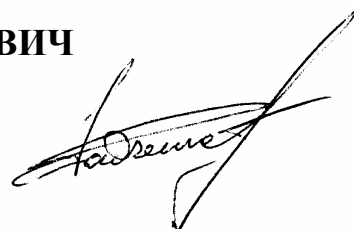


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

РАДЧЕНКО КОСТЯНТИН СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.745.5:669.13

**ХРОМОМАРГАНЦЕВІ ЗНОСОСТІЙКІ ЧАВУНИ ДЛЯ РОБОТИ
В УМОВАХ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ**

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі ливарного виробництва чорних і кольорових металів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
Ямшинський Михайло Михайлович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
доцент кафедри ливарного виробництва
чорних і кольорових металів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Бубликов Валентин Борисович,
Фізико-технологічний інститут
металів і сплавів НАН України,
завідувач відділу високоміцних та спеціальних чавунів;

доктор технічних наук, професор
Хричиков Валерій Євгенович,
Національна металургійна академія України МОН України,
завідувач кафедри ливарного виробництва.

Захист відбудеться «17» лютого 2015 року о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корпус №9, аудиторія № 203.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І.Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «16» січня 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



О.В. Степанов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Абразивне зношування є основною причиною виходу з ладу значної кількості литих деталей машин, що працюють в теплоенергетичній, гірничодобувній, металургійній, хімічній та інших галузях. Збитки від простою устаткування та витрати на його ремонт часто перевищують вартість самих деталей. Правильний вибір сплавів для виготовлення швидкозношуваних деталей визначає економічну ефективність роботи тієї чи іншої машини, установки або цілої системи.

Для виготовлення литих деталей, що працюють в умовах абразивного та гідроабразивного зношування, використовують високолеговані білі чавуни, які за кількістю литва, що з них виготовляють, посідають одне з провідних місць серед чавунів із спеціальними властивостями.

Більшість сучасних сплавів, які використовують у теплоенергетиці як зносостійкі, вміщують у своєму складі значну кількість дорогих елементів, таких як нікель, молібден, ванадій, хром тощо. У світовій та вітчизняній практиці накопичений значний досвід використання як зносостійких матеріалів раціонально легованих високохромистих і хромомарганцевих чавунів. Проте такі чавуни не завжди відповідають необхідним вимогам щодо зносостійкості та механічних властивостей. Вони схильні до утворення тріщин у виливках у процесі їх тверднення або термічного оброблення, погано оброблюються на металорізальних верстатах тощо.

Аналізом літературних даних з цього питання встановлено, що покращити технологічні і експлуатаційні властивості хромомарганцевих чавунів можна додатковим легуванням, мікролегуванням, модифікуванням та відпрацюванням усіх операцій технологічних процесів виготовлення виливків та їх термічного оброблення.

Гідроабразивний знос литих деталей агрегатів систем гідрозоловидалення (ГЗВ) теплових електростанцій наносить значну шкоду господарству, а витрати на заміну таких деталей обчислюються сотнями тисяч гривень за рік. Тому задачі пошуку нових зносостійких сплавів для підвищення довговічності роботи машин і механізмів після з'ясування причин, які сприяють зносу металу в гідроабразивному середовищі, є досить актуальними.

Актуальність проблеми для України полягає ще й у тому, що з одного боку відсутні ресурси дорогих легувальних елементів (Ni, Mo, Co, W), які успішно використовують у світовій практиці для виготовлення литих деталей із зносостійких сплавів, а з іншого боку, в різних галузях промисловості (як в Україні, так і за кордоном) спостерігається тенденція до погіршення умов роботи машин і механізмів внаслідок інтенсифікації абразивного та гідроабразивного видів зношування.

Так, наприклад, аналізом показників витрат металу на одиницю виробленої електроенергії тепловими електростанціями (ТЕС) України встановлено: щороку безповоротно витрачаються тисячі тонн металу литих деталей високої вартості. Підвищення цього показника за останні роки спостерігається в Україні через погіршення якості палива, тобто вугілля, яке вмістить у своєму складі до 50 % негорючих, але досить абразивних речовин. Тому умови роботи зносостійких деталей агрегатів систем приготування палива та ГЗВ ТЕС з часом тільки погіршуються.

У роботі розглянуто питання, що пов'язані з покращанням експлуатаційних характеристик існуючих зносостійких сплавів та пошуком нових, які не вміщують у

своєму складі дорогих і дефіцитних хімічних елементів.

Узагальнення лабораторних досліджень зносостійкості високолегованих чавунів в абразивному і гідроабразивному середовищах, дослідно-промислові випробовування технологічних процесів виготовлення литих деталей багерних насосів та інших пристроїв систем ГЗВ дало можливість автору рекомендувати як зносостійкий матеріал безнікелевий хромомарганцевий чавун, який має високий опір зношуванню і задовільну оброблюваність на металорізальних верстатах після відповідних режимів термічного оброблення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота має зв'язок з темами, які виконувалися на кафедрі ливарного виробництва чорних і кольорових металів НТУУ «КПІ», а саме НДР: № 2265п «Теоретичні і технологічні принципи керування спеціальними властивостями високолегованих сплавів для литих деталей особливо відповідального призначення» (номер держреєстрації 0109U000571); № 2431п «Теоретичні і технологічні принципи розроблення новітніх сплавів із спеціальними властивостями для виробництва деталей різними способами лиття» (номер держреєстрації 0111U002533); № 2632п «Розроблення методології прогнозування структури і властивостей металу у виливках із сплавів на основі заліза з високим вмістом хрому» (номер держреєстрації 0113U000649). У перерахованих роботах здобувач приймав безпосередню участь як виконавець.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою роботи є розроблення нових високоєфективних зносостійких сплавів на основі заліза на підставі теоретичних основ легування, мікролегування, модифікування та термічного оброблення, визначення комплексу їх ливарних, механічних і спеціальних властивостей. Розроблені сплави повинні мати високі експлуатаційні властивості, зокрема зносостійкість в абразивних і гідроабразивних середовищах, й задовільні технологічні характеристики.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано і вирішено такі наукові та практичні задачі:

1. На підставі дослідження експлуатаційних та механічних властивостей визначено оптимальні діапазони концентрацій основних легувальних елементів – хрому та марганцю – для високохромистих чавунів, з урахуванням умов роботи литих деталей механізмів систем ГЗВ ТЕС, їх конфігурації, маси та габаритних розмірів.

2. Установлено доцільність додаткового легування, мікролегування та модифікування базового хромомарганцевого чавуну такими елементами, як Ti, V, B, Sb і рідкісноземельні метали (РЗМ) окремо, а також спільно Ti та РЗМ. Визначено оптимальні концентрації цих елементів з урахуванням умов роботи машин і механізмів.

3. Досліджено вплив термічного оброблення на структуру та властивості рекомендованих сплавів. Визначено оптимальні режими термічного оброблення залежно від необхідних твердості та зносостійкості литої деталі.

4. Розроблено технології виплавляння рекомендованих хромомарганцевих чавунів в дугових та індукційних електропечах з використанням недорогих шихтових матеріалів і виготовлення із них якісних виливків різних габаритних розмірів.

5. Виконано виробничі випробовування конкретних виробів, виготовлених із рекомендованих сплавів, і доказана доцільність використання їх у промисловості.

Матеріали дисертації відповідають вимогам одержання науково-обґрунтованих теоретичних і практичних результатів, які суттєво доповнюють відомості щодо створення нових ефективних металевих матеріалів на основі заліза.

Об'єкт дослідження: процес розроблення нових зносостійких чавунів для умов інтенсивного абразивного та гідроабразивного зношування.

Предмет дослідження: хімічний склад, структура, ливарні, механічні та спеціальні властивості зносостійких чавунів.

Методи досліджень. Мета і поставлені в роботі задачі обумовили проведення наукових досліджень з використанням сучасних методів та устаткування для визначення ливарних, механічних та експлуатаційних характеристик сплавів з високими достовірністю та відтворюваністю результатів (наведено в розділі 2).

Наукова новизна отриманих результатів. Дослідженнями процесів легування, мікролегування та модифікування розширено наукові уявлення щодо впливу основних (Cr, Mn, Ni), а також додаткових (Ti, V, Sb, B та РЗМ) елементів на структуроутворення та експлуатаційні властивості хромомарганцевих чавунів. Деякі особливості впливу Sb та РЗМ на властивості чавунів встановлено вперше.

1. Дослідженнями впливу процесів легування, фазових перетворень під час термічного оброблення на структуру, гідроабразивну зносостійкість сплавів в нейтральному середовищі та твердість встановлено, що вміст хрому в білому чавуні можна знизити з 28 % до 19 % без утрат експлуатаційних властивостей при збереженні технологічних показників, а 1,5...3,0 % Ni в хромонікелевому чавуні замінити 2,5...4,5 % Mn, який є значно дешевшим.

2. Дослідженнями процесів мікролегування та модифікування доповнено наукові дані щодо впливу добавок Ti (до 1,2 %), V (до 1,1 %), Sb (до 1,0 %), B (до 0,1 %), РЗМ (до 0,8 %), а також спільного впливу Ti (до 0,2 %) та РЗМ (до 0,5 %) на структуроутворення, експлуатаційні та механічні властивості високохромистого чавуну на прикладі нового зносостійкого хромомарганцевого чавуну. Зокрема встановлено, що за 1,0 % сурми в базовому хромомарганцевому чавуні розгалужені дендрити аустеніту в тонкостінних виливках не утворюються, а набувають глобулярної форми. Комплексні добавки Ti та РЗМ діють одночасно як модифікатори I та II роду, причому таку дію проявляють обидва елементи.

3. Встановлено, що додавання в хромомарганцевий чавун окремо 0,4...0,5 % титану підвищує зносостійкість сплаву в нейтральному гідроабразивному середовищі на 15 %; 0,5...0,8 % ванадію – на 22 %, 0,1...0,2 % сурми – на 20 %, 0,01...0,02 % бору – на 20 %, 0,1...0,25 % РЗМ – на 18 %, а спільне оброблення чавуну 0,1...0,2 % титану та 0,15...0,25 % РЗМ – на 13 %.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами роботи запропоновано зносостійкі хромомарганцеві чавуни, які можна використовувати для виробництва литих деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного та гідроабразивного зношування, наприклад для виготовлення литих деталей машин і механізмів систем гідрозоловидалення теплових електростанцій. Розроблені зносостійкі чавуни мають високі експлуатаційні та задовільні технологічні властивості і можуть успішно замінити дорогі хромонікелеві чавуни. Економічний ефект від використання рекомендованого чавуну замість чавуну 280Х28Н2 складає 8700 грн на

тонну рідкого металу, а показники відносної ефективності розроблених чавунів вищі за еталонний хромонікелевий чавун.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення дисертаційної роботи, що виносяться на захист, сформульовані автором особисто. Автору належать: аналіз літературних даних, визначення мети та постановка завдання дослідження, розроблення та удосконалення існуючих методик дослідження ливарних властивостей сплавів, гідроабразивної зносостійкості, виготовлення зразків, шліфів, проведення металографічних досліджень, рентгеноструктурного, мікрорентгеноспектрального та дюрOMETричного аналізів, проведення різних режимів термічного оброблення, обробка та аналіз отриманих даних. Постановку задач, обговорення результатів досліджень та формулювання основних висновків і рекомендацій виконано спільно з науковим керівником і співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Наукові положення та результати роботи представлені та обговорені на міжнародних конференціях: «Стратегия качества в промышленности и образовании» (м. Варна, Болгарія, 2010, 2011 pp.), «Литье 2011», «Литье 2013» (м. Запоріжжя, 2011, 2013 pp.), «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейной индустрии» (м. Київ, 2010, 2011 pp.), «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Київ, 2012, 2013, 2014 pp.), «Матеріали для роботи в екстремальних умовах-4» (м. Київ, 2012 p.), «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве» (м. Краматорськ, 2013 p.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладено в 24 наукових працях, у тому числі в 7 статтях у наукових фахових виданнях, з яких 1 стаття у виданні, що індексується в базі даних SCOPUS та 3 статті у виданнях іноземних держав, 17 тезах доповідей в збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, загальних висновків, рекомендацій, переліку використаних джерел із 102 найменувань, 3 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 159 стор., у тому числі 56 рис., 27 табл. Основна частина дисертації складає 141 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, показано зв'язок з науковими програмами, наведено основні результати, відзначено їх наукову новизну та практичне значення, особистий внесок здобувача та апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** проаналізовано науково-технічну літературу щодо сучасного стану промислових зносостійких сплавів. Наведено їх характеристики, переваги та недоліки. Визначено вимоги, які до них пред'являють під час виготовлення виробів та їх експлуатації. Показано можливість оптимізації хімічного складу зносостійких сплавів на підставі теоретичних основ легування, мікролегування і модифікування з метою підвищення експлуатаційних характеристик при збереженні або покращанні технологічних показників. На основі теорій абразивного та гідроабразивного зношування визначено можливість використання для роботи в екстремальних умовах експлуатації високолегованих зносостійких хромистих чавунів. На підставі критичного аналізу науково-технічної літератури за темою дисертації сформульовано мету, задачі та основні напрямки їх реалізації.

У другому розділі описано матеріали, устаткування та методи дослідження абразивної та гідроабразивної зносостійкості, структури, механічних і ливарних властивостей чавунів.

Виплавляння експериментальних сплавів здійснювали в індукційній печі ІСТ-0,06 з основною футеровкою переплавленням з використанням переробного чавуну, сталевого брухту, звороту власного виробництва та необхідних феросплавів.

Як проба для визначення рідкотекучості сплавів вибрана спіраль трапецієподібного перерізу відповідно ГОСТ 16438 – 70. Рідкотекучість визначали за температури металу 1390 ± 10 °С. Лінійну усадку визначали за методикою, яка заснована на перетворенні лінійних змін зразка розмірами $200 \times 25 \times 35$ мм під час його усадки в пропорційну зміну електричного струму за допомогою потенціометричного датчика лінійних переміщень. Для визначення схильності сплавів до утворення тріщин використано циліндричну технологічну пробу. Оцінку тріщиностійкості чавунів здійснювали за площею тріщини, яка утворюється в термічному вузлі на внутрішній поверхні проби. Твердість зразків та мікротвердість структурних складових визначали за стандартними методиками.

Зносостійкість сплавів досліджено методом обертання зразків у гідроабразивному середовищі на власноруч сконструйованій і виготовленій автором установці. Як гідроабразивне середовище використано суміш кар'єрного піску та води в співвідношенні 1:1 за об'ємом, як еталон для порівняння зносостійкості сплавів – зразки із хромонікелевого чавуну 280Х28Н2.

Металографічні дослідження здійснено на мікроскопах МІМ – 8, Neophot-21 та Axio Vert.A1 (Carl Zeiss). Вибіркові дослідження мікроструктури не травлених і травлених зразків, локальний хімічний склад окремих фаз та розподіл хімічних елементів між ними виконано на растровому електронному мікроскопі РЕМ 106И.

У третьому розділі представлено результати досліджень гідроабразивної зносостійкості, твердості та структури легованих чавунів залежно від вмісту в них основних легувальних елементів – хрому, марганцю та нікелю.

Для дослідження впливу хрому його додавали в діапазоні концентрацій від 4,5 до 31,6 % у чавун з вмістом біля 3,0 % вуглецю, а для підвищення прогартовуваності – 4,0...5,0 % Mn.

Установлено, що підвищення концентрації хрому до 21 % суттєво покращує експлуатаційні властивості марганцевого чавуну (рис. 1). Із збільшенням вмісту хрому кількість карбідів цементитного типу зменшується внаслідок утворення спеціальних карбідів хрому з вищою мікротвердістю (рис. 2). При цьому евтектика ледебуритного типу поступово витісняється евтектикою з розгалуженими диспергованими карбідами $(Cr, Fe, Mn)_7C_3$, яка значною мірою відповідає принципу Шарпі. Підвищенню твердості та зносостійкості сплаву сприяє збільшення кількості цієї евтектики та зменшення кількості аустеніту.

Подальше підвищення концентрації хрому в чавуні призводить до появи в структурі крупних заевтектичних карбідів типу Me_7C_3 , що кристалізуються у вигляді довгих голкоподібних шестигранних призм. Такі карбіди знижують зносостійкість і особливо міцність виливків, хоча твердість сплаву при цьому підвищується.

Отже найкращі характеристики одержано за вмісту в чавуні 18...20 % хрому.

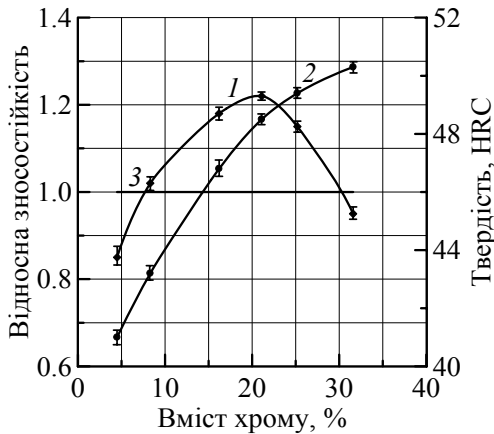


Рис. 1. Вплив хрому на твердість і зносостійкість високолегованого чавуну: 1 – відносна зносостійкість; 2 – твердість; 3 – еталонний чавун 280X28H2

Марганець додавали в чавун (вміст хрому 18...20 %) у діапазоні концентрацій від 2 до 12 %.

Підвищення вмісту марганцю знижує твердість і зносостійкість чавуну (рис. 3), що пояснюється збільшенням кількості аустеніту в основі металу та його стабілізацією (рис. 4). Крім того, марганець підвищує розчинність вуглецю в γ -залізі, що призводить до зменшення загальної кількості спеціальних карбідів хрому. У хромомарганцевих чавунах кожен відсоток марганцю знижує вміст карбідної фази на 1,0...1,4 %. Зносостійкість сплаву при цьому зменшується й за вмісту марганцю біля 9 % вона стає меншою, ніж еталонного сплаву 280X28H2.

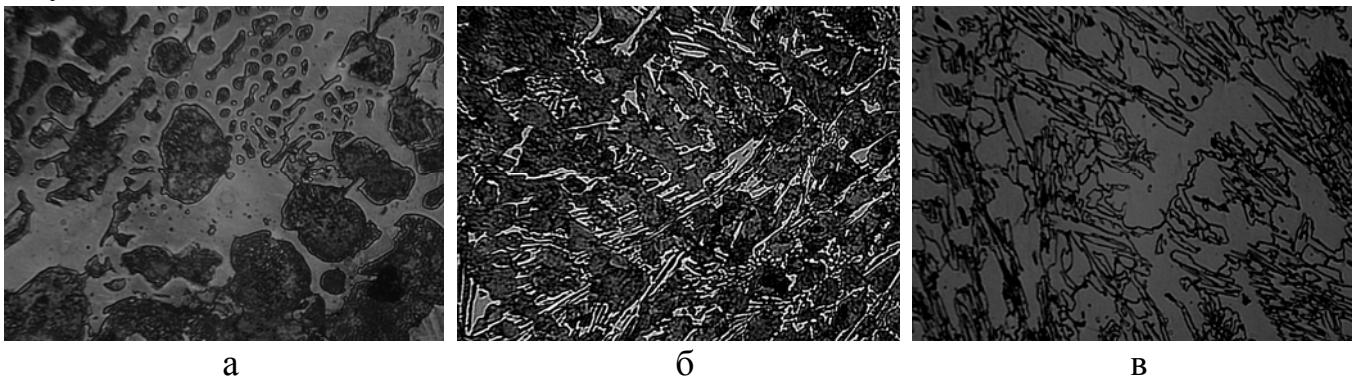


Рис. 2. Вплив хрому на структуру високолегованого чавуну: а – 4,5 % Cr; б – 21,1 % Cr; в – 25,2 % Cr ($\times 200$)

Враховуючи той факт, що марганець підвищує прогартовуваність хромистих чавунів, і при незначних його концентраціях залишковий аустеніт у чавуні здатний зміцнюватися під дією ударів абразивних частинок, високохромистий чавун має додатково вміщувати 3,0...5,0 % марганцю.

За результатами досліджень впливу хрому і марганцю на властивості зносостійких чавунів запропоновано базовий хромомарганцевий чавун з вмістом 18...20 % хрому та 3,5...4,5 % марганцю для проведення подальших досліджень.

У виробничих умовах часто використовують як шихтовий матеріал литі деталі, які відпрацювали свій ресурс і які в своєму складі вміщують нікель. Практичний і теоретичний інтерес представляє вивчення впливу різного вмісту нікелю на твердість і зносостійкість базового хромомарганцевого чавуну.

Досліджено вплив нікелю в діапазоні концентрацій до 2,9 % на властивості базового хромомарганцевого чавуну. Установлено, що найвищу зносостійкість має хромомарганцевий чавун без додавання нікелю (рис. 5), хоча твердість його нижча, ніж легованого нікелем. Це пояснюється тим, що нікель стабілізує аустеніт, зменшуючи його здатність зміцнюватись під впливом мікроударних навантажень.

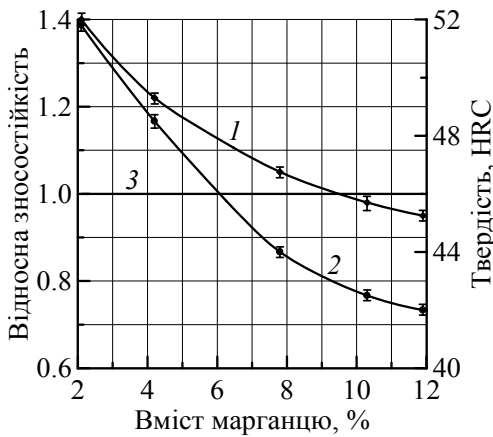


Рис. 3. Вплив марганцю на твердість і зносостійкість високолегованого чавуну: 1 – відносна зносостійкість; 2 – твердість; 3 – еталонний чавун 280X28H2

нікелю має визначатися для кожного конкретного виливка, виходячи з умов його експлуатації.

Підвищення твердості сплаву спричинено дисперсійним твердненням після виділення карбідів із насиченого хромомарганцевонікелевого аустеніту під час відносно повільного охолодження зразків у ливарній формі. Це проявляється особливо після збільшення нікелю до 1,0 %. Подальше підвищення вмісту нікелю в базовому чавуні практично не змінює ні твердість, ні зносостійкість.

Таким чином, з точки зору зносостійкості, нікель не може бути використаний як елемент, що здатний покращити цю експлуатаційну характеристику. Його доцільно вводити тільки разом з марганцем і титаном для підвищення пластичних властивостей зносостійких сплавів, які працюють в умовах помірних ударних навантажень. Кількість

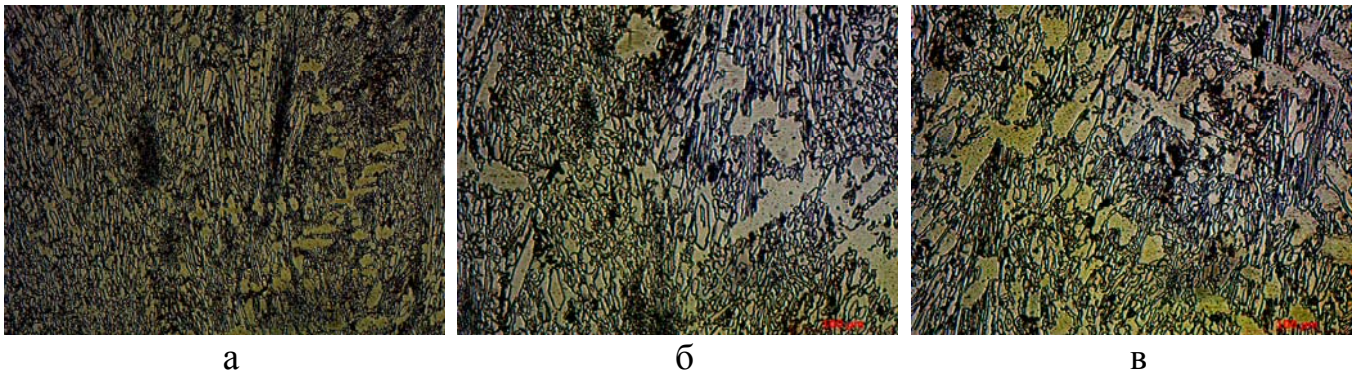


Рис. 4. Вплив марганцю на структуру високолегованого чавуну: а – 2,5 % Mn; б – 5,7 % Mn; в – 11,2 % Mn ($\times 200$)

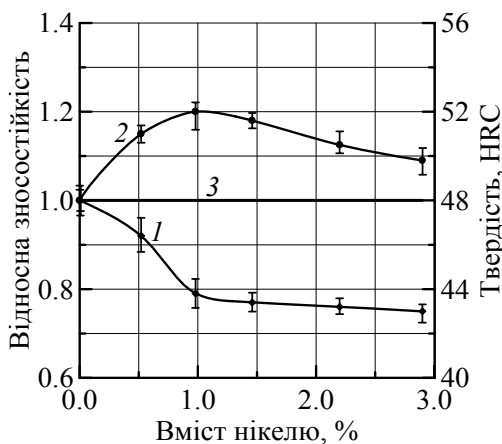


Рис. 5. Вплив нікелю на властивості базового чавуну: 1 – зносостійкість; 2 – твердість; 3 – базовий чавун

Для виготовлення литих деталей, що працюють в умовах абразивного або гідроабразивного зношування, вміст нікелю в хромомарганцевому чавуні, виплавленому методом переплавлення, може знаходитись на рівні 0,3...1,0 %.

У четвертому розділі викладено результати дослідження впливу процесів легування, мікролегування та модифікування на структуроутворення та експлуатаційні характеристики базового високолегованого хромомарганцевого чавуну. Мікролегування та модифікування здійснювали з метою дослідження впливу на первинну кристалізацію чавунів і зміну структурних складових металу у виливках.

На підставі літературного огляду для мікролегування вибрано титан, ванадій і сурму, а для модифікування – бор та рідкісноземельні метали.

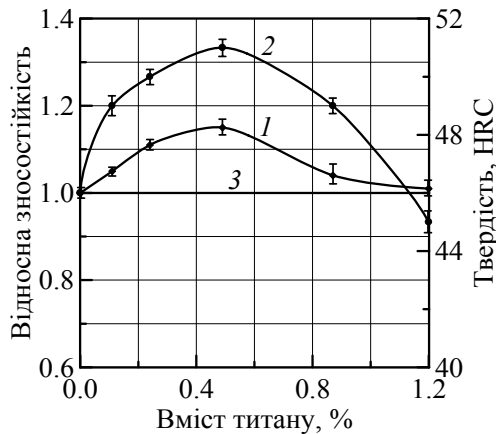


Рис. 6. Зносостійкість і твердість хромомарганцевого чавуну залежно від вмісту титану: 1 – відносна зносостійкість; 2 – твердість; 3 – базовий чавун

Досліджено вплив титану на характеристики хромомарганцевого чавуну в діапазоні концентрацій до 1,2 % (рис. 6 та рис. 7). Враховуючи високу спорідненість титану до кисню, його додавали в сплав після повного розкиснення рідкого металу алюмінієм.

Найвищі експлуатаційні та механічні властивості сплаву зафіксовано за вмісту 0,5 % титану. За більшого його вмісту, карбіди і карбонітриди титану розподіляються в структурі нерівномірно, утворюють колонії, які є концентраторами напружень і викирковуються під дією абразиву.

Отже для покращання експлуатаційних характеристик хромомарганцевого чавуну його доцільно мікролегувати титаном у межах 0,1...0,5 %.

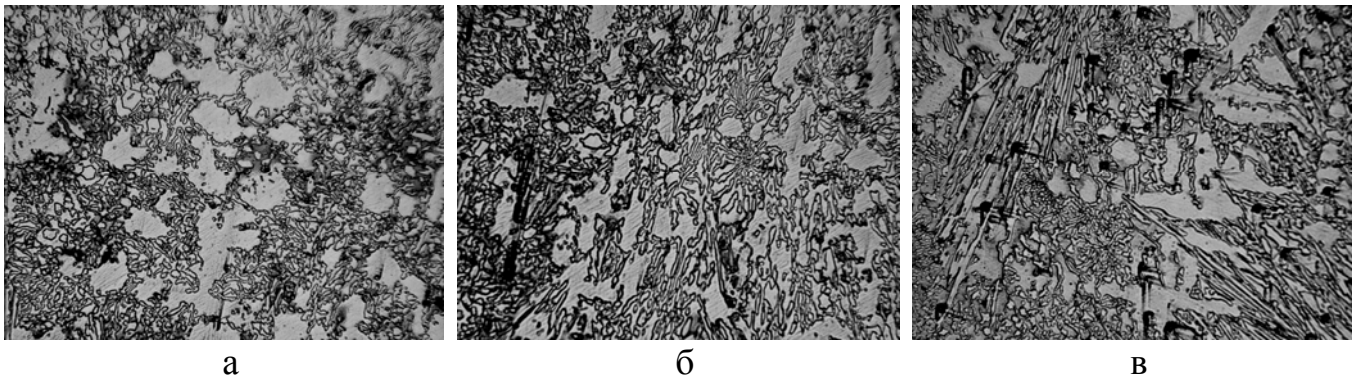


Рис. 7. Вплив титану на структуру базового хромомарганцевого чавуну: а – без титану; б – 0,40 % титану; в – 1,0 % титану ($\times 200$)

Вивчено вплив ванадію на властивості зносостійкого хромомарганцевого чавуну в діапазоні концентрацій до 1,1 %. Властивості чавуну показано на рис. 8, а структура – на рис. 9.

Установлено, що добавки до 0,3 % ванадію внаслідок його мікролегувальної та розкиснювальної дії знижують зносостійкість і твердість сплаву.

Це пояснюється тим, що після додавання в хромомарганцевий розплав невеликої кількості ванадію, він витрачається переважно на розкиснення металу та легування карбідів $(\text{Fe, Cr, Mn})_7\text{C}_3$, а з підвищенням його вмісту до 1 % суттєво зростають і зносостійкість, і твердість сплаву, оскільки збільшується кількість надтвердих карбідів ванадію.

Подальше збільшення вмісту ванадію недоцільне, оскільки утворюються великі карбіди округлої форми, які мають поганий зв'язок з металом матриці і швидко викирковуються із неї під дією абразиву.

Таким чином, для підвищення зносостійкості хромомарганцевого чавуну, його доцільно мікролегувати ванадієм у межах 0,5...0,8%.

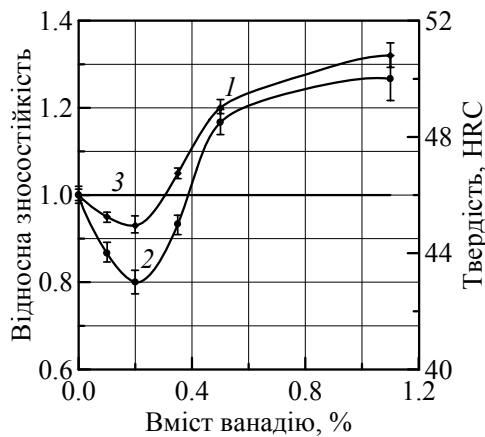


Рис. 8. Зносостійкість і твердість хромомарганцевого чавуну залежно від вмісту ванадію: 1 – відносна зносостійкість; 2 – твердість; 3 – базовий хромомарганцевий чавун

Досліджено вплив сурми на структуру та властивості базового хромомарганцевого чавуну в діапазоні концентрацій до 1,0 %. Приймаючи до уваги невисоку температуру плавлення сурми (630,5 °C), її додавали в ківш у процесі заповнення останнього рідким металом. Результати досліджень показано на рис. 10.

Невеликі присадки сурми (до 0,15%) в хромомарганцевий чавун сприяють підвищенню твердості та зносостійкості сплаву. Це пояснюється тим, що сурма впливає на евтектичне перетворення і на кристалізацію аустеніту. Сурма діє як поверхнево активний елемент, що адсорбуючись на поверхні кристалів, обмежує ріст первинних дендритів аустеніту під час кристалізації, і таким чином подрібнює структуру (рис. 11).

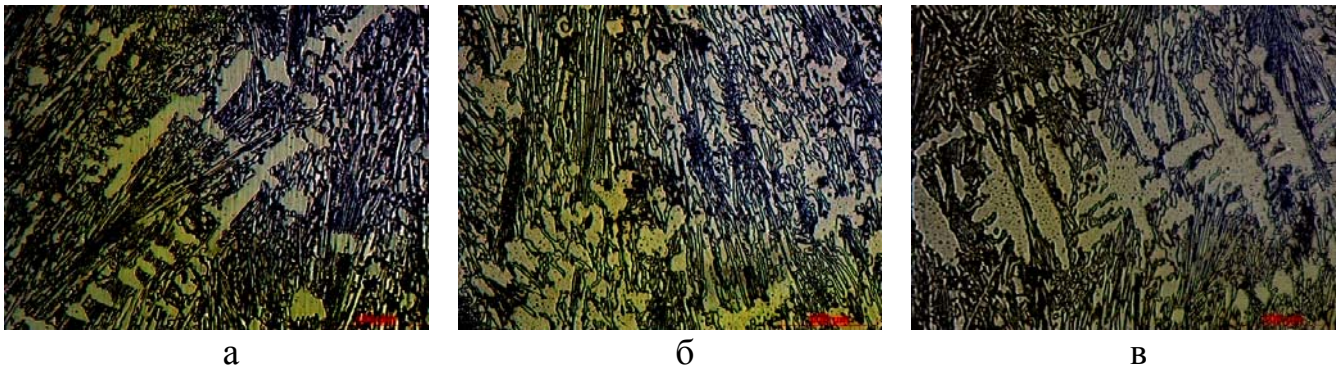


Рис. 9. Структура базового хромомарганцевого чавуну залежно від вмісту ванадію: а – без ванадію; б – 0,15 % ванадію; в – 0,8 % ванадію ($\times 200$)

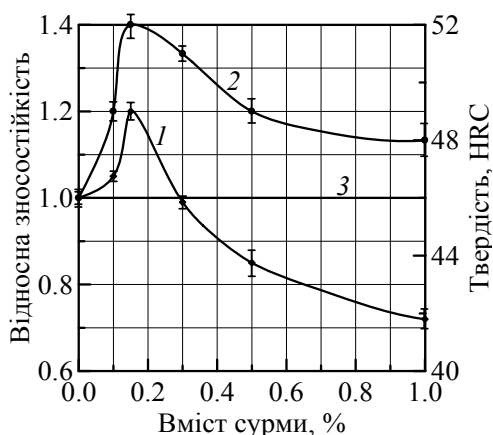


Рис. 10. Вплив сурми на властивості хромомарганцевого чавуну: 1 – відносна зносостійкість; 2 – твердість; 3 – базовий чавун

Подальші підвищення присадки сурми (більше 0,2 %) не доцільні, оскільки в таких кількостях сурма сприяє утворенню неметалевих включень і плівок, які погіршують зносостійкість металу. Проте слід зазначити, що в реальних промислових виливках ширина і довжина дендритів аустеніту набагато більша, ніж у дослідних зразках, а литі деталі зношуються в деяких місцях до утворення наскрізних отворів. Знос у таких місцях посилений якраз внаслідок наявних крупних дендритів, які мають меншу мікротвердість (3...4 ГПа), ніж карбіди (9...14 ГПа), і зношуються досить швидко, прискорюючи знос усієї деталі. У наших дослідженнях за максимального вмісту сурми (0,8...1,0 %) витягнуті дендрити не утворювалися, а набували глобулярної форми.

У реальних виливках позитивний ефект від

обмеження росту первинних дендритів може перевищити негативний ефект від утворення неметалевих включень, спричинених сурмою, а тому її підвищений вміст може бути цілком виправданий.

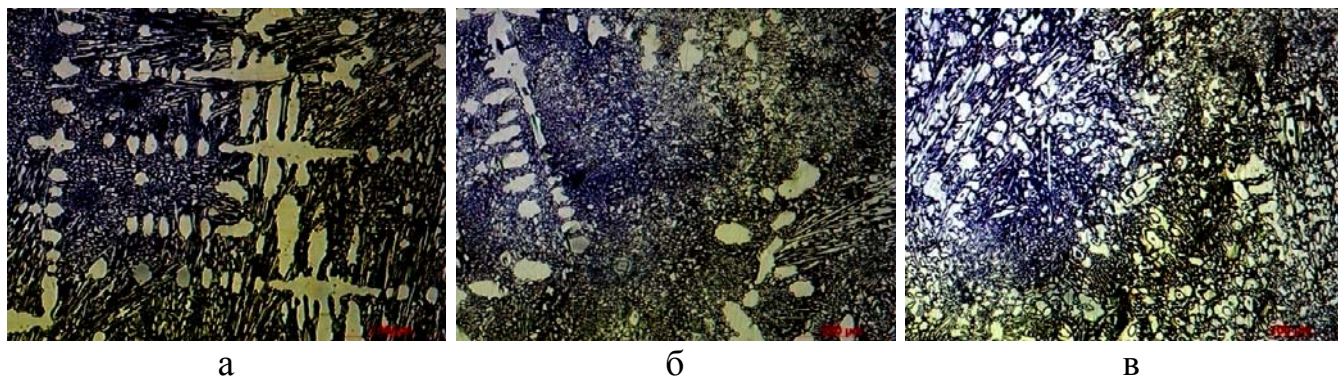


Рис. 11. Структура хромомарганцевого чавуну базового складу залежно від вмісту сурми: а – без сурми; б – 0,15 % сурми; в – 1,0 % сурми ($\times 200$)

Отже, для підвищення зносостійкості хромомарганцевого чавуну його необхідно додатково мікролегувати перед заливанням у форми сурмою в кількості 0,1...0,2 %, а в окремих випадках (для подрібнення структури та покращення механічного оброблення) – до 0,8 %, оскільки за такого вмісту сурми не утворюються розгалужені дендрити аустеніту.

Вплив **бору** на експлуатаційні характеристики хромомарганцевого чавуну вивчено в діапазоні концентрацій до 0,1 % (за присадкою). Додаткове оброблення чавуну бором суттєво підвищує твердість і зносостійкість металу (рис. 12).

Важливий вплив бору на властивості чавуну полягає в його модифікувальній дії на процеси кристалізації (рис. 13), внаслідок чого подрібнюється первинне зерно, а також здійснюється додаткове розкиснення. Бор змінює і стан меж зерен, і межових шарів, що позитивно позначається на властивостях чавуну.

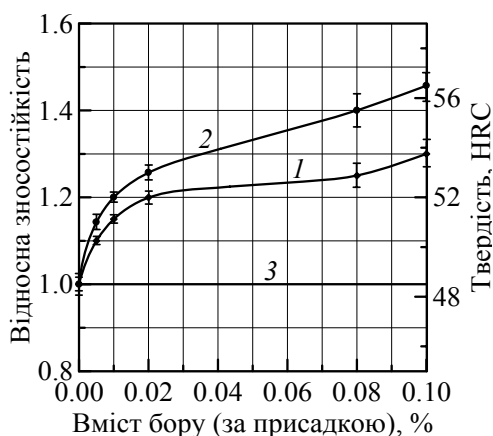


Рис. 12. Зміна зносостійкості та твердості базового хромомарганцевого чавуну, модифікованого бором: 1 – відносна зносостійкість; 2 – твердість; 3 – базовий чавун

Більша частина бору в чавуні знаходиться у вигляді боридів і карбоборидів різних металів, які мають високу твердість і крихкість.

Бор здійснює сильний вплив на процеси кристалізації чавуну як поверхнево-активний елемент, змінює стан меж зерен, подрібнює їх і додатково розкиснює метал, що позитивно впливає на його експлуатаційні властивості. Бор також усуває транс-кристалізацію в білих чавунах (рис. 13).

Проте за результатами проведених досліджень можна зробити висновок: до оброблення чавуну бором слід підходити обережно, оскільки вже при вмісті 0,03 % бору чавун набуває підвищеної крихкості, а його зносостійкість залишається без змін.

Отже для підвищення твердості і зносостійкості хромомарганцевих чавунів їх доцільно модифікувати бором у межах 0,005...0,020 %.

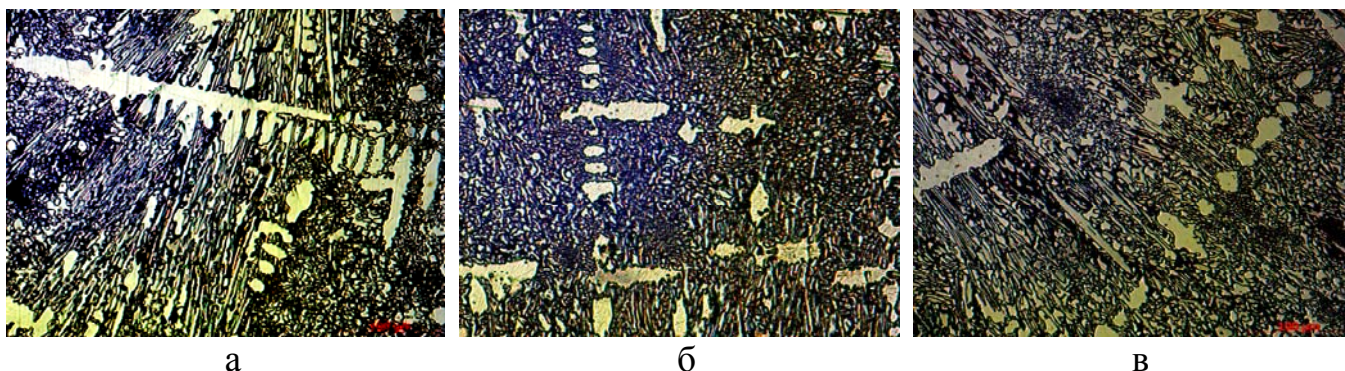


Рис. 13. Структура хромомарганцевого чавуну базового складу після присадок бору: а – без бору; б – 0,01 % бору; в – 0,1 % бору ($\times 200$)

Вплив РЗМ на експлуатаційні характеристики хромомарганцевого чавуну вивчено в діапазоні концентрацій до 0,8 % (за присадкою). РЗМ у вигляді лігатури МЦ50ЖЗ з вмістом 50 % Се, 30 % La, 10 % Nd додавали в тигель печі безпосередньо перед випусканням металу.

Установлено, що додаткове оброблення хромомарганцевого чавуну присадками РЗМ (до 0,25 %) підвищує зносостійкість і твердість металу (рис. 14).

РЗМ ефективно зв'язують сірку та кисень у хромомарганцевих чавунах, змінюють форму неметалевих вкраплин з кутастої або продовгуватої на глобулярну, яка менше знеміцнює сплав.

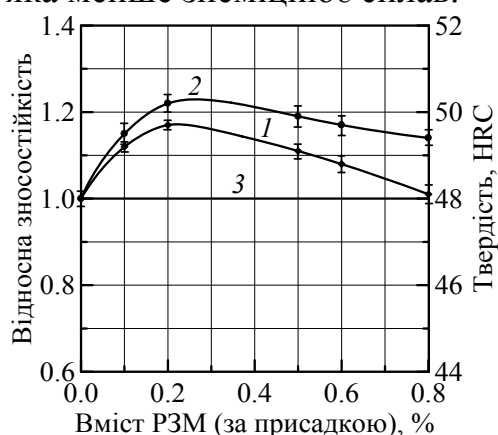


Рис. 14. Зміна зносостійкості та твердості базового хромомарганцевого чавуну, модифікованого присадками РЗМ: 1 – відносна зносостійкість; 2 – твердість; 3 – базовий чавун

Присадки РЗМ помітно подрібнюють структуру вихідного хромомарганцевого чавуну (рис. 15). Сполуки церію, лантану та неодиму під час кристалізації діють як поверхнево-активні речовини на межі дендритів аустеніту, і обмежують їх ріст. Тут є певна аналогія з впливом сурми. Крім того, в сплаві, що вміщує 0,1 % РЗМ, евтектика $\gamma + (\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$ має дисперснішу будову.

Отже для підвищення зносостійкості і твердості хромомарганцевих чавунів їх доцільно модифікувати присадками РЗМ у межах 0,10...0,25 %.

Комплексне легування декількома елементами за малого вмісту кожного з них ефективніше впливає на властивості сплавів, ніж легування одним чи двома елементами за більшого їх вмісту. Це пояснюється тим, що легувальні елементи впливають на властивості сплавів не аддитивно, а по-своєму підсилюючи один одного, тобто проявляють синергійний ефект. Додавання в чавун активних карбідоутворювальних елементів – титану, ванадію, ніобію, цирконію тощо – суттєво підвищує мікротвердість складнолегованих карбідів, сприяє підвищенню твердості і зносостійкості сплаву внаслідок утворення дрібнодисперсних високо-твердих карбідів. Ці елементи також сприяють подрібненню структури сплаву через утворення додаткових центрів кристалізації, тобто через модифікування 2-го роду.

Одночасне додавання елементів, що діють як поверхнево-активні добавки (РЗМ, сурма – в наших дослідженнях), призводить до обмеження росту крупних дендритів і, відповідно, подрібнення структури сплаву внаслідок модифікування 1-го роду.

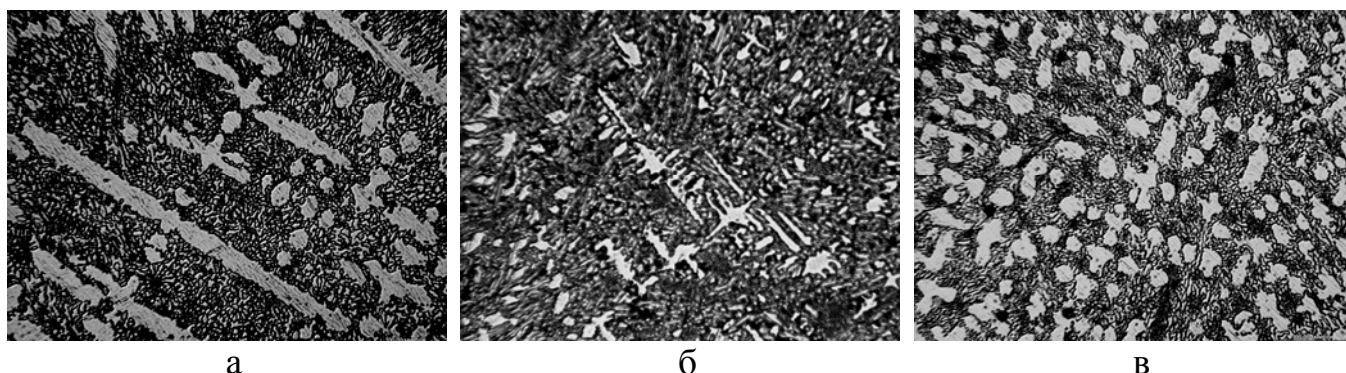


Рис. 15. Структура базового хромомарганцевого чавуну залежно від присадок РЗМ: а – без РЗМ; б – 0,2 % РЗМ; в – 0,5 % РЗМ ($\times 200$)

Вивчено спільний вплив титану (до 0,2 %) і РЗМ (до 0,2 %) на структуру і властивості базового зносостійкого чавуну.

Присадки в чавун титану спільно з РЗМ суттєво подрібнюють структуру вихідного чавуну (рис. 16). У центральній частині зразків значно зменшується ширина і особливо довжина дендритів первинного аустеніту та подрібнюється евтектика $\gamma + (\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$.

Титан утворює карбіди та карбонітриди, які розташовані переважно в аустенітній матриці та на межах фаз матриця-карбід (рис. 17, а). У карбідах хрому їх значно менше. Враховуючи відповідність типів кристалевих ґраток вони можуть бути центрами кристалізації аустеніту, і, таким чином, інокулювати розплав.

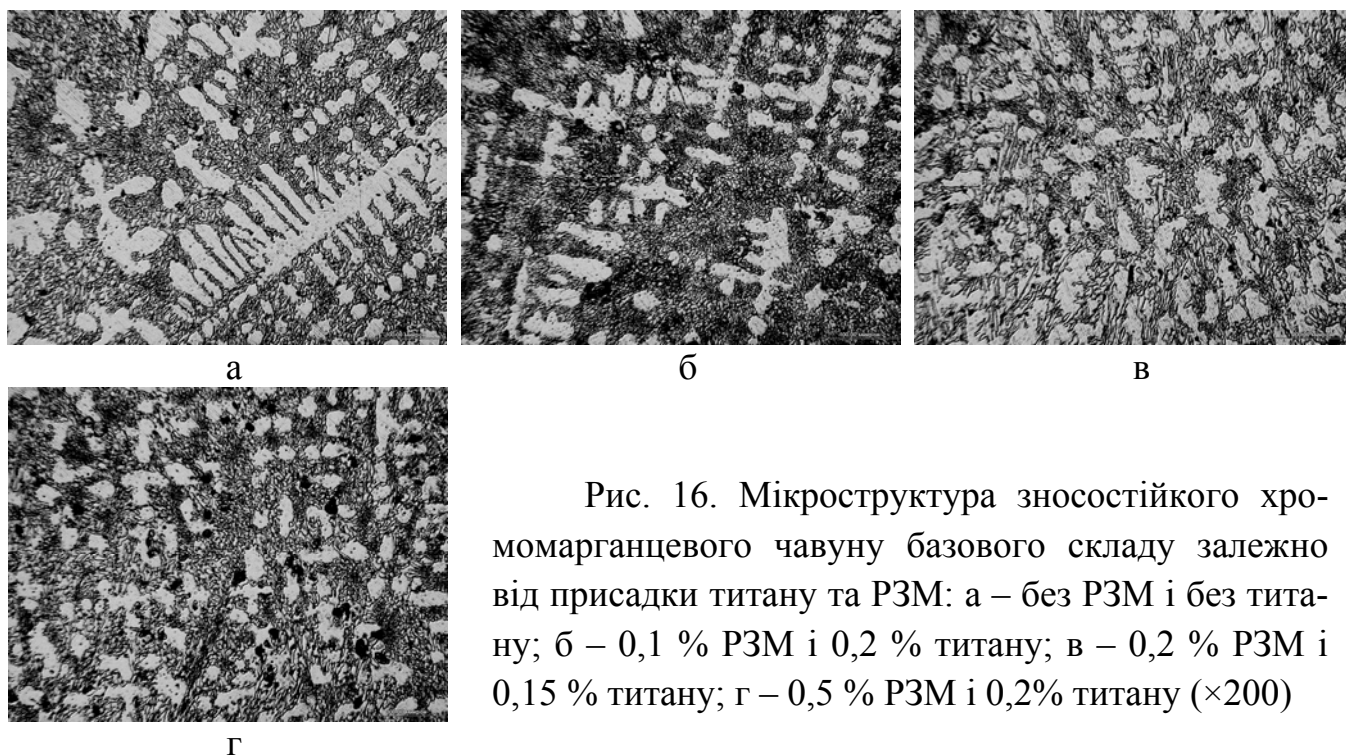


Рис. 16. Мікроструктура зносостійкого хромомарганцевого чавуну базового складу залежно від присадки титану та РЗМ: а – без РЗМ і без титану; б – 0,1 % РЗМ і 0,2 % титану; в – 0,2 % РЗМ і 0,15 % титану; г – 0,5 % РЗМ і 0,2% титану ($\times 200$)

У той же час тугоплавкі частинки TiC або $Ti(C, N)$, що утворилися до кристалізації основної маси розплаву, перебуваючи на межі зерен, ефективно протистоять росту фаз, подрібнюють їх і сприяють ефекту модифікування чавуну. Карбіди титану також можуть бути зародками для утворення первинних шестигранних карбідів хрому $(Cr, Fe)_7C_3$, і подрібнювати їх.

РЗМ ефективно зв'язують сірку та кисень у високолегованих чавунах і знаходяться в складі сульфідів й оксисульфідів (рис. 17, б) переважно сферичної форми. Оксисульфіди РЗМ рівномірно розподілені в структурі, їх кількість зростає із збільшенням загального вмісту РЗМ в сплаві. Крім того, зустрічаються вкраплини, в яких сульфід РЗМ знаходиться поруч з карбонітридом титану (рис. 17, б).

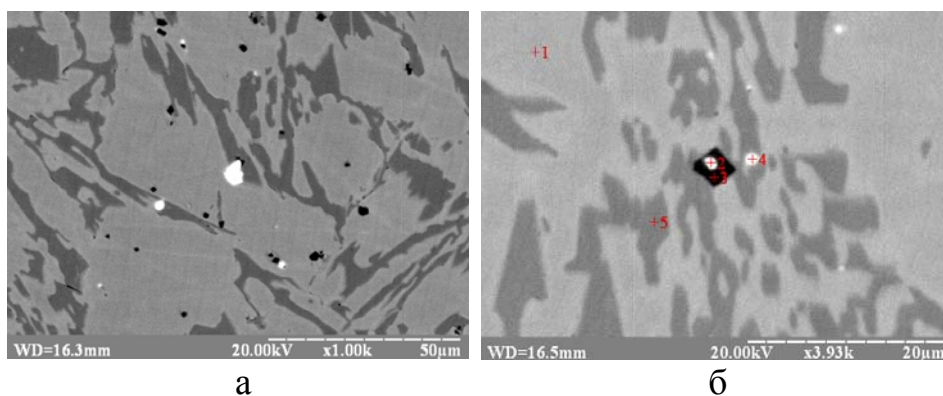


Рис. 17. Мікροструктура базового хромомарганцевого чавуну, що вміщує присадки титану та РЗМ $\times 1000$ (а) і $\times 4000$ (б)

Дослідженнями структури травлених зразків за великих збільшень на оптичному, а також на скануючому електронному мікроскопі встановлено, що в складі дендритів аустеніту модифікованих РЗМ і титаном чавунів наявні дрібні часточки розмірами 1...4 мкм (рис. 18, а, б), які підвищують мікротвердість зерен первинного аустеніту з 3,2 до 4,2 ГПа.

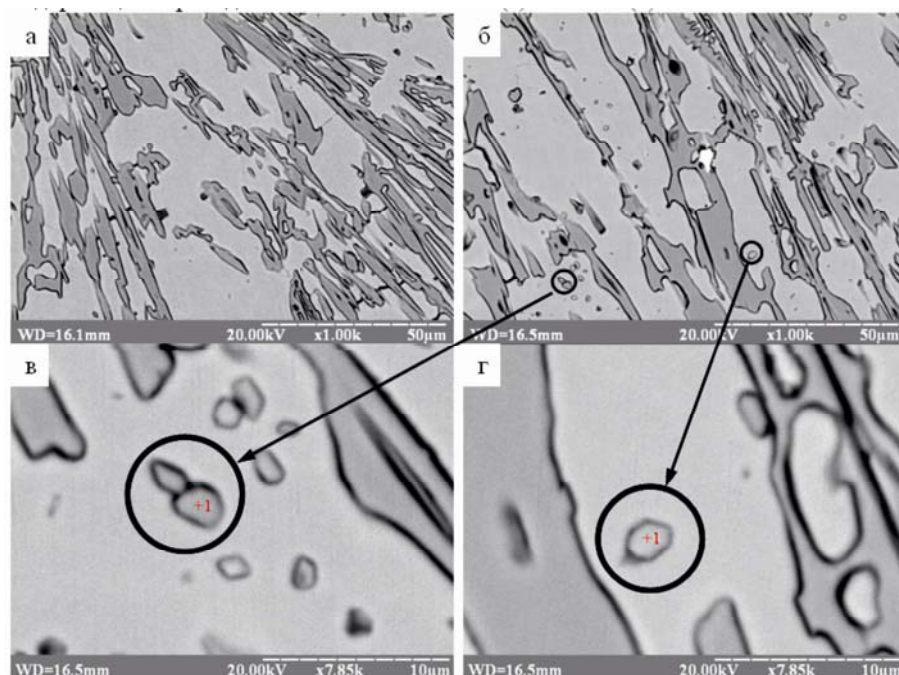


Рис. 18. Мікροструктура зносостійкого хромомарганцевого чавуну базового складу у вихідному стані (а), модифікованого присадками 0,15 % титану та 0,2 % РЗМ (б) і дрібнодисперсні вкраплини карбідів (в, г)

Найбільша кількість таких вкраплин виявлена в сплавах з вмістом 0,2 і 0,5 % РЗМ. Очевидно, це дрібнодисперсні карбіди хрому типу $(Cr, Fe, Mn)_7C_3$ (рис. 18), що не входять до складу евтектики.

Максимальну зносостійкість (вищу на 15 %) зафіксовано в сплаву, модифікованому присадками 0,15 % титану та 0,2 % РЗМ, при цьому твердість чавуну досягає 48...50 HRC і практично не змінюється після модифікування.

Отже для покращення структури, нейтралізації впливу шкідливих домішок, підвищення гідроабразивної зносостійкості хромомарганцеві чавуни доцільно під час випускання розплаву з плавильного агрегату додатково обробляти присадками титану в кількостях 0,15...0,2 % і РЗМ – в кількостях 0,15...0,25 % (за присадкою).

Крім високих експлуатаційних характеристик розроблені чавуни мають задовільні ливарні властивості.

Чавуни за температури заливання форм 1400 ± 10 °С, що приблизно на 100 °С перевищує температуру ліквідус, мають рідкотекучість 460...760 мм (табл. 1). Така рідкотекучість перевищує рідкотекучість вуглецевої сталі, еталонного хромонікелевого чавуну 280X28H2, та трохи поступається рідкотекучості сірого чавуну і задовольняє вимогам щодо заливання форм, навіть під час виробництва тонкостінних та складних за конфігурацією виливків.

Лінійна усадка рекомендованих чавунів складає 1,8...2,1 %, що вище, ніж сірого чавуну, і є приблизно такою, яку мають середньолеговані сталі та чавун 280X28H2.

Таблиця 1

Ливарні властивості рекомендованих хромомарганцевих чавунів

Індекс сплаву	Позначення сплаву	Ливарні властивості рекомендованих сплавів			Призначення сплаву
		практична рідкотекучість, мм	лінійна усадка, %	відносна тріщиностійкість*	
1	280X28H2 (еталон)	450...500	1,9...2,0	1	Литі деталі багерних насосів (робочі колеса, корпуси, бронедиски)
2	290X19Г4	500...760	2,0...2,1	1	Те саме
3	290X19Г4Н	520...750	1,9...2,0	1,27	Те саме
4	290X19Г4Т	480...750	1,9...2,1	1,24	Деталі багерних насосів і шламових транспортерів
5	290X19Г4Ф	500...720	1,9...2,1	1,22	Те саме
6	290X19Г4Р	460...690	1,85...2,0	1,18	Зносостійкі деталі з мінімальною кількістю механічного оброблення (коліна пульпопроводів, бронедиски насосів)
7	290X19Г4Су	490...720	1,8...2,0	1,19	Литі деталі багерних насосів (робочі колеса, корпуси, бронедиски)
8	290X19Г4ц**	490...750	1,9...2,1	1,15	Те саме

* Відносно чавуну 280X28H2

** Сплав оброблений 0,2 % РЗМ

Розміри надливів слід вибирати та визначати їх розміри за рекомендаціями для сталевих литва. Враховуючи складність відокремлення надливів від виливків їх треба проектувати легковідокремлюваними з використанням спеціальних стрижнів.

Об'ємна усадка рекомендованих чавунів дорівнює 7,2...7,8 % і реалізується у вигляді розсіяної усадкової поруватості.

Схильність виливків із рекомендованих чавунів утворювати гарячі або холодні тріщини визначається підвищеною лінійною усадкою, порівняно низькою міцністю, особливо за температур утворення гарячих тріщин, невисокою пластичністю та низькою теплопровідністю, яка призводить до росту первинного зерна і зниження міжзеренних зв'язків.

Отже, за сукупністю ливарних властивостей рекомендовані чавуни є перспективними матеріалами для виготовлення виливків, що працюють в умовах абразивного та гідроабразивного зношування.

У п'ятому розділі «Термічне оброблення зносостійких хромомарганцевих чавунів» досліджено вплив різних режимів відпалу (рис. 19) на твердість та структуру шести варіантів хромомарганцевого чавуну базового складу, а також додатково мікролегованого і модифікованого титаном, ванадієм, бором та РЗМ (табл. 2). Чавун з індексом 102 є комплексно модифікованим (В, Ti, V, РЗМ), виплавлений спеціально для дослідження можливостей його термічного оброблення.

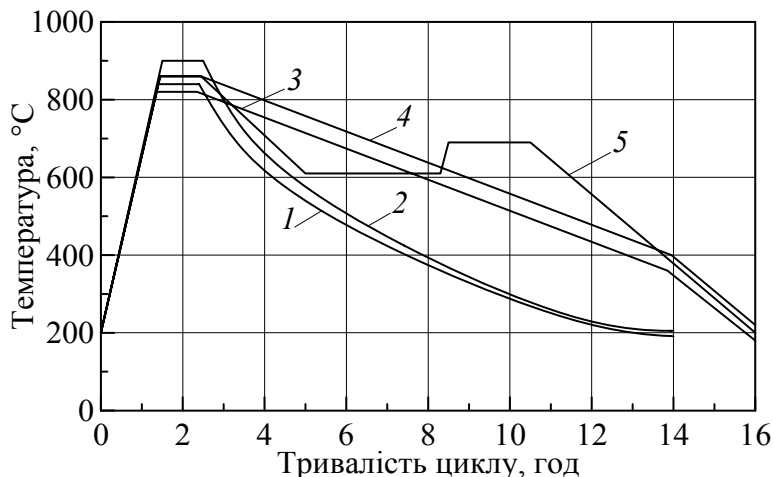


Рис. 19. Режими відпалу хромомарганцевих чавунів

За даними технічної літератури відпал хромомарганцевих чавунів в діапазоні температур 800...1050 °C не завжди зменшує твердість чавуну, а інколи вона навіть стає вищою ніж у литому стані. Отже перспективним може бути ізотермічний ступінчастий відпал. Він менш чутливий до температури аустенізації, легше контролювати зміну температури, а охолодження та нагрівання практично не регламентуються.

Таблиця 2

Хімічний склад досліджених хромомарганцевих чавунів

Інд. плавки	Позначення чавуну	Хімічний склад, %							
		C	Si	Cr	Mn	Ti	РЗМ*	P	S
								не більше	
21	300X20ГЗ	3,0	0,6	19,6	2,5	-	-	0,05	0,05
41	320X19ГЗ	3,2	0,8	19,1	3,0	-	-	0,05	0,05
51	320X20ГЗ	3,2	0,7	19,8	3,2	-	-	0,05	0,05
92	280X20Г4Тц	2,8	1,0	20,0	4,4	0,1	0,1	0,05	0,05
101	290X19Г4Т	2,9	0,9	19,2	3,9	0,1	-	0,05	0,05
102	290X19ГЗРТФц**	2,9	1,0	19,1	2,7	0,2	0,2	0,05	0,05

* за присадкою

** додатково вміщує 0,02 % бору та 0,1 % ванадію

Твердість литих зразків різних плавок коливалась у межах 49...56 HRC (табл. 3), причому вона мало залежала від вмісту вуглецю (в межах 2,8...3,2 %), кремнію (0,6...1,0 %), хрому (19,1...20,0 %) та модифікувальних добавок (до 0,2 %

титану та до 0,2 % РЗМ). Основним елементом, що впливає на твердість зразків у литому стані, є марганець (рис. 20).

Таблиця 3

Твердість досліджених хромомарганцевих чавунів в литому стані та після різних режимів відпалу

Позначення чавуну	Твердість, HRC					
	у литому стані	після відпалу за режимом №1	після відпалу за режимом №2	після відпалу за режимом №3	після відпалу за режимом №4	після відпалу за режимом №5
300X20ГЗ	56,0	44,0	42,0	40,0	40,0	40,0
320X19ГЗ	53,0	48,0	45,0	48,0	52,0	43,0
320X20ГЗ	51,5	48,0	52,0	47,5	45,0	46,5
280X20Г4Тц	49,0	60,0	59	56,0	53,0	55,0
290X19Г4Т	50,0	46,0	48,5	50,0	50,0	50,0
290X19ГЗРТФц	54,0	46,2	52	43,0	44,0	39,5

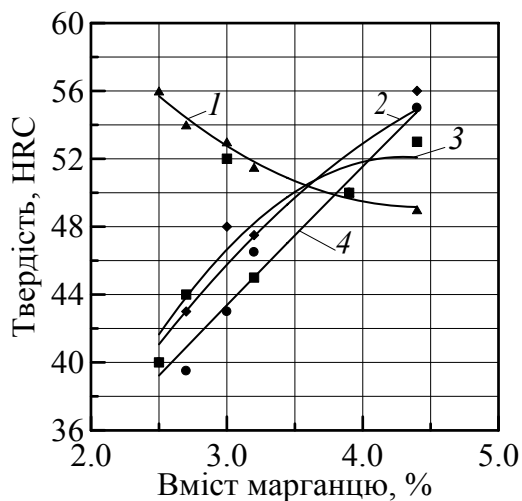


Рис. 20. Залежність твердості хромомарганцевого чавуну від вмісту марганцю: 1 – у литому стані; 2 – після відпалу за режимом № 3; 3 – після відпалу за режимом № 4; 4 – після ступінчастого відпалу марганцю від 2,5 до 4,4 % твердість термооброблених зразків зростає з 39,5 до 55 HRC. За вмісту марганцю 3,9 % і вище твердість зразків після відпалу не знижувалась, а навіть зростала.

Структура зразків у литому стані складається переважно з первинних дендритів аустеніту та евтектики $\gamma + (\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$. Різницю твердості литих зразків можна пояснити різною кількістю аустеніту, внаслідок різного вмісту марганцю, оскільки

Після відпалу за режимами №1 та №2 (нагрівання до температур 840 та 900°C, витримання протягом години та охолодження разом з піччю) твердість чавунів зменшувалась незначно, або навіть зростала, що негативно впливає на їх механічне оброблення.

Найтехнологічнішим у даному дослідженні виявився ступінчастий відпал. Твердість зразків хромомарганцевого чавуну після ступінчастого відпалу коливалась у межах 39,5...55,0 HRC (табл. 3), причому найнижчу твердість мали зразки з найменшим вмістом марганцю (зразки 21 і 102), а найвищу – з максимальним вмістом марганцю (зразок 92). Твердість зразків чавуну різних плавок після термічного оброблення знаходиться практично в прямолінійній залежності від вмісту марганцю (рис. 20) і мало залежить від вмісту інших елементів у межах коливань хімічного складу (табл. 2). Із збільшенням кількості

ки останній стабілізує аустеніт і підвищує розчинність вуглецю в γ -залізі, внаслідок чого також дещо зменшується кількість хромистих карбідів у чавуні.

Аустеніт чавунів з мінімальним вмістом марганцю (зразки 21 та 102) під час ступінчастого відпалу розпадається повністю на зернистий перліт (м'які продукти розпаду) різної дисперсності (рис. 21), що призводить до зниження твердості до 39...40 HRC (табл. 3).

Високохромисті чавуни з такою твердістю уже можуть задовільно оброблятися на металорізальних верстатах традиційними методами, що підтверджено попередніми випробовуваннями. Для кращої оброблюваності необхідно зменшувати кількість марганцю в чавуні (рис. 20), або ж зменшувати кількість вуглецю, який є основним регулятором кількості карбідів.

У сплавів з середнім вмістом марганцю (сплави 41 і 51) твердість знизилась всього на 5...10 од (табл. 3). Матриця цих сплавів складається з армованого вторинними карбідами аустеніту, що не розпався, та частково продуктів розпаду. У результаті цього твердість сплаву зменшилась недостатньо для проведення механічного оброблення.

У зразках 101 і 92 після ступінчастого відпалу зниження твердості не відбулось, а в чавуні з максимальним вмістом марганцю (4,4 %) твердість навіть зросла (табл. 3). Насичений марганцем аустеніт таких чавунів розпадається лише частково, натомість в ньому виокремлюється велика кількість вторинних карбідів, що додатково зміцнюють і підвищують твердість сплаву. Частковий розпад аустеніту починається в місцях з мінімальним вмістом марганцю, внаслідок його ліквідації в зернах дендритів.

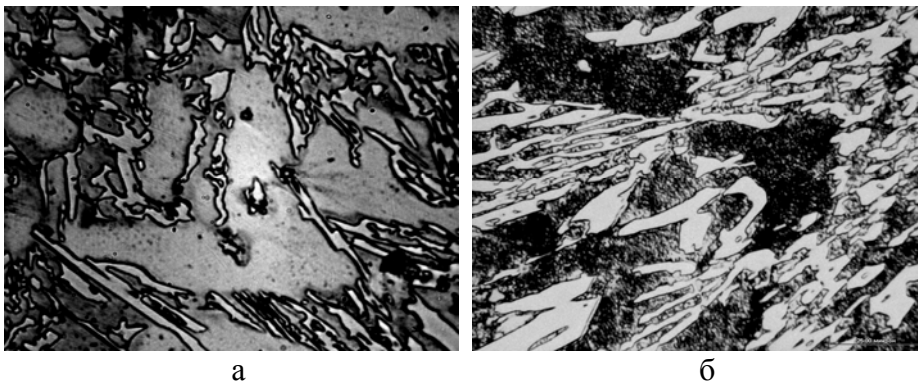


Рис. 21. Структура хромомарганцевого чавуну 290Х19ГЗРТФц (з вмістом 2,7 % Mn): а – в литому стані; б – після ступінчастого відпалу ($\times 500$)

Отже за даними впливу різних режимів відпалу можна зробити наступні висновки:

1. Для виготовлення литих зносостійких деталей, що потребують механічного оброблення, необхідно застосовувати хромомарганцеві чавуни (2,8...3,2 % С, 18...21 % Cr) із зниженим вмістом марганцю (до 2,5...2,7 %).

2. Для зниження твердості хромомарганцевого чавуну до рівня 40 HRC і нижче його необхідно піддавати відпалу за одним із наступних режимів:

- нагрівання до температури 840 °C (± 20 °), витримка протягом 1 год (не менше 1 год на кожні 20 мм товщини стінки деталі), охолодження в печі із швидкістю не вище 40 °C/год;

– нагрівання до 870 °С, витримування протягом 1 год, охолодження з піччю до 610 °С, витримування протягом 3 год, нагрівання до 690 °С, витримування протягом 2 год та охолодження з піччю (ступінчастий відпал).

3. Використання ступінчастого відпалу може бути особливо ефективним для чавунів з вмістом вуглецю на нижній межі. При цьому слід обирати оптимальні температури початкового та ізотермічного витримування (з урахуванням вмісту Mn).

Максимальну твердість та зносостійкість мають високохромисті чавуни з мартенситною та мартенситно-аустенітною структурою металевої основи.

Для отримання максимальної твердості і зносостійкості досліджено вплив режимів гартування на повітрі на структуру та твердість п'яти варіантів хімічного складу хромомарганцевих чавунів (табл. 4).

З урахуванням попередніх досліджень впливу режимів відпалу, хімічний склад досліджених чавунів відрізнявся в основному вмістом марганцю (від 2 до 4 %), оскільки останній сильніше за інші елементи впливає на структуру та твердість чавунів як в литому стані, так і після термічного оброблення.

Також досліджений комплексно модифікований чавун 290X19ГЗРТФ_ц, оскільки він є перспективним для виготовлення зносостійких деталей та задовільно оброблюється різанням у відпаленому стані. Гартування (з попереднім витримуванням протягом 1 год) проводили від температур 800...1100 °С.

За недостатньої температури витримування (800 °С) в структурі металевої основи чавунів наявні продукти перлітного розпаду аустеніту, незначна кількість вторинних карбідів та залишковий аустеніт, внаслідок чого твердість чавуну низька (рис. 22). З підвищенням температури витримування та гартування металева основа збіднюється легувальними елементами, внаслідок виділення великої кількості вторинних карбідів, одночасно підвищується температура мартенситного перетворення.

Таблиця 4

Хімічний склад досліджених хромомарганцевих чавунів

Інд. плавки	Умове позначення чавуну	Хімічний склад, %							
		C	Si	Cr	Mn	Ti	PЗМ*	P	S
								не більше	
15	300X20Г2	3,0	0,6	19,6	2,1	-	-	0,05	0,05
41	320X19Г3	3,2	0,8	19,1	3,0	-	-	0,05	0,05
51	320X20Г3	3,2	0,7	19,8	3,5	-	-	0,05	0,05
100	290X19Г4	2,9	0,9	19,2	3,9	-	-	0,05	0,05
102	290X19ГЗРТФ _ц **	2,9	1,0	19,1	2,7	0,2	0,2	0,05	0,05

* за присадкою

** додатково вміщує 0,02 % бору та 0,1 % ванадію

Металева основа таких чавунів складається з мартенситу, вторинних карбідів (виокремлених у процесі витримування) та залишкового аустеніту (рис. 23).

З підвищенням температури гартування до 1100 °С твердість чавунів знижується до 48...53 HRC. За таких температур концентрація вуглецю та легувальних елементів в аустеніті збільшується внаслідок розчинення вторинних карбідів, стабільність аустеніту в перлітній області підвищується.

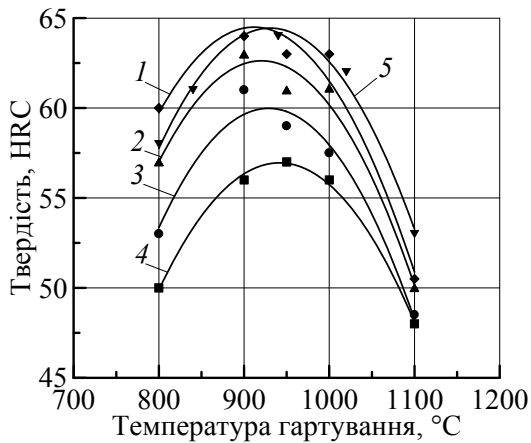


Рис. 22. Залежність твердості хромомарганцевого чавуну від температури гартування:
 1 – чавун 300X20ГЗ; 2 – чавун 320X19ГЗ;
 3 – чавун 320X20ГЗ; 4 – чавун 290X19Г4;
 5 – чавун 290X19ГЗРТФц

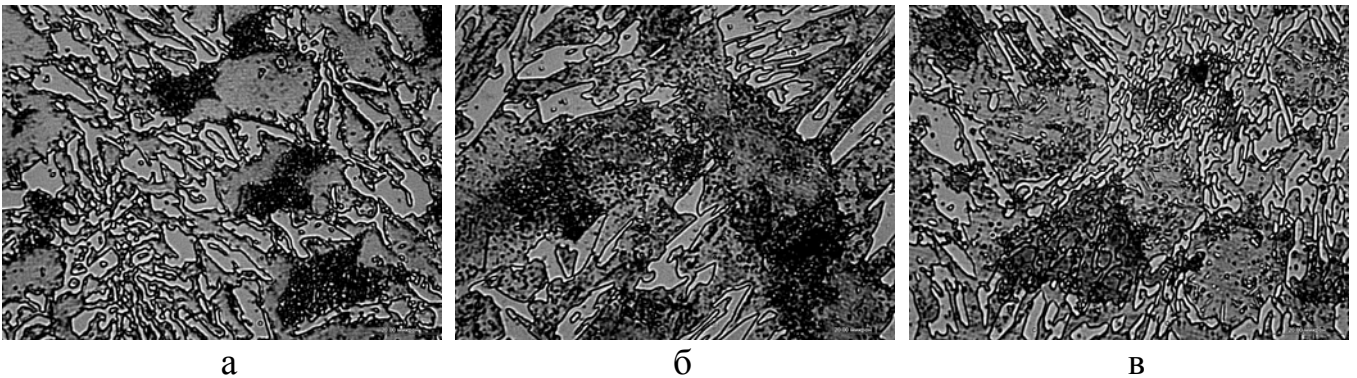


Рис. 23. Структура хромомарганцевого чавуну 290X19ГЗРТФц (2,7 % Mn) залежно від температури гартування: а – 800 °C; б – 950 °C; в – 1050 °C ($\times 500$)

Проте одночасно знижується температура мартенситного перетворення і збільшується кількість залишкового аустеніту, що і призводить до зниження твердості. Підвищені температури гартування можна застосовувати в разі необхідності збільшення міцності чавуну, що може бути пов'язано з підвищеними ударними навантаженнями під час експлуатації деталей.

Отже для досягнення максимальної твердості та зносостійкості хромомарганцевих чавунів їх необхідно гартувати з температур 900...950 °C на повітрі.

У шостому розділі викладені результати аналізу технологічних процесів виготовлення литих деталей багерних насосів в умовах ливарного цеху СО «Електроремонт», що дало можливість визначити окремі відхилення від існуючих норм, які базуються на основі досягнень ливарної науки. З метою використання нових сплавів здійснено корегування технологічних процесів виготовлення корпусів і коліс багерних насосів, а також запропоновано технологію виготовлення литих шламових шнекових транспортерів у вигляді окремих витків.

За розробленими технологіями плавлення зносостійких чавунів та ливарної форми в ливарному цеху СО «Електроремонт» системи «Донбасенерго» із чавуну 290X19Г4ТР виготовлена партія комплектів корпус+колесо+диск для багерного насосу 12ГРТ-8 в кількості 5 шт. для Ладижинської ТЕС. У теперішній час здійснюється апробація комплекту виробів на Ладижинській ТЕС.

У розділі наведено розраховування економічної ефективності використання рекомендованих зносостійких хромомарганцевих чавунів замість застосовуваного в

промисловості чавуну 280Х28Н2 для виготовлення деталей, що працюють в умовах гідроабразивного зношування.

Розрахунки виконані з урахуванням вартості матеріалів на 1 травня 2014 р.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена нова методика визначення зносостійкості сплавів для литих деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного та гідроабразивного зношування в нейтральному середовищі.

2. На підставі термодинамічних властивостей хімічних елементів та сучасного уявлення щодо структуроутворення зносостійких сплавів на основі заліза дослідженнями встановлено, що для підвищення експлуатаційних характеристик високолегованих білих чавунів необхідно визначати співвідношення основних легувальних елементів – хрому та марганцю – залежно від конкретних умов експлуатації деталей та їх конфігурації.

3. Для виготовлення литих деталей, що працюють в умовах гідроабразивного зношування, визначено найбільш раціональне співвідношення основних елементів в чавуні: 2,8...3,2 % С, 18...20% хрому і 3,5...4,5% марганцю. Чавуну надано умовне позначення 290Х19Г4. Його зносостійкість у порівнянні з чавуном 280Х28Н2 вища на 22 %.

4. Для підвищення експлуатаційних характеристик рекомендованого хромо-марганцевого чавуну (на 15...20 %) його доцільно мікролегувати окремо титаном у межах 0,1...0,5 %, ванадієм – 0,5...0,8 % або сурмою – 0,1...0,2 % та модифікувати бором у межах 0,005...0,020 % (за присадкою) або РЗМ у межах 0,1...0,25 % (за присадкою), а також спільною присадкою титану (0,15...0,2 %) і РЗМ (0,15...0,25 % за розрахунком).

5. Рекомендовані чавуни мають задовільні ливарні властивості, зокрема рідкотекучість 460...760 мм, лінійну усадку 1,8...2,1 % та відносну тріщиностійкість 1,18...1,27 (в порівнянні з чавуном 280Х28Н2).

6. Розроблені режими термічного оброблення для рекомендованих чавунів, що дають можливість виконувати їх механічне оброблення з наступним гартуванням для підвищення твердості та зносостійкості.

7. Розроблено технологічний процес і технологічну інструкцію на плавлення та розливання рекомендованого чавуну в індукційних і дугових електропечах.

8. Розроблено технології ливарних форм виготовлення корпусів і коліс багερних насосів й частин витків шламових шнекових транспортерів.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Підвищення гідроабразивної зносостійкості високолегованого білого чавуну / Г.Є. Федоров, М.М. Ямшинський, Є.О. Платонов [та ін.] // Наукові вісті. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. - № 1. – С. 95—99. *Здобувачем досліджено вплив основних легувальних, а також додаткових мікролегувальних елементів на гідроабразивну зносостійкість та твердість білих чавунів.*

2. Радченко К.С. Оптимизация химического состава износостойких высоколегированных белых чугунов / К.С. Радченко, Г.Е. Федоров, М.М. Ямшинский //

Металл и литье Украины. – 2011. – №1. – С. 20—23. *Здобувачем досліджено вплив добавок титану, ванадію та сурми на експлуатаційні властивості хромомарганцевого чавуну 290X19Г4.*

3. Ізотермічний ступінчастий відпал хромомарганцевих чавунів / Радченко К.С., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є., Платонов Є.О. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2014. - № 1. - С. 218-222. *Здобувачем досліджено вплив ізотермічного ступінчастого відпалу на твердість і структуру хромомарганцевих чавунів різних хімічних складів.*

4. Влияние титана и редкоземельных металлов на структуру износостойкого высокохромистого чугуна / Радченко К.С., Платонов Е.А., Ямшинский М.М., Федоров Г.Е. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2013. - №4. - С. 40-42. *Входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus. Здобувачем досліджено сумісний вплив модифікування титаном та РЗМ на структуру зносостійкого високохромистого чавуну 280X20Г4Л.*

5. Радченко К.С. Влияние микролегирования и модифицирования на свойства износостойкого Cr-Mn чугуна / Радченко К.С., Ямшинский М.М., Федоров Г.Е. // *Металлургия машиностроения.* – 2012. - №6. - С. 14-17. *Іноземне видання. Здобувачем визначено оптимальний склад хромомарганцевого чавуну для отримання його максимальної зносостійкості в гідроабразивних середовищах, вплив процесів мікролегуювання і модифікування на властивості базового чавуну.*

6. Служебные характеристики микролегированных и модифицированных белых чугунов / Ямшинский М.М., Радченко К.С., Федоров Г.Е., Платонов Е.А. // *Литье и металлургия.* – 2013. - №4. - С. 29-34. *Іноземне видання. Здобувачем досліджено структуру та службові характеристики хромомарганцевих чавунів, додатково легованих сурмою та титаном, а також модифікованих бором та РЗМ.*

7. Повышение служебных свойств Cr-Mn чугуна комплексным модифицированием / Радченко К.С., Ямшинский М.М., Федоров Г.Е., Платонов Е.А. // *Металлургия машиностроения.* – 2014. - №2. - С. 22-25. *Іноземне видання. Здобувачем досліджено вплив комплексного модифікування титаном та РЗМ на структуру, зносостійкість, агрегатну твердість та мікротвердість зерен аустеніту зносостійкого хромомарганцевого чавуну.*

8. Підвищення гідроабразивної зносостійкості високохромистого білого чавуну / К.С. Радченко, Г. Є. Федоров, М. М. Ямшинський, Р. О. Костін // VI Международная научно-практическая конференция «ЛИТЬЕ 2010», 22-23 апреля 2010, г. Запорожье, С. 163-164.

9. Исследование износостойкости сплавов в гидроабразивной среде / К.С. Радченко, Г.Є. Федоров, М.М. Ямшинський [и др.] // VI Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании» 4-11 июня 2010 г. Технический университет - г. Варна, Болгария. – 2010. - С. 521-524.

10. Структура и свойства износостойкого высокохромистого чугуна, обработанного титаном и редкоземельными металлами / Радченко К.С., Платонов Е.А., Ямшинский М.М., Федоров Г.Е. // IV Международная научно-практическая конференция «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве» 30 сентября – 4 октября 2013 года, г. Краматорск. – 2013. – С. 189-190.

АНОТАЦІЯ

Радченко К.С. Хромомарганцеві зносостійкі чавуни для роботи в умовах гідроабразивного зношування. Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – Ливарне виробництво. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2014 р.

У дисертації вирішено актуальну науково-технічну задачу заміни дорогого хромонікелевого чавуну марки 280X28H2 набагато дешевшим хромомарганцевим. Дослідженнями впливу процесів легування, мікролегування та модифікування базового чавуну доказано, що додаткове оброблення його присадками Ti, V, Sb, W та PЗМ суттєво змінює структуру та підвищує експлуатаційні властивості.

Рекомендовані чавуни мають задовільні ливарні властивості, що дає можливість виготовляти зносостійкі деталі методами лиття будь-якої конфігурації, маси та габаритних розмірів.

Розроблено оптимальні режими термічного оброблення рекомендованих чавунів, які дають можливість одержати мартенситно-аустенітну структуру, а отже високі твердість та зносостійкість.

Розроблено технології плавлення рекомендованих чавунів і виготовлення із них виливків різного призначення. Технології апробовано у виробничих умовах, що підтвердило перспективність використання хромомарганцевих чавунів для виготовлення зносостійких литих деталей.

Ключові слова: хромомарганцевий чавун, мікролегування, модифікування, виливок, зносостійкість, твердість, термічне оброблення, структура.

АННОТАЦИЯ

Радченко К.С. Хромомарганцевые износостойкие чугуны для работы в условиях гидроабразивного изнашивания. Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – Литейное производство. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, 2014 г.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача замены широко используемого в промышленности, но дорогого, хромоникелевого чугуна марки 280X28H2 более дешевым хромомарганцевым.

На основании исследований процессов структурообразования, измерения твердости и изменения износостойкости в гидроабразивной среде установлено, что для получения максимальных эксплуатационных свойств чугунов должен содержать 2,8...3,2 % C, 18...20 % Cr, 3,5...4,5 % Mn. Разработанный чугун в литом состоянии имеет структуру, состоящую из аустенита и хромистокарбидной эвтектики $(\gamma + \text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$, которая в высокой степени отвечает принципу Шарпи. При этом отсутствуют крупные заэвтектические карбиды хрома и мягкий феррит. Рекомендуемый чугун имеет износостойкость в гидроабразивной среде на 22 % выше, чем хромоникелевый 280X28H2.

Повысить эксплуатационные свойства хромомарганцевых чугунов можно дополнительным легированием, микролегированием и модифицированием, а также

оптимизацией режимов их термической обработки с целью улучшения их обрабатываемости и последующего повышения износостойкости. Перспективными элементами для улучшения эксплуатационных свойств могут быть Ti, V, Sb, В и РЗМ. Однако данные по влиянию этих элементов на структуру износостойких чугунов ограничены и часто противоречивы.

Установлено, что для повышения эксплуатационных характеристик хромомарганцевого чугуна (на 15...20 %), его целесообразно микролегировать титаном в пределах 0,1...0,5 %, ванадием – 0,5...0,8 % или сурьмой – 0,1...0,2 % или модифицировать бором в пределах 0,005...0,020 % (по присадке) или РЗМ в пределах 0,15...0,25 % (по присадке).

Изучением совместного влияния титана и редкоземельных металлов на структуру и свойства чугуна установлено, что добавка 0,15...0,20 % титана и 0,15...0,25 % РЗМ (по расчету) повышает износостойкость сплава в гидроабразивной среде в среднем на 15 %. Комплексное модифицирование существенно измельчает структуру чугуна. При этом микротвердость дендритов аустенита повышается с 3,2 до 4,2 ГПа за счет образования дисперсных твердых карбидов легирующих элементов.

Рекомендованные чугуны имеют удовлетворительные литейные свойства: жидкотекучесть по спирали Керри – 460...760 мм, линейная усадка 1,8...2,1 % и относительная трещиностойкость по технологической пробе в пределах 1,18...1,27. Это позволяет изготавливать износостойкие детали методами литья любых конфигурации, массы и габаритных размеров.

Разработаны оптимальные режимы термической обработки рекомендованных чугунов. Для выполнения механической обработки литых деталей их следует подвергать предварительному отжигу по одному из режимов: нагрев до температуры 840 °С (± 20 °С), выдержка в течение 1 ч (не менее 1 ч на каждые 20 мм толщины стенки детали), охлаждение в печи со скоростью не выше 40 °С/ч или нагрев до 870 °С, выдерживание в течение 1 ч, охлаждение с печью до 610 °С, выдерживание в течение 3 ч, нагрев до 690 °С, выдерживание в течение 2 ч, охлаждение с печью. Металлическая основа чугунов после отжига состоит из мягких продуктов распада аустенита и вторичных карбидов, а твердость сплава снижается до 39...40 HRC, что позволяет осуществить его механическую обработку.

После смягчающей термообработки детали из хромомарганцевых чугунов необходимо подвергать закалке с температур 900...950 °С на спокойном воздухе для получения мартенситно-аустенитной структуры, а следовательно высоких твердости и износостойкости.

Разработаны технологии плавки рекомендованных чугунов и изготовления из них отливок различных габаритных размеров и назначения. Технологии прошли апробацию в производственных условиях и показали перспективность использования разработанных хромомарганцевых чугунов для изготовления износостойких литых деталей разного назначения.

Ключевые слова: хромомарганцевый чугун, микролегирование, модифицирование, отливка, износостойкость, твердость, термическая обработка, структура.

ABSTRACT

Radchenko K.S. Chromium manganese wear resistant cast iron for work in hydroabrasive wear condition. Manuscript. Thesis for a degree of candidate of engineering sciences on special 05.16.04 is Foundry production. – National technical university of Ukraine «Kiev polytechnic institute», Kyiv, 2014.

Actual scientific and technical task of substitution of the expensive chromium nickel cast iron 280-Cr28-Ni2 brand mark for much more inexpensive chromium-manganese one has been solved in this dissertation work. Investigation of influence of alloying, microalloying and modification processes of the basic cast iron evidenced, that additional treatment with supplements Ti, V, Sb, B and REM changes drastically structure and up-grades its exploitation properties.

The cast irons recommended have good foundry properties that gives opportunity to manufacture the different wear resistant goods details of any configuration, mass, complexity by the casting methods.

Optimal regimes of the heat treatment of the cast irons recommended have been worked out which give opportunity to gain martensite-austenitic structure, thus high hardness and wear resistance.

Melting technologies of the cast irons recommended and production of the casts of them for different purposes have been developed. The technologies developed were approved in manufacturing conditions and the results obtained support perspective of the chromium-manganese cast irons use for production of the wear resistant cast details.

Keywords: chromium-manganese cast iron, microalloying, modification, casting, wear resistance, hardness, heat treatment, structure.