

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра: „Матеріалознавство та ливарне виробництво”

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою МЛІВ

к.т.н., доцент

_____ Олександр Кузик

“ _____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

на тему:

“Дослідження впливу структури і хімічного складу хромистих чавунів на ударно-абразивну зносостійкість деталей гірничорудної промисловості”

“Research on the influence of the structure and chemical composition of chromium cast irons on the impact and abrasive wear resistance of parts of the mining industry”

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи МЗ-23мб

спеціальності 132 – «Матеріалознавство»

_____ Озерянський В.А.

“ _____ ” _____ 2026 р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

_____ Віктор Ломакін

“ _____ ” _____ 2026 р.

Рецензент _____

5. Консультанти по роботі із зазначенням розділів роботи

| Розділ | Консультант | Підпис, дата | |
|--|---------------|----------------|------------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Огляд зносостійких хромистих чавунів | Ломакін В. М. | | |
| Дослідження впливу структури і хімічного складу хромистих чавунів на ударно-абразивну зносостійкість деталей гірничорудної промисловості | Ломакін В. М. | | |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1. | Огляд зносостійких хромистих чавунів | | |
| 2. | Дослідження впливу структури і хімічного складу хромистих чавунів на ударно- абразивну зносостійкість деталей гірничорудної промисловості | | |
| 4. | Оформлення пояснювальної записки | | |
| 5. | Оформлення рецензії | | |
| 6. | Захист кваліфікаційної роботи | | |

Дата видачі завдання:

“ ____ ” _____ 2026 р.

Підпис керівника

Ломакін В. М.

(прізвище та ініціали)

Підпис здобувача

Озерянський В. А.

(прізвище та ініціали)

Анотація

стор. 41, рис. 6, табл. 3, бібліографічних назв 5

Чавун, вилівок, куля, хром, твердість, ударно-абразивна зносостійкість

Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти на тему “Дослідження впливу структури і хімічного складу хромистих чавунів на ударно-абразивну зносостійкість деталей гірничорудної промисловості” складається із п'яти розділів.

Розглянуто матеріалознавчі теоретичні основи формування абразивної та ударно-абразивної зносостійкості литих сплавів, термічну обробку зносостійких хромистих чавунів, сучасний стан досліджень та розробок в області матеріалів для мелючих куль, порівняльну характеристику хромистих чавунів в якості матеріалу для мелючих куль.

Виконано дослідження структури і ударно-абразивної зносостійкості литих мелючих куль з низькохромистого чавуну.

Annotation

Page 41, fig. 6, table. 3, bibliographic titles 5

Cast iron, casting, ball, chromium, hardness, impact and abrasive wear resistance

The qualification work for the first (bachelor's) level of higher education on the topic "Study of the influence of the structure and chemical composition of chromium cast irons on the impact-abrasive wear resistance of mining industry parts" consists of five sections.

The article examines the theoretical foundations of materials science for the development of abrasive and impact-abrasive wear resistance in cast alloys, the heat treatment of wear-resistant chromium cast irons, the current state of research and development in the field of grinding ball materials, and the comparative characteristics of chromium cast irons as grinding ball materials.

Research has been carried out on the structure and impact-abrasive wear resistance of cast grinding balls made of low-chromium cast iron.

Зміст

стор.

| | |
|--|----|
| Вступ..... | 7 |
| 1. Матеріалознавчі теоретичні основи формування абразивної та ударно-абразивної зносостійкості литих сплавів | 8 |
| 2. Термічна обробка зносостійких хромистих чавунів | 12 |
| 3. Сучасний стан досліджень та розробок в області матеріалів для мелючих куль | 16 |
| 4. Порівняльна характеристика хромистих чавунів в якості матеріалу для мелючих куль | 23 |
| 5. Дослідження структури і ударно-абразивної зносостійкості литих мелючих куль | 32 |
| Висновок | 39 |
| Список літератури | 41 |

ВСТУП

Абразивне та ударно-абразивне зношування є однією з основних причин втрати працездатності деталей машин і технологічного обладнання, що експлуатуються в умовах дії твердих частинок, ударних навантажень та інтенсивного тертя. Особливо актуальною проблемою зносостійкості є для литих деталей гірничого, металургійного, ливарного та транспортного обладнання, які працюють у важких умовах експлуатації. Довговічність таких виробів значною мірою визначається структурою металу, фазовим складом, твердістю та здатністю матеріалу чинити опір пластичному деформуванню й руйнуванню поверхневого шару [1, 2].

Формування високої абразивної та ударно-абразивної зносостійкості литих сплавів базується на комплексному поєднанні твердості, міцності та в'язкості матеріалу. Вирішальну роль при цьому відіграють структура металевої основи, наявність карбідних фаз, дисперсність структури та характер розподілу структурних складових. Саме тому в сучасному матеріалознавстві значна увага приділяється дослідженню механізмів зношування, впливу легування, термічної обробки та модифікування структури литих сплавів з метою підвищення їх експлуатаційної довговічності [3, 4, 5].

1. МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ТЕОРЕТИЧЕІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ АБРАЗИВНОЇ ТА УДАРНО-АБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛИТИХ СПЛАВІВ

Абразивна та ударно-абразивна зносостійкість литих сплавів є однією з найважливіших експлуатаційних характеристик деталей, що працюють в умовах інтенсивного механічного контакту з твердими частинками, ударних навантажень і тертя. Особливого значення проблема зношування набуває для деталей ливарного, гірничого, металургійного, сільськогосподарського та транспортного обладнання, які експлуатуються в умовах дії піску, шлаку, руди, дробу, ґрунту та інших абразивних середовищ. До таких деталей належать футеровки, лопатки дробометів, корпуси насосів, зуби ковшів, мелючі тіла, валки, напрямні, колосники, шнеки та інші литі елементи машин.

Абразивне зношування являє собою процес руйнування поверхневого шару металу внаслідок дії твердих частинок або нерівностей, твердість яких перевищує твердість матеріалу деталі. У процесі тертя абразивні частинки врізаються в поверхню металу, викликаючи пластичне деформування, мікрорізання, виривання частинок металу та утворення мікротріщин. При ударно-абразивному зношуванні до дії абразиву додаються циклічні ударні навантаження, які значно ускладнюють механізм руйнування поверхні. У цьому випадку метал одночасно піддається ударній пластичній деформації, наклепу, локальному зміцненню та втомному руйнуванню.

Формування високої зносостійкості литих сплавів безпосередньо пов'язане з їх структурою, фазовим складом, твердістю, характером карбідної складової та здатністю поверхневого шару чинити опір пластичному деформуванню. Одним із головних факторів є співвідношення між твердістю матеріалу та твердістю абразивного середовища. Чим вища твердість поверхневого шару, тим менша глибина проникнення абразивної частинки та менша інтенсивність мікрорізання.

Разом із тим для умов ударно-абразивного зношування недостатньо лише високої твердості. Надмірно твердий, але крихкий матеріал може швидко руйнуватися внаслідок утворення тріщин і викришування поверхні під дією

ударів. Тому для таких умов важливе поєднання високої твердості з достатньою в'язкістю та ударною міцністю. Саме тому при створенні зносостійких литих сплавів велике значення має оптимальна структура металу.

У сірих і високоміцних чавунах важливу роль відіграє форма графіту та структура металевої основи. Пластинчастий графіт у сірому чавуні створює концентратори напружень, через що ударна міцність і ударно-абразивна стійкість є відносно невисокими. Однак наявність графіту покращує антифрикційні властивості та знижує коефіцієнт тертя. Високоміцний чавун із кулястим графітом має значно кращу опірність ударним навантаженням завдяки меншій концентрації напружень у металевій основі.

Важливе значення має структура металевої матриці. Феритна структура характеризується високою пластичністю, але невисокою твердістю та недостатньою абразивною стійкістю. Перлітна структура забезпечує більш високу твердість і кращий опір абразивному зношуванню. Найвищу зносостійкість серед традиційних структур мають бейнітна та мартенситна основи, оскільки вони характеризуються підвищеною твердістю та значним опором пластичному деформуванню.

Особливе місце серед зносостійких литих матеріалів займають високохромисті чавуни. Їх висока абразивна стійкість обумовлена наявністю великої кількості твердих карбідів хрому типу Cr_7C_3 та $Cr_{23}C_6$, рівномірно розподілених у металевій матриці. Карбіди мають дуже високу твердість і ефективно перешкоджають проникненню абразивних частинок у поверхню металу. При цьому властивості таких чавунів значною мірою залежать від співвідношення між карбідною фазою та металевою основою. Якщо матриця є занадто крихкою, можливе викришування карбідів і прискорене руйнування поверхні.

У марганцевистих аустенітних сталях типу сталі Гадфільда механізм підвищення ударно-абразивної зносостійкості має іншу природу. Ці сталі характеризуються високою пластичністю та здатністю до інтенсивного наклепу поверхневого шару. Під дією ударів і тиску поверхневий шар зміцнюється, його твердість різко зростає, тоді як серцевина залишається в'язкою. Саме поєднання

поверхневого зміцнення та високої в'язкості забезпечує виняткову стійкість таких сталей в умовах ударно-абразивного навантаження.

На формування зносостійкості істотно впливають розміри зерна та дисперсність структури. Дрібнозерниста структура сприяє рівномірнішому розподілу навантажень і підвищує опір утворенню та поширенню мікротріщин. Дисперсні карбіди та рівномірний фазовий розподіл знижують локальні концентрації напружень і покращують експлуатаційні властивості литого сплаву.

Важливим фактором є також характер литої структури. У литих сплавах можуть утворюватися дендритна неоднорідність, ліквіація, пористість, усадкові дефекти та неметалеві включення, які негативно впливають на зносостійкість. Такі дефекти стають осередками зародження тріщин і прискорюють руйнування поверхневого шару. Саме тому велике значення має контроль технології лиття, швидкості охолодження та режимів кристалізації.

Підвищення абразивної та ударно-абразивної зносостійкості литих сплавів досягається також шляхом легування. Хром, молібден, ванадій, титан, вольфрам і ніобій сприяють утворенню твердих карбідів, підвищують твердість і теплостійкість структури. Марганець та нікель покращують в'язкість і стабілізують аустенітну структуру. Комплексне легування дозволяє формувати багатофазні структури з оптимальним поєднанням твердості та пластичності.

Значний вплив на структуру і властивості мають термічна та термомеханічна обробки. Гартування забезпечує утворення мартенситної структури з високою твердістю, відпуск дозволяє регулювати співвідношення міцності та в'язкості, а ізотермічна обробка сприяє формуванню бейнітної структури. Для високомарганцевих сталей важливе значення має розчинний відпал із швидким охолодженням для стабілізації аустеніту.

У сучасному матеріалознавстві значна увага приділяється модифікуванню та поверхневому зміцненню литих сплавів. Для цього використовують легування, модифікування розплаву, термічне напилення, плазмове зміцнення, лазерну обробку, борування, азотування та йонно-імплантаційне модифікування поверхні. Такі методи дозволяють формувати зміцнений поверхневий шар із

високою твердістю та підвищеною стійкістю до мікрорізання й ударного руйнування.

Таким чином, абразивна та ударно-абразивна зносостійкість литих сплавів визначається складною взаємодією структури металу, фазового складу, твердості, в'язкості, характеру карбідної складової та умов експлуатації. Формування оптимальної структури є основною матеріалознавчою передумовою створення литих матеріалів із високою довговічністю в умовах інтенсивного зношування.

2. ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ЗНОСОСТІЙКИХ ХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ

Термічна обробка хромистих чавунів є одним із найважливіших способів формування їх структури та експлуатаційних властивостей. Основною метою термічної обробки є зміна фазового складу металевої матриці, регулювання співвідношення між твердістю та в'язкістю, стабілізація карбідної фази, а також підвищення абразивної та ударно-абразивної зносостійкості. Ефективність термічної обробки значною мірою визначається вмістом хрому, вуглецю та інших легувальних елементів, а також вихідною литою структурою чавуну.

Хром у чавунах є сильним карбідоутворюючим елементом і суттєво впливає на фазові перетворення при нагріванні та охолодженні. Зі збільшенням його вмісту зростає кількість твердих карбідів хрому, змінюється стабільність аустеніту та зменшується швидкість дифузійних процесів. Саме тому режими термічної обробки низькохромистих, середньохромистих та високохромистих чавунів мають істотні відмінності.

Для низькохромистих чавунів із вмістом хрому до 1 % найбільш характерними є нормалізація, гартування та відпуск. Такі чавуни за структурою наближаються до перлітних або перлітно-цементитних систем, а хром у невеликих кількостях підвищує прокалюваність і твердість металевої основи. У литому стані структура низькохромистого чавуну може складатися з перліту, фериту та цементитної фази. Для підвищення твердості та зносостійкості застосовується гартування з температур аустенітизації близько 850–950 °С з охолодженням у маслі або на повітрі. У результаті формується мартенситна або мартенситно-трооститна структура з підвищеною твердістю. Після гартування зазвичай проводять низький або середній відпуск, який дозволяє знизити внутрішні напруження та дещо підвищити в'язкість без істотного зменшення твердості.

Нормалізація низькохромистих чавунів застосовується для подрібнення структури та вирівнювання фазового складу після лиття. Під час нормалізації відбувається часткова перекристалізація металевої основи, зменшується дендритна неоднорідність та підвищується однорідність механічних

властивостей. У деяких випадках для деталей, що працюють при помірному зношуванні, нормалізація є достатньою без подальшого гартування.

Середньохромисті чавуни з вмістом хрому до 5 % характеризуються більшою кількістю легованих карбідів та вищою твердістю у литому стані. Термічна обробка таких чавунів спрямована переважно на формування дрібнодисперсної мартенситно-карбідної структури. Для цього використовують гартування з температур 900–1050 °С з подальшим охолодженням у маслі або на повітрі. Під час нагрівання частина карбідів розчиняється в аустеніті, що призводить до його легування вуглецем та хромом. Після швидкого охолодження формується високолегований мартенсит із підвищеною твердістю.

Відпуск середньохромистих чавунів проводять для зняття термічних напружень і стабілізації структури. Низький відпуск дозволяє зберегти високу твердість, тоді як середній або високий відпуск дещо знижує твердість, але покращує ударостійкість та опір утворенню тріщин. У ряді випадків застосовують подвійний відпуск, який сприяє стабілізації мартенситної структури та зменшенню кількості залишкового аустеніту.

Для високохромистих чавунів із вмістом хрому понад 20 % термічна обробка має свої особливості, оскільки структура таких матеріалів містить значну кількість карбідів хрому типу Cr_7C_3 та $Cr_{23}C_6$.

У литому стані матриця може бути аустенітною, аустенітно-мартенситною або аустенітно-карбідною. Високий вміст хрому значно підвищує стабільність аустеніту, тому отримання повністю мартенситної структури є складнішим, ніж у низьколегованих системах.

Основними видами термічної обробки високохромистих чавунів є гартування, стабілізуючий відпуск та ізотермічна обробка. Гартування проводять із високих температур – приблизно 950–1100 °С. При нагріванні відбувається часткове розчинення вторинних карбідів та легування аустеніту. Після охолодження формується мартенситно-карбідна або аустенітно-мартенситно-карбідна структура з високою твердістю та зносостійкістю. Однак через значну кількість легувальних елементів у структурі часто зберігається залишковий аустеніт.

Для зменшення кількості залишкового аустеніту застосовується багаторазовий або стабілізуючий відпуск. Під час відпуску відбувається частковий розпад пересичених твердих розчинів, стабілізація мартенситу та виділення дисперсних карбідів. Це сприяє підвищенню стабільності структури та покращує експлуатаційні характеристики деталей.

У деяких випадках для високохромистих чавунів застосовують ізотермічну обробку, яка дозволяє отримати бейнітоподібні структури з більш сприятливим поєднанням твердості та в'язкості. Такі режими використовуються для деталей, що працюють в умовах одночасного абразивного та ударного навантаження.

Важливою особливістю термічної обробки хромистих чавунів є значний вплив карбідної фази на процеси фазових перетворень. Карбіди хрому мають дуже високу твердість і практично не розчиняються повністю навіть при високих температурах аустенітизації. Тому структура хромистих чавунів після термічної обробки зазвичай являє собою композицію твердих карбідів, розташованих у зміцненій металевій матриці.

Крім класичної об'ємної термічної обробки, для хромистих чавунів можуть застосовуватися поверхневі методи зміцнення: індукційне гартування, лазерна обробка, плазмове зміцнення, борування та азотування. Такі методи дозволяють формувати локально зміцнений поверхневий шар із високою твердістю при збереженні більш в'язкої серцевини деталі.

Для литих мелючих куль термічна обробка застосовується не завжди через значну вартість та складність масового термооброблення великих партій виробів. У багатьох випадках необхідна структура формується безпосередньо під час кристалізації та охолодження у формі. Особливо це характерно для високохромистих чавунів, у яких уже в литому стані формується карбідонасичена структура з високою твердістю та зносостійкістю.

Таким чином, термічна обробка хромистих чавунів є ефективним засобом керування їх структурою та властивостями. Вибір режимів обробки визначається вмістом хрому, необхідним рівнем твердості, умовами експлуатації та економічною доцільністю застосування. Низькохромисті чавуни добре реагують на традиційне гартування та відпуск, середньохромисті – на формування

мартенситно-карбідної структури, а високохромисті – на складні режими стабілізації аустенітно-карбідної системи з метою досягнення максимальної абразивної зносостійкості.

3. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОЗРОБОК В ОБЛАСТІ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МЕЛЮЧИХ КУЛЬ

Незважаючи на досить велику кількість підприємств, що виготовляють мелючі тіла, все ще існує потреба таких виробів. Причиною цього є швидке зношування мелючих тіл у млинах, а також недосконалість існуючих технологій і обладнання, які не дозволяють отримувати необхідні обсяги зносостійкої продукції.

Як відомо, для розмелювання твердих гірських порід, клінкеру, вугілля та інших матеріалів застосовуються мелючі тіла у вигляді куль або циліндрів (цильпебсів). Інколи використовуються також параболоїди та еліпсоїди. Рідше – прямокутні призми, конічні ролики та тіла Кордта.

З точки зору впливу геометричної форми тіл, що мелють, на експлуатаційні властивості і якість помолу, сферична форма є більш доцільною, оскільки забезпечує рівномірність зносу і ударних навантажень, збільшує інтенсивність стирання сировини, дисперсність подрібнення і вихід придатного. Хоча, проблема вибору геометричної форми тіл, що мелють, далеко не так однозначна. Так, наприклад, 1 м^3 куль діаметром 40 мм має сумарну площу робочої поверхні 100 м^2 , а 1 м^3 еліпсоїдов аналогічної ваги - 135 м^2 .

Зазвичай мелючі тіла сферичної форми виготовляють діаметром 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 і 120 мм. У процесі подрібнення порід вони падають у розмольних млинах з висоти 2,7-3,8 м, досягаючи швидкостей 7,5-8,6 м/с, при цьому динамічні зусилля досягають сотень кН, а напруги на поверхні куль – тисяч Мпа.

Це є причиною їхнього ударно-абразивного зносу. Крім того, розмелювання більшості гірських порід, що є жорстким абразивним середовищем, викликає інтенсивне абразивне стирання мелючих тіл. Отже, до матеріалу тіл, що мелють, пред'являються дві взаємовиключні вимоги. З одного боку він повинен характеризуватись високою твердістю, оскільки стикається з високотвердою породою, з іншого – в'язкістю, яка в основному визначає ударостійкість мелючих тіл.

Одним з найбільш поширених зносостійких матеріалів, що використовуються для виготовлення відповідальних деталей, є сталь Гатфільда Г13Л.

Структура такої сталі в литому стані складається з аустеніту і надлишкових карбідів $(Fe, Mn)_3C$, що виділяються по межах зерен і знижують її міцність і в'язкість. У зв'язку з цим литі вироби гартують у воді для отримання більш стабільної аустенітної структури.

В цілому цей матеріал має високу стійкість тільки при ударних навантаженнях, коли відбувається деформаційне зміцнення аустеніту та утворення мартенситу. При ударних навантаженнях, що поєднуються зі значним абразивним впливом, мартенситне перетворення не відбувається, тому зносостійкість такої сталі невисока. Внаслідок цього сталь П10Г13Л не набула значного поширення для масового виготовлення мелючих тіл.

Більш доцільним є використання інструментальних сталей. Однак, низьковуглецеві сталі практично не гартуються на мартенсит. Для мелючих тіл з такого матеріалу характерна висока ударостійкість, але низька зносостійкість.

Високовуглецеві леговані сталі можна досить легко загартувати на мартенсит, але вони нетехнологічні при обробці тиском. Враховуючи високу вартість, інструментальні леговані сталі не знайшли застосування в якості матеріалу мелючих тіл, тому в даний час такі вироби виготовляють методом обробки тиском (поперечно-гвинтова прокатка) зі сталей марки 35-55, 35Г-65Г.

Сталеві кулі порівняно дорогі і мають нерівномірну по об'єму твердість. Низька їх зносостійкість призводить до великих безповоротних втрат металу, а витрата сталевих катаних куль досягає 2-5 кг на 1 т подрібненої руди.

Для зниження вартості 1 тони мелючих куль і їх питомої витрати знадобився такий матеріал, який забезпечив би мінімальний знос при можливо нижчій його вартості. В Україні ще в 1936 р. намагалися замінити сталеві кулі чавунними, вартість яких вдвічі нижча за вартість сталевих. Але зношування чавунних куль, що спочатку відливали в піщаних формах зі звичайного сірого чавуну, було також приблизно в 2 рази більше сталевих.

Останнім часом намітилася тенденція повсюдного переходу від

використання сталевих мелючих тіл, одержуваних методом поперечно-гвинтової прокатки з рядової сталі, до більш зносостійких, відлитих зі спеціального чавуну. Ця тенденція значно посилюється завдяки розвитку ливарних технологій, обладнання та розробці зносостійких матеріалів, таких як легований білий чавун, що характеризується не тільки високою зносостійкістю, але й нижчою вартістю.

Підвищена зносостійкість і стабільність форми мелючих тіл з білого чавуну обумовлена їх значно більшою об'ємною твердістю. Твердість литої кулі діаметром 60 мм від зовнішньої поверхні до центру зменшується з 500 до 350 НВ, а основна маса металу має твердість 400 НВ. У сталевій катаній кулі твердість від поверхні до центру змінюється від 500 НВ до 150 НВ.

Одним з основних факторів, що обумовлює формування вибілого шару в чавуні, є масова частка кремнію в його складі. У науково-дослідних роботах досліджували вплив вмісту кремнію на зносостійкість мелючих тіл циліндричної форми з вибіленого чавуну, і встановили, що найкращі службові властивості мають циліндри з 0,6-0,9% Si. При збільшенні масової частки кремнію до 1,2-2% знос мелючих тіл зростає, а твердість знижується.

У табл. 1.1 наведено основні хімічні склади вибілених чавунів.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад вибілених чавунів

| Тип чавуну; структура в робочому шарі | Вміст елементів, % | | | | | | |
|---|--------------------|-------------|-------------|------|-------|-------------|-------------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni |
| Нелегований і низьколегований; перліто- цементитна | 2,8- 3,8 | 0,2- 0,8 | 0,3- 0,9 | ≤0,5 | ≤0,12 | 0,4- 0,8 | - |
| Легований; перліто- цементитна | 3,0- 3,6 | 0,5- 0,9 | 0,4- 0,8 | ≤0,5 | ≤0,10 | 0,4- 1,0 | 2,0- 3,0 |
| Легований; сорбіто- цементитна | 2,8- 3,8 | 0,2- 0,8 | 0,4- 1,0 | ≤0,5 | ≤0,12 | 0,7- 1,0 | ≤2,0 |

Величина відбілу по перерізу мелючих тіл з нелегованого, або низьколегованого чавунів (при $\sim 1\%$ Si) більшою мірою визначається швидкістю затвердіння виливка. Застосовуючи спеціальні технології формоутворення, що забезпечують високу швидкість тепловідведення від виливка до ливарної форми, в таких чавунах можна отримати відбіл по всьому перерізу виливка, тобто, найбільш придатну для таких виробів структуру білого чавуну, що чинить опір зношування в основному карбідами, які захищають робочу поверхню.

По абразивній стійкості нелегований і низьколегований білий чавун, наприклад марок ОІ-1, ОІ-2 і ОІ-3, перевершує сталь 20Х в 1,15 – 2,24 рази. Основним недоліком зазначених матеріалів є порівняно висока крихкість і відносно низькі ударна вязкість і міцність. Структура таких сплавів в литому стані складається з перлітної матриці і карбідів Fe_3C або $(\text{Fe},\text{Cr})_3\text{C}$, що утворюють неперервну сітку по якій тріщина, що виникла при ударі легко поширюється. Тому, хоча цементит – достатньо твердий орторомбічний карбід, твердість якого можна порівняти з твердістю кварцу (HV 840-1100), має бути замінений іншими карбідами. При цьому одним з найдешевших і найефективніших карбідоутворюючих елементів є хром.

За кордоном для виготовлення відповідальних деталей, що працюють в умовах інтенсивної абразивної дії та високих ударних навантажень, застосовують легований мартенситний чавун Ніхард, а також високолегований білий чавун Клаймекс Аллой-42 (сплав 15-3). При цьому термін служби футеровок розмольних млинів і мелючих тіл, виготовлених з таких матеріалів, перевищує тривалість використання аналогічних виливків з вуглецевої та 110Г13Л сталей у 2-8 разів (табл. 1.2).

В Україні сплави Ніхард та Клаймекс Аллой-42 не знайшли широкого застосування через потребу в нікелі (до 4.5%) та молібдені ($\sim 3\%$). Як литі зносостійкі матеріали в Україні все більшого поширення набувають марганцеві і високохромисті білі чавуни.

Таблиця 1.2 – Відносна швидкість зносу мелючих тіл

| Матеріал | Вміст елементів, % | | | | | | | НВ | Відносна швидкість зносу | |
|----------------------------------|--------------------|---------|---------|------|-------|---------|---------|---------|--------------------------|--------------|
| | С | Si | Mn | Cr | Ni | S | P | | мідна руда | Залізна руда |
| Високовуглецева мартенсіна сталь | еталон | | | | | | | - | 100 | 100 |
| Легований; перліто-цементитна | 3,0-3,6 | 0,5-0,9 | 0,4-0,8 | ≤0,5 | ≤0,10 | 0,4-1,0 | 2,0-3,0 | 415-477 | 185 | 160 |
| Легований; сорбіто-цементитна | 2,8-3,8 | 0,2-0,8 | 0,4-1,0 | ≤0,5 | ≤0,12 | 0,7-1,0 | ≤2,0 | 477-534 | 139 | 148 |
| Ніхард | | | | | | | | 555-627 | 90 | 62 |

Марганцеві зносостійкі білі чавуни (до 12% Mn), у структурі яких виявляється підвищена кількість карбідів типу $(Fe,Mn)_3C$, мають високу абразивну зносостійкість. Однак, ледебурит, що міститься в таких чавунах, основу якого становить крихкий цементит, викликає зниження пластичності, в'язкості і підвищує схильність до утворення і поширення тріщин. Цей факт має важливе практичне значення для литих мелючих тіл.

Відома висока ефективність застосування іншого матеріалу – високохромистого білого чавуну (ВХБЧ) з мартенситно-аустенітною металевою основою та спеціальними карбідами в структурі. Дослідженнями встановлено, що зростання зносостійкості доєвтектичних високохромистих білих чавунів із підвищенням вмісту вуглецю пов'язане з поступовим збільшенням у їх структурі евтектичної карбідної складової.

Причому обмеженням вмісту вуглецю в таких матеріалах служить небезпека зростання крихкості чавуну з утворенням великих твердих заєвтектичних карбідів, що знижують ударно абразивну стійкість литих мелючих тіл. Максимуми кривих абразивної зносостійкості, зі збільшенням

вмісту хрому, зміщуються у бік менших значень вмісту вуглецю, оскільки хром відповідно зрушує евтектичну точку. Так, при вмісту в чавуні 12% Сг евтектичний вміст вуглецю становить 3.5-3.6%, а при збільшенні концентрації хрому до 25% воно знижується до 2.6-2.8%.

При постійному ж вмісту вуглецю (2.2-2.9%), збільшення концентрації хрому в межах від 0 до 30% викликає стабільне підвищення зносостійкості. Так, при збільшенні вмісту хрому в сплаві понад 10% замість карбідів $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ утворюються найбільш зносостійкі тверді карбіди $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$, які розташовуються в матриці аустеніту або продуктів його перетворення.

Значний вплив карбідів типу Fe_3C , $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ та $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ на зносостійкість білих чавунів призвело до недооцінки ролі металевої основи, тоді як зносостійкість може бути реалізована тільки тоді, коли карбіди міцно утримуються в структурі. Незважаючи на високу твердість карбідів, вони можуть бути видалені з матриці більшою чи меншою мірою залежно від її механічних властивостей. Якщо зерна абразиву твердіші за матрицю, вони проникають у поверхню металу, деформують його і видаляють з поверхні мелючого тіла мікрооб'єм, в якому можуть бути і карбіди. Інша важлива роль матриці - служити жорсткою підкладкою для карбідів при абразивному зношуванні.

Більшість дослідників більш-менш згодні з тим, що найкращі результати у використанні високохромистих білих чавунів забезпечуються при мікроструктурі, що складається з карбідів $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$, розташованих у мартенситній або мартенситно-аустенітній матриці.

Відомо, що отримати таку структуру при литті важко і пов'язано з необхідністю легування чавуну дорогими добавками нікелю та молібдену. З іншого боку, загартування чавунних мелючих тіл у воді або маслі може призвести до тріщин і отже – до швидкого їх розколювання в процесі експлуатації. Для отримання мартенситно-аустенітної матриці необхідна термообробка литих виробів, яка зазвичай полягає в аустенізації, повітряному загартуванні та відпуску.

Проведеними дослідженнями показана висока ефективність застосування для виготовлення мелючих тіл хромомарганцевих і хромомолібденових чавунів,

таких як ИЧХ4Г7, ИЧХ12Г5, ИЧХ12Г3М, ИЧХ15Г4, ИЧХ12М, 55-59 НРС.

Незважаючи на вищевикладене високолеговані чавуни поки не знаходять застосування як матеріал мелючих тіл. Це можна пояснити високою вартістю феросплавів і великими енергетичними витратами при виплавці ВХБЧ. Під час проведення термообробки час витримки високохромистого чавуну становить близько двох чи трьох годин за нормальної температури 900- 1050 °С.

Отже, проведений аналіз показує, що умовами отримання . високої ударно-абразивної стійкості матеріалу мелючих тіл при задовільній їх міцності є: максимальна кількість карбідів, їх роз'єднаність, відсутність великих карбідів, у тому числі заевтектичних, і максимальна твердість і в'язкість металевої основи.

Остаточний вибір складу чавуну, прийнятного за умовами експлуатації мелючих тіл, повинен бути здійснений у напрямку економії легуючих добавок без значного зниження його експлуатаційних характеристик.

4. ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ В ЯКОСТІ МАТЕРІАЛУ ДЛЯ МЕЛЮЧИХ КУЛЬ

Низькохромисті чавуни з ледебуритною структурою належать до групи зносостійких білих чавунів, у яких основні експлуатаційні властивості визначаються співвідношенням металевої матриці та твердих карбідних фаз. Такі чавуни містять, як правило, до 1 % Cr, а також підвищений вміст вуглецю, що забезпечує формування значної кількості евтектичної карбідної складової. Хром у невеликих концентраціях не формує самостійної карбідної системи, як у високохромистих чавунах, однак активно легує цементит і металеву основу, підвищуючи твердість, прокаліюваність та загальну зносостійкість матеріалу.

Основу структури низькохромистого ледебуритного чавуну становить ледебурит — евтектична суміш аустеніту та цементиту, яка утворюється під час кристалізації при високому вмісті вуглецю. У процесі охолодження аустеніт, що входить до складу ледебуриту, зазнає подальших фазових перетворень і при кімнатній температурі найчастіше переходить у перліт, троостит або частково мартенсит залежно від швидкості охолодження та хімічного складу сплаву. У результаті остаточна структура складається з металевої матриці та твердих карбідних включень, що утворюють безперервний або напівбезперервний каркас.

Ледебурит у таких чавунах є основною зносостійкою складовою структури. Цементитна фаза має дуже високу твердість, тому ефективно протидіє мікрорізанню та пластичному деформуванню поверхні при абразивному зношуванні. При цьому хром частково розчиняється у цементиті, утворюючи легований цементит $(Fe,Cr)_3C$, твердість якого є вищою, ніж у звичайного цементиту. Саме це забезпечує підвищення абразивної зносостійкості навіть при невеликому вмісті хрому.

Металева матриця низькохромистого ледебуритного чавуну найчастіше є перлітною або перлітно-мартенситною. Перлітна матриця складається з чергування фериту та цементиту у вигляді тонких пластин, що забезпечує достатньо високу твердість при збереженні певної пластичності. Якщо

швидкість охолодження є вищою або застосовується термічна обробка, у структурі може утворюватися мартенсит, який значно підвищує твердість і опір зношуванню. Водночас надмірна кількість мартенситу може збільшувати внутрішні напруження та підвищувати чутливість матеріалу до тріщиноутворення.

Для низькохромистих ледебуритних чавунів характерною є наявність первинних карбідів, які кристалізуються безпосередньо з рідкого металу при підвищеному вмісті вуглецю. Ці карбіди мають видовжену або сітчасту форму і значною мірою впливають на твердість та характер руйнування матеріалу. Якщо карбідна сітка є надто грубою або нерівномірною, це може призводити до концентрації напружень і зниження ударної міцності. Тому важливим завданням технології лиття є отримання більш дрібної та рівномірної ледебуритної структури.

Великий вплив на структуру таких чавунів має швидкість охолодження виливка. При швидкому охолодженні формується дрібнодисперсний ледебурит із тонкими карбідними включеннями та більш твердою матрицею. Повільне охолодження сприяє укрупненню карбідів і підвищенню неоднорідності структури. Саме тому для деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування, прагнуть отримати максимально дрібну та рівномірну структуру.

Хром у низьколегованих чавунах також впливає на стабільність перліту та глибину прокаліювання. Навіть невеликі його концентрації уповільнюють дифузійні процеси та сприяють утворенню більш дисперсної структури після охолодження або термічної обробки. Крім того, хром дещо підвищує теплостійкість та опір окисненню.

У процесі експлуатації ледебуритна структура забезпечує високу опірність абразивному руйнуванню завдяки поєднанню твердого карбідного каркаса та достатньо міцної металевої основи. При дії абразивних частинок основне навантаження сприймають карбіди, тоді як матриця утримує їх у структурі та перешкоджає викришуванню. Саме баланс між твердістю карбідів та міцністю металевої основи визначає експлуатаційну довговічність низькохромистих

ледебуритних чавунів.

Такі чавуни широко застосовуються для виготовлення деталей, що працюють в умовах абразивного зношування: мелючих куль, футеровок, дробильних плит, колосників, шнеків, робочих органів змішувачів та іншого ливарного й гірничого обладнання. Їх перевагами є достатньо висока твердість, хороша зносостійкість, відносна дешевизна та технологічність лиття порівняно з високохромистими сплавами.

Тип хромистих карбідів і металевої матриці зазвичай визначається тепловим травленням і рентгеноспектральним аналізом.

Мікроструктура низькохромистого чавуну (~1% Cr) з карбідами $(Fe, Cr)_3C$ показана на рис. 2.1.

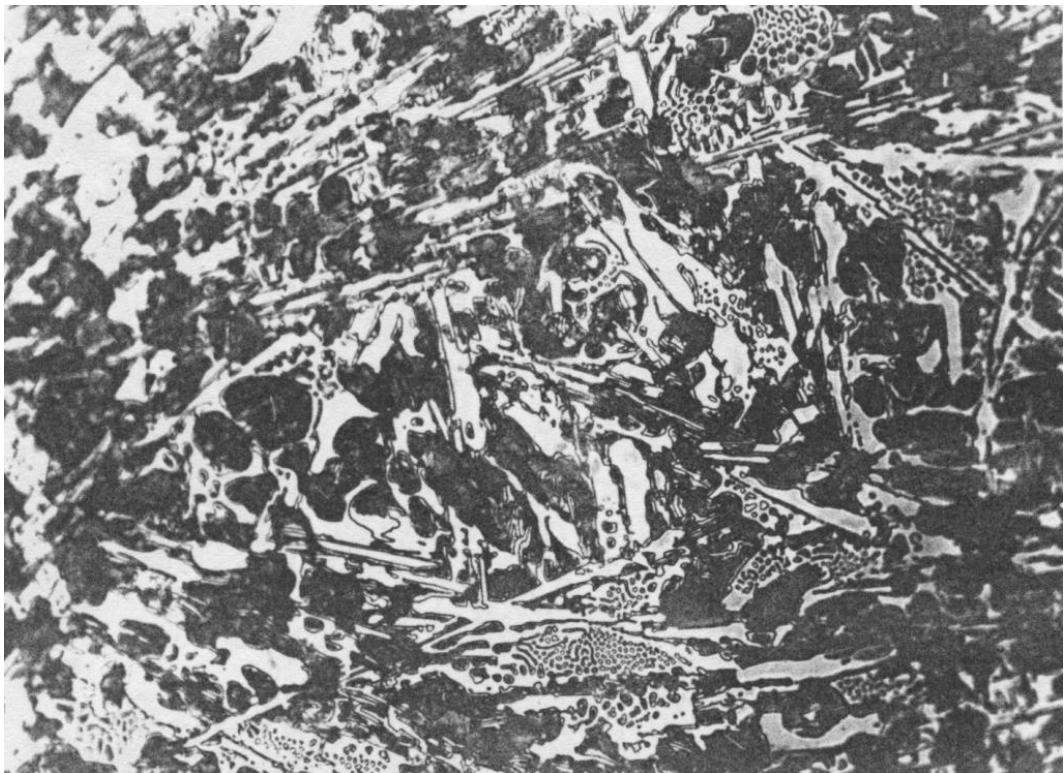


Рис. 2.1 – Мікроструктура білого чавуну (0,8% Cr) $\times 500$

Чавуни з вмістом хрому на рівні 4–6 % займають проміжне положення між низькохромистими та високохромистими зносостійкими чавунами і характеризуються складнішою та більш стабільною структурою. Такі сплави широко застосовуються для виготовлення деталей, що працюють в умовах

інтенсивного абразивного та помірного ударно-абразивного зношування, зокрема мелючих куль, футеровок млинів, плит дробарок, шнеків, робочих органів змішувачів та іншого технологічного обладнання.

Структура середньохромистих чавунів формується під впливом підвищеного вмісту хрому, який активно бере участь у карбідоутворенні та суттєво змінює процес кристалізації й фазові перетворення. На відміну від низькохромистих чавунів, де основною карбідною фазою є легований цементит $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$, у чавунах із 4–6 % Cr починають формуватися складніші хромовмісні карбіди з вищою твердістю та більшою стабільністю. Саме це забезпечує помітне підвищення абразивної зносостійкості порівняно з низьколегованими системами.

У литому стані структура таких чавунів зазвичай складається з металевої матриці, евтектичної карбідної фази, первинних карбідів та продуктів перетворення аустеніту. Основною структурною особливістю є наявність ледебуритної евтектики, яка містить аустеніт і карбіди. У процесі охолодження аустеніт зазнає подальших фазових перетворень і при кімнатній температурі може переходити у перліт, троостит, бейніт або мартенсит залежно від швидкості охолодження та режимів термічної обробки.

Металева матриця середньохромистих чавунів найчастіше має перлітно-мартенситний, мартенситний або мартенситно-аустенітний характер. Саме структура матриці значною мірою визначає співвідношення між твердістю та ударостійкістю матеріалу. Перлітна складова забезпечує певну пластичність і здатність сприймати ударні навантаження, тоді як мартенсит значно підвищує твердість і абразивну зносостійкість. Наявність залишкового аустеніту частково підвищує опір утворенню тріщин та знижує чутливість матеріалу до ударних навантажень.

Карбідна фаза у чавунах із 4–6 % Cr є значно більш розвиненою, ніж у низькохромистих сплавах. Карбіди можуть мати сітчасту, стрижневу, видовжену або ізольовану форму. Вони розташовуються по межах дендритів, у складі евтектики або у вигляді окремих включень у матриці. Основною карбідною фазою є леговані карбіди типу $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$, а також перехідні хромовмісні карбіди

підвищеної твердості. Хром значно підвищує твердість карбідів та їх стійкість до стирання, що забезпечує підвищення експлуатаційної довговічності деталей в умовах абразивного зношування.

Важливою особливістю структури середньохромистих чавунів є більш висока дисперсність карбідної фази. При правильному режимі кристалізації та охолодження формується дрібніша й рівномірніше розподілена карбідна сітка, що позитивно впливає на механічні та експлуатаційні властивості. Надмірне укрупнення карбідів може призводити до локальної концентрації напружень і погіршення ударної стійкості матеріалу.

У процесі термічної обробки структура таких чавунів може істотно змінюватися. Після гартування формується мартенситно-карбідна структура з високою твердістю. Частина аустеніту може зберігатися у вигляді залишкового аустеніту через легувальний вплив хрому. Після відпуску відбувається стабілізація структури, зменшення внутрішніх напружень та часткове виділення вторинних карбідів.

Для середньохромистих чавунів характерне більш сприятливе поєднання твердості, зносостійкості та ударної міцності, ніж для класичних високохромистих чавунів. Саме тому вони часто використовуються в умовах, де одночасно присутні абразивне стирання, циклічні навантаження та локальні удари.

У структурному відношенні такі чавуни можна вважати перехідною системою між ледебуритними низькохромистими чавунами та високохромистими карбідонасиченими сплавами. Вони ще не мають такої великої кількості спеціальних карбідів хрому, як чавуни з 15–25 % Cr, однак уже характеризуються суттєво легованою карбідною фазою та підвищеною стабільністю структури.

Саме баланс між твердою карбідною складовою, достатньо міцною металевою матрицею та помірною кількістю залишкового аустеніту забезпечує середньохромистим чавунам хорошу працездатність в умовах комбінованого абразивного й ударно-абразивного зношування.

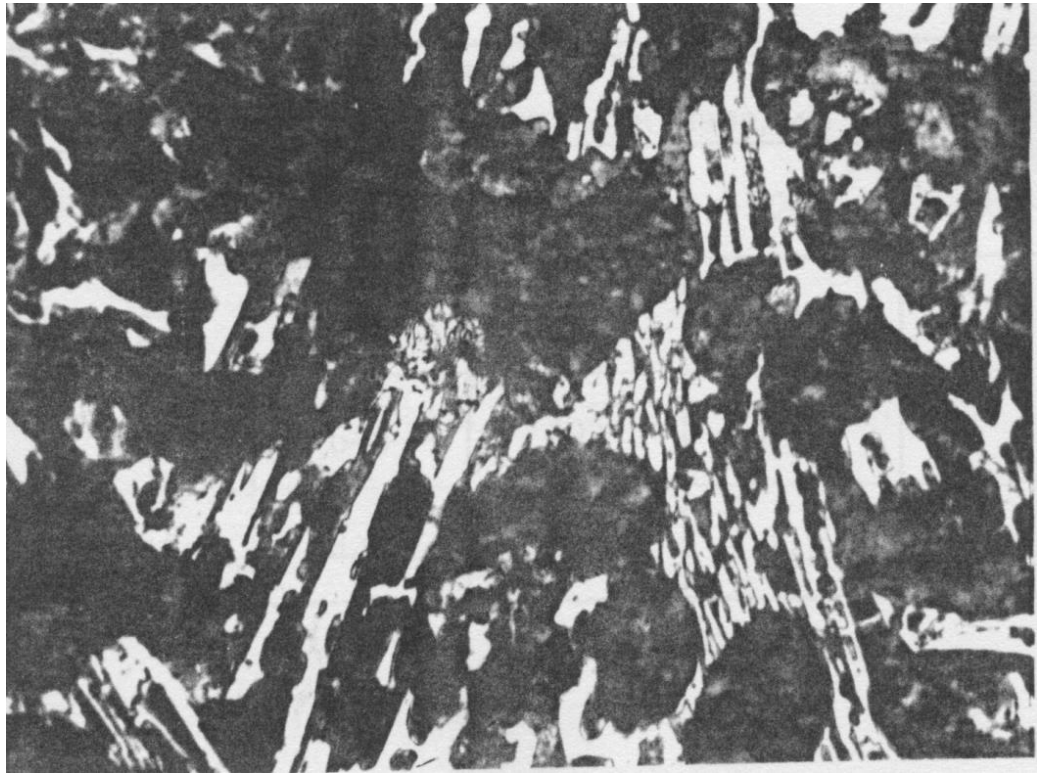


Рис. 2.2 – Мікроструктура легованого чавуну (4,65% Cr) $\times 500$

Чавуни з вмістом хрому на рівні 15–25 % належать до групи високохромистих зносостійких чавунів і характеризуються складною карбідонасиченою структурою, яка забезпечує дуже високі показники твердості та абразивної зносостійкості. Такі сплави широко застосовуються для виготовлення деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування, зокрема мелючих куль, футеровок млинів, дробильних плит, насосних деталей, робочих органів дробометного обладнання, шнеків і різноманітних елементів гірничо-металургійного устаткування.

Основною особливістю структури високохромистих чавунів є наявність великої кількості твердих карбідів хрому, рівномірно розподілених у металевій матриці. Саме карбідна складова визначає основні експлуатаційні властивості таких матеріалів. При вмісті хрому 15–25 % у структурі формуються переважно карбіди типу Cr_7C_3 , а також частково Cr_23C_6 . Ці карбіди мають дуже високу твердість, яка значно перевищує твердість звичайного цементиту, тому вони

ефективно протидіють мікрорізанню, пластичному деформуванню та стиранню поверхні.

У литому стані структура високохромистого чавуну складається з металевої матриці та евтектичної карбідної фази. Евтектика формується під час кристалізації розплаву і являє собою суміш аустеніту та карбідів хрому. На відміну від низькохромистих чавунів, де ледебурит базується переважно на цементиті, у високохромистих сплавах формується складна хромокарбідна евтектика з набагато вищою твердістю та стабільністю.

Карбіди у структурі можуть мати видовжену, стрижневу, голчасту або сітчасту форму. Їх морфологія значною мірою залежить від хімічного складу, швидкості охолодження та умов кристалізації. При правильно підібраних режимах лиття формується дрібнодисперсна й рівномірно розподілена карбідна структура, яка забезпечує найкраще поєднання зносостійкості та механічної міцності. У разі надмірного укрупнення карбідів або формування грубої карбідної сітки можливе локальне підвищення концентрації напружень та погіршення опору ударним навантаженням.

Металева матриця високохромистих чавунів може бути аустенітною, мартенситною або аустенітно-мартенситною. У литому стані через високий вміст хрому та вуглецю значна частина структури часто представлена легованим аустенітом. Хром є сильним стабілізатором аустеніту та водночас карбідоутворюючим елементом, тому фазові перетворення у таких чавунах проходять складніше, ніж у низьколегованих системах.

Аустенітна матриця характеризується більшою пластичністю та здатністю частково сприймати ударні навантаження. Водночас її твердість є нижчою порівняно з мартенситом. При швидшому охолодженні або після термічної обробки частина аустеніту переходить у мартенсит, у результаті чого формується мартенситно-карбідна або аустенітно-мартенситно-карбідна структура. Саме така структура вважається найбільш ефективною для деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування.

Високохромисті чавуни характеризуються значною кількістю залишкового аустеніту. Це пояснюється високою легованістю металевої основи, яка стабілізує

аустеніт навіть при кімнатній температурі. Наявність певної кількості залишкового аустеніту є позитивним фактором, оскільки він частково знижує чутливість матеріалу до ударних навантажень і зменшує ймовірність утворення тріщин. Під дією навантажень залишковий аустеніт може локально зміцнюватися внаслідок деформаційних перетворень, що додатково підвищує зносостійкість поверхневого шару.

Важливе значення має співвідношення між кількістю карбідів і металевою матрицею. При недостатній кількості карбідів знижується абразивна зносостійкість, тоді як надмірний розвиток карбідної фази може погіршувати механічну міцність та ускладнювати роботу матеріалу при динамічних навантаженнях. Саме тому при проектуванні складу високохромистих чавунів прагнуть отримати оптимальний баланс між твердою карбідною складовою та достатньо міцною металевою основою.

Хром також суттєво впливає на дисперсність структури. Він уповільнює дифузійні процеси, підвищує стабільність карбідів і сприяє утворенню більш рівномірної карбідної фази. У результаті структура високохромистих чавунів є значно стабільнішою при тривалій роботі в умовах тертя та високих контактних навантажень.

У процесі термічної обробки структура таких чавунів може додатково змінюватися. Після гартування формується зміцнена мартенситно-карбідна матриця, а відпуск дозволяє стабілізувати структуру та частково знизити внутрішні напруження. Проте для литих мелючих куль термічна обробка часто не застосовується через складність і високу вартість масового термооброблення, тому необхідні властивості формуються безпосередньо у процесі лиття та охолодження у формі.

Таким чином, структура високохромистих чавунів із вмістом хрому 15–25 % являє собою складну багатофазну систему, що складається з твердих карбідів хрому та легованої металевої матриці аустенітного, мартенситного або аустенітно-мартенситного типу. Саме поєднання високої твердості карбідів, стабільності структури та достатньо міцної металевої основи забезпечує таким чавунам дуже високі показники абразивної та ударно-абразивної зносостійкості.

Мікроструктура високохромистого чавуну (рис. 2.3) складається із аустеніто-карбідної евтектики зі спеціальними карбідами хрому $(Cr, Fe)_7C_3$, окремих ділянок троосто-мартенсита з мікротвердістю 644-750 Н μ і мілких вторинних карбідів. Середня мікротвердість евтектики становить 790 Н μ , карбідів $(Cr, Fe)_7C_3$ – 1620-1854 Н μ .

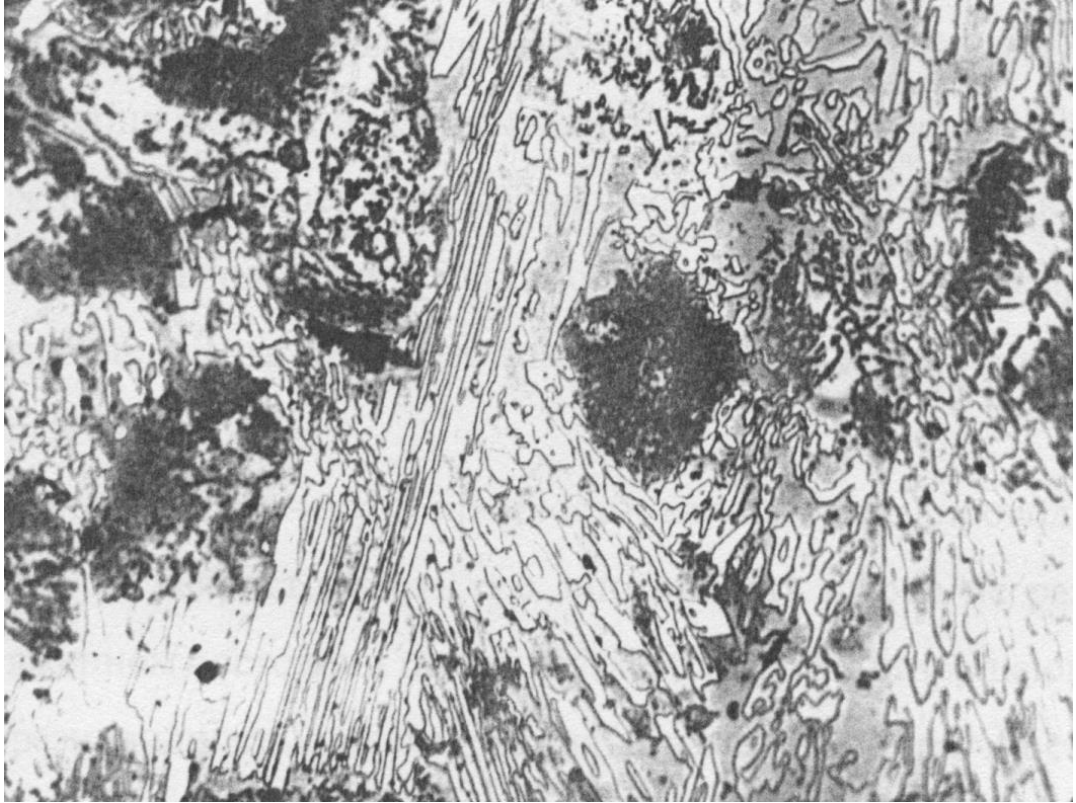


Рис. 2.3 – Мікроструктура високохромистого чавуну (20,8% Cr) $\times 500$

Порівняльний аналіз експлуатаційних властивостей і вартості їх досягнення показав, що в умовах сьогодення компромісним є виготовлення мелючих тіл з низьколегованого хромом чавуну (0,8-1%).

5. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ І УДАРНО-АБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛИТИХ МЕЛЮЧИХ КУЛЬ

Проблема забезпечення оптимальних експлуатаційних властивостей мелючих тіл, таких як твердість, зносостійкість і динамічна міцність досі не вирішена. Вся складність такого завдання полягає в тому, що такі властивості залежать від великої кількості факторів, серед яких: хімічний склад, металографічна структура, мікротвердість складових структури, кількість і розподіл карбідів ледебуриту. Тому при вирішенні завдання отримання необхідних властивостей мелючих тіл слід враховувати всю різноманітність чинників, що докорінно впливають на технологію отримання таких виробів.

Відносно механічного стирання є підстави вважати, що між умовами роботи мелючих тіл різних діаметрів суттєвої різниці немає. Знос матеріалу мелючого тіла визначається тертям з різанням поверхні кулі, а також ступенем абразивності матеріалу, що розмелюється. Довговічність кулі залежить не тільки від опору стиранню і ударостійкості, але і лімітується також границею втоми матеріалу.

Опір вилівка стиранню зазвичай може бути підвищений наявністю в металевій матриці металу карбідів цементитного типу (Me_3C) та інших Me_7C_3 , Me_{23}C_6 . З цією метою в практиці виробництва таких виробів застосовується легування чавуну карбідоутворюючими елементами, зокрема марганцем або хромом. Марганець в умовах сьогодення є більш дешевим. Проте хром здатен ефективніше покращити зносостійкість завдяки утворенню карбідів $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ і $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$. Саме тому в якості матеріалу для куль все частіше використовується низькохромистий чавун.

Абразивна зносостійкість може бути визначена в звичайному лабораторному млину, оскільки фізична природа явища при переході з великого на малий масштаб принципово не змінюється. Оцінка динамічної міцності (ударостійкості) мелючих тіл при зношуванні в лабораторному млину не може бути визначена, не можуть бути відтворені умови, пов'язані з ударною втомою матеріалу.

Мелючі тіла зі звичайних білих чавунів не відповідають вимогам по ударостійкості. Підвищення цієї важливої експлуатаційної властивості досягається легуванням чавунів і проведенням термообробки литих виробів.

У деяких роботах вказується, що при комплексному легуванні хромистого чавуну можна підвищити динамічну міцність мелючих тіл без проведення термічної обробки. При цьому в якості однієї з можливих присадок пропонується кремній.

Така рекомендація знаходиться в певному протиріччі з загальновизнаними вимогами до зносостійких матеріалів для мелючих тіл. За літературними даними кремній знижує зносостійкість чавунних виливків, і в зв'язку з цим рекомендується обмежувати зміст такого елемента в металі до 1%. Разом з цим, останніми дослідженнями показано, що кремній підвищує динамічну міцність (ударостійкість і втомну міцність) куль, зменшує схильність чавуну до усадки і розмір зерна. Такі дані були отримані при дослідженні експлуатаційних властивостей куль з легованого марганцем чавуну. Крім того, в класичних роботах вказується, - щоб уникнути крихкості куль, особливо великих розмірів, потрібно мати зовнішній вибілений шар товщиною до 20-25 мм, а внутрішню частину необхідно зберегти з сірого чавуну, тобто кращим є вибілений чавун.

В даній роботі усі вищеперераховані положення були перевірені по відношенню до експлуатаційних характеристик мелючих тіл сферичної форми, відлитих із низькохромистого чавуну.

Задача дослідження полягала у визначенні раціонального, економічно обґрунтованого, хімічного складу хромистого чавуну для мелючих куль для забезпечення високої ударостійкості таких виробів.

В якості вихідного служив чавун наступного складу: вуглець – 3,0%, кремній – 1,0%, марганець – 0,4%, сірка – 0,05%, фосфор – 0,06%.

З метою визначення ступеня легування чавуну хромом, в межах від 0 до 1%, були відлиті кілька партій куль діаметром 40 мм з різним вмістом хрому. Чавун виплавляли в індукційній печі середньої частоти, типу ІЧТ, з основною футеровкою на чистому чушковому чавуні і сталевому низьковуглецевому брукті. Температура випуску чавуну становила 1500 °С. Рідкий чавун піддавали

комплексному легуванню середньовуглецевим ферохромом та сілікомарганцем у ковші. Кулі відливали в багатомісних кокілях. Збільшення вмісту хрому в чавуні в межах до 1% призводить до зростання об'ємної твердості і зносостійкості. Але, з точки зору динамічної міцності (ударостійкості) мелючих тіл немає ясності.

Дослідження динамічної міцності, як відомо, проводиться шляхом випробування куль на ударостійкість, тобто здатність куль не руйнуватися при ударно-напруженому стані при навантаженні, близькому до руйнівного.

Іншим різновидом дослідження динамічної міцності є випробування мелючих тіл на міцність від втоми при ударному навантаженні. Метою такого дослідження є визначення порівняльної довговічності кулі при ударній роботі в млину.

Проведення випробування куль на динамічну міцність викликало труднощі, оскільки для досліджуваних сплавів невідома величина граничних, близьких до руйнуючих, динамічних зусиль. Крім того, ударостійкість мелючих тіл не регламентується держстандартом, і на різних ливарних підприємствах, що виробляють литі мелючі вироби, для визначення втомної стійкості і ударостійкості куль застосовуються різні пристосування. При цьому використовується різна частота і величина динамічних зусиль.

В даній роботі динамічну міцність мелючих тіл досліджували на спеціальному механізованому копрі (рис. 2.4).

При випробуваннях на ударостійкість мелюча куля отримувала удар бойка масою 70 кг, що падав з висоти 0,5 м. Частота прикладання динамічних навантажень становила 10 ударів за хвилину. Ударостійкість визначали по середній кількості ударів витриманих мелючим тілом до руйнування.

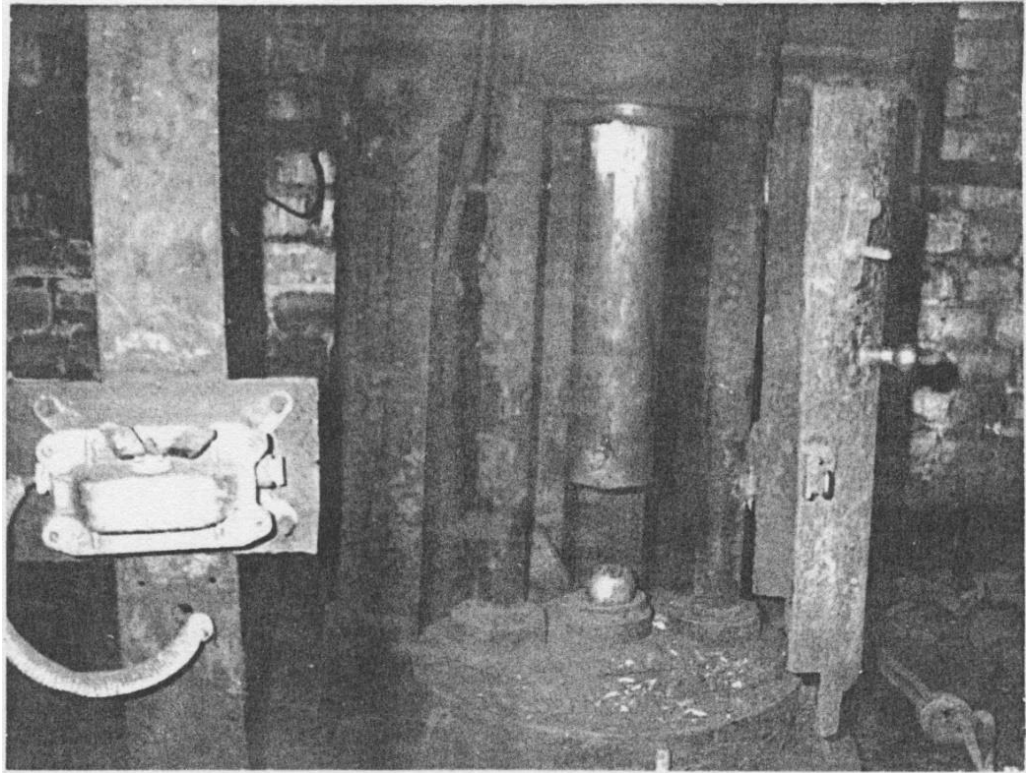


Рис. 2.4 – Механізований копер

Металографічні дослідження структури отриманих виливків проводили з використанням мікроскопа. При цьому встановлено, що при вмісту хрому більше 0,3% виділення структурно вільного графіту відсутні по всьому перетину виливка.

Вивчення травлених шліфів показало, що мікроструктура усіх досліджених виливків являє собою мікроструктуру доевтектичного білого чавуну, що складається з продуктів розпаду надлишкового аустеніту і ледебуритної евтектики. У перетині виливка можна виділити три зони: поверхневу, перехідну і центральну. Поверхнева зона має мілкодисперсну перліто-цементитну структуру. При збільшенні вмісту хрому дисперсність структури підвищується. При переході від поверхневої до центральної зони виливка структура стає більш грубою, змінюється кількісне співвідношення між структурними складовими, збільшується частка ділянок розпаду надлишкового аустеніту. У центральній зоні спостерігається мікропористість, що пов'язано з особливостями кристалізації куль.

У табл. 1 приведені результати дослідження твердості чавуну у різних перетинах виливка

Таблиця 4.1 – Властивості виливків мелючих куль Ø40 мм

| Вміст хрому, % | Твердість HRC в різних перетинах виливка | | | Ударостійкість, уд |
|-------------------|---|--------------|-------|-----------------------|
| | поверхня | середній шар | центр | |
| Вихідний сплав | 40 | 38 | 32 | 42 |
| 0,1 | 42 | 40 | 31 | 72 |
| 0,2 | 42 | 40 | 33 | 144 |
| 0,3 | 44 | 41 | 36 | 281 |
| 0,4 | 47 | 46 | 39 | 546 |
| 0,5 | 50 | 50 | 41 | 722 |
| 0,6 | 52 | 52 | 43 | 768 |
| 0,7 | 53 | 52 | 43 | 774 |

За результатами проведеного дослідження побудовані залежності твердості чавуну від вмісту в ньому хрому для центральної, середньої і поверхневої частин сферичного виливка (рис. 2.5).

Згідно з рис. 2.5 твердість поверхневої зони виливка і прилеглої до неї основної маси металу, з підвищенням вмісту-хрому в чавуні зростає (криві 1 і 2). Максимальна твердість білого легованого чавуну досягається при вмісту хрому 0,7-1% (<1% Si). При цьому перепад твердості від поверхні (~ 52 HRC) до центру кулі (~ 42 HRC) становить величину, порядку 10 одиниць.

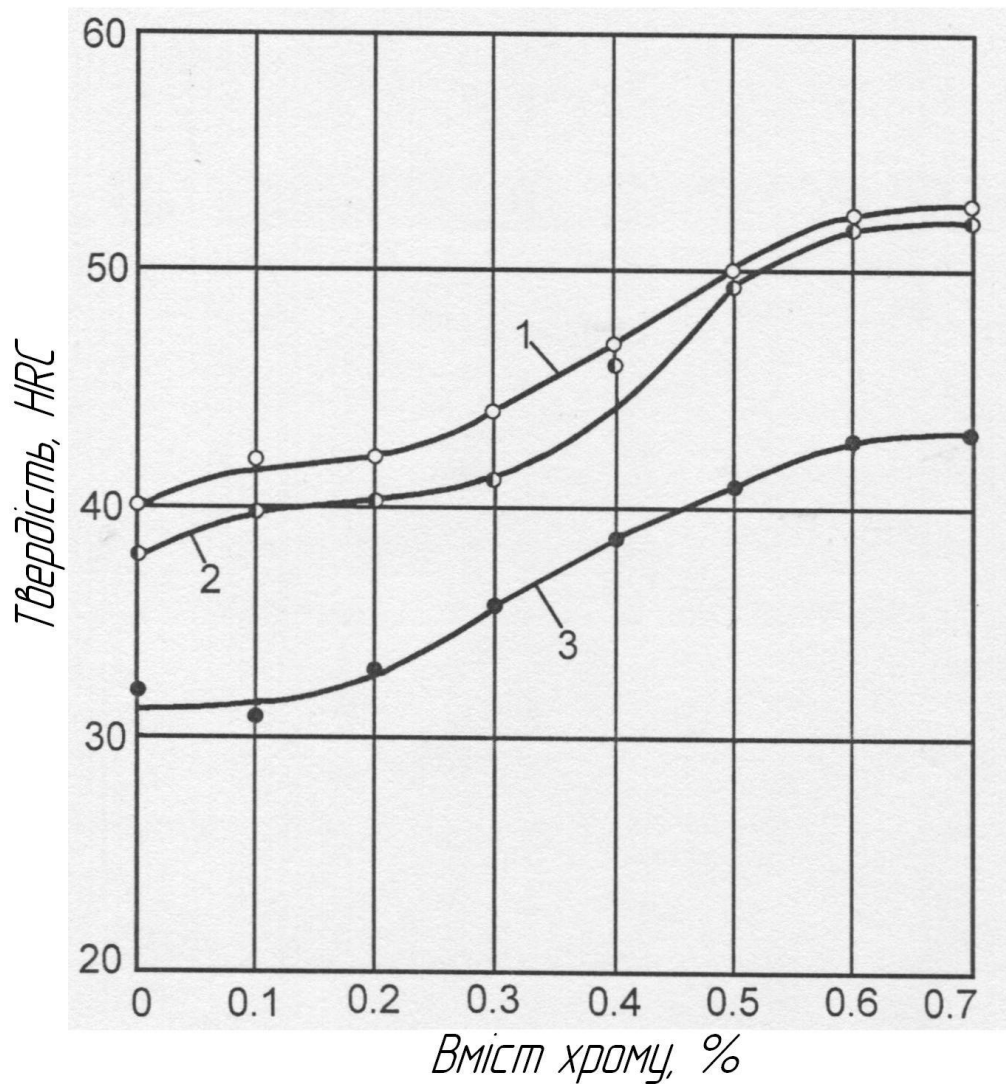


Рис 2.5 - Зміна твердості по перетину кулі

- 1 - поверхнева зона виливка;
- 2 - середня частина виливка (1/2 радіуса кулі);
- 3 - центральна частина виливка

Як видно з рис. 2.6 ударостійкість виливків кулі (динамічна міцність) збільшується з підвищенням масової частки хрому в чавуні в межах до 1%. При цьому найбільше зростання динамічної міцності спостерігається при збільшенні масової частки хрому від 0,3% до 0,5%. При подальшому зростанні вмісту хрому, ударостійкість білого низьколегованого чавуну підвищується менш помітно, і при наявності хрому 0,7-0,8% досягає максимуму.

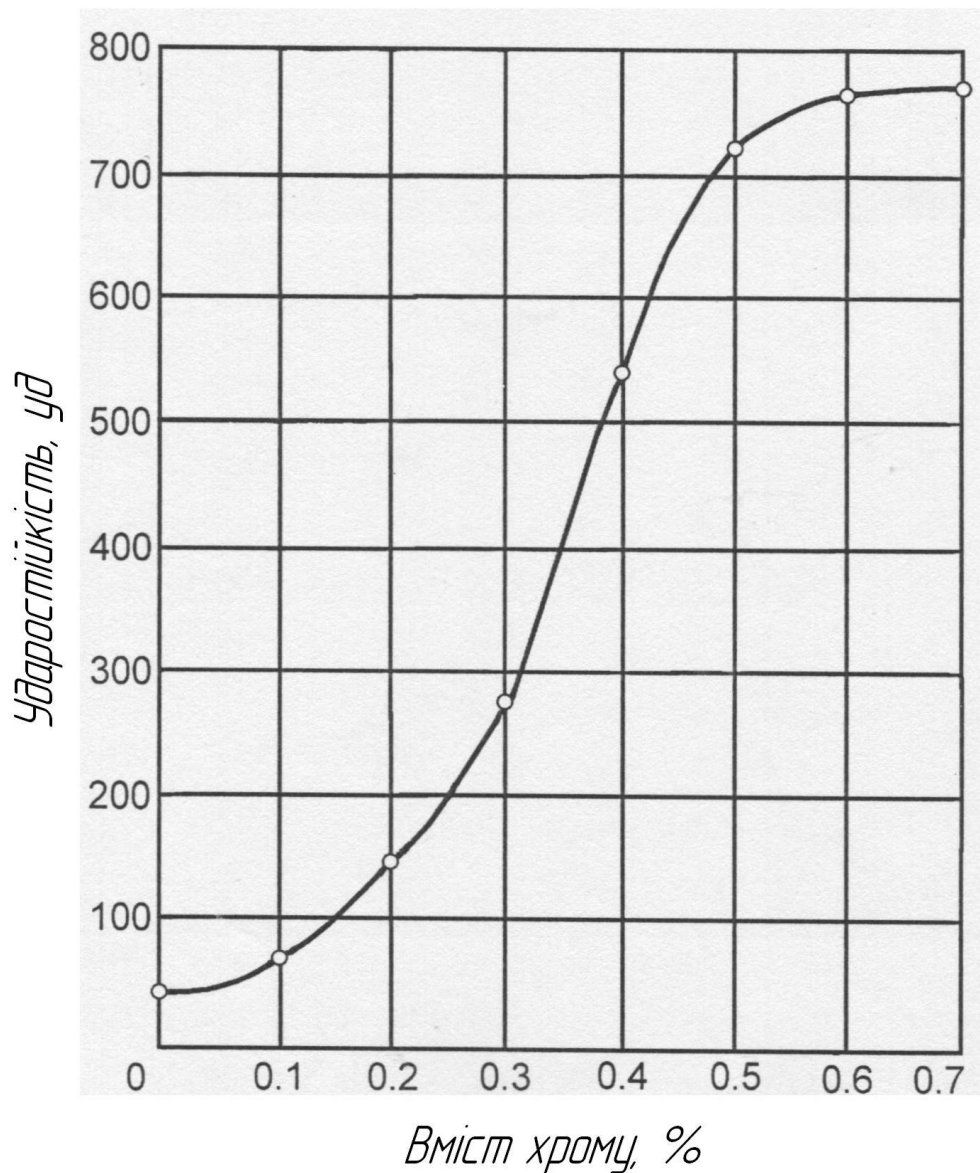


Рис. 2.6 – Ударостійкість куля із низькохромистого чавуну

Встановлена залежність ударостійкості мелючих тіл і вже відомі з наукової літератури експериментальні дані по зносостійкості білого чавуну дозволили зробити висновок: при розмелюванні твердих гірничих порід, з великим вмістом твердого кварцу, застосування низьколегованого хромистого чавуну в якості матеріалу для молотьних тіл є найбільш ефективним, як в плані досягнення високої ударостійкості, так і для забезпечення економічності експлуатаційних характеристик.

Висновок

У результаті виконаного порівняльного аналізу хромистих чавунів для виробництва литих мелючих куль було досліджено властивості низьколегованого чавуну з вмістом хрому до 1 %, середньолегованого чавуну з вмістом хрому до 5 % та високохромистого чавуну з вмістом хрому понад 20 %. Аналіз проводився з урахуванням основних експлуатаційних характеристик, зокрема твердості, абразивної зносостійкості, ударостійкості, структури металу, технологічності виробництва та економічної ефективності застосування.

Встановлено, що зі збільшенням вмісту хрому у структурі чавуну зростає кількість твердих карбідних фаз, що сприяє підвищенню твердості та опору абразивному зношуванню.

Високохромисті чавуни характеризуються високими показниками зносостійкості завдяки наявності значної кількості карбідів хрому в аустенітно-карбідній або аустенітно-мартенситно-карбідній структурі. Такі сплави забезпечують ефективну роботу в умовах інтенсивного абразивного зношування, однак їх використання супроводжується підвищенням вартості матеріалу та ускладненням технології виробництва.

Середньохромисті чавуни займають проміжне положення між низьколегованими та високохромистими сплавами, забезпечуючи достатньо високі показники твердості та зносостійкості при задовільних механічних властивостях.

Встановлено, що для умов експлуатації литих мелючих куль доцільним є застосування низькохромистого чавуну з вмістом хрому до 1 %. Даний матеріал забезпечує достатній рівень твердості, зносостійкості та ударостійкості при меншій вартості виробництва порівняно з високохромистими чавунами. Крім того, низьколеговані чавуни характеризуються кращою технологічністю лиття та економічною ефективністю при масовому виробництві мелючих куль.

Таким чином, за сукупністю експлуатаційних, технологічних та економічних показників для виробництва литих мелючих куль рекомендовано

застосування низькохромистого чавуну, який забезпечує раціональне поєднання твердості, абразивної зносостійкості, ударостійкості та собівартості продукції.

Список літератури

1. Хричиков В.Е., Меньяло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: Навч. посібник. Видання друге, доопрацьоване. Дні-пропетровськ: НМетАУ, 2015. – 89 с.
2. Астапова Г.В. Матеріалознавство та основи технології переробки природної сировини у непродовольчі товари. Навчальний посібник/ [Г. В. Астапова, К. А. Астапова, Л. Г. Саркісян та ін.] – К.: Центр учбової літератури, 2009. – 120 с. – ISBN: 978-966-364-866-8.
3. Кшнякін В.С., Опанасюк А.С., Дядюра К.О. Основи фізичного матеріалознавства. У двох частинах. Частина 2. Навчальний посібник . – Суми : Сумський державний університет, 2015.– 291 с. ISBN: 978-966-657-586-2 ISBN: 978-966-657-588-6.
4. Поплавко, Ю.М., Переверзева Л.П., Воронов С.А., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство. Частина 2. Діелектрики. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. — 392 с.
5. Бузило В.І., Сердюк В.П., Яворський А. В, Гайдай О.А. Матеріалознавство Навчальний посібник. – Дніпро: Дніпровська політехніка, 2021. — 243 с.