

НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

ХИТЬКО ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.744.3:621.771.07.001.736

**ГРАФІТИЗУЮЧЕ МОДИФІКУВАННЯ
ЧАВУННИХ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ У ЛИВАРНІЙ ФОРМІ**

Спеціальність 05.16.04 – ливарне виробництво

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2009

Дисертацію є рукопис.

Робота виконана в Національній металургійній академії України Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор Хричиков Валерій Євгенович, Національна Металургійна Академія України, м. Дніпропетровськ, завідувач кафедри ливарного виробництва.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Луцьов Валентин Васильович**, Запорізький Національний технічний університет, директор фізико-технічного інституту (ЗНТУ), завідувач кафедри „Машини і технологія ливарного виробництва”

кандидат технічних наук **Реп'ях Сергій Іванович**,
головний металург ТОВ «ІТЛ» ЛАССО», м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться “ 13 ” травня 2009 р. о 12³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.02 Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою 49600, м. Дніпропетровськ, – 56, проспект Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий “ 9 ” квітня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ **А.М. ДОЛЖАНСЬКИЙ**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Внутрішньоформене модифікування чавунів є ефективним способом підвищення механічних та експлуатаційних характеристик чавунних виливків. Вальцеливарне виробництво має значні досягнення з удосконалення технології литва і поліпшення якості прокатних валків. Проте, у зв'язку з інтенсифікацією технологічних процесів у прокатному виробництві стійкість валків через поламки шийок та бочок перестала задовольняти збільшеним вимогам високопродуктивної роботи прокатних станів, що пов'язано з низькими міцнісними характеристиками металу їх осьової зони та наявністю транскристалічності у структурі. Необхідність підвищення міцності осьової зони валка при задовільній якості його робочого шару обумовлює необхідність проведення робіт, спрямованих на підвищення механічних та експлуатаційних властивостей чавунних прокатних валків, зокрема, шляхом диференційованого внутрішньоформеного модифікування розплавів. Однак теорія і технологія внутрішньоформеного модифікування чавунів для таких крупних виливків як прокатні валки до теперішнього часу не розроблені.

Відомий широкий ряд графітуючих модифікаторів, серед яких є FeSi, FeSiAl, CaMnSi та інші, однак, у випадку диференційованого внутрішньоформеного модифікування, коли значною мірою знята теплота перегріву розплаву, відомі модифікатори, маючи високу температуру плавлення та теплоємність, обростають кіркою затверділого розплаву та не засвоюються. Ці обставини вимагають розробки нових модифікаторів на основі легкоплавких компонентів, які мають високу графітуючу здатність. Серед відомих елементів максимальна графітуюча здатність у Al, Si, Ca. До того ж алюміній має досить низьку температуру плавлення та високу температуру кипіння. Тому розробка нових графітуючих модифікаторів для осьової зони виливка прокатного валка на основі цих компонентів є перспективною. Аналіз літературних даних довів недостатню вивченість впливу алюмінію як модифікатора для внутрішньоформеного диференційованого модифікування чавунних розплавів, при відомому впливі його на властивості чавунних розплавів як легуючого елементу. Відсутність таких даних та науково обґрунтованої технології диференційованого внутрішньоформеного модифікування, розробленої на основі моделювання теплових процесів плавлення модифікатора і твердіння виливка, призводить до нестабільного ефекту графітуючого модифікування осьової зони валка та неможливості отримання якісного робочого шару необхідної товщини.

У зв'язку з вищевикладеним, дисертаційна робота, що спрямована на розробку наукових основ прогресивної технології лиття валків з диференційованим модифікуванням розплавів високоефективним легкоплавким модифікатором і на цій основі підвищення їх якості, є актуальною, а задача має важливе науково-прикладне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана на кафедрі ливарного виробництва Національної металургійної академії України у відповідності з державною науково-технічною програмою 04.01

«Ресурсозберігаючі екологічно чисті процеси і технології в металургії і ливарному виробництві» (наказ МН №102 від 23.04.97 р., завдання 04.01/0137), держбюджетною тематикою по координаційних планах, затверджених Міністерством освіти і науки України (№ДР 0102U000871). Автор дисертації був виконавцем цієї науково-дослідної роботи.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є поліпшення структури і фізико-механічних властивостей прокатних валків застосуванням диференційованого внутрішньоформеного модифікування розплавів та розробка перспективної технології їх виробництва.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання.

1. Виконати аналіз причин виходу прокатних валків з ладу, дослідити структуру і властивості матеріалу валків серійного виробництва.

2. Дослідити вплив алюмінію, комплексу хімічних елементів Al+Si та суміші Al+SiO₂ як модифікаторів на процеси структуроутворення і властивості чавунів для прокатних валків.

3. Оптимізувати хімічний склад сумішного графітуючого модифікатора, що ефективно впливатиме на процес формування структурних складових матеріалу серцевини прокатних валків, розробити технологію введення цього модифікатора в розплав і провести випробування її в лабораторних умовах на матеріалах, що використовуються для лиття прокатних валків.

4. Розробити математичну модель нагріву і розплавлення модифікатора в процесі твердіння валка у ливарній формі.

5. Розробити конструкцію пристрою для внутрішньоформеного графітуючого модифікування чавуна легкоплавкими модифікаторами, який забезпечує необхідну точність процесу введення модифікатора в форму.

6. Визначити параметри технологічного процесу внутрішньоформеного модифікування, що забезпечує дію на необхідні зони литої заготовки валка, в певний момент часу, що передуює початку процесу його твердіння, з метою поліпшення структури і підвищення властивостей матеріалу цих зон валка.

7. Впровадити одержані результати в промисловість та навчальний процес.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес лиття чавунних прокатних валків.

Предмет дослідження. Закономірності процесів структуроутворення і формування властивостей в робочому шарі і осьовій зоні литих прокатних валків з модифікованих чавунів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань був використаний комплекс сучасних методів, який включає: математичне планування експерименту, методи хімічного та металографічного аналізів, дослідження мікротвердості і фізико-механічних властивостей матеріалів. Для опису температурних полів використаний метод математичного моделювання, що реалізований на комп'ютерній техніці з використанням стандартних програм.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Одержали подальший розвиток експериментально визначені залежності впливу алюмінію, комплексу хімічних елементів Al+Si, та суміші

Al+SiO₂ як легкоплавких модифікаторів на структуру і властивості сірих та високоміцних чавунів для прокатних валків, що твердіють у ливарній формі.

Розробка відрізняється збільшенням меж дослідного діапазону модифікаторів для оцінки впливу їх індивідуальної модифікуючої здатності на відбіл, макро- та мікроструктуру. Це дало можливість обумовити склад легкоплавкого графітізуючого модифікатора для оброблення осьової зони валка з підвищенням в ній міцності.

2. Вперше встановлені термочасові параметри процесу кристалізації валкових розплавів, які відлиті із застосуванням внутрішньоформеного графітізуючого модифікування легкоплавким модифікатором.

Розробка відрізняється визначенням температурних закономірностей процесу твердіння прокатного валка при внутрішньоформеному графітізуючому модифікуванні із застосуванням легкоплавких модифікаторів. Це дозволяє регулювати утворення робочого шару валків заданої товщини та їх експлуатаційні характеристики.

3. Вперше встановлено відсутність демодифікуючої дії в інтервалі температур ліквідус-солідус легкоплавкого модифікатора на основі алюмінію на кулястість форми графіту високоміцного чавуну.

Розробка відрізняється використанням легкоплавкого модифікатора на основі алюмінію при внутрішньоформеному графітізуючому модифікуванні осьової зони валка після сфероїдизуючої ковшової обробки всього об'єму вилівка та твердіння робочого шару валка. Це дозволило досягти підвищення міцнісних властивостей металу серцевинної зони валків за рахунок поліпшення її структури.

4. Вперше розроблена математична модель нагріву і розплавлення модифікатора в процесі твердіння прокатного валка у ливарній формі.

Розробка відрізняється урахуванням впливу фізичних параметрів легкоплавкого модифікатора на основі алюмінію та діоксиду кремнію на процес плавлення модифікатора в осьовій зоні валкової форми. Це дозволяє прогнозувати час потрібний на модифікування, керувати структуроутворенням металу по поперечному перетину прокатного валка з підвищенням його міцнісних та експлуатаційних властивостей.

Практична цінність отриманих результатів

На підставі результатів проведених досліджень був запропонований оптимальний склад сумішного модифікатора для внутрішньоформеної обробки чавунних розплавів для прокатних валків, який дозволив підвищити їх фізико-механічні та експлуатаційні характеристики. Розроблено новий спосіб лиття чавунних прокатних валків, у тому числі пристрій для введення сумішного модифікатора при внутрішньоформеному модифікуванні.

Результати роботи пройшли випробовування на ВАТ «ДЗПВ» (акт від 17.10.07р.). Крім того, розроблені теоретичні положення використовуються в навчальному процесі в розділах лекційних курсів з дисциплін «Теоретичні основи ливарного виробництва» і «Виробництво вилівоків із спеціальних леггованих та модифікованих чавунів і сталей» при підготовці бакалаврів та магістрів на кафедрі ливарного виробництва НМетАУ (акт від 15.01.09 р.).

Особистий внесок автора. Автор брав безпосередню участь у дослідженнях і теоретичному узагальненні результатів по виготовленню литих заготовок прокатних валків із застосуванням внутрішньоформеного модифікування чавунів, яке дозволило підвищити їх міцнісні характеристики. Основні наукові результати дисертаційної роботи базуються на дослідженнях, виконаних безпосередньо автором. У роботу включені лише ті результати, які одержані автором особисто або при його участі, що полягали, як мінімум, у постановці завдань, розробці методів і програми досліджень обробці і аналізі отриманих результатів, їх узагальненні. Особистий внесок претендента в роботах, опублікованих у співавторстві, полягає в наступному: [1] - участь у проведенні експериментів та обробці їх результатів; [2] - виконання експериментальних досліджень в умовах ВАТ «ДЗПВ», обробка та узагальнення отриманих даних; [3] - розробка математичної моделі теплових процесів твердіння прокатного валка у ливарній формі; [4] - розробка складу графітуючого модифікатора та технології його введення у ливарну форму, виконання досліджень структури дослідних зразків; [5] - розробка основних відмінкових ознак трьох пунктів винаходу; [6] - приймав участь у проведенні експериментів та обробці їх результатів; [7] - виконання експериментальних досліджень, обробка та узагальнення отриманих результатів; [8] - проведення експериментальних досліджень. Претендент вважає своїм обов'язком виразити вдячність керівникові і співавторам спільних публікацій, які сприяли виконанню і реалізації результатів експериментів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи докладалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на наукових семінарах і конференціях: IV Międzynarodowa Sesja Naukowa Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej (Częstochowa, 2003); Materials and metallurgy-Summaries of lectures (Zagreb, 2004); XV Міжнародна конференція «Теплотехніка і енергетика в металургії» (м. Дніпропетровськ, 7-9 жовтня 2008 р.); науковий семінар кафедри ливарного виробництва НМетАУ (м. Дніпропетровськ, 16.01.2009).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 8 наукових виданнях, з них 4 – у фахових виданнях України.

Структура і об'єм дисертаційної роботи. Дисертація складається з вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 111 найменувань та чотирьох додатків. Робота викладена на 182 сторінках, включає 73 рисунки та 16 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульована її мета, викладена наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, а також дані щодо апробації результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі проаналізовані літературні дані щодо існуючих наукових і практичних підходів до модифікування чавунних виливків. Розглянуті основні технологічні особливості лиття прокатних валків з чавуну, що містяться в працях Кривошеєва А.Є., Котешова М.П., Хричикова В.Є., Соценка О.В., Патерсона С.Е.,

Іванової Л.Х. та ін. Проаналізовані відомі методи запобігання браку виливків по наскрізній стовпчатості. Одним з доступних методів поліпшення якості чавунів є модифікування. Модифікуванню в більшості випадків піддають метал всього вилівка— робочого шару і осьової зони, що призводить до перевитрати модифікаторів і вимагає при виборі останніх дотримання балансу впливу, як на осьову зону так і на робочий шар. Але часто вимоги до властивостей цих зон прокатних валків взаємовиключні. Крім того, існуючі способи дії на осьову зону вилівка прокатного валка передбачають значну перевитрату як рідкого металу, так і модифікаторів.

Аналіз науково-технічної літератури виявив, що при внутрішньоформеному модифікуванні уявляється проблематичним забезпечення заданого в суворих межах моменту спрацьовування пристроїв для введення модифікаторів, а існуючі модифікатори графітізуючої дії мають значну температуру плавлення і для розчинення і засвоєння розплавами вимагають значного перегрівання останніх. Крім того, важливим є створення ресурсозберігаючих технологій.

Аналіз сучасного стану вальцеливарного виробництва і відповідної науково-технічної літератури виявив, що роботи з внутрішньоформеного графітізуючого модифікування чавунних прокатних валків є актуальними та спрямованими на вирішення важливої науково-технічної задачі.

У другому розділі розглянуто матеріали та методика дослідження. Дві серії промислових експериментів по модифікуванню чавунних прокатних валків виконання СПХН-60 (чорнова маса 0,687 т) проводили в умовах вальцеливарного цеху ВАТ «ДЗПВ». Частина стаціонарної комбінованої валкової форми виготовляли по прийнятій на даному підприємстві технології. Складання ливарних форм у кожній серії експериментів здійснювали на подвійному піддоні, щоб заливання валків йшло через спільний стояк. Чавун виплавляли в індукційній печі моделі ІЧТ-6. Для внутрішньоформеного модифікування залитої розплавом валкової форми був розроблений спеціальний пристрій, якій складається з направляючого вузла та штанги з модифікатором. Конструкція пристрою була запатентована (пат. України №80101).

Для дослідження структури і механічних властивостей матеріалу дослідних і контрольних валків їх розрізали на диски. Перед зняттям сірчаних відбитків за методом Баумана поверхню дисків шліфували. Металографічний аналіз проводили згідно з ГОСТ 3443-87 на оптичних металомікроскопах моделей МІМ-8М і “Neophot 21” при збільшеннях 12...1300. Шліфи досліджували до та після травлення. Механічні властивості досліджували за стандартними методиками.

Для оптимізації хімічного складу сумішного модифікатора використовували математичне планування експерименту з використанням 4x4 латинського квадрату.

У третьому розділі з метою визначення службових характеристик чавуна виливків були проведені дослідження мікроструктури і властивостей матеріалу литих чавунних валків серійного виробництва ВАТ «ДЗПВ», а також аналіз їх експлуатаційної стійкості в умовах ВАТ «Дніпропетровський металургійний завод ім. Петровського». Мікроструктура, механічні властивості і термостійкість

матеріалу робочого шару валків були типовими для валкових чавунів, що кристалізуються при підвищеній швидкості.

Причинами передчасного виходу валків із експлуатації по тріщинах, поламках бочок і шийок була наявність цементиту в матеріалі серцевини бочок і шийках, транскристалічність макроструктури бочок валків і відповідно низькі міцнісні властивості матеріалу серцевини прокатних валків.

В результаті проведеного комплексу досліджень встановлено, що технологія виробництва чавунних валків потребує корегування для підвищення міцності матеріалу серцевини бочок і шийок, що дозволить підвищити їх надійність при роботі в прокатних станах. Підвищення стійкості валків, збільшення пластичності осьової зони і поліпшення механічних властивостей можливе при змінюванні структури центральної зони вилівка. Оскільки зміна умов кристалізації виливків прокатних валків веде до ускладнення технологічного оснащення, тому найперважною є внутрішньоформене модифікування чавуну центральних зон валків - серцевин бочок і шийок.

У четвертому розділі наведені результати лабораторних досліджень впливу легкоплавких графітизуючих модифікаторів на відбіл валкових проб, мікроструктуру і властивості валкових сірих чавунів з пластинчастим і кулястим графітом. Дослідження впливу присадки чистого алюмінію або алюмінієвого сплаву АК12 в межах від 0,01 до 1,0 % за масою на структуру валкового чавуну з пластинчастим графітом показало, що така обробка дозволяла досягти зменшення вмісту карбідів вже при введенні модифікатора у кількості 0,1...0,2% за масою. Це пов'язано з тим, що при введенні такої кількості модифікатора з врахуванням його значної графітизуючої здатності, розплав піддається максимальній дегазації і активації центрів графітоутворення при кристалізації. Проте повного усунення карбідоутворення в структурі дослідного валкового чавуну при обробці як алюмінієм, так і сплавом АК12 не було досягнуто.

Встановлено, що при внутрішньоформеному модифікуванні найкращі технологічні властивості мали модифікатори з температурою плавлення, що дорівнювала $T_{omm} = T_s - (500...570)$, де T_s – температура солідус розплаву чавуну.

Вибір оптимального складу модифікатора здійснювали з використанням метода математичного планування експерименту. Як незалежні змінні були обрані – вміст у сумішному модифікаторі комплексу «алюміній+кремній» (решта УДП діоксиду кремнію) та температура плавлення модифікатора.

Для реалізації задачі побудови математичної моделі, що пов'язує дослідні показники (відбіл на валковій пробі та середній показник твердості чавуну) з вмістом обраних компонентів у модифікаторі, використовували комбінаторний план планування експерименту за типом 4 x 4 латинського квадрату, досліди у комірках котрого ставили у випадковому порядку. Розраховували адекватність планування. Гіпотезу про незначимість усіх взаємодій перевіряли за критерієм Фішера. Обробку даних, що були одержані в експерименті, та визначення оптимального складу сумішного модифікатора проводили за допомогою узагальненої функції бажаності.

В результаті проведеного експерименту встановлено, що до оптимальних параметрів модифікатора слід віднести вміст комплексу «алюміній+кремній»–

30...45% та УДП діоксиду кремнію – 55...70%, при котрих комплексний показник якості модифікатора мав максимальне значення 0,84...0,89. Склад розробленого модифікатора був запатентований.

Дослідження впливу присадки модифікатора розробленого складу у межах від 0,01 до 0,8% за масою на відбіл чавуну показало, що модифікування дозволяє досягти максимально низького вмісту карбідів вже при введенні 0,01...0,02% модифікатора. Подальше збільшення вмісту модифікатора понад 0,02% за масою при введенні у чавунний розплав не приводило до збільшення кількості активних центрів кристалізації й тому вміст карбідів у структурі чавуну не зменшувався (рис. 1).

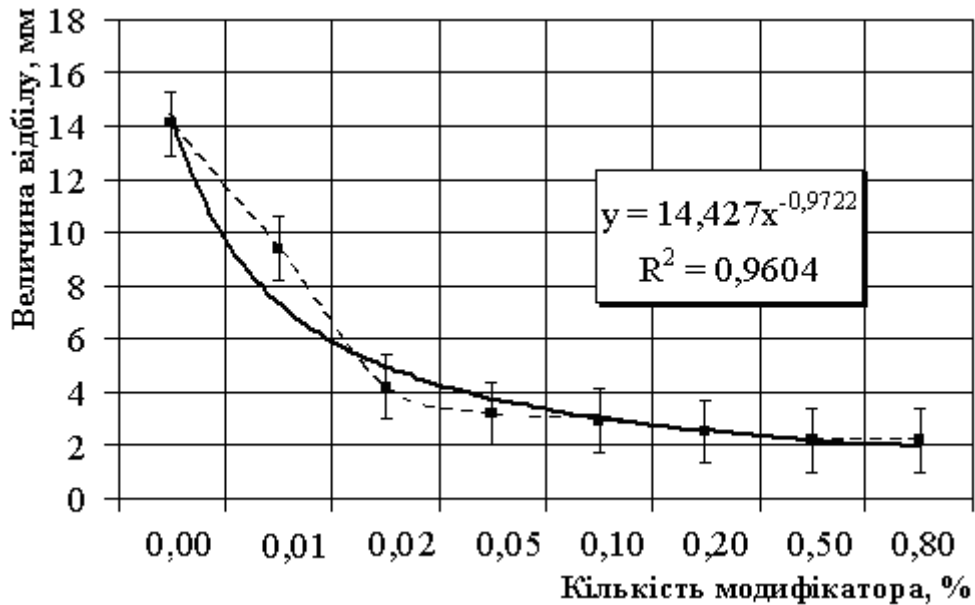


Рис. 1. Дослідження впливу модифікатора розробленого складу на величину відбілу валкової проби

Вплив дослідних модифікаторів на твердість чавунів довів, що твердість немодифікованих і модифікованих різними модифікаторами чавунів з пластинчастим графітом зменшується з віддаленням від поверхні у глибину проб. Середні значення твердості чавуна модифікованих проб були більшими у порівнянні зі середніми її значеннями у пробах з немодифікованих чавунів. За середнім показником твердості проб дослідні модифікатори можна розмістити у такий зростаючий ряд: алюміній, алюмінієвий сплав марки АК12, модифікатор розробленого складу.

У зв'язку з тим, що алюміній, який входить до складу сумішного модифікатора, вважається десфероїдизатором кулястого графіту, була проведена серія лабораторних експериментів для оцінки впливу сумішного модифікатора розробленого складу на структуру і властивості валкового чавуну такого складу, мас. %: вуглець 3,5; кремній 0,88; марганець 0,6; фосфор 0,20; сірка 0,02; хром 0,6; нікель 1,0; магній 0,05; залізо – решта.

Обробка дослідного чавуну модифікатором розробленого складу (присадка до 0,02%) не приводила до помітної зміни форми графіту. Розміри графітних включень збільшувалися від приповерхневого шару зразків до серцевини. У приповерхневому

шарі графітні включення мали значно менші розміри у порівнянні з графітними включеннями у серцевинних ділянках виливків. Розподіл графітних включень у приповерхневих шарах й у серцевині був порівняно рівномірним.

Металографічний аналіз показав, що кількість графіту з віддаленням від поверхні до серцевини збільшувалась практично лінійно. Загальна кількість графіту зі збільшенням присадки сумішного модифікатора у розплав чавуну збільшувалась у 2...2,4 рази. Це можна пояснити тим, що алюміній, котрий входить до складу сумішного модифікатора, відноситься до найсильніших (після кремнію) графітизаторів.

Кількість графіту у приповерхневому шарі проби була меншою через більш високу швидкість кристалізації, яка сприяла формуванню високовуглецевої фази у вигляді цементиту.

Цементит у приповерхневому шарі проби з немодифікованого чавуну був високого ступеня дисперсності. Кількість ж цементиту у мікроструктурі проб з немодифікованого чавуну і проб, що оброблені різними присадками модифікатора розробленого складу, зменшувалась у 1,3...1,4 рази.

Кількість перліту у структурі чавунів корелює з кількістю цементиту. Так, з віддаленням від нижньої частини проби у немодифікованому чавуні кількість перліту збільшується на 9%, в обробленому присадкою 0,01% за масою модифікатора – на 25% і присадкою 0,02% за масою модифікатора – на 32%.

Середнє значення твердості проб чавуну з кулястим графітом, оброблених присадкою модифікатора розробленого складу (0,01% за масою), було більшим на 37% у порівнянні з середнім показником твердості проби з чавуну з пластинчастим графітом, обробленої такою ж кількістю розробленого модифікатора.

В цілому, модифікування чавунів з кулястим графітом сумішним модифікатором розробленого складу привело до подрібнення графітних включень, не мало значного впливу на форму кулястого графіту і сприяло незначному збільшенню кількості графітної складової, що сприятливо вплинуло на міцність чавуну.

У п'ятому розділі* наведені результати по розробці математичної моделі твердіння чавунного прокатного валка з введенням плавкого модифікатора. Розроблено фізичну модель чотирьох варіантів процесу твердіння модифікованого прокатного валка у ливарній формі – з різними варіантами конфігурації модифікатора, діаметру бочки валка, теплофізичних властивостей металу і форми. Модель описує стан елементів вказаної системи після заповнення ливарної форми розплавом і після графітизуючого модифікування, а також стан системи і теплові процеси, що проходять в ній. Процес теплообміну в системі описували із застосуванням методу ентальпії, враховуючи фазові перетворення. Представлені рівняння теплопровідності, граничні і початкові умови для форми, суміші, модифікатора, розплаву в зазорі між модифікатором і формувальною сумішшю, внутрішнього шару розплаву. Поставлену задачу вирішували з використанням методу кінцевих різниць. Будову різницевої рівнянь виконували за допомогою методу інтегральних теплових балансів.

Були одержані такі основні розрахункові формули


(1)


(2)


(3)


(4)


(5)

* Раздел выполнен под научным руководством д.т.н. Ивановой Л.Х.


(6)

де $F_a = \frac{\alpha \Delta \tau}{\Delta r^2}$; $\xi_j = \frac{\Delta r}{2r_j}$; $\Delta = \frac{R_H R_B}{N}$,

R_H і R_{BH} – відповідно зовнішній і внутрішній радіуси елементу.

Отримані розрахункові формули, що дозволяють моделювати процес теплообміну, змінюючи значення основних початкових даних. За допомогою розробленої моделі можливе моделювання процесу твердіння розплаву з різними варіантами конфігурації модифікатора, діаметру бочки валка, теплофізичних властивостей металу і форми. Складено алгоритм розрахунку процесу твердіння виливка, який реалізовано у вигляді програми.

Адаптація розробленої моделі, що проведена для валка з діаметром бочки 368 і шийки – 200 мм з використанням даних експериментальних досліджень процесу нагріву форми і кристалізації металу, свідчила про можливість введення у твердіючий розплав модифікатора на штанзі через надливну частину форми після витримки, необхідної для формування робочого шару валка.

Встановлено, що до закінчення формування робочого шару валка, кірка, що утворюється на піщано-глинистій частині форми, настільки незначна і буде видалена при механічному обробленні, що можна говорити про модифікуючий ефект не лише осьової зони бочки, але і практично всього перетину шийок валка. Проведеними дослідженнями валків, відлитих за вказаною технологією це підтверджується. Очевидно, що час витримки розплаву до введення модифікатора може бути збільшений з 4 до 4,5 хв. За цей час робочий шар збільшується з 40 до 60 мм.

У шостому розділі приведені результати з розробки і випробовуванню досліджуваних технологій лиття прокатних валків виконання СПХН-60, які проводили в умовах вальцеливарного цеху ВАТ «ДЗПВ». Хімічний склад дослідних

валків витримували в межах (% за масою): вуглець $3,579 \pm 0,16$; кремній $0,898 \pm 0,028$; марганець $0,342 \pm 0,009$; фосфор $0,236 \pm 0,012$; сірка $0,031 \pm 0,001$; хром $0,567 \pm 0,015$; нікель $1,043 \pm 0,054$; залізо - решта. Заливання чавунного розплаву у форми проводили при температурі $1300 \dots 1320^\circ\text{C}$.

У першій серії експериментів в одній з ливарних форм, після заливання і витримки, необхідної для формування робочого шару заданої товщини, проводили примусове модифікування, тобто вводили модифікатор за допомогою розробленого та запатентованого пристрою (рис. 2), а у другій серії – в одній з валкових форм при її складанні розміщували необхідну присадку модифікатора. Другу форму на подвійному піддоні в першій і другій серії експериментів залишили без змін з метою здобуття контрольних валків. Заливання, охолодження, вибивання валків з форм здійснювали за прийнятою на підприємстві технологією.

Модифікування дослідних валків здійснювали модифікатором розробленого складу, що містив: УДП SiO_2 (65%), і алюміній (33%). Витрата модифікатора складала $1,8 \dots 2,0$ кг на тону чавуну.

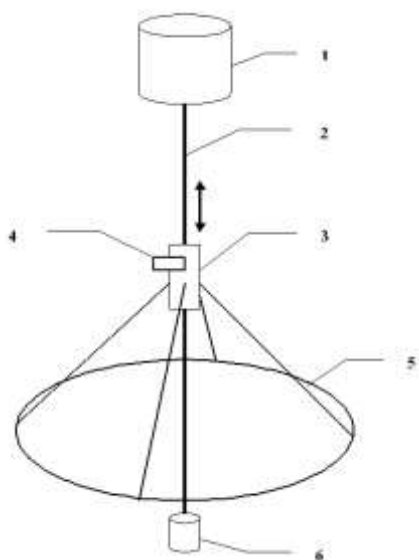


Рис. 2. Схема пристрою для введення модифікатора в осьову зону прокатного валка, що твердіє: 1 – вантаж; 2 – штанга; 3 – напрямна втулка; 4 – фіксатор штанги; 5 – система кріплення пристрою на надливній частині форми; 6 – легкоплавкий модифікатор, закріплений на штанзі

У першій серії експериментів введення пристрою з модифікатором в заповнену чавунним розплавом ливарну форму на рівень вище на $100 \dots 150$ мм від низу форми нижньої шийки, проводили через 4 хв після формування робочого шару заданої товщини (40 мм). Тривалість модифікування становила ~ 3 хв. Введення і виведення розробленого пристрою для внутрішньоформеного модифікування здійснювали зі швидкістю $5 \dots 7$ см/с.

Після вибивання ливарних форм від усіх валків обох серій експериментів (дослідних і контрольних) були відібрані зразки

для дослідження мікроструктури і властивостей.

Мікроструктура чавуну робочого шару дослідного і контрольного валків характеризувалася наявністю цементитної евтектики, яка була представлена грубо диференційованим ледебуритом. Характеристика цементиту була однаковою в обох виливках. Металева матриця складалася з фериту і перліту різної дисперсності.

В серцевинній частині бочки дослідного валка (на відстані $70 \dots 140$ мм від литої поверхні у глибину бочки) цементит у мікроструктурі чавуну практично був відсутній, а в чавуні контрольного валка присутність його складала 10%. Кількість

графітної складової структури в чавуні дослідного валка була 12%, а контрольного тієї ж дослідної партії – у 2 рази меншою, тобто 6%. Кількість фериту в структурі чавуна дослідного валка складала 15, а контрольного валка – 30%. Значні мікроструктурні зміни чавуну осьової зони бочки дослідного валка, мабуть, пов'язані з тим, що розплав піддається максимальній дегазації і активації центрів графітоутворення при кристалізації в серцевинній зоні валка.

Зіставлення сірчаних відбитків з дисків, вирізаних з бочок дослідного і контрольного валків показало їх різний характер: бочка дослідного валка має яскраво виражену «двошаровість» в порівнянні з бочкою контрольного (рис. 3).

В результаті дослідження механічних властивостей ($\sigma_{\text{в}}^{\text{виг}}$, $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}}$) матеріалу валків встановлено, що в матеріалі серцевинної зони дослідного валка рівень міцності $\sigma_{\text{в}}^{\text{виг}}$ був вищим, ніж в контрольному. Так, на глибині 135...185 мм рівень міцності $\sigma_{\text{в}}^{\text{виг}}$ матеріалу дослідного валка був на 8...15 % вищим, ніж у контрольного валка. З віддаленням від поверхні у глибину бочки рівень міцності $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}}$ дослідного валка також залишався на 3...18% вищим, ніж контрольного. Міцність $\sigma_{\text{в}}^{\text{виг}}$ по усьому перетину шийок як нижніх, так і верхніх була на 10...20% вищою в дослідних валках. Міцність $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}}$ по усьому перетину нижніх шийок була практично однаковою в дослідних валках, а по перетину верхньої шийки дослідного валка – на 13...30% вище в порів-

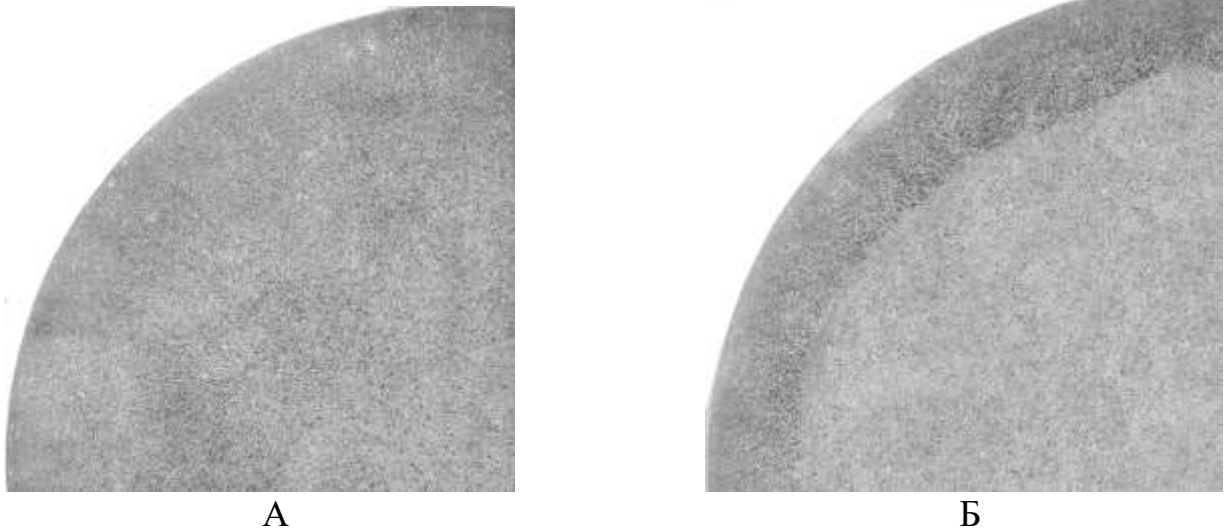


Рис. 3. Сірчані відбитки бочок валків:

- А- бочка валка, відлитого за серійною технологією (контрольний валок)
 Б- бочка валка, відлитого з модифікуванням осьової зони (дослідний валок)

нянні з контрольним. Отже, модифікування металу осьової зони валка легкоплавким модифікатором розробленого складу за допомогою спеціального пристрою на штанзі привело до значного підвищення міцнісних властивостей в серцевинній зоні прокатного валка.

Основний результат модифікування виявився в зміні процесу кристалізації металу в серцевинній частині бочки валка (рис. 4), перехідна ж зона і робочий шар знаходяться в строго певних і прогнозованих межах.

Модифікування прокатних валків в другій серії експериментів здійснювали за допомогою пристрою з вільним виділенням модифікатора, який встановлювали в нижній частині порожнини валкової форми.

Мікроструктура чавуну робочого шару і дослідного і контрольного валків другої серії характеризувалася наявністю цементитної евтектики, яка була представлена грубо диференційованим ледебуритом. Металева матриця складалася з фериту та перліту різної дисперсності. Вміст перліту і фериту в чавуні дослідного і контрольного валків був однаковим – перліту П85%, а фериту - Ф15%.



А

Б

Рис. 4. Макроструктура контрольного (А) і дослідного (Б) валків

Кількість цементитної складової була великою по перетину бочок обох досліджуваних валків, проте в міру віддалення від поверхні в глибину бочки валка кількість карбідної складової в структурі матеріалу досліджуваних валків зменшувалась з 55%: у дослідному валку до 25, а у контрольному – до 35%.

У другій серії експериментів внутрішньоформене модифікування металу осьової зони валка легкоплавким модифікатором розробленого складу, привело до плавного зменшення вмісту цементиту і збільшення вмісту графіту в цій зоні, проте кількість цементиту в осьовій зоні обох досліджуваних валків була значною.

В результаті дослідження механічних властивостей матеріалу валків встановлено, що в серцевинній зоні дослідного валка другої партії рівень міцності $\sigma_{\text{в}}^{\text{ВИГ}}$ був вищим на 4...11%, ніж в контрольного валку цієї ж партії. Однак, в порівнянні з дослідним валком першої партії міцність $\sigma_{\text{в}}^{\text{ВИГ}}$ в серцевинній зоні валка другої дослідної партії була нижчою на 2...3%. Крім того, наприклад, на глибині 150 мм міцність $\sigma_{\text{в}}^{\text{ВИГ}}$ матеріалу дослідного валка першої партії складала 695 МПа, другої партії – 690 МПа, що на 16 і 15% більше, відповідно, ніж контрольних валків. Міцність $\sigma_{\text{в}}^{\text{Р}}$ матеріалу серцевинної зони дослідного валка другої партії в порівнянні з контрольним була більше в середньому на 8%.

З віддаленням від поверхні в глибину шийок міцність $\sigma_{\text{в}}^{\text{ВИГ}}$ чавуну дослідного валка другої партії залишалася на 2...18% вищою в порівнянні з контрольним. Міцність $\sigma_{\text{в}}^{\text{Р}}$ по усьому перетину нижніх шийок була практично однаковою як у дослідному валку другої партії, так і контрольному. Проте, у порівнянні з дослідним валком першої партії міцність $\sigma_{\text{в}}^{\text{Р}}$ матеріалу валка другої дослідної партії була нижче на 2...8% рівня міцності матеріалу валка першої дослідної партії.

Проведений порівняльний аналіз двох технологічних процесів графітуючого модифікування осьової зони валків показав, що найкращі результати були отримані

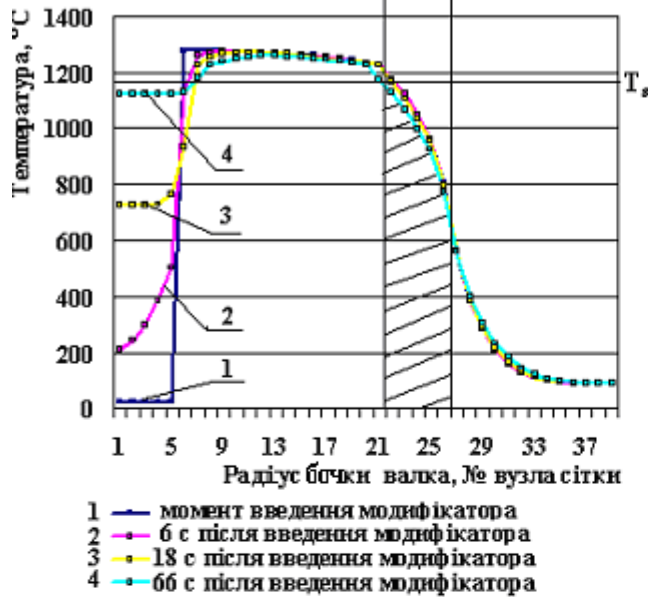
при обробці чавунного розплаву модифікатором з примусовим введенням його на штанзі.

Металографічний аналіз показав суттєву стрибкоподібність зміни вмісту цементиту по перетину бочок валків зважаючи на одномоментність змін, що відбуваються під час модифікування внутрішньої зони валка на відміну від відносної плавності зменшення критичної швидкості твердіння під час лиття за звичайною технологією.

Примусове модифікування валкових розплавів дозволило отримати робочий шар гарантованої товщини, а осьову зону практично без цементитної складової. Ефект модифікування особливо виражений в серцевинній зоні бочки валка у зв'язку із зміною стовпчастої структури на рівноосьову. На розроблений спосіб виготовлення виливків прокатних валків з примусовим внутрішньоформеним графітуючим модифікуванням отримано патент України № 80101.

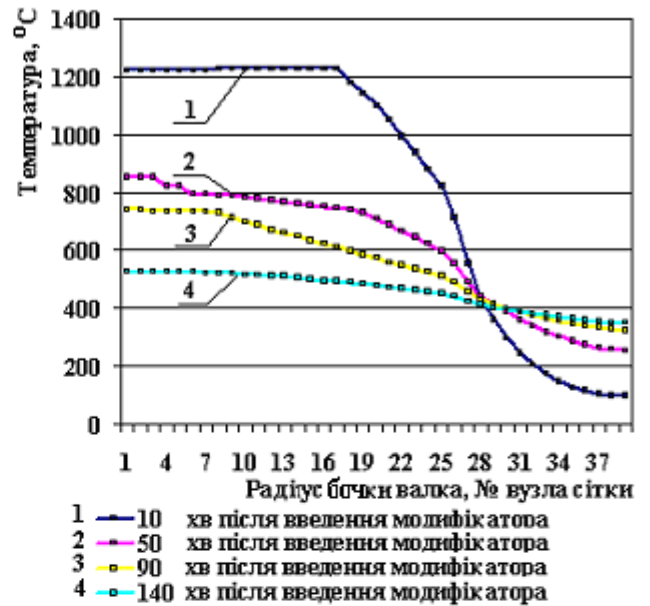
Як показали розрахунки із застосуванням розробленої моделі, внутрішньої енергії розплаву вистачає для розплавлення і розподілу модифікатора за всім об'ємом частини виливка, яка модифікується (рис. 5), що відповідно підтверджено проведеними промисловими експериментами.

Температурне поле бочки валка діаметром 368мм у процесі введення модифікатора
Затверділий робочий шар валка



А

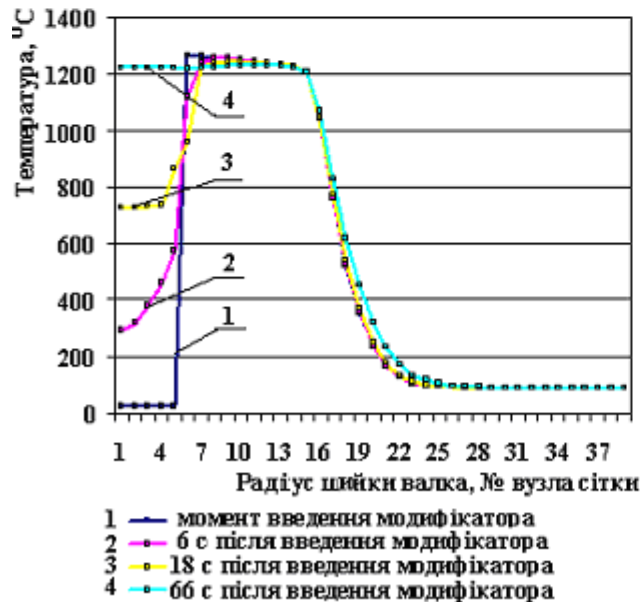
Температурне поле бочки валка діаметром 368мм після введення модифікатора



Б

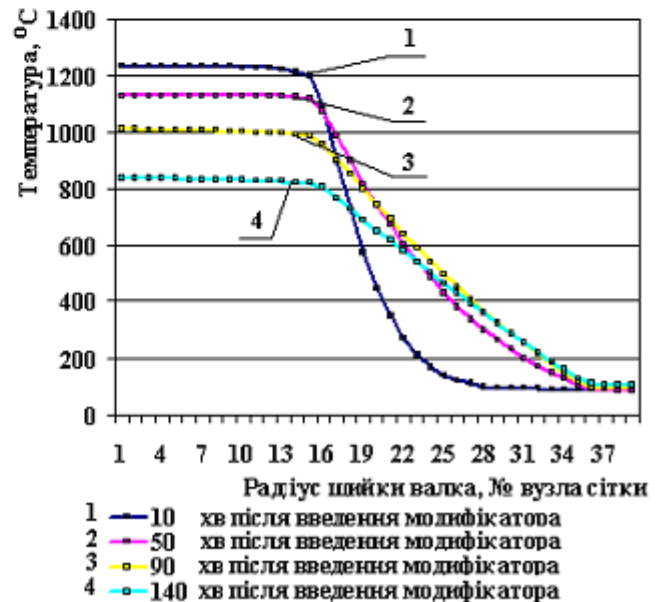
Вісь валкової форми - № 0; Модифікатор - № 1-5; Розплав чавуну - № 5-26; Металевий кокіль - № 26-39

Температурне поле шийки валка діаметром 200мм у процесі введення модифікатора



В

Температурне поле шийки валка діаметром 200мм після введення модифікатора



Г

Вісь валкової форми - № 0; Модифікатор - № 1-5; Розплав чавуну - № 5-15; Формувальна суміш - № 15-35; Металевий кокіль - № 35-39

Рис. 5. Температурні криві бочки (А, Б) і шийки (В, Г) валка діаметром 368 мм в процесі введення (А, В) і після введення (Б, Г) модифікатора

Висновки

У дисертації наведені теоретичні узагальнення і нові рішення науково-технічної задачі, яка полягає у розробці наукових основ по визначенню параметрів технологічного процесу внутрішньоформеного модифікування, що забезпечує суттєвий вплив на осьову зону литої заготовки валка для поліпшення структури і підвищення міцнісних та експлуатаційних властивостей матеріалу цієї зони. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень отримані наступні наукові і практичні результати.

1. Аналіз сучасного стану вальцеливарного виробництва та експлуатаційної стійкості валків показав, що основною причиною передчасного виходу валків з ладу є поламки шийок та бочок, що пов'язано з транскристалічністю в структурі бочок і низькими показниками міцності осьової зони валків. Отож, робота, яка спрямована на дослідження впливу внутрішньоформеного графітуючого модифікування чавунних прокатних валків на їх структуроутворення та механічні властивості, є актуальною.

2. Дослідження експлуатаційної стійкості, структури і властивостей матеріалу листо- і сортопрокатних валків серійного виробництва показали, що технологія їх виробництва потребує корегування для усунення транскристалічності в структурі бочок і підвищення міцності осьової зони валків.

3. Отримані залежності відбілу для сірого чавуну з пластинчастою формою графіту від кількості введених легкоплавких графітуючих модифікаторів трьох типів - алюмінію і комплексів хімічних елементів $Al+Si$, $Al+SiO_2$, згідно яких використання модифікатора $Al+SiO_2$ має найкращу графітуючу здібність. За середнім показником підвищення твердості чавунів дослідні модифікатори можна розмістити у такий зростаючий ряд: алюміній, комплекс хімічних елементів $Al+Si$ та модифікатор $Al+SiO_2$.

4. Використання модифікатора $Al+SiO_2$ при модифікуванні чавуну з кулястою формою графіту сприяло збільшенню графітної складової у структурі та не виявило демодифікуючої дії на фактор форми графіту.

5. Оптимізовано склад графітуючого сумішного модифікатора, що містить комплекс «алюміній+кремній» у кількості 30...45% та УДП діоксиду кремнію – 55...70%. Склад розробленого модифікатора був запатентований.

6. Обробка модифікатором оптимізованого складу, як для чавуну з пластинчастим, так і кулястим графітом, сприяє усуненню відбілу та підвищенню міцнісних властивостей чавунів на 3...18%.

7. Розроблена математична модель технологічного процесу внутрішньоформеного графітуючого модифікування розплаву легкоплавким модифікатором і твердіння литого валка у комбінованій ливарній формі та складений алгоритм розрахунку процесу його твердіння.

За допомогою розробленої математичної моделі визначені температурні параметри роботи легкоплавкого модифікатора при внутрішньоформеному модифікуванні осьової зони прокатних валків.

8. Розроблена нова конструкція пристрою для внутрішньоформеного графітуючого модифікування легкоплавким модифікатором, який забезпечує

необхідну точність початку процесу і стабільність ефекту модифікування. Розроблений пристрій відрізняється простотою і надійністю, а також можливістю багаторазового використання.

9. Визначені термочасові параметри процесу кристалізації валків, які відлиті із застосуванням внутрішньоформеного графітуючого модифікування легкоплавким модифікатором, та розроблено методи реалізації цього технологічного процесу. Промислові випробування показали надійність примусового модифікування. Модифікування валкових розплавів дозволило одержати робочий шар гарантованої товщини, а структуру осьової зони практично без цементитної складової. Застосування внутрішньоформеного модифікування осьової зони бочки валка дозволило усунути транскристалічність структури.

10. Механічні властивості ($\sigma_{\text{в}}^{\text{виг}}$, $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}}$) матеріалу бочок валків, що були промодифіковані за новою технологією, на 3...18, а верхніх та нижніх шийок – на 10...30% вище у порівнянні з валками серійного виробництва.

11. Результати роботи пройшли випробування у промислових умовах на ВАТ «Дніпропетровський завод прокатних валків» (акт від 17.10.07р.). Крім того, розроблені теоретичні положення використовуються в навчальному процесі в розділах лекційних курсів з дисциплін «Теоретичні основи ливарного виробництва» і «Виробництво виливків із спеціальних легованих та модифікованих чавунів і сталей» при підготовці бакалаврів та магістрів на кафедрі ливарного виробництва НМетАУ (акт від 15.01.09 р.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ ВИКЛАДЕНО В ПУБЛІКАЦІЯХ:

1. Соценко О.В. Методы внутриформенного модифицирования чугуна при литье прокатных валков / О.В. Соценко, А.Ю. Хитько // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2003. - № 4. – С. 41 – 44.

2. Хрычиков В.Е. Внутриформенное модифицирование чугуна прокатных валков / В.Е. Хрычиков, Хитько А.Ю. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. - № 1. – С. 73 – 76.

3. Хрычиков В.Е. Моделирование тепловых процессов нагрева и плавления модификатора в осевой зоне чугунного прокатного валка / В.Е. Хрычиков, Л.Х. Иванова, С. И. Решетняк, А. Ю. Хитько // *Сучасні проблеми металургії*. – 2007. – т.10. – С. 37-39.

4. Хрычиков В.Е. Модифицирование чугунных прокатных валков: регион. межвузов. сборн. науч. трудов / В.Е. Хрычиков, А.Ю. Хитько, А.В. Ковалев // *Системные технологии*. – 2005. - № 5 (40). – С. 52 – 55.

5. Пат. 80101 Україна, МПК (2006) В 22 D 7/06 (2007.01); В 22 D 15/00; В 22 D 27/20 (2007.01); С 21 С 7/04; С 21 С 7/076 (2007.01); С 22 С 35/00. Спосіб виготовлення виливків для одержання двошарових листопркатних валків, ливарна форма і модифікатор для здійснення способу / Хричиков В.Э., Хитько О.Ю., Кліменко Ф.К., Бойко Л.Г.; заявник та патентотримувач Національна металургійна Академія України/ - № 20040604860; заявл. 21.06.04; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13.

6. Матвеева М.О. Особенности структурообразования и ликвации в железоуглеродистых сплавах легированных азотсодержащими ферросплавами / М.О. Матвеева, А.Ю. Хитько, Б.В. Климович // Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inizytierii materialowej: IV Miedzynarodowa Sesja Naukowa: тезисы докл. – Czestochowa, 2003. – Seria Metalurgia nr 31. - С. 316 – 319.

7. Khrychikov V.E. Graphitizing Modification of Iron Forming Roll in Casting Mold / V.E. Khrychikov, Khitko A.U., Matveyeva M.O. // Process metallurgy – Summaries of lectures. – Zagreb. – 2004. –vol.43, br.3. – str. 232.

8. Хрычиков В.Е. Технология дифференцированного внутрiformенного модифицирования прокатных валков в литейной форме / В.Е. Хрычиков, А.Ю. Хитько // Теплотехника и энергетика в металлургии: Материалы XV международной конференции. - Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2008. – С. 7.

АНОТАЦІЯ

Хитько О.Ю. Графітізуюче модифікування чавунних прокатних валків у ливарній формі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.16.04 – Ливарне виробництво. - Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ, 2009.

Дисертація присвячена рішення науково-прикладної задачі, яка полягає у підвищенні якості виливків прокатних валків модифікуванням їх осьової зони, що забезпечує поліпшення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Одержані науково обґрунтовані та експериментально підтвержені результати. Сукупність цих результатів дозволила на рівні винаходу розробити високоефективну технологію внутрішньоформеної обробки чавунів графітізуючим модифікатором оптимального складу для валків с пластинчастим та кулястим графітом, механічні та експлуатаційні властивості котрих перевершують аналогічні властивості валків, виготовлених за серійними технологіями. Запропоновано і експериментально обґрунтовано застосування математичної моделі твердіння чавунного прокатного валка з введенням плавкого модифікатора. Модель описує стан елементів вказаної системи після заповнення ливарної форми та після модифікування, а також її стан та теплові процеси, які в ній проходять. За допомогою розробленої моделі можливо моделювання процесу твердіння розплаву з різними варіантами конфігурації модифікатора, діаметра валка, теплофізичних властивостей металу та ливарної форми. Складено алгоритм розрахунку процесу твердіння вилівка, котрий реалізовано в виді ком'ютерної програми. Обробка розплавів запропонованим графітізуючим модифікатором дозволяє підвищити механічні та службові властивості матеріалу валків, утилізувати відходи, котрі раніше не використовувалися.

Ключові слова: лиття, ливарна форма, чавун, графіт, модифікування, структура, властивість, прокатний валок

АННОТАЦІЯ

Хитько А.Ю. Графитизирующее модифицирование чугуновых прокатных валков в литейной форме. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – Литейное производство. - Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, 2009.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной задачи, заключающейся в повышении качества отливок прокатных валков модифицированием их осевой зоны, обеспечивающим улучшение их физико-механических и эксплуатационных свойств.

Исследованы эксплуатационная стойкость, структура и свойства материала листо- и сортопрокатных валков серийного производства. Показано, что технология производства валков нуждается в корректировке для устранения транскристалличности в структуре бочек и повышения прочности сердцевинной зоны валков, что позволит повысить их надежность при работе в прокатных станах.

Исследовано влияние легкоплавких графитизирующих модификаторов трех типов, в том числе алюминия и алюминиевого сплава АК12 на величину отбела, структуру и твердость чугуна с пластинчатым графитом. Разработан состав смесового графитизирующего модификатора, температура плавления которого на 500...570 °С меньше температуры затвердевания металла отливки.

Разработано устройство, обеспечивающее принудительный ввод модификатора в валковую форму для модифицирования сердцевины валка, выполненное в виде направляющей трубы с размещенной в ней штангой с модификатором. Устройство располагается на опоре, установленной над рабочей полостью, причем ход штанги составляет 0,8...0,9 высоты полости литейной валковой формы.

Разработаны методы реализации двух технологических процессов внутриформенного модифицирования: со свободным истечением модификатора разработанного состава в залитой литейной форме с размещением его при сборке формы в полости нижней ее части, формирующей нижнюю шейку валка, а также с принудительным модифицированием расплава в литейной форме через ее прибыльную часть. Внутриформенное модифицирование по обеим технологиям обеспечивает воздействие на осевую зону литой заготовки валка в определенный момент времени, предшествующий началу процесса ее затвердевания.

Проведенный сопоставительный анализ разработанных технологических процессов внутриформенного графитизирующего модифицирования осевой зоны валков показал, что наилучшие результаты достигаются при обработке расплава модификатором в залитой валковой форме путем принудительного ввода через прибыльную часть. Модифицирование способствует изменению столбчатой структуры на равноосную в сердцевинной зоне бочки валка, а также повышению

прочностных свойств материала этой зоны на 3...18%. Разработанный технологический процесс был запатентован.

Разработана математическая модель технологического процесса внутриформенного графитизирующего модифицирования легкоплавкими модификаторами и затвердевания литого валка в литейной форме. Получены расчетные формулы, которые позволяют моделировать процесс затвердевания расплава с различными вариантами конфигурации формы и химического состава модификатора, диаметра валка, теплофизических свойств его материала и валковой формы. Проведена адаптация разработанной модели с использованием результатов экспериментальных исследований процесса нагрева формы и кристаллизации в ней металла. Расчеты показали, что внутренней энергии расплава достаточно для расплавления, всплытия и распределения модификатора в объеме модифицируемой части отливки, что соответственно подтверждается проведенными экспериментами.

Ключевые слова: литье, литейная форма, чугуны, модифицирование, структура, свойство, прокатный валок.

SUMMARY

Hitko O. J. Graphite modification of cast-iron forming rolls in a casting-form. - The Manuscript.

Dissertation thesis for competition a scientific degree of Cand. Tech. Sci. on specialty 05.16.04– Foundry. – National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, 2009.

Dissertation is devoted to solving of scientific-applied problem concerning the improvement of rolls' quality by means of modifying axle zone of casting of a roll, that provides the improvement of their physical, mechanical and operational properties. Obtained data scientifically grounded and confirmed by the experiment. Combination of these results allowed to elaborate highly effective technology of inside of form treatment of cast-iron rolls with the help of graphite modifier of optimum composition for rolls with lamellar and spheroidal graphite. Their mechanical and operating properties exceed the same properties of rolls made in accordance with serial production technologies.

The application of mathematical model of solidifying of cast-iron roll with the help of adding fusing modifier is proposed and grounded experimentally.

The model shows the state of elements of the given system after filling of foundry loam mould and after modifying. Besides the state of the system and the heat processes taking place in it are shown.

It is possible with the help of given model to design the process of solidifying of melt with different variants of form and size of the modifier, the diameter of the roll, heat physical properties of metal and foundry loam mould. Algorithm of the process of solidifying of casting is worked out, and is realized in the form of the program. The treatment of melt by means of the given graphite modifier allows to improve mechanical and operating possibilities of the rolls' material, helps to utilize the wastes which haven't been used before.

Keywords: casting, casting form, cast iron, graphite, modifying, structure, property, forming roll.