої механічної обробки або взагалі обходяться без неї. РМ обмежують теплосиловий вплив на крихкі компоненти, пропонують широкий вибір недорогих армуючих елементів (АЕ) і вирізняються високою продуктивністю. Вони також характеризуються спрощеним апаратним забезпеченням та високим потенціалом для механізації, автоматизації й реалізації безперервних технологічних процесів. Завдяки цим особливостям, рідкофазні методи дозволяють створювати композиційні матеріали, які неможливо або економічно нераціонально отримати іншими шляхами.

Рідкофазні методи є основою для ливарних технологій, які використовують форми, зміцнені фізичними методами ущільнення, забезпечуючи високий коефіцієнт використання матеріалу (КВМ).

Одним із найбільш ефективних шляхів підвищення зносостійких характеристик виробів є армування литих заготовок високомодульними елементами, що реалізується саме через ливарну технологію рідкофазного суміщення із залученням дифузійного з'єднання компонентів [18].

У контексті ливарного виробництва, особливі можливості для створення армованих виливків відкриває технологія лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ). Цей метод дозволяє здійснювати занесення та точне позиціонування армуючих елементів (АЕ) шляхом їх попередньої інтеграції безпосередньо у пінополістиролову модель, яка слугує носієм. Модель з АЕ

потім розміщується у піщаному наповнювачі, і при заливанні рідкого металу відбувається формування армованої конструкції.

Застосування ЛГМ для армування призводить до появи нових багатокомпонентних систем, які є унікальними для теорії ливарних процесів: "метал – модель – імплантовані АЕ – форма" та "метал – АЕ – форма" [19].

Інтеграція армуючих елементів у ливарну форму або модель, що газифікується, значно розширює можливості керування структурою і властивостями виливків. З теплофізичної точки зору, використання внутрішніх холодильників для керування кристалізацією є лише початковим етапом; технологія армованих виливків охоплює значно ширший спектр конструкцій, включаючи литі армовані конструкції (ЛАК) та композиційні матеріали. Присутність АЕ у формі суттєво змінює умови газогідродинаміки лиття, а також модифікує інтенсивність процесів тепло- та масообміну під час затвердіння, що дає змогу в широких межах контролювати кінцеві функціональні характеристики виливків.

Самі композиційні матеріали створюються з компонентів, що не розчиняються взаємно. Зазвичай вони поєднують металеву матрицю з високоміцними елементами (порошками, волокнами, нитками), які занурені в матрицю та пов'язані нею в єдиний моноліт. Залежно від вигляду зміцнюючих компонентів, КМ класифікують на дисперснозміцнені, волокнисті та шаруваті. Компонент, який є суцільним (безперервним) в об'ємі, називається матрицею, а переривчастий компонент – армуючим елементом або наповнювачем [20].

Металеві композити (ЛКМ) вирізняються високою термостійкістю, кращою електро- і теплопровідністю, а також підвищеною стійкістю до ерозії порівняно з порошковими КМ. Вони демонструють значне підвищення міцності та модуля пружності, а їхня питома міцність (відношення міцності до питомої ваги) є вищою на порядок. Ці матеріали є перспективним класом машинобудівних матеріалів, оскільки традиційні сплави не можуть

задовольнити зростаючі вимоги до міцності та жорсткості в умовах посилення експлуатаційних навантажень.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Початкові спроби керувати процесом охолодження виливка, що знаходився в одноразовій ливарній формі, шляхом впливу на дисперсний наповнювач і зміни його характеристик, виявилися малоефективними і мали вельми обмежений потенціал. Було встановлено, що можливості суттєвого підвищення швидкості остигання металу та регулювання фінальної структури і властивостей виливків через такі маніпуляції є незначними. Максимальне покращення швидкості охолодження та, відповідно, ступінь подрібнення кристалічного зерна металу вдалося збільшити лише у 2–2,5 рази. Цей результат підтвердив, що для методів впливу на ливарну форму, які є економічно доцільними у промисловому виробництві, вже було досягнуто практичної межі ефективності. У зв'язку з цим, подальші дослідницькі зусилля були переорієнтовані на технологічні підходи, що дозволяють здійснювати безпосередній вплив на виливок у внутрішній порожнині ливарної форми.

Значно ширші та перспективніші можливості відкриває застосування внутрішніх холодильників. Цей підхід є одним із ключових напрямків у технологіях виготовлення армованих, композиційних та біметалевих литих виробів. В цьому контексті, технологія лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), надає унікальні переваги. Вона дозволяє точно позиціонувати та заносити армуючі елементи (АЕ), включаючи дисперсні добавки (феросплави чи металеві порошки) або внутрішні холодильники, безпосередньо у внутрішній простір форми. Це досягається завдяки тому, що АЕ інтегруються в одноразову пінополістиролову модель, яка потім розміщується у піщаному наповнювачі.

Дослідницький аналіз наукових джерел, присвячених впливу різноманітних технологічних чинників, а також фізико-механічних, теплофізичних та геометричних характеристик складових частин ливарної

системи (газифікованої моделі, форми та її покриттів) на якість готових виливків, дозволив виділити низку критично важливих параметрів. Було встановлено, що на кінцеву якість виливка впливають: швидкість підйому рідкого металу у формі, густина матеріалу моделі, газопроникність як самої форми, так і її покриття, температурний режим заливання розплаву, тиск, що діє на рідкий метал, теплоакumuлююча здатність ливарної форми, а також геометричні особливості конфігурації самого виливка.

Для повноцінного дослідження механізмів взаємодії, що виникають між карбідами вольфраму або металокерамічними твердими сплавами з газовим середовищем і залізовуглецевими розплавами, застосовувався метод, заснований на термодинамічному розрахунку рівноважного стану хімічних реакцій на поверхнях поділу фаз.

Кінетика тверднення композиційних виливків аналізувалася за допомогою комп'ютерного моделювання, в основу якого був покладений метод кінцевих елементів. У процесі цих обчислень було зроблено припущення про регулярне (впорядковане) розміщення армуючих твердосплавних частинок, які мали сферичну форму, вздовж трьох координатних осей. Область, обрана для розрахунків, мала форму куба. Розмір грані цього куба дорівнював половині відстані між центрами сусідніх частинок. Важливою умовою симетрії було прийнято відсутність теплових потоків на всіх гранях розрахункового куба.

Вивчення особливостей утворення перехідних зон у композиційних виливках проводилося на зразках, які були вирізані з виливків, виготовлених стаціонарним заливанням розплаву у ливарні форми. Досліджувалися комбінації систем, включаючи: «сталі 30Л – частки сплаву Т15К6», «сталі 30Л – частки сплаву ВК8», «чавун 300Х12Г3М – частки сплаву ВК8» та «чавун 300Х12Г3М – частки сплаву Т15К6». Температуру заливання сталі підтримували на рівні 1630 °С, а чавуну — 1420 °С. Армуючі частки мали фракційний розмір 2–8 мм, а їхня вихідна температура становила 100 °С.

Температуру розплаву контролювали приладом ТТЦ-103, а температуру твердосплавних частинок — оптичним пірометром.

Для візуалізації мікроструктури твердого сплаву застосовували хімічне травлення із використанням реагенту, що містив червону кров'яну сіль, їдкий калій та воду. Мікроструктуру матричного сплаву виявляли травленням у спиртовому розчині азотної кислоти. Коли виникала потреба одночасного аналізу мікроструктури матриці та твердосплавних включень, зразки піддавали процедурі поверхневого окислення у муфельній печі при 500 ± 10 °С.

Аналіз мікроструктури здійснювався за допомогою мікроскопів «Неофот-2» та JEOL JSM-35CF, а локальний хімічний склад структурних компонентів визначався на електронному растровому аналізаторі РЕММА-102.

Дослідження технологічних аспектів виробництва композитів проводилося безпосередньо під час виготовлення виливків із визначеними габаритами (105x80x65 мм та $\varnothing 210 \times \varnothing 130 \times 60$ мм). Як основні (матричні) сплави використовували сталь 30Л і чавун 300Х12Г3М, а як армуючі компоненти — тверді сплави марок ВК8 та Т15К6.

Ливарні форми створювали із застосуванням CO₂-процесу, використовуючи суміш кварцового піску (95%) та рідкого скла (5%). Внутрішню порожнину форми покривали протипригарною фарбою. Виплавка матричного металу відбувалася в індукційних електричних печах, а для попереднього нагріву твердосплавних частинок застосовувалася індукційна установка.

У рамках дослідження потрібно було вирішити комплекс завдань:

1. Вивчити вплив температурно-часових параметрів на формування структури, механічних і триботехнічних характеристик литих армованих конструкцій на основі мідних сплавів.

2. Встановити закономірності затвердіння та формування властивостей виливків, отриманих у вакуумованих формах із застосуванням моделей, що газифікуються, та дисперсних імплантатів.
3. Визначити умови впливу випаровуваної моделі, а також геометрії та кількості армуючих елементів на гідродинаміку та тепло-масоперенос у рідкому та твердіючому сплаві.

Для вирішення цих складних наукових завдань застосовувалися методи аналітичних розрахунків теплофізичних умов лиття, а також методики фізичного і математичного моделювання процесу заповнення ливарних форм. Дослідження закономірностей тепломасообміну та гідродинаміки у нових багатокомпонентних системах, таких як "метал–модель–імплантовані АЕ – форма" і "метал – АЕ – форма", вимагало встановлення умов і механізмів впливу цих компонентів. Зокрема, необхідно було дослідити:

- вплив щільноупакованої макроармуючої фази (МАН) у формі, яка створює новий поровий простір з модифікованими гідравлічними і теплофізичними характеристиками, на гідродинамічні параметри лиття, варіюючи при цьому термочасові параметри форми, МАН і матричного сплаву;

- закономірності впливу МАН у вигляді окремих геометричних тіл, які не стикаються між собою, на гідравлічні і теплофізичні параметри форми та їхній вплив на процеси тепло- масопереносу, одночасно варіюючи кількістю, геометрією МАН і термочасовими параметрами заливаємого сплаву.

В цілому, методологія дослідження була спрямована на формування теоретичної та технологічної основи для виробництва виливків із керованою структурою та заданими властивостями.

3 КЕРУВАННЯ СТРУКТУРОЮ І ВЛАСТИВОСТЯМИ ВИЛИВКІВ МЕТОДОМ АРМУВАННЯ ЛИТИХ КОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОМ РОЗМІЩЕННЯ АРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ПОРОЖНИНІ ФОРМИ АБО ОДНОРАЗОВОЇ ПІНОПОЛІСТИРОЛОВОЇ МОДЕЛІ

Метод керування структурою та властивостями виливків через армування литих конструкцій, що здійснюється шляхом розташування армуючих елементів (АЕ) безпосередньо у порожнині ливарної форми або всередині одноразової пінополістиролової моделі, є стратегічно важливим напрямом у сучасному ливарному виробництві. Цей підхід набуває актуальності через фундаментальні обмеження традиційних ливарних процесів, зокрема, через проблему лімітованого теплообміну між виливком та піщаною формою. Інтенсивність остигання литої заготовки, розміщеної у піщаній формі, є низькою, що пояснюється малою теплоакумуючою здатністю матеріалу форми порівняно з металом виливка. За своєю суттю, виливок може віддати формі лише ту кількість теплової енергії, яку форма здатна ефективно поглинути та відвести. Оскільки піщані форми мають обмежені можливості у відведенні тепла, інженерна думка шукає способи посилення цього процесу.

Одним із найпоширеніших та давно відомих методів для інтенсифікації та контролю процесів затвердіння й охолодження є застосування внутрішніх металевих холодильників. Зазвичай такі холодильники виготовляються з металу, ідентичного або хімічно близького до металу виливка, що сприяє їх якісному зварюванню з розплавом, який твердіє. Однак технологія армування значно розширює цей інструментарій, охоплюючи набагато ширший спектр конструкцій, що дозволяє створювати армовані литі вироби (ЛАК) та різноманітні композиційні матеріали (КМ). З теплофізичної точки зору,

використання простих внутрішніх холодильників для керування кристалізацією є лише першим, початковим етапом у цій технології.

Концепція композиційних матеріалів та армування. Сучасні ливарні технології, особливо метод армування, орієнтовані на створення композиційних матеріалів (КМ), які є поєднанням двох або більше складових, що відрізняються хімічним складом та фізико-механічними властивостями, та розділені чіткими межами поділу. Головна мета інтеграції цих компонентів полягає в наданні кінцевому виробу унікальних властивостей, якими не володіє жодна з його складових окремо. Контролюючи розмір, просторове розташування та об'ємне співвідношення компонентів, інженери отримують можливість створювати матеріали з наперед заданими експлуатаційними характеристиками.

У структурі КМ компонент, що зберігає свою суцільність по всьому об'єму, називається матрицею (МС – матричний сплав), а переривчастий компонент, який є роз'єднаним в об'ємі матриці, називається армуючим елементом (АЕ) або наповнювачем. В залежності від морфології та просторового розташування зміцнюючих компонентів, КМ класифікуються на дисперснозміцнені, волокнисті та шаруваті.

Металеві композити (ЛКМ) мають високу термостійкість, кращу електро- і теплопровідність, а також підвищену стійкість до ерозії порівняно з порошковими КМ. Порівняно з традиційними литими чи деформованими металами, ЛКМ демонструють значне підвищення міцності та модуля пружності, а їхнє значення питомої міцності (відношення міцності до питомої ваги) може бути вищим на порядок. Це робить КМ найбільш перспективним класом машинобудівних матеріалів в умовах постійного посилення експлуатаційних вимог, які традиційні сплави вже не можуть задовольнити. Армуючі елементи, що використовуються для підвищення абразивної зносостійкості, зазвичай є порошками тугоплавких сполук, таких як карбіди, нітриди, оксиди або подрібнені металокерамічні тверді сплави. Ці частки

повинні бути високодисперсними, рівномірно розподіленими та мати мінімальну взаємодію з матричним матеріалом.

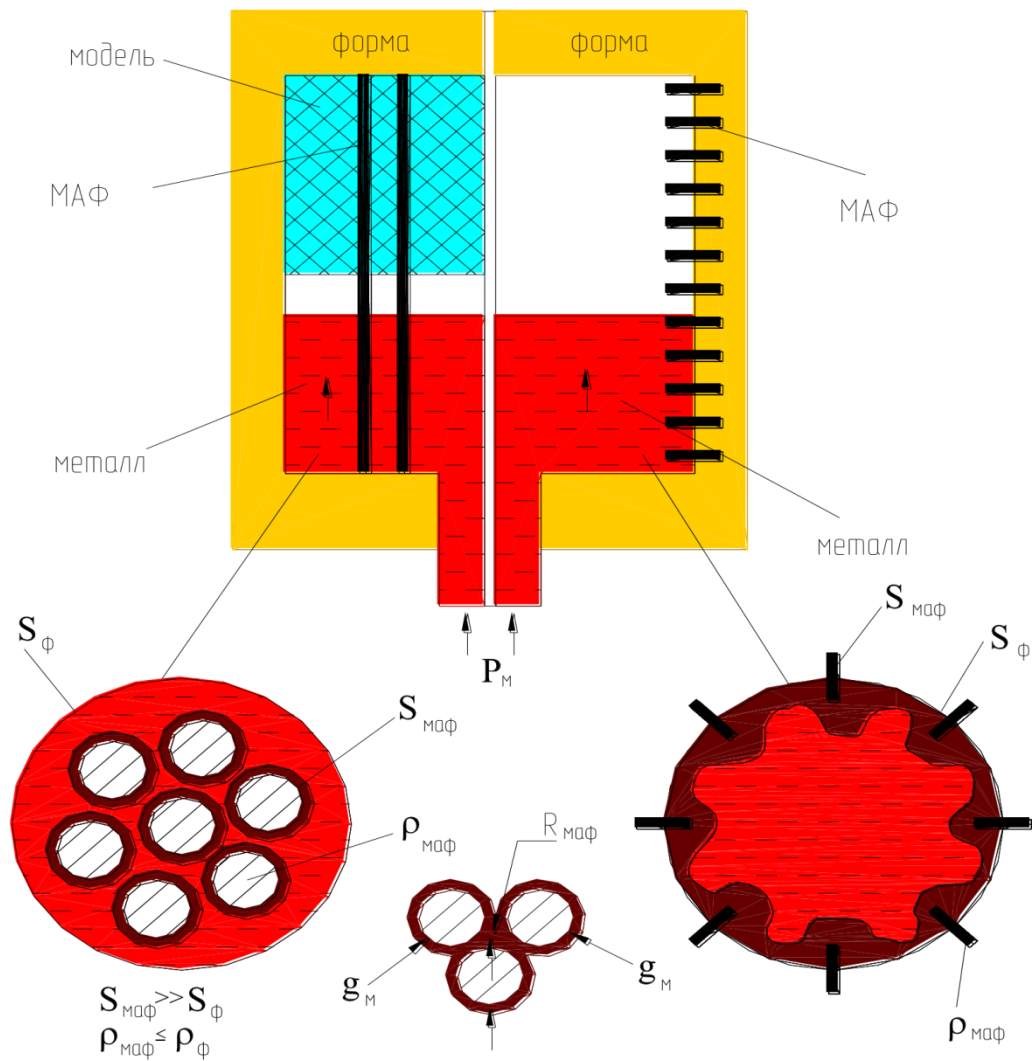
Технологія лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), відіграє ключову роль у вдосконаленні методів армування. ЛГМ належить до прогресивних методів ливарництва, що демонструють значний ріст у промислово розвинених країнах. Її інноваційний потенціал у контексті армування полягає в тому, що пінополістиролова модель виконує унікальну функцію носія.

Модель може слугувати носієм для армувальних та охолоджувальних елементів (АЕ), а також для імплантантів (лігатур, модифікаторів), які вводяться безпосередньо в розплав металу під час формування та затвердіння виливка у формі. Ця можливість дозволяє заздалегідь інтегрувати необхідні компоненти (металеві чи неметалеві частки) у модель, що значно зручніше, ніж в інших технологічних процесах. Завдяки цьому забезпечується точне позиціонування та занесення армуючих елементів всередину порожнини форми.

Таке застосування ЛГМ дозволяє частково контролювати процес кристалізації готових виробів шляхом об'ємного або поверхневого легування та модифікування розплаву безпосередньо у ливарній формі, з метою досягнення запланованих експлуатаційних характеристик. Хоча застосування ЛГМ, де модель слугує носієм для таких вставок і домішок, перебуває на початковому етапі розвитку, воно відкриває широкі перспективи для розширення потенціалу ливарних технологій.

Крім того, під час заливання розплаву та термічної деструкції моделі у формі генерується відновлювальне газове середовище. Це середовище сприяє суттєвому зниженню ступеня окислення введених присадок, що мінімізує їхні загальні втрати. Таким чином, ЛГМ створює умови для підвищення ефективності засвоєння армуючих компонентів, що є ключовим завданням для розробки виливків із контрольованою структурою.

При отриманні виливків шляхом армування АЕ, розташованими у формі або моделі (особливо при ЛГМ), виникають нові багатокомпонентні системи, які є новітніми для теорії ливарних процесів. Це системи: "метал–модель–імплантовані АЕ – форма" і "метал – АЕ – форма". Присутність щільно розміщених (упакованих) АЕ у ливарній формі спричиняє суттєву модифікацію умов теплообміну, що протікає в цих системах.



S_ϕ , $S_{мае}$ – поверхня форми і МАЕ; $P_{мае}$, $P_{мс}$ – вага МАЕ і матричного сплаву;
 $P_м$ – тиск на матричний сплав, R – радіус елемента МАЕ; g – товщина
 перехідного шару на межі «МАЕ -МС»

Рисунок 3.1 – Схеми формування поверхневих і об'ємних властивостей литих конструкцій (ЛАК) з застосуванням макро (МАН) і дисперсних армуючих елементів (ДАН)

Інтеграція макроармуючих елементів (МАН) у пінополістиролову модель або безпосередньо у порожнину форми дозволяє формувати литі конструкції нового типу, які володіють функціональними характеристиками, невластивими традиційним ливарним сплавам (ТЛС), таким як сталь, чавун, мідь, алюміній. Серед цих функціональних можливостей виділяють:

1. Формування комірчастої (стільникової) структури литої конструкції: Це дозволяє досягти характеристик, що не поступаються або перевершують аналогічні суцільні конструкції, водночас маса знижується на 40–50%. Такий ефект досягається завдяки інтеграції МАН (наприклад, керамічних елементів із густиною $1,1\text{--}1,7\text{ г/см}^3$), чия густина у 2,5–8 разів нижча за густину матричних сплавів.

2. Покращення міцнісних показників: Це досягається шляхом армування тіла виробу АН (наприклад, волокнами, кулями, стрижнями), міцність яких перевершує матричний ливарний сплав (МЛС). Це забезпечує як підвищення міцності самої конструкції, так і підтримання або покращення міцності опорного (несучого) конструкційного шару.

3. Забезпечення високих експлуатаційних характеристик поверхневого робочого шару: Це включає надання покращених триботехнічних, корозійних, зносостійких чи герметизуючих властивостей. Це реалізується через введення АН з металевих і керамічних матеріалів безпосередньо у поверхневий шар моделі або форми.

Найефективнішим способом підвищення зносостійких властивостей литих виробів є саме армування високомодульними елементами. Це реалізується через технологію рідкофазного суміщення з дифузійним з'єднанням компонентів. Такі ливарні композити, як «карбідочавуни», демонструють значне перевищення експлуатаційного ресурсу порівняно з

традиційними матеріалами: у 3–7 разів вищу стійкість до зносу, ніж білі та високоміцні чавуни, та у 4–10 разів вищу, ніж марганцевисті сталі. Це дозволяє значно збільшити довговічність робочих органів обладнання, що функціонує в умовах інтенсивного абразивного зносу.

Присутність АЕ у формі суттєво змінює умови газогідродинаміки лиття. Це також модифікує інтенсивність процесів масо- та теплообміну під час затвердіння і охолодження виливків, що дає можливість у широких межах контролювати кінцеві функціональні характеристики конструкцій.

Проведені дослідження засвідчили, що присутність макроармуючих елементів (МАЕ) прискорює тверднення розплаву. Це прискорення прямо пропорційне масі МАЕ відносно загального об'єму металу у формі. Було виявлено, що наявність МАЕ у формі впливає на процес зняття перегріву металу до температури T_1 у 2–7 разів інтенсивніше, ніж аналогічний процес у порожнистій формі. Хоча вплив МАЕ на саме остигання (охолодження) виливка є менш вираженим, співвідношення швидкості остигання стрижня у порожнистій формі до швидкості за наявності МАЕ становить від 1/1,2 до 1/3,0.

Крім того, на контактній поверхні "МАЕ-метал" процес затвердіння починається зі стрімкого формування твердої фази (намерзання), після чого утворюється шар, що містить від 15% до 70% твердої фази. Повне формування твердого металевого шару довкола МАЕ завершується лише після кристалізації попередньо утворених шарів. Це свідчить про те, що АЕ функціонують не лише як пасивні холодильники, але й як активні центри формування структури.

Якість і стабільність характеристик литих армованих конструкцій (ЛАК) та виливків із диференційованими властивостями (ВДВ) визначаються комплексом технологічних чинників, головним чином температурно-часовими параметрами. Однак, вплив цих факторів на формуутворення, мікроструктуру та функціональні властивості литих армованих матеріалів досі

вивчено недостатньо. Крім того, наразі існують обмежені та переважно емпіричні математичні моделі для розрахунку й оптимізації параметрів лиття з армувальними елементами.

Це призводить до необхідності встановлення умов і механізмів впливу компонентів нових багатокомпонентних систем на процеси. Зокрема, необхідно було дослідити:

1. Вплив щільноупакованої макроармуючої фази (МАЕ) у ливарній формі: МАЕ створює власний поровий простір, що наділяє форму новими гідравлічними і теплофізичними характеристиками. Необхідно було вивчити цей вплив на гідродинамічні параметри лиття, варіюючи термочасові параметри форми, МАЕ і матричного сплаву. Досліджувався також вплив цієї фази на процеси тепло- і масопереносу в рідкому та твердіючому МС.

2. Закономірності впливу МАЕ у вигляді окремих геометричних тіл: Якщо МАЕ не стикаються між собою, їхнє розташування у формі, орієнтоване щодо потоку металу, також зумовлює нові гідравлічні і теплофізичні параметри форми. Слід було встановити закономірності впливу такої конфігурації на процеси тепло- і масопереносу в рідкому та твердіючому сплаві при варіюванні кількості, геометрії МАЕ і термочасовими параметрами заливаємого сплаву.

3. Умови впливу випаровуваної моделі: Дослідження також мало визначити умови впливу випаровуваної моделі, а також геометрії та кількості АЕ на гідродинаміку лиття і тепло-масоперенос у рідкому та твердіючому сплаві.

Хоча розв'язання цих завдань є складним, досягнення необхідної для практичних цілей точності можливе із застосуванням методів фізичного і математичного моделювання. В якості методів досліджень використовувалися аналітичні розрахунки теплофізичних умов лиття і методики фізичного моделювання заповнення ливарних форм. Наприклад, для аналізу кінетики

тверднення композиційних виливків застосовувалося комп'ютерне моделювання, що ґрунтується на методі кінцевих елементів.

Таким чином, керування структурою виливків через армування, особливо з використанням ЛГМ, є складним, але високоефективним методом, який базується на встановленні закономірностей фізико-хімічної взаємодії, газогідродинаміки та тепломасопереносу при взаємодії рідкого металу з гетерогенною армуючою фазою. Успішне вирішення цих науково-технічних завдань формує теоретичну і технологічну основу для виготовлення виливків із керованою структурою та необхідними властивостями.

Контроль структури литого виробу через армування можна порівняти з інтелектуальним будівництвом, де замість заливання монолітного бетону з однієї марки, інженер заздалегідь вбудовує спеціальні високоміцні або теплопровідні стрижні (АЕ) лише у критично важливі зони конструкції, точно розраховуючи, як ці вставки змінять швидкість застигання та кінцеву міцність, щоб отримати максимальну ефективність матеріалу.

4 ОСНОВНА ЧАСТИНА

4.1 Аналіз стану виготовлення композиційних матеріалів

Композиційні матеріали (КМ), які також часто називають композитами, за своєю суттю є складними матеріалами, сформованими шляхом поєднання двох або більшої кількості вихідних складових (компонентів). Принципова особливість цих компонентів полягає у їхній відмінності за хімічним складом і фізико-механічними властивостями. Важливо, що всередині кінцевого матеріалу ці складові залишаються розділеними, зберігаючи чітко визначені межі поділу.

Фундаментальна мета інтеграції різних компонентів у композит полягає в тому, щоб надати готовому продукту комплекс унікальних властивостей, які були б неможливими або недосяжними для жодної з вихідних складових, взятих окремо. Технологи отримують можливість створювати матеріали з точно заданими характеристиками (фізичними, механічними, експлуатаційними) через маніпулювання розміром, просторовим розташуванням, а також об'ємним і масовим співвідношенням цих складових.

У структурі КМ компоненти виконують різні ролі. Той компонент, який зберігає свою суцільність (безперервність) по всьому об'єму, називається матрицею. Натомість, компонент, що має переривчасту структуру і є роз'єднаним в об'ємі матриці, називають армуючим елементом (АЕ) або наповнювачем.

Металеві композити (тобто КМ, створені на основі металів та їхніх сплавів) класифікуються відповідно до геометрії та взаємного розташування їхніх компонентів. За цією ознакою вони поділяються на дисперснозміцнені, волокнисті та шаруваті композиційні матеріали.

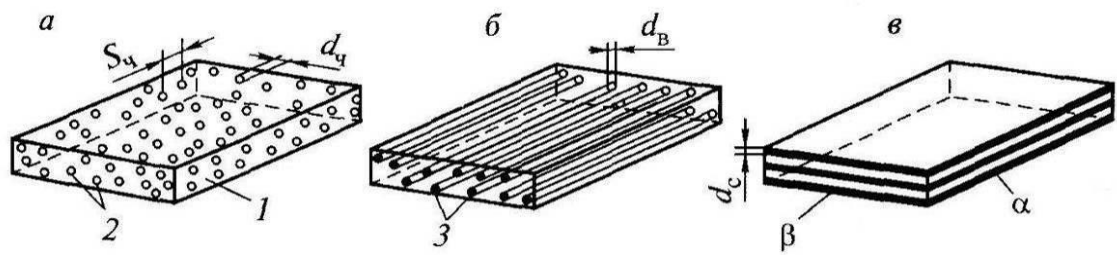


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення дисперснозмцнених (а), волокнистих (б), шаруватих (в) структур композиційних матеріалів: 1 – матриця; 2 – частинки, які армують діаметром d_q з відстанню S_q ; 3 – волокна, які армують діаметром d_b ; d_c – товщина шару в шаруватому β - α композиті.

Армуючі матеріали є критично важливими складовими, оскільки саме вони безпосередньо відповідають за суттєве підвищення абразивної зносостійкості композиційного матеріалу. Як правило, функцію наповнювачів виконують порошки тугоплавких хімічних сполук, таких як карбіди, нітриди, оксиди та сульфіді. Додатково для цієї мети активно застосовують подрібнені металокерамічні тверді сплави.

Стійкість композитів до зносу залежить від низки факторів, включаючи індивідуальні властивості наповнювача та матриці, а також від специфіки їхньої взаємодії. Важливу роль відіграють габарити наповнювача та його рівень розчинення у матриці. Крім того, на зносостійкість впливає наявність, склад і характер продуктів хімічної взаємодії між компонентами, а також мікронапруги, що виникають на поверхні поділу між наповнювачем і матрицею.

Порівняльний аналіз твердості абразивних часток кварцу (900 – 1280 HV) та структурних складових сталей і чавунів показує, що лише карбіди хрому, молібдену, вольфраму, ванадію, титану та бору мають твердість, яка перевищує твердість кварцу. Це підтверджує, що саме ці тугоплавкі сполуки є найбільш ефективними для протидії абразивному зносу.

Таблиця 4.1 – Твердість абразивних частинок і структурних складових залізовуглецевих сплавів [2].

Назва	Твердість, HV	Назва	Твердість, HV
Кварц	900-1280	Цементит	840-1100
Ферит	70-120	Карбід хрому Cr_7C_3	1200-1600
Нелегований перліт	250-320	Карбід молібдену Mo_2C	1500
Легований перліт	300-460	Карбід вольфраму WC	2400
Аустеніт (12% Mn)	170-230	Карбід ванадію VC	2800-3000
- низько легований	300-400	Карбід титану TiC	3000-3250
- високохромистий	300-400	Карбід бору B_4C	3700
Мартенсит	500-1010		

Згідно з цими даними, карбіди можна ранжувати за їхнім потенціалом підвищення зносостійкості у такій послідовності: $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{Mo}_2\text{C} \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{WC} \rightarrow \text{VC} \rightarrow \text{TiC} \rightarrow \text{B}_4\text{C}$.

У процесі виготовлення композиційних виливків такі компанії, як "Sandvik", використовують спечені тверді карбіди (наприклад, WC , TiC , TaC) з кобальтовою зв'язкою у формі твердих сплавів.

Металокерамічні тверді сплави визначаються як багатокомпонентні матеріали. Вони утворюються з частинок твердих тугоплавких сполук (карбідів, нітридів, карбонітридів), які зцементовані між собою пластичною та більш легкоплавкою фазою (зв'язка). Як правило, ця зв'язка базується на металах, що входять до групи заліза.

Таблиця 4.2 – Характеристика металокерамічних сплавів

Марка сплаву	Густина, кг/м ³	Твердість, HRA	Масова частка, %		
			WC	TiC	Co
BK3	15100	92	97	-	3
T5K10	12800	88,5	85	5	10
T15K6	11300	90,0	79	15	6

При визначенні об'ємного вмісту армуючих частинок слід враховувати, що зі збільшенням їхньої кількості абразивна зносостійкість покращується. Проте надмірне насичення композиту ускладнює процес заповнення ливарної форми розплавленим металом. Для досягнення ефективного зміцнення частки мають бути високодисперсними, рівномірно розподіленими на певній відстані одна від одної та не вступати в активну взаємодію з матеріалом матриці.

Ефективність зміцнюючого ефекту, який надають частки другої фази, залежить від геометричних параметрів структури. Максимальний результат досягається за таких умов:

1. Розмір зміцнюючих часток має бути не більшим за 0,01–0,05 мкм. Частки більшого розміру не чинять суттєвого впливу за високих температур, але можуть забезпечувати зміцнення за нормальних чи негативних температур.
2. Середня дистанція між зміцнюючими частками повинна перебувати в діапазоні 0,1–0,5 мкм при їхньому рівномірному розташуванні.
3. Об'ємний вміст зміцнюючої фази для забезпечення ефективного зміцнення не повинен перевищувати 5–10%.

У деяких технологіях (наприклад, для виливків з чавуну) дисперсні частки карбідів SiC і FeC розміром 10–15 мкм вводять безпосередньо у рідкий розплав. Карбіди, що не розчинилися, утворюють колоїдну суміш, а в структурі формуються інтерметалеві включення (типу FeSiC, Fe₃Si₃) та тверді розчини. Це забезпечує підвищення зносостійкості при терті ковзання у кілька разів.

Питання визначення оптимальної структури металевої основи для зносостійких композиційних матеріалів є комплексним і досі дискусійним. Дослідження показали, що аустенітно-мартенситна структура, особливо за наявності в ній карбідних фаз, є більш зносостійкою, ніж чиста мартенситна структура.

Позитивна роль аустеніту в мартенситних сплавах із карбідами пояснюється міцнішим зчепленням карбідних фаз саме з аустенітом (через вищий ступінь когерентності), ніж із мартенситом. Додатково це пов'язано з нижчим рівнем внутрішніх напружень та меншою дефектністю кристалічної будови.

Проте, цей позитивний ефект аустеніту на зносостійкість може бути реалізований лише за умови, що аустеніт є нестабільним. Під час експлуатаційного зношування, коли в мікросферах робочих поверхонь виникають локальні температурні стрибки та пластичні деформації, аустеніт повинен зазнавати перетворення на мартенсит. Ці фазові перетворення (за типом аустеніт $\rightarrow$ мартенсит, або ж аустеніт $\rightarrow$ мартенсит + дисперсні карбіди) поглинають частину енергії, що інакше була б витрачена на руйнування матеріалу.

Найкращий тип структури матриці значною мірою залежить від умов зношування:

- За умов чисто абразивного зношування (низькі питомі тиски, що нагадує ерозію), максимальну зносостійкість демонструють сплави з мартенситною або мартенсито-карбідною структурою.
- За умов високих питомих тисків, ударних впливів або складно-напруженого стану (коли знос супроводжується локальною деформацією), перевагу слід надавати аустеніто-мартенсито-карбідним структурам, за умови, що вміст аустеніту не перевищує 20–25%.

Композити, особливо литі композиційні матеріали (ЛКМ), мають низку переваг перед традиційними металами:

- Висока термостійкість.
- Краща електро- і теплопровідність та стійкість до ерозії порівняно з порошковими КМ.
- Значне підвищення міцнісних властивостей і модуля пружності (у кілька разів) порівняно з однорідними литими та деформованими металами.
- Значення питомої міцності (відношення міцності до питомої ваги) є вищим на порядок.

Це робить КМ найбільш перспективним класом машинобудівних матеріалів, оскільки традиційні сплави вже не можуть задовольнити зростаючі вимоги до міцності та жорсткості в умовах посилення експлуатаційних навантажень.

Прикладом успішного застосування є «карбідочавуни» – нова генерація зносостійких композитів, що активно впроваджується у переробній промисловості для подрібнення рудних матеріалів. Ці матеріали поєднують високу зносостійкість твердих сплавів з ударною в'язкістю високоміцних чавунів. Експлуатаційний ресурс карбідочавунів значно перевищує показники інших матеріалів:

- у 3–7 разів вища стійкість до зносу, ніж у білих та високоміцних чавунів;
- у 4–10 разів вища, ніж у марганцевистих сталей;
- у 5–15 разів вища, ніж у загартованих сталей.

Твердість чавунної матриці цих композитів знаходиться в межах 200–450 НВ, тоді як армуючі частки твердого сплаву мають твердість 66–75 HRC.

Карбідочавуни ефективно застосовуються у гірничій та переробній галузях. Наприклад, при розмелі вугілля вони збільшують термін експлуатації роторних пластин у 4–5 разів порівняно з марганцевистою сталлю. Козирки ковшів екскаваторів, виготовлені з карбідочавуну, зберігають гостру ріжучу кромку та мінімальне викришування протягом усього терміну служби.

Дослідження також демонструють, що армування чавуну сталевим дротом (з діаметром 1–4 мм та вмістом вуглецю 0,1–0,6%) може подвоїти міцність чавуну СЧ20, водночас роблячи його неохильним до крихкого руйнування. Навіть просте суспензійне заливання чавуну з додаванням 1–3% залізного порошку у струмінь розплаву підвищує його міцність на 33% та твердість на 46%.

Ці матеріали є незамінними в екстремальних умовах експлуатації (агресивні середовища, знакозмінні та ударні навантаження, надвисокі температури), зокрема в авіаційній, ракетній та космічній техніці, де їхнє використання дозволяє знизити масу деталей на 20–60% при збереженні еквівалентної міцності.

Технологія виготовлення композитних виливків вимагає дотримання специфічних умов:

1. Рівень змочуваності дисперсної фази розплавленим металом (покращується за допомогою поверхнево-активних присадок та спеціальної підготовки дисперсної фази).
2. Природа дисперсних частинок та особливості їхньої попередньої підготовки.
3. Температурний режим розплаву.
4. Специфіка режимів перемішування металевого розплаву в момент інтеграції частинок.

Компанія "Sandvik", наприклад, при виробництві своїх карбідочавунів розміщує подрібнений твердий сплав на сітці у попередньо нагрітій формі, а температура рідкого чавуну має перевищувати температуру ліквідусу на 150–400 °С для забезпечення якісного зчеплення (зварювання) між твердим сплавом і чавунною матрицею. Натомість, спроби зниження температури заливання можуть погіршити рідкоплинність металу та запобігти якісному заповненню проміжків.

У дослідженнях для зміцнення сталевих виливків твердосплавні пластини монтували у ливарну форму на дротяних каркасах безпосередньо перед заливкою, витримуючи технологічний зазор до стінки форми 10 мм. Заливання сталі здійснювали при температурі 1510–1540 °С, що забезпечувало достатню рідкоплинність для якісного зчеплення.

Актуальність подальших досліджень взаємодії у системах типу «залізовуглецеві сплави – металокерамічні частки» продиктована потребою керувати фізико-хімічними та теплофізичними процесами, що відбуваються під час лиття та тверднення, аби гарантувати високу та стабільну якість продукції, що експлуатується в умовах інтенсивного абразивного зносу. Це вимагає проведення досліджень взаємодії армуючих частинок і матриці, моделювання затвердіння, вивчення мікроструктури границі розподілу та оптимізації параметрів отримання виливків.

Композиційні матеріали у ливарній справі є своєрідним "металургійним бетоном", де матриця (цемент) зв'язує надміцні, але крихкі армуючі елементи (щебінь). Завдяки точному контролю над розміром і розміщенням "щебеню" (наприклад, карбідів) та його взаємодією з "цементом" (металевою матрицею) створюється матеріал, який є одночасно міцним, стійким до зносу і, залежно від потреби, легким, тоді як кожен компонент окремо був би неефективним.

4.2 Властивості композиційних матеріалів

У сфері переробної промисловості, зокрема для операцій, пов'язаних із подрібненням та помелом рудних і кускових матеріалів, було впроваджено нове покоління зносостійких композитів, відомих як «карбідочавуни». Ці матеріали є результатом активної діяльності таких компаній, як "Sandvik" та "Mueller", які успішно поєднали в них виняткову зносостійкість, притаманну твердим сплавам, з ударною в'язкістю, характерною для високоміцних чавунів.

Ця унікальна комбінація властивостей дозволяє карбідочавунам значно перевершувати за експлуатаційним ресурсом та стійкістю до зносу традиційні матеріали. Згідно з даними, наданими компанією «Sandvik», показники стійкості карбідочавунів є вищими, ніж у білих та високоміцних чавунів, у 3-7 разів. Вони також перевищують стійкість марганцевистих сталей у 4-10 разів, загартованих сталей у 5-15 разів та навіть наплавлених поверхонь у 3-6 разів.

Властивості карбідочавунів диференційовані: чавунна матриця має твердість у діапазоні 200-450 HB, тоді як армуючі частки твердого сплаву вирізняються значно вищою твердістю — 66-75 HRC.

Карбідочавуни мають широке застосування у гірничій та переробній галузях, демонструючи особливу ефективність при роботі з мінеральною сировиною, особливо при дробленні кускових матеріалів. Їхня виняткова зносостійкість є ключовим фактором, що забезпечує економічну рентабельність використання цього матеріалу в умовах тривалої та інтенсивної експлуатації.

Практичні приклади підтверджують їхню ефективність:

- При розмолу вугілля на теплових електростанціях, застосування карбідочавуну призводить до збільшення терміну служби роторних пластин у 4-5 разів порівняно з використанням марганцевистої сталі.
- У процесі дроблення агломерату використання композитного карбідочавуну продовжує термін служби робочих лопаток у 4 рази порівняно з лопатками, відновленими методом наплавлення, водночас гарантуючи більш рівномірне та якісне дроблення.
- Козирки ковшів екскаваторів, виготовлені з карбідочавуну, зберігають гостру ріжучу кромку та мають мінімальне викрашування аж до повного експлуатаційного зносу, демонструючи підвищений загальний термін служби.

- Для молотків у молоткових млинах використання композиційного карбідочавуну збільшує термін служби у 3-6 разів порівняно з деталями, які відновлювалися наплавленням.

Дослідження також демонструють потенціал армування чавунних виливків іншими матеріалами. Наприклад, вивчення процесу посилення чавуну СЧ20 сталевим дротом (діаметром 1–4 мм та вмістом вуглецю 0,1–0,6%) показало, що міцність чавуну зросла удвічі. Такі армовані чавуни також не схильні до крихкого типу руйнування, що надає їм переваги перед іншими марками чавуну.

Навіть просте суспензійне заливання чавуну, яке передбачає додавання у струмінь розплаву 1–3% залізного порошку, призводить до зростання міцності на 33% та підвищення твердості на 46%.

Загалом, композиційні матеріали (КМ) з металевою матрицею (ЛКМ) мають значні переваги перед традиційними металами, включаючи високу термостійкість, кращу електро- і теплопровідність та стійкість до ерозії порівняно з порошковими КМ. Вони демонструють значне підвищення міцнісних властивостей та модуля пружності (у кілька разів), а їхня питома міцність (відношення міцності до питомої ваги) є вищою на порядок.

Ці характеристики роблять КМ найбільш перспективним класом машинобудівних матеріалів, особливо для використання в авіаційній, ракетній та космічній техніці. У цих галузях КМ, наприклад, на основі алюмінію та титану (для лопаток газотурбінних двигунів) або нікелю та хрому (для надвисоких температур), дозволяють знизити масу деталей на 20-60% при збереженні еквівалентної міцності. Литі композити на основі свинцю або мідних сплавів, армовані залізовуглецевими АЕ, успішно застосовуються для виготовлення підшипників, здатних працювати без мастильних матеріалів.

Таким чином, композиційні виливки вирішують актуальну технологічну задачу щодо підвищення експлуатаційних властивостей металу, покращуючи стійкість до абразивного, ударно-абразивного та гідроабразивного

зношування, забезпечуючи високу міцність, корозійну стійкість та інші функціональні характеристики, що гарантує безпечну та безаварійну роботу машин і механізмів.

4.3 Методи отримання композиційних матеріалів

Методи виробництва композиційних матеріалів (КМ) поділяються на три основні категорії: твердофазні (ТМ), рідкофазні (РМ) та методи осадження. Хоча твердофазні методи пропонують надзвичайно широкий спектр можливостей для створення КМ майже без обмежень щодо кількості, морфології чи дисперсності армуючих елементів (АЕ), вони часто несуть ризики механічного пошкодження крихкої арматури під час компактування та ускладнюють досягнення рівномірного розподілу АЕ. На противагу цьому, рідкофазні технології, які детально розглядаються у цьому розділі, мають значні переваги у ливарній справі. Вони дозволяють виробляти виливки з КМ, які потребують мінімальної або не потребують подальшої механічної обробки, забезпечують обмежений силовий вплив на крихкі компоненти, спрощують апаратне забезпечення, відзначаються високою продуктивністю та високим коефіцієнтом використання металу (КВМ).

У літейній практиці, особливо для створення армованих виливків, існує два принципових шляхи введення армуючих частинок: їх попереднє розміщення у порожнині ливарної форми або введення безпосередньо у рідкий розплав після заливання. Найбільш ефективним методом для забезпечення контрольованого та рівномірного розподілу армуючих частинок по всьому об'єму матричного сплаву визнано саме попереднє розташування АЕ у формі.

Методи, що ґрунтуються на попередньому розміщенні АЕ (Статичне лиття). Однією з найбільш відпрацьованих та комерційно успішних технологій є виробництво зносостійких композитів, відомих як «карбідочавуни», що активно впроваджуються компаніями, як-от "Sandvik". Цей підхід, що використовується для подрібнення та помелу рудних матеріалів, поєднує

високу зносостійкість твердих сплавів з ударною в'язкістю високоміцних чавунів.

Технологічний процес, що використовується компанією "Sandvik", передбачає покриття подрібненого металокерамічного твердого сплаву розплавом чавуну. Чавун, як матричний сплав, має кулястий графіт та вуглецевий еквівалент у діапазоні 3,5-5,0. Подрібнений твердий сплав (як правило, спечені карбіди WC, TiC, TaC з кобальтовою зв'язкою) розміщується у попередньо нагрітій ливарній формі на спеціально натягнутій сітці з металевого дроту.

Критичним фактором цієї технології є температурний режим заливання. Температура рідкого чавуну повинна бути значно вищою – на 150-400 °C – за температуру ліквідусу. Дотримання цієї високої температури є обов'язковим для забезпечення якісного та міцного зварювання (зчеплення) між твердим сплавом і чавунною матрицею. Це демонструє, що успіх методу залежить від точного контролю теплових умов, які сприяють дифузійному з'єднанню, але не викликають надмірного розчинення армуючої фази.

Подібний підхід було застосовано для зміцнення лопатей зірочок дробарок агломерату. Виливці, які серійно виготовлялися зі сталі 70ХЛ, були модифіковані шляхом монтажу твердосплавних пластин марки ТН-20 (твердість HRC 90-95) безпосередньо у ливарну форму перед заливанням. Пластини фіксувалися на дроті зі сталі Ст. 3, а каркасні конструкції розміщували з технологічним зазором до стінки форми, що складав 10 мм.

Для забезпечення надійного зчеплення між сталевим розплавом та твердосплавними пластинами, сталь заливали при температурі 1510-1540 °C. Як показали дослідження, така температура була необхідна для підтримки достатньої рідкоплинності металу, щоб заповнити всі проміжки та гарантувати міцне з'єднання. Спроби знизити температуру заливання з метою захисту каркасів призводили до швидкого падіння рідкоплинності, що унеможливлювало якісне формування виливка. Після заливання та

охолодження виливки піддавали термічній обробці (нормалізації при 876-890 °С і відпуску при 600 °С). Результати випробувань підтвердили значний успіх: стійкість композитних виливків до абразивного зношування зросла у 2-3 рази порівняно зі стандартною сталлю 70ХЛ.

Для оптимізації параметрів ливарного процесу композитних виливків, які використовують попередньо розташовані твердосплавні частинки, була розроблена чітка технологічна послідовність, що охоплює:

1. Виготовлення та збирання ливарної форми.
2. Монтаж дротяної сітки з фіксацією армуючих частинок у її осередках.
3. Термічна обробка (нагрів) армуючих частинок.
4. Виплавка матричного сплаву та його заливання у форму.
5. Охолодження, вилучення та фінішні операції (обрубка, відрізка, зачистка).

Дослідження підтвердили, що для виготовлення якісних композиційних виливків товщиною до 80 мм, температура заливання сталі повинна підтримуватися в діапазоні 1620-1690 °С, а чавуну – 1380-1450 °С. Оптимальні параметри, які забезпечують формування якісної дифузійної зони між твердосплавними частинками ВК8 та сталевую матрицею 30Л, були встановлені наступним чином: об'ємна частка частинок – 2-8%, розмір частинок – 3-10 мм, температура заливання – 1630-1650 °С, а попередній нагрів частинок – 100-200 °С. Ці умови є критично важливими для управління фізико-хімічними процесами на міжфазних межах, запобігаючи надмірному розчиненню карбідної складової та забезпечуючи якісне дифузійне з'єднання.

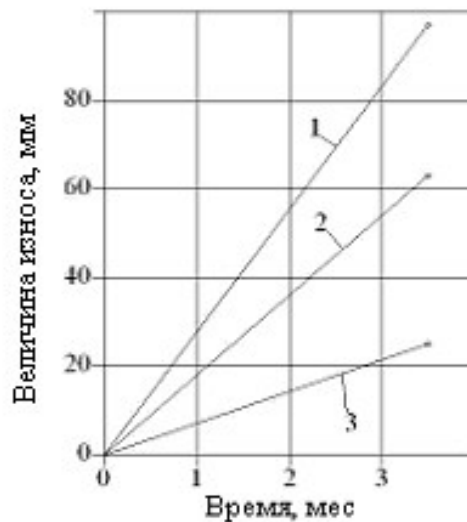


Рисунок 4.2 – Абразивний знос лопастей зірочок дробарок агломерату
 1 – виливки зі сталі 70ХЛ без армуючих вставок; 2 – з дворядним розташуванням твердосплавних пластин по висоті форми; 3 – з трирядним розташуванням твердосплавних пластин по висоті форми.

Методи, що ґрунтуються на введенні добавок у розплав (Динамічне лиття)

Хоча пріоритет віддається попередньому розташуванню, існують і ефективні методи динамічного лиття, зокрема відцентрове лиття. Цей метод успішно застосовується, наприклад, для виготовлення армованих шарошок (конусних різців) для бурових доліт.

Принцип технології полягає у використанні значної різниці в густині між матричним металом та армуючою фазою. У форму, що обертається навколо вертикальної осі, одночасно подається рідкий метал та литий карбід вольфраму (реліт), густина якого ($16,4\text{--}16,6\text{ г/см}^3$) суттєво перевищує густину сталі. Під дією потужних відцентрових сил, щільний реліт мігрує до зовнішньої периферійної зони форми, де формуються зуби шарошок. У процесі кристалізації реліт частково розчиняється, створюючи кінцеву армовану конструкцію. Успіх цього методу визначається точним контролем швидкості обертання форми, температури сталі, а також кількості та концентрації доданого реліту.

Варіацією динамічного підходу є методика, описана у французькому патенті. Вона передбачає виробництво деталей із металевою матрицею за допомогою відцентрового лиття з можливістю послідовного та дозованого введення кількох типів зміцнюючих матеріалів *після* початку заливання матричного розплаву. Для цього виливниця обладнується кількома каналами для роздільної подачі розплаву та армуючих фаз, які з'єднуються в один канал безпосередньо перед входом у форму, що обертається.

Окрім використання крупних армуючих елементів (як у випадку з пластинами або релітом), у рідкофазних методах також застосовується введення ультрадисперсних порошків. Наприклад, у дослідженні ультрадисперсні порошки карбідів та карбонітридів титану, ванадію, хрому та марганцю додавалися до білих валкових чавунів. Ціль полягала у цілеспрямованому формуванні структури та властивостей робочого шару. Важливо, що такі порошкоподібні матеріали вводилися не одночасно, а порційно, при цьому їхня масова частка становила всього 0,05-0,25% від загальної маси металу робочого шару.

Фактори, що визначають якість композиційних виливків. Незалежно від обраного методу (статичного чи динамічного лиття), якість кінцевих ливарних композитів та, власне, принципова можливість їх виробництва обумовлені низкою критичних факторів:

1. Рівень змочуваності дисперсної фази розплавленим металом. Це фундаментальна умова, яка визначає міцність зв'язку між матрицею та наповнювачем. Для досягнення якісного змочування можуть застосовуватися поверхнево-активні металеві присадки або спеціальна попередня обробка дисперсної фази.

2. Природа та попередня підготовка дисперсних частинок.

3. Температурний режим розплаву (що вже було продемонстровано як критичний фактор для якісного зварювання).

4. Специфіка режимів перемішування металевого розплаву в момент інтеграції частинок.

Необхідність контролювати ці фактори обумовлена тим, що під час формування композитів типу «залізовуглецеві сплави – металокерамічні частки» відбуваються складні фізико-хімічні та теплофізичні процеси. Наприклад, термодинамічні розрахунки показали, що при контакті армуючих частинок твердих сплавів ВК і ТК з розплавами сталей і чавунів утворюються оксиди (WO_2 , WO_3 , CoO , Co_3O_4 , TiO_2 , Ti_2O_3), що свідчить про активну взаємодію на межі фаз.

Таким чином, розробка технології отримання композиційних виливків є не лише інженерним завданням, а й вимагає глибокого розуміння механізмів взаємодії, щоб забезпечити високу та стабільну якість продукції, необхідну для деталей, які експлуатуються в умовах екстремальних навантажень та інтенсивного абразивного зносу.

Узагальнюючи, методи отримання композиційних матеріалів у ливарній справі є високотехнологічними процесами, які прагнуть гармонізувати рідкофазне середовище (розплав) з твердофазною арматурою. Для реалізації поставлених завдань необхідно провести наступні дослідження:

- дослідження взаємодії армуючих частинок и матриці;
- моделювання затвердіння композиційних виливків;
- вивчення мікроструктурі границі розподілу армуючих частинок и матриці;
- дослідження параметрів отримання композиційних виливків.

5 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Дослідження взаємодії армуючих частинок і матриці

Для з'ясування природи хімічних сполук, які потенційно можуть виникати на межі розділу фаз при виробництві композитів, було проведено термодинамічні розрахунки. Дослідження фокусувалося на взаємодії армуючих елементів, виготовлених з металокерамічних твердих сплавів (зокрема груп ВК і ТК), з розплавами сталей і чавунів. Були проаналізовані можливі реакції кобальту (Co), карбіду вольфраму (WC) і карбіду титану (TiC) з основними елементами залізовуглецевих сплавів (такими як C, Si, Mn, Cr, Mo, O₂, S) у значному температурному інтервалі 1300-1800 К (1027-1527 °C).

Результати розрахунків наведені на рис. 5.1.

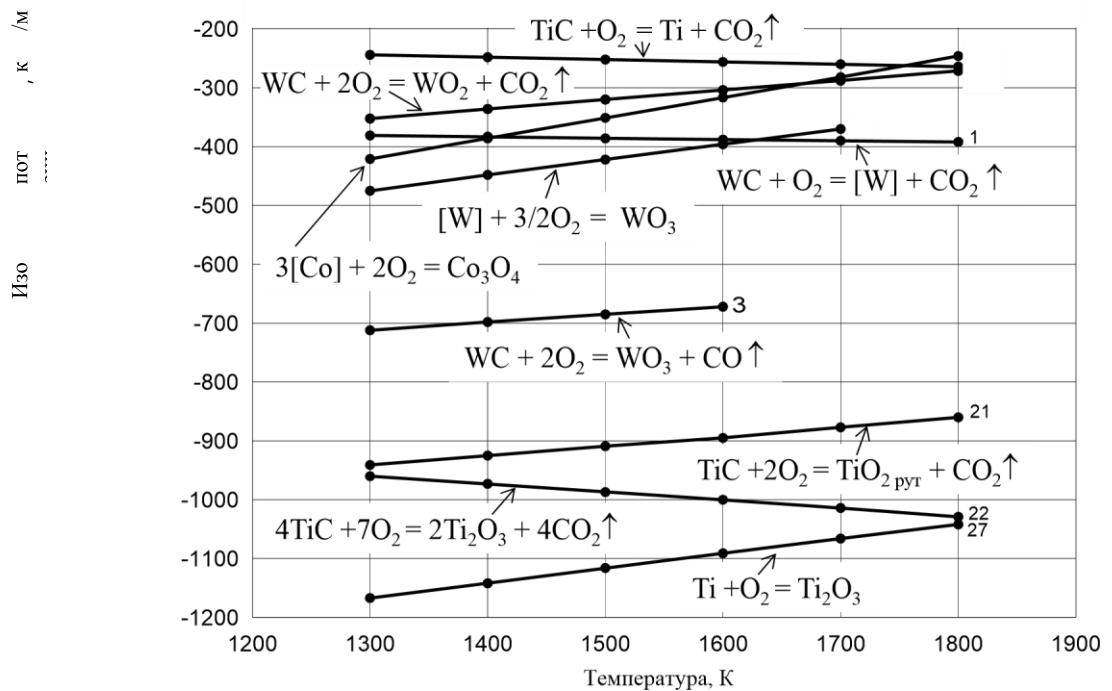


Рисунок 5.1 – Вплив температури на ізобарний потенціал реакцій взаємодії компонентів твердих сплавів ВК і ТК (кобальту, карбідів вольфраму і титану) з хімічними елементами залізовуглецевих сплавів

Отримані розрахункові дані чітко засвідчили, що при інтеграції армуючих частинок твердих сплавів групи ВК у рідкі залізовуглецеві сплави, нагріті до 1300 К, домінуючою хімічною взаємодією є окислення. Встановлено, що кисень активно реагує з карбідом вольфраму, чистим вольфрамом та кобальтом, результатом чого стає утворення оксидів вольфраму та кобальту. Паралельно відбувається відновлення вольфраму з його карбіду під впливом кисню. Із підвищенням робочої температури розплаву до 1800 К, процес утворення оксиду вольфраму (WO_3) залишається основним, але реакція відновлення вольфраму киснем з карбіду істотно інтенсифікується.

Водночас, введення армуючих частинок твердих сплавів групи ТК у залізовуглецеві розплави демонструє дещо іншу закономірність формування продуктів реакції. При температурі 1300 К фіксується переважне утворення складних оксидів титану Ti_2O_3 та TiO_2 , а також оксидів вольфраму WO_3 та WO_2 і кобальту Co_3O_4 . Як і у випадку з ВК, відбувається відновлення титану і вольфраму з карбідних сполук киснем. Збільшення температури розплаву до 1800 К не змінює загальний характер і тип утворених хімічних сполук, зберігаючи визначену картину взаємодії.

Ці результати є критично важливими, оскільки утворення оксидів на міжфазній межі впливає на змочуваність армуючої фази розплавом і, відповідно, на якість кінцевого дифузійного з'єднання, що є основою міцності композиційного матеріалу.

5.2 Мікроструктура границі розподілу армуючих частинок з матрицею

Взаємодія частинок Т15К6 зі сталлю 30Л. Коли армуючі компоненти, зокрема частки марки Т15К6 (які мають склад: 6% Со, 15% TiC, 79% WC), контактують із рідкою сталлю 30Л, вони прогріваються, і на їхній поверхні одразу намерзає шар матричного сплаву. Коли температура частинки зростає

вище 1360°C, це призводить до початку плавлення кобальтової зв'язки. Таке плавлення викликає руйнування зовнішніх шарів частинки, які потім змішуються з рідким матричним розплавом. При цьому карбіди вольфраму (WC) і титану (TiC) вступають у взаємодію з розплавом і частково розчиняються в ньому.

Мікроструктурний аналіз перехідної зони, що утворилася в композиті «сталь 30Л – частки T15K6», показує, що вона має чітку межу поділу з боку твердосплавної частки, проте її межа з боку матричного металу є розмитою (нечіткою). Ширина цієї перехідної зони становить від 300 до 500 мкм. У зоні, що прилягає до матричного сплаву, спостерігаються світлі ділянки карбідної евтектики, яка локалізується у міждендритних проміжках. Ця евтектика містить карбіди типу $(W,Fe)_6C$ і є результатом дифузії вольфраму в сталь.

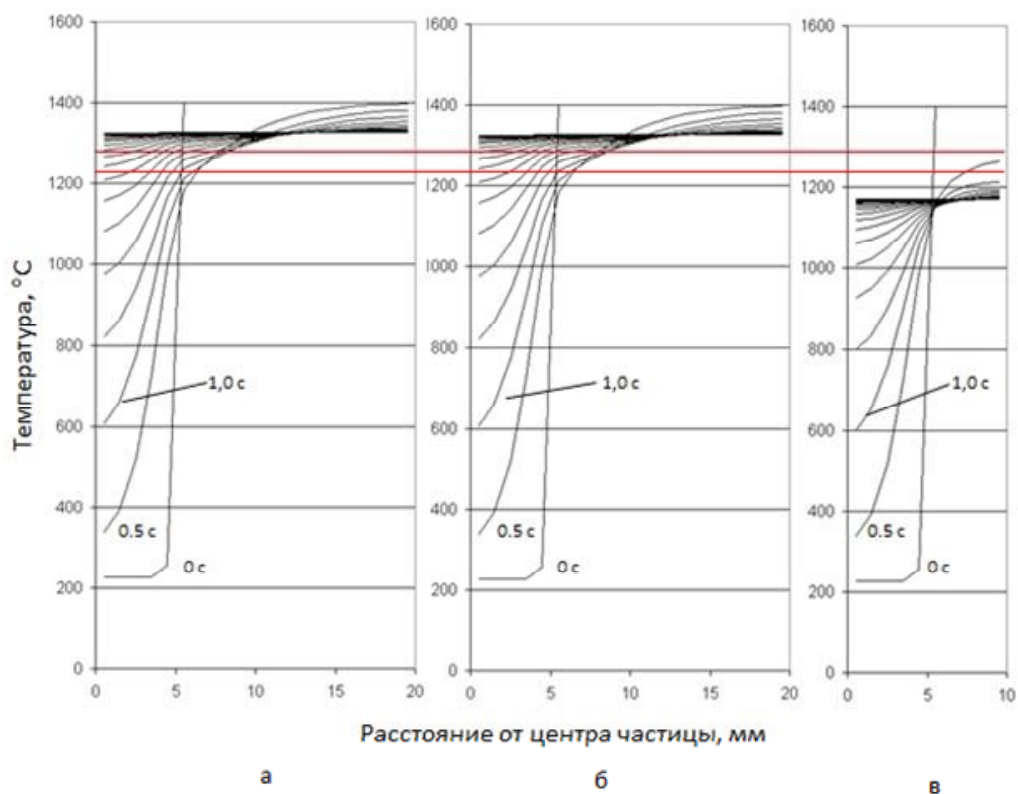


Рисунок 5.2 – Вплив вмісту армуючих частинок ВК8 на температурні поля композиційних виливків «чавун 300Х12Г3М - частинки ВК8».

а- 5% об; б-10% об; в - 20% об.

Температура заливки чавуну - 1410 °С.

Температура нагріву частинок - 225 °С.

Розмір частинок - 10 мм.

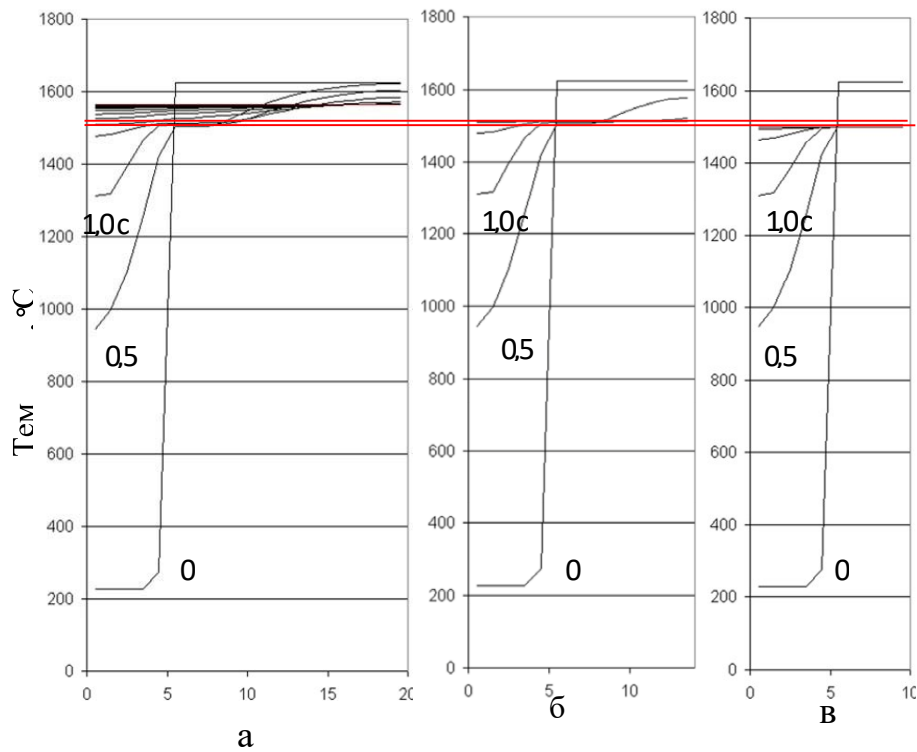


Рисунок 5.3 – Вплив вмісту армуючих частинок ВК8 на температурні поля композиційних виливків «сталь 30Л - частинки ВК8» на відстані від центра частинок мм.

а- 5 % об; б- 10 % об; в - 20 % об.

Температура заливки сталі - 1625 °С.

Температура нагріву частинок – 225 °С.

Розмір частинок - 10 мм.

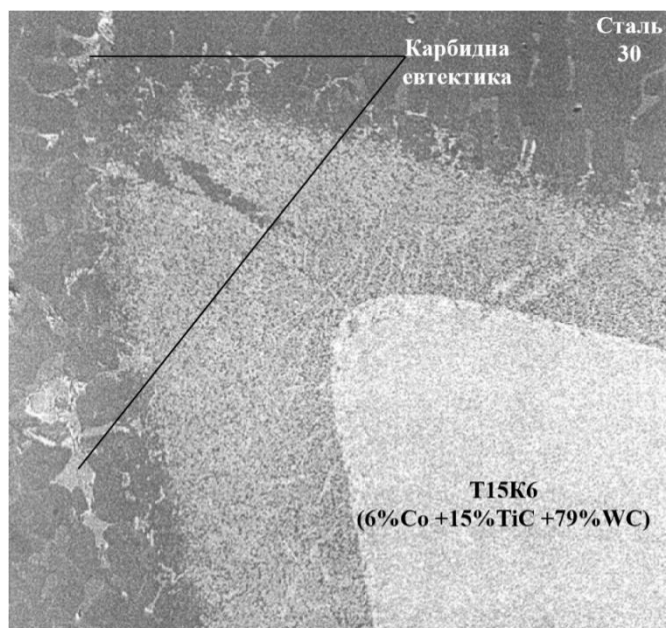


Рисунок 5.4 – Мікроструктура перехідної зони композиційного виливку «сталь 30Л—частинка Т15К6». x100



Рисунок 5.5 – Мікроструктура карбідної евтектики с карбідами $(W,Fe)_6C$ x1000

Аналіз хімічного складу структурних складових підтвердив, що під час кристалізації вилівка кобальт, а також карбіди вольфраму і титану з армуючих елементів частково розчиняються в матриці та концентруються в перехідному шарі. Було виявлено, що карбід вольфраму розчиняється більш інтенсивно,

ніж карбід титану. Це пояснюється тим, що вольфрам знайдено не лише у перехідній зоні, але й у самій матриці та в карбідній евтектиці, тоді як титан локалізується виключно в межах перехідної зони.

Таблиця 5.1 — Хімічний склад структурних складових композиційного виливку «сталь 30Л — частинки Т15К6»

Структурна складова	Масова частка елементів, %						
	Fe	Cr	Mn	W	Ti	Co	Si
Армуючі частинки Т15К6	-	-	-	80,43	13,05	6,52	-
Перехідна зона	56,06	0,11	0,34	17,5	24,24	2,59	0,16
Матриця сталь 30Л	97,38	0,21	0,4	1,66	-	-	0,30
Карбідна евтектика	59,44	0,37	0,31	39,83	-	-	-

Взаємодія частинок ВК8 зі сталлю 30Л. У випадку композиційного виливка системи «сталь 30Л — частки ВК8» (92% WC + 8% Co), перехідна зона демонструє нечіткі, розмиті межі як з боку частки, так і з боку матричного сплаву. Ця зона є значно ширшою, ніж у попередньому випадку, коливаючись у діапазоні 700 до 900 мкм. Формування цієї зони супроводжується руйнуванням поверхневих шарів твердосплавних частинок ВК8, що викликане частковим розчиненням карбідів вольфраму та дифузією вуглецю, вольфраму і кобальту в матрицю під час взаємодії з рідким розплавом.

Мікроструктура перехідного шару складається з карбідної евтектики з карбідами типу $(W,Fe)_6C$, а також з фериту та сорбіту, легованих вольфрамом і кобальтом. Ферит формує оболонки навколо дендритів сорбіту та карбідної евтектики. Утворення сорбіту пояснюється впливом вольфраму та кобальту, які сприяють формуванню більш дисперсних продуктів розпаду аустеніту в результаті $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення.

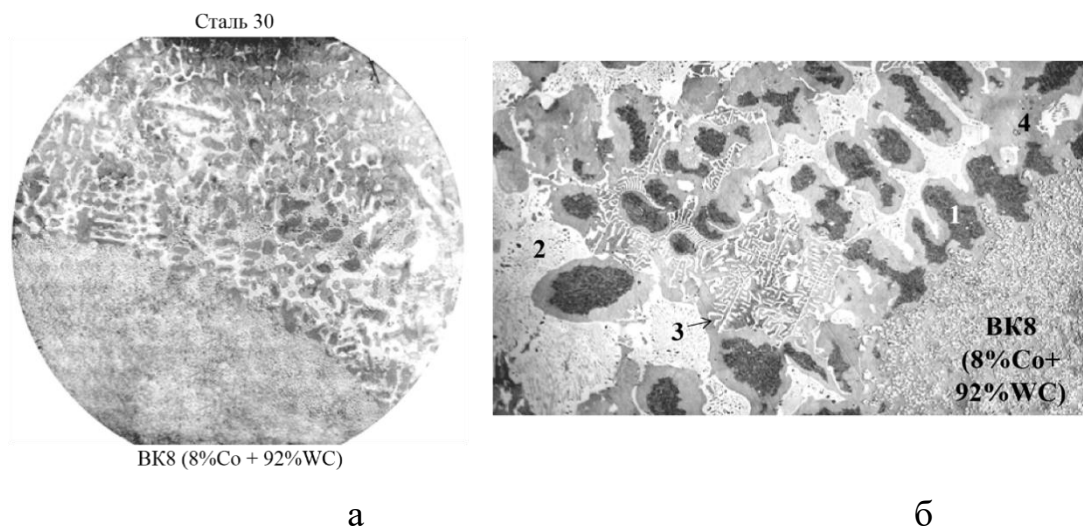


Рисунок 5.6 — Мікроструктура перехідної зони композиційного виливку «стал 30Л — частинки ВК8»:
 1 — сорбіт; 2 — ледебурит с карбідами типу $(\text{Fe}, \text{W})_3\text{C}$;
 3 — карбідна евтектика с карбідами ти карбідами типу $(\text{W}, \text{Fe})_6\text{C}$; 4 — ферит.
a — $\times 100$, *б* — $\times 400$

Залежно від локальних умов кристалізації та хімічного складу, в перехідній зоні можуть формуватися два типи карбідної евтектики:

1. Ледебурит з карбідами типу $(\text{W}, \text{Fe})_3\text{C}$.
2. Евтектика з карбідами типу $(\text{W}, \text{Fe})_6\text{C}$ (характерна для вольфрам-легованих чавунів і сталей).

Карбідна евтектика типу $(\text{W}, \text{Fe})_6\text{C}$ переважно розташована біля самої частинки, тоді як ледебурит рівномірно розподілений по всій перехідній зоні. Це свідчить про неоднорідний розподіл вольфраму, кобальту та вуглецю по ширині перехідного шару. Вміст вольфраму в ледебуритній евтектиці з боку матричного сплаву не перевищує 2%, але в евтектиці $(\text{W}, \text{Fe})_6\text{C}$ він може сягати 20%, що пов'язано з меншою дифузійною рухливістю вольфраму порівняно з вуглецем.

Взаємодія частинок ВК8 з чавуном 300Х12Г3М. При дослідженні композиційного виливка «чавун 300Х12Г3М — частки ВК8», було встановлено, що практично відсутні процеси плавлення кобальтової зв'язки та розчинення карбідної складової твердосплавних частинок матричним сплавом. Однак внаслідок температурного впливу розплаву на поверхневому

шарі частинки відбувається рекристалізація кобальтової зв'язки. Це призводить до утворення перехідного шару, але його ширина є значно меншою і становить лише 40–60 мкм. Основні структурні компоненти матричного сплаву — карбіди $(Cr, Mo, Fe)_7C_3$ і ферит — не змінюються біля частинки, що підтверджує відсутність суттєвого розчинення як карбідної складової, так і кобальтової зв'язки твердосплавних частинок.

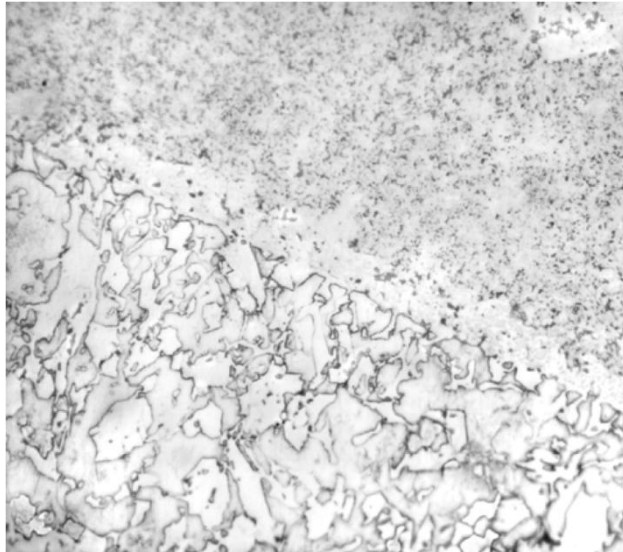


Рисунок 5.7 — Мікроструктура перехідної зони композиційного виливку «чавун 300Х12Г3М - частинки ВК88». х400

Ситуацію з формуванням перехідної зони між твердою арматурою та рідким металом можна порівняти із спробою з'єднання двох різних матеріалів (наприклад, металевої пластини та кераміки) у розплаві. Якщо температура розплаву достатньо висока (як у випадку зі сталлю), вона "підплавляє" зв'язку (кобальт) арматури, вивільняючи її компоненти (карбіди), які потім мігрують у матрицю, створюючи широкий і, часто, нерівномірний "інтерфейс" (перехідну зону) з нових змішаних фаз. Якщо ж температура розплаву нижча (як у випадку з чавуном), він не може так агресивно "розмити" арматуру, і формується лише вузький, більш контрольований шар, де відбувається лише

рекристалізація зв'язки без масового розчинення основних армуючих елементів.

5.3 Дослідження параметрів отримання композиційних виливків

Існує два шляхи введення армуючих частинок у виливок: або їх попередньо розташовують у порожнині ливарної форми, або їх вводять у розплав вже після того, як він залитий. Використання першого методу (попереднього розташування) вважається найефективнішим. Це пояснюється тим, що він надає можливість досягти більш рівномірного розподілу армуючих частинок по всьому об'єму матричного сплаву. Досягнення такого рівномірного розподілу забезпечується використанням спеціалізованих сіток, у комірках (осередках) яких і відбувається фіксація (закріплення) частинок.

Технологічне відпрацювання параметрів ливарного процесу для композитних виливків, що передбачає введення твердосплавних армуючих частинок (використовуючи перший метод), здійснювалося з дотриманням певної послідовності операцій (ілюстрація на рис. 5.8):

- Етап виготовлення та подальшого збирання ливарної форми (рис. 5.8 а);
- Монтаж дрітної сітки (рис. 5.8 б), в осередках якої проводилася фіксація частинок (рис. 5.8 в);
- Термічна обробка (нагрів) армуючих частинок (рис. 5.8 г);
- Процес виплавки матричного металу (сплаву) та подальше заливання ним ливарної форми (рис. 5.8 д);
- Охолодження вже залитих виливків та їхнє вилучення з ливарної форми (рис. 5.8 е);
- Виконання завершальних (фінішних) операцій, таких як обрубка, відрізка та зачистка (рис. 5.8 ж).

Дані, отримані в ході дослідження впливу температурного режиму заливання матричних сплавів на показник глибини заповнення композитних виливків, представлені для аналізу на рис. 5.9. В ході обчислень було прийнято

допущення, що рух (протягом) розплаву зупиняється (припиняється) в той момент, коли на його фронтальній частині досягається температура виліваємості.

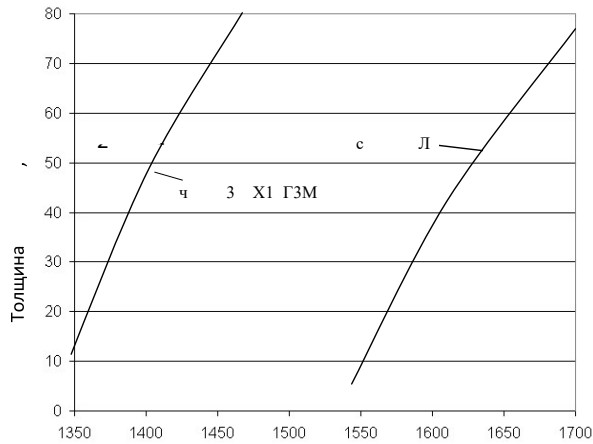


Рисунок 5.8 – Вплив температури заливки матричних сплавів на глибину заповнення композиційної виливки при сифонному підводі розплаву

Об'ємна частка частинок ВК8 - 10%. Розмір частинок - від 6 до 8 мм. Відстань між частинками від 8 до 14 мм. Температура частинок - 225 ° С. Максимальна швидкість підйому металу в

Температура заливки матричного сплава, °С формі з частинками при сифонної заливці - 15 мм / с)

Дані, що наведені на рис. 5.9 показують, що при температурах заливки стали від 1620 до 1690 °С і чавуну від 1380 до 1450 °С можливе виготовлення композиційних виливків товщиною до 80 мм.

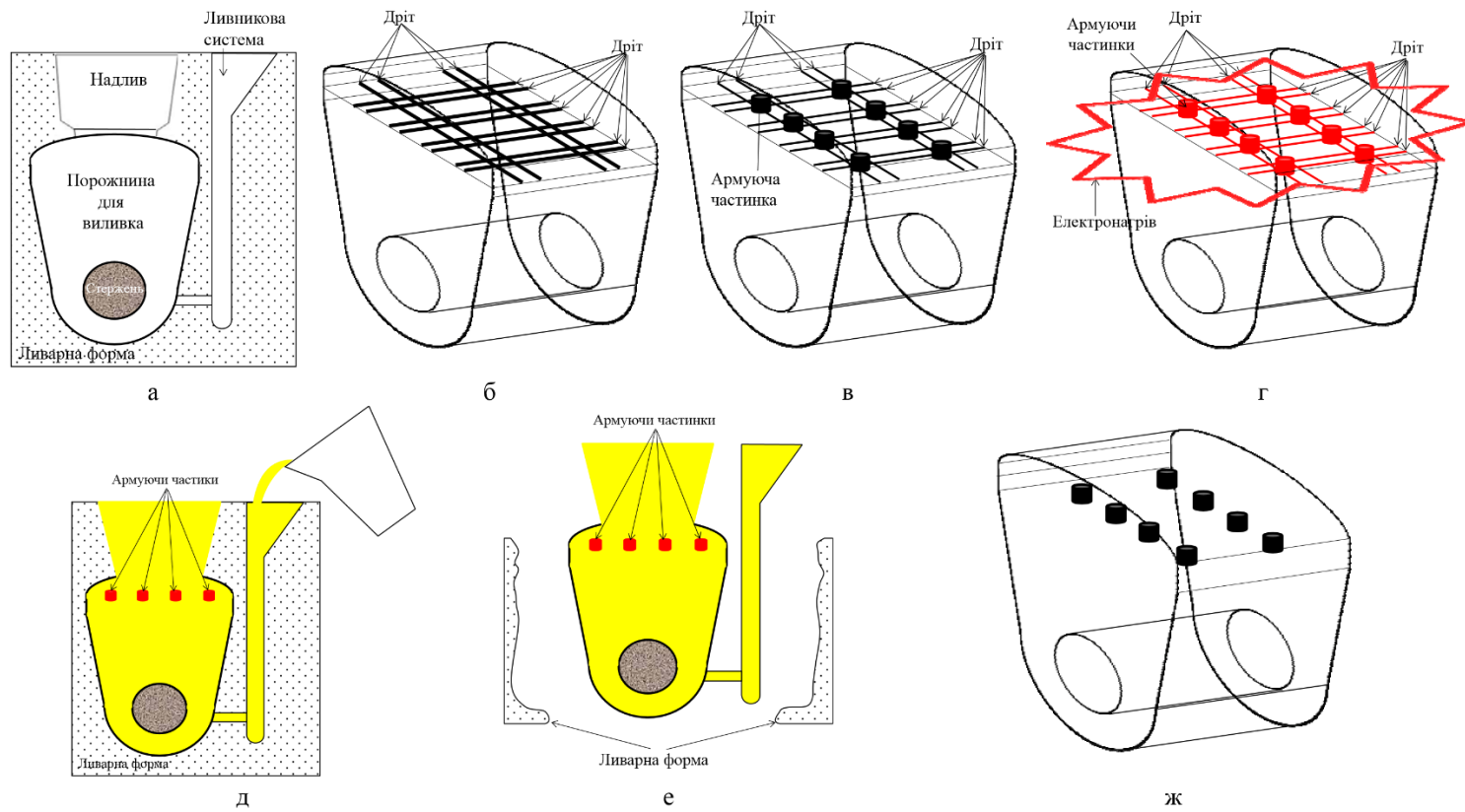
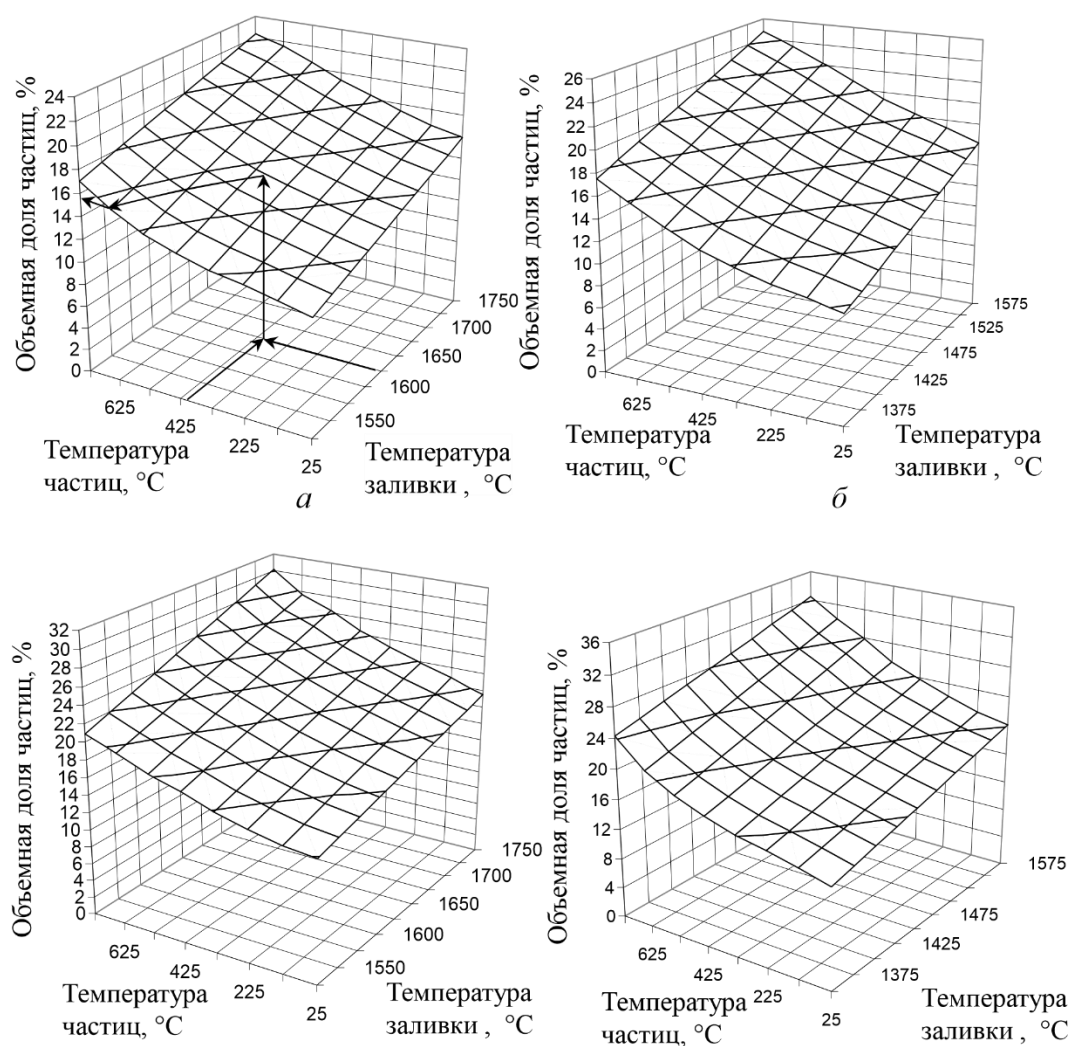


Рисунок 5.9 – Схема технологічного процесу лиття композиційних виливків з попередньо розташованими армуючими частинками у порожнині ливарної форми

За результатами обчислювальних експериментів побудовані номограми (рис. 5.10) для визначення максимальної об'ємної частки твердих частинок в залежності від температур заливки матричних сплавів і попереднього нагріву частинок, що дозволяють оптимізувати параметри технології отримання композиційних виливків.



1525

в з

Рисунок 5.10 – Номограми для визначення максимальної об'ємної частки твердосплавних частинок в композиційних виливках «Сталь 30Л - частилки ВК8» (а), «Чавун 300Х12Г3М - частилки ВК8» (б), «Сталь 30Л - частилки Т15К6» (в), «Чавун 300Х12Г3М - частилки Т15К6» (г) в залежності від початкової температури частинок і температури заливки матричного сплаву.

В результаті аналізу виконаних досліджень визначили оптимальні технологічні параметри процесу отримання композиційних виливків, що забезпечують формування якісної дифузійної зони між твердосплавними армуючими частинками і матричним сплавом (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Параметри технологічного процесу лиття композиційних виливків «сталь 30 - армуючі частинки твердий сплав ВК8»

Технологічний параметр	Значення параметру
Об'ємна частка твердосплавних частинок ВК8, %	2-8
Розмір твердосплавних частинок, мм	3-10
Діаметр дроту сітки, мм	2,2-2,6
Температура заливки матричного сплаву, °С:	1630-1650
Температура попереднього нагрівання частинок, °С:	100-200
Масова швидкість заливки, кг/с, для виливків масою від 10 до 20 кг	3,0-4,0

Аналіз формування композиційних виливків виявив ключові фізико-хімічні процеси, що відбуваються на міжфазних межах компонентів. Зокрема, було встановлено, що під час взаємодії твердосплавних частинок (типів ВК і ТК) із розплавом матриці на їхній поверхні утворюються різноманітні хімічні сполуки. Ці продукти реакції включають оксиди вольфраму WO_2 , WO_3 , кобальту CoO , Co_3O_4 та титану TiO_2 , Ti_2O_3 , TiO .

При використанні сталі 30Л як матричного сплаву, критичним моментом є оплавлення кобальтової зв'язки, яка входить до складу металокерамічних твердосплавних часток, таких як ВК8 і Т15К6. Цей процес не тільки посилює взаємодію армуючих частинок із рідким металом, але й сприяє формуванню необхідного якісного дифузійного з'єднання. Для того, щоб запобігти небажаному утворенню складних карбідних фаз у перехідному шарі та уникнути надмірного розчинення карбідної складової твердих сплавів,

необхідно забезпечити мінімальну швидкість тверднення композитного виливка – не менше 1,5 °C/с.

На основі проведених досліджень було визначено оптимальні технологічні умови для лиття зі сталлю 30Л. Ідеальна температура заливання матричного сплаву має підтримуватися у вузькому діапазоні: від 1630 до 1660 °C. Також було встановлено, що армуючі частки слід попередньо нагрівати до температури від 200 до 350 °C, а їхня об'ємна частка у виливку має становити від 2 до 8%. Завдяки оптимізації цих параметрів для композитних виливків системи «залізовуглецеві сплави – металокерамічні частинки» забезпечується висока та стабільна якість кінцевої продукції.

Практичне впровадження таких композитних виливків дозволяє значно підвищити експлуатаційний ресурс робочих механізмів. Це особливо актуально для обладнання, що використовується у гірничорудній, металургійній промисловості та дорожньому будівництві, де деталі працюють в умовах інтенсивного зношування та екстремальних навантажень. Крім того, застосування цих матеріалів гарантує ефективне використання та значну економію дорогих високолегованих сплавів.





Композиційні виливки дробильно – розмельного обладнання

6 ОЦІНКА СТАНУ УМОВ ПРАЦІ І БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧХ ПРОЦЕСІВ ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Використання композиційних та армованих виливків є одним із найбільш актуальних технологічних завдань сучасної металургії, спрямованим на досягнення найкращих експлуатаційних властивостей металу. Ці матеріали дозволяють значно покращити опір виробів до різних видів зношування — абразивного, ударно-абразивного та гідроабразивного. Окрім підвищеної зносостійкості, композити забезпечують високу міцність, жароміцність, корозійну стійкість та теплопровідність.

Надійність і новоутворені властивості деталей, виготовлених на основі литих сплавів та армованих виливків, є запорукою безпечної та безаварійної роботи складних машин, механізмів, апаратів та іншого устаткування. Це має критичне значення у таких галузях, як суднобудування, авіаційна та космічна техніка, автомобілебудування та залізничний транспорт.

Вплив на безпеку виробництва та експлуатації. Багато деталей, особливо ріжучі елементи, експлуатуються в умовах абразивного зносу, різких температурних перепадів і ударних навантажень. Збільшення довговічності робочих поверхонь цих елементів є життєво важливою задачею для машинобудівної, гірничої та будівельної галузей. Підвищене зношення ріжучих елементів не лише знижує ефективність роботи, але й збільшує вібрацію та кількість пилу, що виділяється буровим устаткуванням. Крім того, зростання температури контактуючих поверхонь може стати джерелом запалення горючих сумішей.

Використання композиційних матеріалів на основі литих сплавів допомагає запобігти аваріям у відповідальних вузлах конструкцій, зокрема в атомних реакторах чи теплогенеруючих установках. Вони забезпечують надійне герметичне з'єднання, що виключає витіки рідкого чи газоподібного палива. Крім того, у теплообмінних апаратах, які широко використовуються в

енергетичному, хімічному машинобудуванні та суднобудуванні, застосування металевих композиційних матеріалів підвищує надійність і безпеку при зростанні експлуатаційних параметрів, таких як тиск, температура та швидкість рідини. Отже, композиційні виливки відкривають широкі можливості для вдосконалення технологічних процесів і гарантують безпечні та безаварійні умови експлуатації.

Екологічна чистота та технологічні вимоги ЛГМ. Як базова технологія для отримання композиційних та армованих виливків використовується лиття у форми за моделями, що газифікуються (ЛГМ). У зв'язку з використанням полімерних матеріалів (пінополістиролу), цей процес вимагає дотримання суворих рекомендацій для забезпечення високої культури виробництва та екологічної чистоти.

Вимоги до сировини та зберігання: для виготовлення моделей необхідно використовувати спеціальний ливарний пінополістирол зі зниженим сажеутворенням (наприклад, ПСВ-Л або ПОВ-ЛС), оскільки його термічна деструкція супроводжується меншим утворенням шкідливих продуктів неповного згоряння. Пінополістирол, що спінюється, та розчинники повинні зберігатися виключно у закритій тарі. Зберігання самого пінополістиролу має відбуватися в ізольованому приміщенні при температурі, що не перевищує 20°C, і на відстані не менше 1,5 м від будь-яких джерел тепловиділення.

Механізація та контроль пилу: процеси переробки пінополістиролу повинні бути механізовані. Місця завантаження, транспортування та вивантаження сировини мають бути обладнані пристроями, які унеможливають забруднення повітря виробничих приміщень пилом. Необхідно використовувати способи, що виключають виділення пилу, наприклад, укриття з відсмоктуванням повітря або пневмотранспорт. Розмелювання кварцового піску та просіювання маршаліту/кварцового піску слід проводити в окремих приміщеннях. Очищення порожнини прес-форми струменем стисненого повітря категорично забороняється; для цієї мети

необхідно застосовувати вакуумні установки. При розчиненні пінополістиролових моделей рекомендовано застосовувати менш шкідливі розчинники, наприклад, тетралін.

Управління газовими викидами та теплом: усі виробничі джерела тепла (печі прокалювання, варильні котли, трубопроводи) у місцях, де перебувають робітники, повинні бути обладнані теплоізоляцією відповідно до санітарних норм. Тупикові або прохідні печі, призначені для випалювання моделей та прожарювання форм, повинні мати димососи для уловлювання шкідливих газів. Для забезпечення повного згоряння стиролу та інших газів необхідно, щоб вони потрапляли з першої зони печі у зону з більшою температурою. Для усунення сажеутворення в печі слід подавати окисно-відновлювальні реагенти. У серійному виробництві для нейтралізації газоподібних продуктів термодеструкції моделі, що утворюються під час заливки, необхідно вакуумувати форми в процесі заливки та охолодження. Відсмоктані гази слід направляти на установку термічної регенерації піску або використовувати установки каталітичного допалювання. В одиничному виробництві великих виливків застосовують бічні відсмоктувачі або парасольки, при цьому гази, що виділяються з форми, слід підпалювати. Для видалення конденсату, сажі та пилу з піску рекомендовано застосовувати термічну регенерацію відпрацьованого піску за температури 600-650 °C.

Вимоги до обладнання та процесів: конструкція установок для виготовлення моделей повинна запобігати розбризкуванню модельної композиції під час запресування. Установки ТВЧ, що використовуються для плавки металу та отримання моделей, мають бути екрановані згідно з санітарними нормами. Усі процеси завантаження та транспортування матеріалів, включаючи прожарені форми та керамічні блоки, повинні бути механізовані. Обладнання, що генерує вібрацію, повинно мати віброізоляцію, що забезпечує нормальні умови на робочому місці. Для зменшення шуму від

стисненого повітря та приводу прес-форм необхідно передбачати виведення вихлопів відпрацьованого повітря за межі цеху.

Дотримання вищезазначених організаційних, технічних та санітарних рекомендацій є запорукою високої культури виробництва та екологічної чистоти технологічного процесу ЛГМ.

7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Результатом дослідження технології виробництва литих виробів із композиційних матеріалів, запропонованої в кваліфікаційній роботі, стало підтвердження її технологічної доцільності. З метою визначення економічної доцільності проводили оцінювання економічних переваг від впровадження розроблених технологічних процесів. Раніше було встановлено, що ця технологія базується на процесі лиття за газифікованими моделями, в якому композиційні матеріали попередньо розміщуються всередину форми. Ці елементи включають кульки, стрижні, трубки та волокна, виготовлені зі сталі або кераміки.

Ключовою економічною вигодою виявилось зменшення ваги готових литих виробів. Це стало можливим через застосування композиційних матеріалів з кераміки (з показником густини близько 1700 кг/м^3), оскільки її густина є суттєво нижчою, ніж густина матричного сплаву. Практично, інтеграція керамічних композиційних матеріалів у формі стрижнів та куль, чий об'єм у структурі може займати 10-50%, забезпечила зниження маси литих виробів на рівень від 17% до 40%. Такий результат дозволить зменшити собівартість, а отже, і кінцеву ціну на придатні виливки. Зниження ціни може бути досягнуто для різноманітних залізобетонних та кольорових сплавів завдяки скороченню витрат на базові шихтові матеріали, а також на спожиту в процесі виробництва електроенергію.

Для підтвердження своїх здогадок розраховували собівартість одиниці продукції (1т), результати яких представлено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Планова калькуляція собівартості 1 т литих виробів із композиційних матеріалів

Статті витрат	Кількість на 1 т виливків	Ціна, грн./т	Вартість на 1 т, грн.
1. Металева шихта:			
- сталевий брухт	0,22	8130	1788,6
- композиційний матеріал	0,37	5100	1887,0
- феросиліцій	0,06	61000	3660,0
- феромарганець	0,28	52250	14630,0
- чавунний брухт	0,28	6100	1708,0
- стружка чавунна	0,29	4800	1392,0
Разом	1,5	-	25065,6
Угар	0,05	-	
Загалом рідкого металу		-	25065,6
2. Відходи власного виробництва	0,4	14500	5800,0
Разом			19265,6
3. Флюс універсальний	0,082	7900	647,8
4. Заробітна плата плавильників, заливальників, шихтувальників та ін.			
а) основна			1805,5
б) додаткова			541,7
5. Єдиний соціальний внесок			469,5
6. Енергоносії			3050
7. Загальновиробничі витрати			4843
8. Витрати від браку			306,5
Всього (цехова собівартість)			30929,6

Для порівняння варіантів технічних рішень застосовували такі показники економічної ефективності:

- трудомісткість продукції (t):

$$t = \frac{\chi_{\text{осн}} \times \Phi_{\text{роб}}^{\text{пл}}}{Q}, \text{ нормо-год/т,} \quad (7.1)$$

де $\chi_{\text{осн}}$ – чисельність основних робітників, осіб;

$\Phi_{\text{роб}}^{\text{пл}}$ – плановий час роботи одного робітника за рік, год.;

Q – плановий річний обсяг виробництва продукції, т.

При чисельності робітників основних професій спроможних виробляти 2 тис. т високоякісних виливків –30 осіб, час їх роботи залежить від режиму та змінності

$$\Phi_{1роб}^{пл} = 20 \times 7,8 \times (12 - 1) = 1716 \text{ год.}$$

$$t = \frac{30 \times 1716}{1500} = 34,3 \text{ нормо-год./т}$$

- період окупності капітальних витрат ($T_{ок}$):

$$T_{ок} = KB_{заг} / P_{впров}, \text{ років} \quad (7.2)$$

де $KB_{заг}$ – загальна сума капітальних витрат на впровадження запропонованої технології виготовлення лиття із композиційних матеріалів, грн.;

$P_{впров}$ – річна сума отриманого прибутку від впровадження технології, грн.

Причому $T_{ок}$ обов'язково порівнюють з нормативною величиною ($T_{ок}^{норм}$) наступним чином

$$T_{ок} < T_{ок}^{норм},$$

рівень якого зазвичай становить 5...8 років.

Для розрахунку складових показників зазначених у формулі (7.2) застосовували принцип визначення суми грошового потоку ($P_{впров}$):

$$P_{впров} = 0,82 \times (Ц - С) \times Q, \text{ грн.} \quad (7.3)$$

де 0,82 – коефіцієнт частки чистого прибутку (при ставці податку на прибуток 18%);

$Ц$ – ринкова ціна продукції, грн./т;

$С$ – повна собівартість продукції, грн./т.

По даним підприємств галузі ринкова ціна подібної продукції може становити в межах 45-62 тис. грн./т. Ми візьмемо середньо ринковий рівень

$$Ц = 45 + 62/2 = 53,5, \text{ тис. грн./т.}$$

Повна ж собівартість продукції, яка включає крім цехової собівартості ще і адміністративні витрати та позавиробничі витрати на маркетинг та збут, перевищує цехову собівартість на 40%:

$$С = 30929,6 \times 1,4 = 43,3, \text{ тис. грн./т}$$

Тоді використовуючи розраховані величини ціни та повної собівартості, $\Pi_{\text{впрров}}$ становитиме

$$\Pi_{\text{впрров}} = 0,82 \times (53500 - 43300) \times 2000 = 16728 \text{ тис. грн.}$$

Величина капітальних вкладень на реалізацію запропонованих рішень прийнята на рівні 25800 тис. грн. Тоді термін окупності становитиме

$$T_{\text{ок}} = 25800 / 16728 = 1,54 \text{ років,}$$

а це значно нижче критичних значень, що позитивно характеризує впровадження запропонованої нами технології.

Перелік прийнятних техніко-економічних показників (ТЕП) для порівняння з базовим варіантом технології наведені у таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Порівняння рівнів ТЕП за різними технологіями виготовлення литих виробів із композиційних матеріалів

Показник	Технологія		Зміна	
	базова	запропонована	Δ , нат. од	%
Річний плановий обсяг виробництва продукції, т	2000		-	-
Загальна чисельність працюючих, осіб	55	53	-2	-3,6
- основних	27	30	+2	+11,1
- допоміжних	20	13	-7	-35,0

- інший персонал	8	10	+2	+25,0
Середньомісячний заробіток одного працівника, тис. грн.	22	28	+6	+27,3
Продуктивність праці, т/особу	36,4	37,7	+1,3	+3,6
Технологічна трудомісткість, нормо-год./т	41,0	34,3	-6,7	-16,3
Повна собівартість однієї тонни продукції, тис. грн./т	45,0	43,3	-1,7	-3,8
Середня ринкова ціна реалізації продукції, тис. грн./т	53,5		-	-
Прибуток від реалізації, тис. грн./т	6,97	8,36	+1,39	+20,0
Період окупності усіх капітальних вкладень, років	-	1,54	-	-

Постійність обсягу виробництва продукції пояснюється рівнем попиту та можливістю її реалізації.

Зміни в чисельності персоналу ливарного підприємства обумовлені

- зменшенням допоміжних робітників на 7 осіб,
- додатковою кількістю основних робітників (збільшилося на 11,1%) у зв'язку з додатковими технологічними операціями,
- збільшенням кількості технологів дільниці виробництва лиття із композиційних матеріалів.

Зменшення загальної чисельності працюючих відобразилося на показнику продуктивності праці, яка при однаковому обсязі виробництва лиття збільшилася на 3,6%. Це, крім загальної тенденції збільшення рівня заробітної плати в галузі, дозволило збільшити заробітну плату з 22 до 28 тис. грн./місяць. Позитивним при зростанні заробітку є зменшення трудомісткості виготовлення продукції з 41 до 34,3 нормо-год/т (або на 16,3%).

Економічну доцільність запропонованої технології доводить зменшення собівартості виготовлення продукції на 3,8%. При постійній ціні реалізації прибуток підприємства при збуті 1 т ливарної продукції з урахуванням сплаченого податку на прибуток збільшиться на 20%.

Період окупності наших пропозицій по удосконаленню технології виготовлення литих виробів із композиційних матеріалів – 1,54 років, що менше нормативних 6 років і це знову ж таки є підтвердженням обґрунтуванням ефективності даної технології.

ВИСНОВКИ

Внаслідок виконання досліджень, присвячених вивченню впливу температурно-часових чинників, геометричних параметрів, типу армуючих елементів (АЕ), що розташовані в піщаних ливарних формах, а також типу матричного розплаву (у вигляді залізовуглецевих і кольорових сплавів), разом з особливостями гідродинаміки та тепломасопереносу при заповненні порожнистих форм і форм з піномоделями (в яких розміщені АЕ), на специфіку тепло-масообміну та процес затвердіння литих армованих конструкцій, було з'ясовано наступне:

1. Присутність щільно розміщених (упакованих) АЕ у ливарній формі призводить до формування двох нових, раніше не описаних у теорії ливарних процесів, систем: "метал – модель – імплантовані АЕ – форма" та "метал – АЕ – форма". Це також спричиняє суттєву модифікацію (видозміну) умов теплообміну, що протікає у цих системах.

2. Присутність макроармуючих елементів (МАЕ) забезпечує умови для прискорення тверднення розплаву. Це прискорення є прямо пропорційним масі МАЕ (при її зростанні відносно загального об'єму металу у формі). Було виявлено значний вплив наявності МАЕ у формі на процес зняття перегріву металу до температури T_1 . Цей процес відбувається у 2–7 разів інтенсивніше, ніж аналогічний процес тверднення виливка у порожнистій формі.

3. На процес остигання (охолодження) виливка наявність МАЕ у формі також чинить вплив, однак цей вплив є вже менш вираженим. Співвідношення, що фіксується між швидкістю остигання стрижня у порожнистій формі та швидкістю за наявності МАЕ, складає величину лише $1/(1,2...3,0)$.

4. Безпосередньо на контактній поверхні "МАЕ-метал" процес затвердіння починається первинно зі стрімкого формування твердої фази (так зване намерзання). Слідом за цим утворюється шар, що містить від 15% до

70% твердої фази. Повне (остаточне) формування твердого металевого шару довкола МАЕ завершується лише тоді, коли попередньо утворені шари вже пройшли процес кристалізації.

5. Аналіз інформації, яка була одержана з використанням комп'ютерних програм (моделювання), стосовно зміни швидкості руху металу у формі та конвективних потоків у ній, дозволив виявити: швидкість конвективних потоків спадає (знижується) відповідно до зменшення обсягу рідкої фази. Цей обсяг, своєю чергою, демонструє повну залежність від температурного поля металу всередині форми.