

Іванова Л.Х., Колотило Є.В.

ЛИТІ ПРОКАТНІ ВАЛКИ З ЧАВУНУ З ВЕРМИКУЛЯРНИМ ГРАФІТОМ

Ivanova L., Kolotilo Ye.

BATHROOM BRAKE CIRCUITS WITH VERMICULAR GRAPHITE

Досліджено процеси структуроутворення в чавунах різного хімічного складу в діапазоні швидкостей охолодження 0,5 ... 5,5 град/с, що мають місце в валковій ливарній формі. Отримано науково обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, сукупність яких дозволила розробити високоефективні технології лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Експериментально встановлено оптимальні вмісти рідкісноземельних металів (РЗМ) у валкових чавунах з вермикулярним графітом при різних швидкостях охолодження. У чавунах з низьким вмістом сірки (до 0,03%) оптимальним є вміст РЗМ_{залиш} - 0,065 ... 0,176 (для швидкості охолодження 0,5 град/с) і 0,01 ... 0,156% (для швидкості охолодження 5,5 град/с). У чавунах з підвищеним вмістом сірки (до 0,10%) при досліджених швидкостях охолодження експериментально встановлені інтервали концентрацій РЗМ_{залиш}, що забезпечують отримання вермикулярних включень графіту: при швидкості охолодження 5,5 град/с - 0,081 ... 0,129%, а при швидкості 0,5 град/с - 0,161 ... 0,190%. При обробці розплавів комплексним модифікатором на основі магнію марки КМg9 вмісти Mg_{залиш} при швидкостях охолодження 5,5 і 0,5 град/с повинні бути в межах 0,022 ... 0,03 і 0,019 ... 0,03%, відповідно. При обробці ж розплавів сумішшю з КМg9 і ФС30РЗМ30 в складі чавуну необхідно мати 0,0071 ... 0,015% Mg_{залиш} і 0,023 ... 0,025% РЗМ_{залиш}. При таких вмістах модифікаторів отримані найкращі поєднання мікроструктури і фізико-механічних властивостей чавунів. Встановлені області виділення вермикулярних графітних включень у валкових чавунах при обробленні розплавів комплексним модифікатором на основі РЗМ і ферротитаном: при швидкості охолодження 5,5 град/с і вмісті титану 0,40 ... 0,42% область концентрацій РЗМ_{залиш} для стабільного отримання графітних включень вермикулярної форми розширювалася і становила 0,061 ... 0,169%, а при швидкості охолодження 0,5 град/с - 0,129 ... 0,230%. На підставі аналізу масиву експериментальних даних розроблені хімічні склади модифікованих РЗМ білих, половинчастих і сірих валкових чавунів з високими експлуатаційними властивостями, та новий склад високоефективного комплексного модифікатора на основі РЗМ марки ФС15Т20М25РЗМ10 для лиття відбілених та з невираженим відбілом прокатних валків з чавунів з вермикулярним графітом.

Удосконалений технологічний процес лиття відбілених листпрокатних валків за рахунок застосування для модифікування основного металу високоефективного комплексного модифікатора оптимального складу. Розроблено і освоєно технології отримання чавунів з вермикулярним графітом при литті валків виконань СВХН-60, СВХН-47 і ЛВ-58 для заміни валків виконань СПХН-60, СШХН-47 і ЛП-58 з використанням для модифікування розплавів сумішей, що складаються з двох модифікаторів – ФС30РЗМ30 і ФС15Т20М25РЗМ10 у співвідношенні 1:3.

Ключові слова: валковий чавун, рідкісноземельний метал, вермикулярний графіт, модифікатор, структура, властивість.

The processes of structuring in cast iron of different chemical composition in the range of cooling rates of 0.5 ... 5.5 deg / s, which take place in the roll casting mould, are investigated. Scientifically based theoretical and experimental results were obtained, the set of which allowed to develop highly effective technologies of casting of rolling rolls from cast iron with vermicular graphite with increased operational characteristics. Optimum content of rare earth metal (REM) in roller cast iron with vermicular graphite at different cooling rates was experimentally established. In the low sulfur (up to 0.03%) cast iron, the rare earth metal residual (REMres) content is 0.065 ... 0.176 (for a cooling rate of 0.5 deg / s) and 0.01 ... 0.156% (for a cooling rate of 5.5 deg / s). In the cast iron with high sulfur content (up to 0.10%), at the cooling rates studied, the intervals of concentrations of REMres have been experimentally established to provide the vermicular inclusions of graphite: at a cooling rate of 5.5 deg / s - 0.081-0.129%, and at a speed of 0.5 deg / s - 0.161 ... 0.190%. When modifying melts with a complex modifier based on magnesium KMg9, the Mg content at cooling rates of 5.5 and 0.5 deg / s should be within 0.022 ... 0.03 and 0.019 ... 0.03%, respectively, when treated with the complex KMg9 and FS30RZM30 in the cast iron it is necessary to have 0.0071 ... 0.015% Mg and 0.023 ... 0.025% REMres. With such content of modifiers, the best combinations of microstructure and physical and mechanical properties of castings are obtained. The areas of formation of vermicular graphite inclusions in roll cast irons were determined when processed with a complex modifier based on rare-earth metals and ferrotitanium: at a cooling rate of 5.5 degrees / s and a titanium content of 0.40 ... 0.42%, the concentration range of the rare-earth bridge for stable production of graphite inclusions of vermicular form has expanded and was 0.061 ... 0.169%, and at a cooling rate of 0.5 deg / s - 0.129 ... 0.230%.

The technological process of casting of bleached roller rolls has been improved due to the application of a highly effective complex modifier (ligature) of optimal composition for the modification of the base metal. The technology for the production of pig iron with vermicular graphite is developed and mastered at casting of rollers with the use of mixtures for modification consisting of two ligatures in the ratio of 1: 3.

Key words: roller cast iron, REM, vermicular graphite, ligature, structure, properties.

Постановка та аналіз проблеми. Поліпшення якості продукції ливарного виробництва, підвищення її надійності и довговічності є нагальною

вимогою нашого часу. Переважна частина виливків виготовляється з чавуну, тому вдосконалення його фізико-механічних властивостей и експлуата-

ційних характеристик служить важливим резервом у справі економії енергетичних і матеріальних ресурсів та інтенсивного розвитку промисловості.

Чавунні прокатні валки є складними виливками, в яких поверхневий робочий шар представлений білим (або половинчастим з кулястим або пластинчастим графітом), а серцевина - сірим чавуном з графітом таких само форм [1]. Якість литих чавунних валків, їх службові властивості залежать від багатьох чинників, але, головним чином, від фізико-хімічних властивостей застосовуваних розплавів і процесів, що протікають в період затвердіння і наступного охолодження їх у ливарній формі. Питанням формування структури білих чавунів присвячені роботи К.П. Буніна і його співробітників [2, 3].

Вперше у вітчизняній літературі термін «вермикулярний графіт» був введений в 1967 р. в роботі [4]. Було показано, що вермикулярний графіт (ВГ) утворюється в чавунах, що містять близько 0,01% магнію і невеликі концентрації церію. Область концентрації модифікаторів, які забезпечують отримання ВГ, розширюється при добавках 0,3% титану. Аналогічним чином діють добавки алюмінію і цирконію. Чавун з вермикулярним графітом (ЧВГ) має межу міцності при розтягуванні від 300 до 500 МПа, відносно подовження від 2 до 6% і модуль пружності близько 145000 МПа. У зв'язку з більш високою демпфувальною здатністю ЧВГ рекомендується застосовувати часто замість чавуну з кулястим графітом (ЧКГ).

ЧВГ відомий з моменту відкриття ЧШГ (1948 р.). Як конструкційний матеріал ЧВГ запропонували використовувати автори [5], а чітку класифікацію поняття вермикулярного графіту дав Шеленг (Shelleng R.D.) [6]. Від моменту відкриття ЧВГ до теперішнього часу інтерес до цього матеріалу значно зріс причому, як до технології його отримання, так і до застосування в різних галузях промисловості. Зокрема, в роботі [7] була показана перспективність застосування комплексних модифікаторів (КМ) на основі РЗМ для лиття прокатних валків з ЧВГ. До переваг ЧВГ [8] в порівнянні з чавуном з пластинчастим графітом (ЧПГ) слід віднести: більш високу міцність без застосування дорогих легувальних добавок; більш високу пластичність і в'язкість і обумовлене цим високий опір руйнуванню; нижчу схильність до окислення і зростання в разі використання при високих температурах.

В даний час питання теорії і практики виробництва та використання виливків з ЧВГ дуже широко висвітлені як у вітчизняній, так і в закордонній науково-технічній літературі. Так, в роботах [9,10] за допомогою оптичного, а також растрового і просвічуваного електронних мікроскопів був досліджений процес формування і структура ВГ, однак проблема формоутворення графітних включень вермикулярної форми досі перебуває в стадії робочих гіпотез.

Технологічні питання отримання ЧВГ для виливків різного призначення були розглянуті в багатьох наукових роботах. Показано, наприклад, що для отримання таких чавунів застосовують оброблення розплавів недостатніми для сфероїдизації графіту кількостями магнію або КМ на його основі, оброблення КМ різних складів. У цих роботах наведено кількісні і температурні параметри оброблення розплавів. Наприклад, авторами [11-13] зазначається, що самостійними напрямками робіт з технології отримання ЧВГ є застосування РЗМ на основі церію, мішметалу, фероцерію, КМ типу залізо-кремній-РЗМ або залізо-кремній-ітрій-мішметал. Ці напрямки отримали розвиток в СНД, Японії, Німеччині та Франції.

Метою роботи була розробка екологічно чистої технології виготовлення прокатних валків з ЧВГ, в тому числі визначення кількісних параметрів технології комплексної обробки розплавів для отримання графіту вермикулярним форми у валкових чавунах різного хімічного складу, розробка оптимального складу КМ і технології отримання прокатних валків з ЧВГ.

Як вже зазначалося, отримання ВГ у чавунах теперішнього часу здійснюють різними методами, які зводяться до оброблення розплавів: магнієм або його КМ до досягнення в чавуні залишкового вмісту магнію ($Mg_{\text{залиш}}$) 0,01 ... 0,03%; магнієм в поєднанні з добавками титану або алюмінію в кількостях 0,2 ... 0,5%; РЗМ; лігатурами типу залізо-кремній-РЗМ, залізо-кремній-РЗМ-титан-алюміній або залізо-кремній-магній-титан-кальцій. Низкою досліджень [4,14,15] однозначно було показано, що модифікування білих і половинчастих валкових чавунів металевим магнієм і його лігатурами призводить до зниження фізико-механічних властивостей. У зв'язку з цим в якості основного модифікатора був використаний КМ на основі РЗМ, для порівняння з ним - КМ на основі магнію, а з легувальних присадок - титан і мідь. Дослідження проводили в лабораторних умовах на базових валкових чавунах з різним вмістом сірки наступного хімічного складу, %: вуглець 3,82; кремній 1,06; марганець 0,84; фосфор 0,20; сірка 0,03 і 0,07; хром 0,45; нікель 2,15; залізо - решта.

У першій серії досліджень на 29 лабораторних плавках визначали вплив зростаючих кількостей лігатур ФС30РЗМ30 і КМг9, а також феротитану і міді на мікроструктуру і властивості валкового низькосірчистого чавуну.

Немодифікований низькосірчистий чавун при швидкості охолодження 5,5 град/с мав мікроструктуру половинчастого чавуну з невеликою кількістю графітних включень пластинчастої форми балу ПГФ2-ПГд180-ПГр3-ПГ2 ГОСТ 3443-87 і цементиту ледебуриту балу Ц40-Цп6000, металева основа виду ПТ1 і Ф складалася з перліту дисперсною ПД0,5 і 12% фериту. При охолодженні зі швидкістю 0,5 град/с той самий чавун мав мікроструктуру сірого перлітно-феритного чавуну з пластинчастим графітом, який характеризувався такими балами:

графіт ПГф1-ПГд350-ПГр3-ПГ10, матриця виду ПТ1 і Ф, П70 (Ф30), перліт дисперсною ПД1,0 і ПД0,5.

Відомо, що для отримання ЧВГ більшість дослідників рекомендують мати в розплаві $Mg_{залиш}$ - 0,01 ... 0,025%. З огляду на те, що при литті прокатних валків швидкості охолодження його різних частин значно вище або нижче, ніж при отриманні машинобудівних виливків, провели серію з 6 плавок для встановлення областей утворення в мікроструктурі досліджуваних чавунів графітних включень вермикулярної форми при модифікуванні лігатурою марки КМг9 ДСТУ 3362-96. Присадку лігатури змінювали в межах 0,3 ... 1,2 мас.% (від 0,012 до 0,37% $Mg_{залиш}$). При швидкості охолодження 5,5 град/с вже залишковий вміст магнію в чавуні 0,019% дозволив змінити форму графітних включень з пластинчастої на вермикулярну. Для швидкості охолодження 5,5 град/с область виділення графітних включень вермикулярної форми була обмежена концентраціями магнію 0,019 ... 0,022%. Слід зазначити, що модифікування лігатурою, що містить магній, при малих концентраціях (0,012%) викликало в мікроструктурі чавуну збільшення кількості графіту, а при подальшому підвищенні вмісту модифікатора відбувалося монотонне зменшення кількості графіту. Для швидкості охолодження 0,5 град/с область виділення графітних включень вермикулярної форми була обмежена концентраціями магнію 0,022 ... 0,026%. Настільки вузькі межі областей утворення і існування графітних включень вермикулярної форми роблять процес отримання їх дуже нестабільним. Однак, при отриманні в чавуні графітних включень вермикулярної форми рівень властивостей модифікованих магнієм чавунів був вищий, ніж у чавуну вихідного стану: межа міцності при вигині - на 8 ... 35, а межа міцності при розтягу - на 17 ... 29%.

Для визначення інтервалу концентрацій $P3M_{залиш}$, що дозволяє стабільно отримувати графітні включення вермикулярної форми, провели 8 плавок з обробленням вихідного чавуну зростаючими кількостями лігатури марки ФС30РЗМ30. Модифікування досліджуваних чавунів лігатурою ФС30РЗМ30 викликало при швидкості охолодження 5,5 град/с зміну форми графітних включень і збільшення ступеня дисперсності перліту. Вже при присадці 0,2 мас.% ФС30РЗМ30 ($P3M_{залиш}$ - 0,045%) в розплав чавуну близько 80% графітних включень в ньому набували вермикулярної форми балу ВГф2-ВГр1-ВГ100, яка зберігалася до концентрацій $P3M_{залиш}$ - 0,104% включно (рис.1, а). Графіт при вмісті $P3M_{залиш}$ - 0,085% в чавуні характеризувався балами ВГф2-ВГр1-ВГ92, а при вмісті $P3M_{залиш}$ - 0,104% - ВГф2-ВГр1-ВГ70. При концентраціях $P3M_{залиш}$ менше за 0,045% форма графітних включень залишалася пластинчастою. Подальше ж збільшення вмісту $P3M_{залиш}$ в чавуні понад 0,104 до 0,144% забезпечувало отримання в чавуні графітних включень кулястої форми балу ШГф4-ШГд45-ШГр1 і повне придушення їх виділення при

концентрації $P3M_{залиш}$ - 0,165%. Модифікування валькового чавуну $P3M$ призвело до значного зменшення (на 50...87,5%) кількості фериту. Кількість карбідної фази збільшилася незначно. Структурні зміни в чавунах супроводжувалися підвищенням їх міцнісних характеристик. За оптимальної присадки лігатури ФС30РЗМ30 0,5% і відповідно вмісті $P3M_{залиш}$ - 0,104% межа міцності при вигині підвищувалася на 14, межа міцності при розтягу - на 30 і твердість НВ - на 4% (рис.1, б). Крім того, міцнісні властивості чавунів, модифікованих лігатурою ФС30РЗМ30, були вищими, ніж чавунів модифікованих лігатурою КМг9, на 2 ... 4 і 3 ... 8%, відповідно [16].

При швидкості охолодження 0,5 град/с близько 30% графітних включень в досліджуваних чавунах набували вермикулярну форму балу ВГф1 ГОСТ 3443-87 при концентраціях $P3M_{залиш}$ - 0,085%, і тільки при концентраціях $P3M_{залиш}$ в інтервалі 0,104 ... 0,144% усі графітні включення набували вермикулярну форму балу ВГф2- ВГ98 ... ВГ85 ГОСТ 3443-87 (рис. 2, а). Збільшення концентрацій $P3M_{залиш}$ до 0,165% призвело до утворення тільки кулястого графіту балу ШГ4-ШГд45-ШГр1. Модифікування чавунів $P3M$ забезпечувало в матриці зменшення кількості фериту на 20...34% і підвищення дисперсності перліту. Твердість чавуну змінювалася незначно, міцнісні властивості підвищувалися в середньому на 27% - при отриманні графітних включень вермикулярної форми і на 38 ... 44% - при отриманні графітних включень кулястої форми (рис.2, б).

Отже, для швидкостей охолодження 5,5 і 0,5 град/с інтервали концентрацій $P3M$, що забезпечують отримання графітних включень вермикулярної форми в чавуні з низьким вмістом сірки, були невеликими і становили 0,045 ... 0,104 і 0,104 ... 0,144% відповідно.

Для розширення області утворення графітних включень вермикулярної форми застосували титан. На серії з 9 лабораторних плавок за мінімальної та визначеної для одержання графітних включень вермикулярної форми (швидкість охолодження 5,5 град/с) постійної у всіх випадках оброблення розплав лігатурою ФС30РЗМ30 мас.0,2% ($P3M_{залиш}$ - 0,040...0,045%) дослідили вплив зростаючих кількостей титану (0,04...0,59%) на мікроструктуру і міцнісні властивості низькосірчистого чавуну. Слід відмітити, що вже мінімальні кількості титану у складі чавуну (0,04%) дозволили одержати увесь графіт у вермикулярній формі при швидкості охолодження 5,5 град/с, а при швидкості 0,5 град/с - тільки 25% графітних включень мали вермикулярну форму. Збільшення вмісту титану в чавуні до 0,59% призводило до збільшення до 50% кількості вермикулярного графіту в чавунах, що тверділи зі швидкістю 0,5 град/с.

Міцність модифікованих $P3M$ чавунів, що містили 0,04 ... 0,08% титану і тверділи при швидкості 5,5 град/с, практично залишалися на рівні вихідних і знижувалися на 4 ... 9% в порівнянні з модифіко-

ваними, що не містили титану (рис. 1, б, г). При подальшому збільшенні вмісту титану до 0,41% міцнісні властивості чавунів зростали в середньому на 5% в порівнянні з модифікованими і на 9 ... 15% у порівнянні з вихідними чавунами. Збільшення

вмісту титану до 0,59% практично не впливало на міцнісні властивості досліджених модифікованих чавунів. Вплив же титану в дослідженому інтервалі концентрацій на міцнісні властивості чавунів, що тверділи зі швидкістю 0,5 град/с, був незначним.

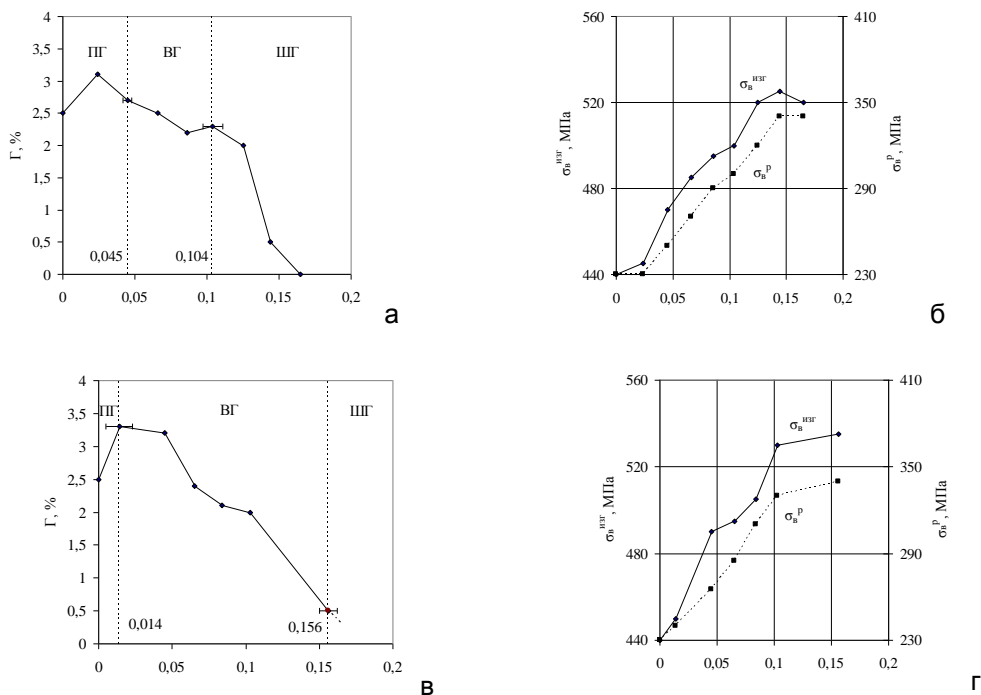


Рисунок 1. Зміна кількості і форми графітних включень (Г) та міцнісних властивостей низькосір-чистого чавуну залежно від вмісту PЗМ_{залиш} при швидкості охолодження 5,5 град/с після оброблення розплаву лігатурою FC30P3M30 (а, б) та сумісно лігатурою FC30P3M30 і оптимальною присадкою титану (в, г)

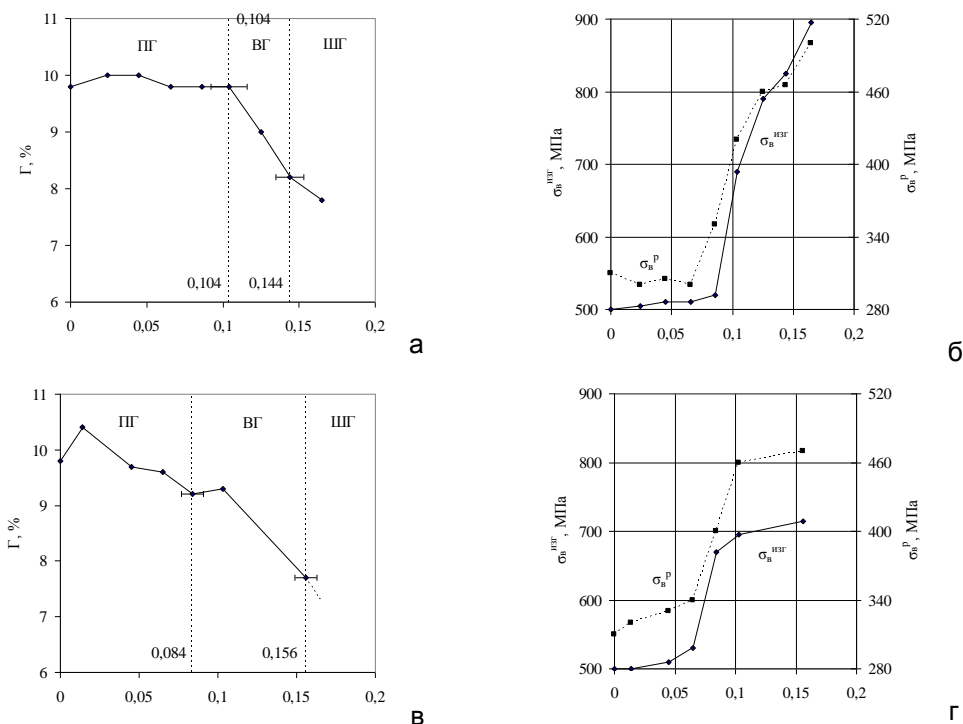


Рисунок 2. Зміна кількості і форми графітних включень (Г) та міцнісних властивостей низькосір-чистого чавуну залежно від вмісту PЗМ_{залиш} при швидкості охолодження 0,5 град/с після оброблення розплаву лігатурою FC30P3M30 (а, б) та сумісно лігатурою FC30P3M30 і оптимальною присадкою титану (в, г)

Отже, встановили, що оптимальним вмістом титану в модифікованих РЗМ чавунах слід вважати його концентрацію у межах 0,3 ... 0,5%.

Для встановлення області освіти графітних включень вермикулярної форми при обробленні зростаючими кількостями лігатури ФС30РЗМ30 при постійному вмісті титану 0,040 ... 0,042% провели 4 плавки, які показали, що за такого вмісту титану і швидкості охолодження 5,5 град/с вже при концентраціях РЗМ_{залиш} в інтервалі 0,065 ... 0,084% в чавуні виділялися графітні включення вермикулярної форми. Область виділення такого графіту розширювалася до концентрації РЗМ_{залиш} - 0,156%, потім слідувала область утворення графітних включень кулястої форми, а при концентрації РЗМ_{залиш} - 0,20% виділення графіту повністю придушувалося (рис.1, в).

Розширення області виділення графітних включень вермикулярної форми при обробленні чавуну лігатурою ФС30РЗМ30 і феротитаном відбувалося і за швидкості охолодження 0,5 град/с (рис. 2, в). Область утворення вермикулярного графіту розширювалася з інтервалу концентрацій РЗМ_{залиш} 0,104 ... 0,144 до інтервалу 0,084 ... 0,156%. Слід зазначити, що факт розширення області виділення графітних включень вермикулярної форми у бік зменшення залишкових вмістів РЗМ при введенні титану потребує додаткових дослідженнях. Однак, раніше в роботі [16] було вказано, що добавка губчастого титану в рідкий оброблений модифікатором чавун демодифікувальної дії не робить і навіть сприяє отриманню кулястого графіту, тобто проявляє модифікувальну дію, яка, очевидно, посилює дію РЗМ, що призводить до вермикулізації графітних включень за більш низьких вмістах модифікатора.

Характер зміни міцнісних властивостей чавунів, що оброблені феротитаном і лігатурою ФС30РЗМ30, при різних швидкостях охолодження був приблизно однаковим: ці властивості монотонно збільшувалися (рис.1, г і 2, г). Межа міцності при вигині зі збільшенням кількості титану в модифікованих чавунах підвищувалася максимально на 9, межа міцності при розтягу - на 28% при швидкості охолодження 5,5 град/с, а при швидкості охолодження 0,5 град/с - межа міцності при вигині підвищувалася на 40, межа міцності при розтягу - на 44%. Оптимальними залишковими вмістами РЗМ і титану в досліджуваних чавунах слід вважати 0,082 ... 0,085 і 0,40 ... 0,41%, відповідно, коли при досліджених швидкостях 5,5 і 0,5 град/с в їх мікроструктурі отримували тільки вермикулярний графіт. Властивості чавунів з оптимальними залишковими вмістами РЗМ і титану в порівнянні з вихідними чавунами були вищими: межа міцності при вигині на 15 і 38%, межа міцності при розтягу - на 35 і 29%, твердість - на 5 і 13%, відповідно при швидкостях охолодження 5,5 і 0,5 град/с.

У зв'язку з тим, що комплексна обробка чавунних розплавів тільки лігатурою ФС30РЗМ30 і спі-

льно лігатурою ФС30РЗМ30 і титаном не призвела до повного придушення виділення фериту, а оскільки матеріал прокатних валків повинен мати високу міцність, то наявність фериту в його структурі є небажаною. Тому для отримання чавунів перлітного класу необхідно було їх легувати, найчастіше вживаним для цього хімічним елементом - міддю [17].

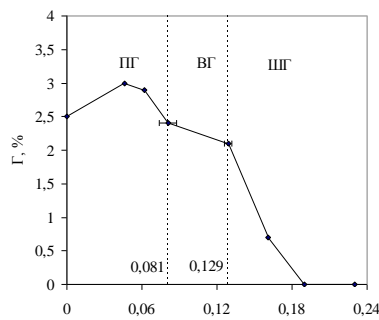
На серії з 4 лабораторних плавок, зафіксувавши вмісти РЗМ_{залиш} і титану в чавуні на оптимальних рівнях (0,082 ... 0,085 і 0,40 ... 0,41% відповідно), досліджували вплив легування зростаючими кількостями міді на структуру і властивості низькосірчистого чавуну. При швидкості охолодження 5,5 град/с повне придушення виділення фериту в матриці чавуну наступало при вмісті міді 0,34%. Збільшення концентрації міді в чавуні до 0,51% призводило до підвищення меж міцності при розтягу і вигині в порівнянні з чавунами, що не містили мідь, в середньому на 8 ... 10%. Збільшення вмісту міді понад 0,51% значного підвищення міцнісних властивостей не викликало. При швидкості охолодження 0,5 град/с повне придушення виділення фериту в мікроструктурі чавунів спостерігали при концентрації міді 0,51%, що і забезпечувало підвищення їх міцнісних властивостей в середньому на 12 ... 15%.

Таким чином, проведеним комплексом лабораторних досліджень було встановлено оптимальні вмісти РЗМ, титану і міді у валкових чавунах при різних швидкостях охолодження. Оптимальними є вмісти в чавунах титану 0,3 ... 0,5, міді 0,3 ... 0,5, РЗМ_{залиш} 0,065 ... 0,176 (для швидкості охолодження 0,5 град/с) і 0,01 ... 0,156% (для швидкості охолодження 5,5 град/с). При обробці розплавів лігатурою КМг9 вміст магнію при швидкості охолодження 5,5 і 0,5 град/с повинен бути в межах 0,022 ... 0,028 і 0,019 ... 0,03%, відповідно. При обробленні ж комплексом з лігатур КМг9 і ФС30РЗМ30 в складі чавуну для отримання найкращого поєднання мікроструктури і властивостей має бути 0,0071 ... 0,015% магнію і 0,023 ... 0,025% РЗМ_{залиш}.

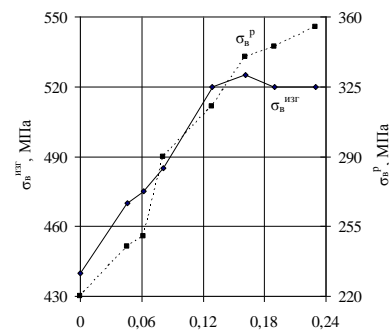
У другій серії досліджень визначали вплив зростаючих кількостей лігатур ФС30РЗМ30 і КМг9, а також феротитану і міді на мікроструктуру і властивості валкового високосірчистого чавуну на серії з 27 лабораторних плавок. Цей вихідний немодифікований чавун при швидкості охолодження 5,5 град/с мав структуру білого доевтектичного чавуну з невеликою кількістю (2,5%) графітних включень пластинчастої форми. Металева основа складалася з перліту дисперсністю ПД0,5 і 8,6% фериту. При охолодженні зі швидкістю 0,5 град/с чавун мав структуру сірого перлітно-феритного чавуну з пластинчастим графітом. Модифікування розплаву лігатурою ФС30РЗМ30 викликало при швидкості охолодження 5,5 град/с зміну форми графітних включень, збільшення дисперсності перліту і зменшення кількості ледебуриту стільникової будови. Графітні включення набували вермикулярну фор-

му при концентрації $P_{3M_{\text{залиш}}} = 0,081\%$. Така форма графітних включень зберігалася до концентра-

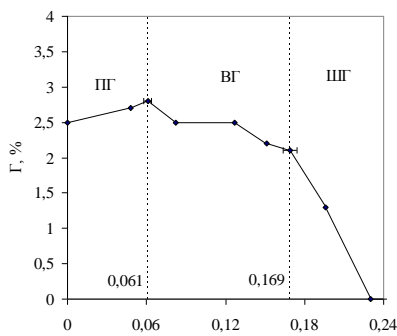
ції в чавуні $P_{3M_{\text{залиш}}} = 0,129\%$ (рис. 3, а).



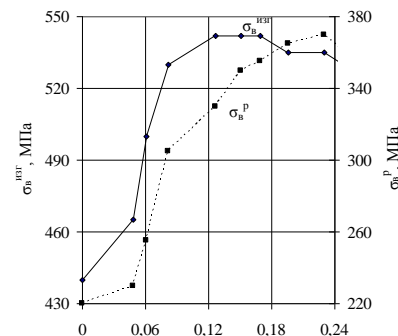
а



б



в



г

Рисунок 3. Зміна кількості і форми графітних включень (Г) та міцнісних властивостей високосірчистого чавуну залежно від вмісту $P_{3M_{\text{залиш}}}$ при швидкості охолодження 5,5 град/с після оброблення розплаву лігатурою ФС30P3M30 (а, б) та сумісно лігатурою ФС30P3M30 і оптимальною присадкою титану (в, г)

При концентраціях $P_{3M_{\text{залиш}}}$ менше за 0,081% форма графітних включень залишалася пластинчастою, а кількість графіту в досліджуваних чавунах декілька зростала в порівнянні з вихідним чавуном. Збільшення вмісту $P_{3M_{\text{залиш}}}$ понад 0,081% призводило до монотонного зменшення кількості графіту в мікроструктурі чавуну і до повного придушення виділення графітних включень при концентраціях $P_{3M_{\text{залиш}}} = 0,19\%$ і більше. При концентраціях в чавуні $P_{3M_{\text{залиш}}}$ менш за 0,129% аж до $P_{3M_{\text{залиш}}} = 0,19\%$ графітні включення в його мікроструктурі мали кулясту форму. Модифікування чавуну з підвищеним вмістом сірки лігатурою ФС30P3M30 призвело до значного зменшення кількості фериту (на 50 ... 60%) в мікроструктурі чавуну, однак повного придушення виділення фериту не спостерігалось. Кількість карбідної фази збільшувалася незначно: з 32 до 35%. Структурні зміни викликали значне підвищення міцності чавуну (рис. 3, б). При охолодженні розплаву зі швидкістю 0,5 град/с при концентраціях $P_{3M_{\text{залиш}}}$ в інтервалі 0,161 ... 0,19% графітні включення набували вермикулярну форму (рис.4).

Модифікування лігатурою ФС30P3M30 в оптимальних кількостях забезпечувало зменшення кількості фериту в матриці в середньому на 29% і підвищення дисперсності перліту. Твердість чавуну змінювалася незначно, міцнісні властивості підвищилися на 40... 51%.

Для розширення області утворення графітних включень вермикулярної форми в досліджуваних чавунах застосовували титан. Проведені дослідження показали, що при вмісті титану 0,40 ... 0,42% і швидкості охолодження 5,5 град/с область концентрацій $P_{3M_{\text{залиш}}}$, що забезпечують стабільне отримання графітних включень вермикулярної форми, розширювалася і становила 0,061 ... 0,169%, потім слідувала область чавуну з графітними включеннями кулястої форми і при вмісті $P_{3M_{\text{залиш}}}$ понад 0,23% виділення графітних включень повністю придушувалися (рис.3, в). Розширення області виділення графітних включень вермикулярної форми при обробленні чавуну лігатурою ФС30P3M30 і титаном відбувалося при швидкості охолодження 0,5 град/с від концентрацій 0,161 ... 0,19 до 0,127 ... 0,23% (рис.4, в). Для отримання чавунів перлітного класу вдавалися до додаткового легування розплавів міддю. На серії лабораторних плавок, зафіксувавши вмісти $P_{3M_{\text{залиш}}}$ і титану на оптимальних рівнях 0,134 ... 0,15 і 0,41 ... 0,45%, відповідно, досліджували вплив легування чавуну зростаючими кількостями міді: При швидкості охолодження 5,5 град/с повне придушення виділення фериту наступало при концентрації міді 0,34% і вище. Збільшення вмісту міді понад 0,5% значного підвищення міцнісних властивостей не викликало. При швидкості охолодження 0,5 град/с повне придушення виділення фериту спостерігали при концентрації міді 0,51% і вище.

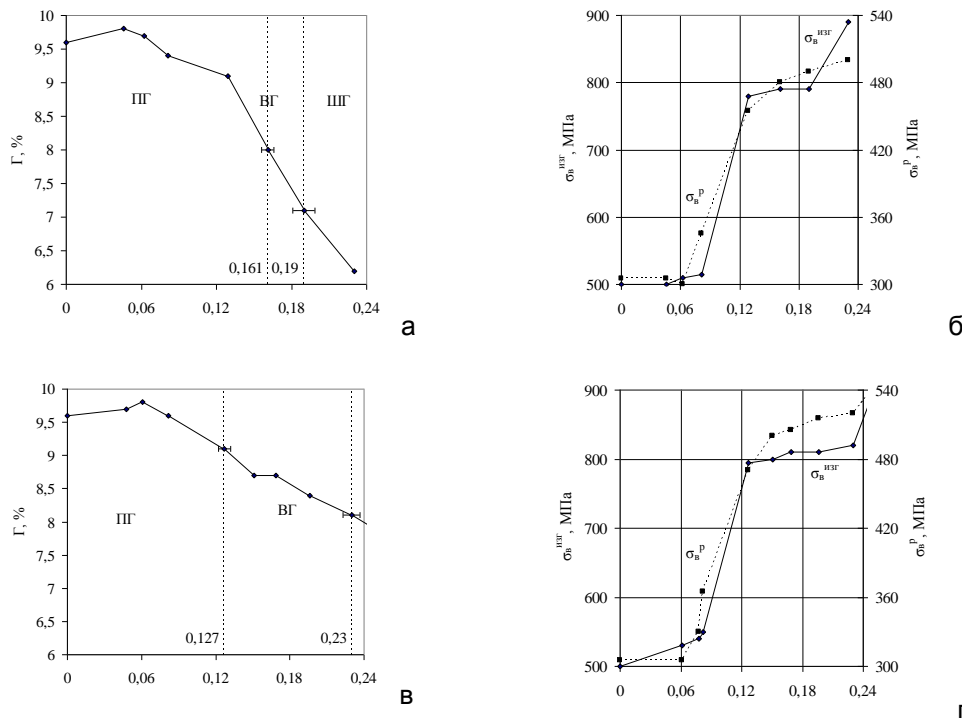


Рисунок 4. Зміна кількості і форми графітних включень (Г) та міцнісних властивостей високосірчистого чавуну залежно від вмісту РЗМ_{залиш} при швидкості охолодження 0,5 град/с після оброблення розплаву лігатурою ФС30РЗМ30 (а, б) та сумісно лігатурою ФС30РЗМ30 і оптимальною присадкою титану (в, г)

Таким чином, для чавуну з підвищеним вмістом сірки, що твердіє при швидкостях охолодження 5,5 і 0,5 град/с, інтервали концентрацій при обробленні розплаву лігатурою ФС30РЗМ30 вмісти РЗМ_{залиш}, які забезпечували отримання графітних включень вермикулярної форми, становили 0,081...0,129 і 0,161...0,19%, відповідно. При обробленні розплаву лігатурою ФС30РЗМ30, феротитаном і міддю у валкових чавунах з підвищеним вмістом сірки, що твердіють в інтервалі швидкостей охолодження, що мають місце у реальній валковій формі, одержані такі результати: оптимальними були вмісти у чавуні титану 0,3 ... 0,5, міді 0,3 ... 0,5, РЗМ_{залиш} 0,127 ...0,23 (для швидкості охолодження 0,5 град/с) та 0,061 ...0,169% (для швидкості охолодження 5,5 град/с) [18].

Третя серія досліджень була присвячена визначенню оптимального складу КМ з легувальними елементами відповідно до вальцеливарного виробництва. Вибір оптимального складу КМ здійснювали з використанням методу математичного планування експерименту. В якості незалежних змінних були обрані – вмісти у лігатурі РЗМ, титану і міді. Для реалізації завдання, що пов'язує показники фізико-механічних властивостей чавуну з вмістами обраних хімічних елементів у КМ, використовували планування експерименту по типу 4 x 4 латинського квадрату, досліді у комірках якого ставили у випадковому порядку. Обробку експериментальних даних, які були одержані в експерименті, та визначення оптимального складу КМ проводили

за допомогою комплексного показника якості – узагальненої функції бажаності D

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i},$$

де d_i – бажаність i -го параметра оптимізації ($i = 1, 2, 3$), що визначається рівнянням $d_i = \exp[-\exp(-y_i)]$;

y_i – i -тий параметр оптимізації.

Якість чавуну оцінювали 3 параметрами: y_1 - частка графітних включень вермикулярної форми в загальній кількості графіту Г,%; y_2 - кількість фериту в мікроструктурі чавуну Ф,%; y_3 - модуль пружності чавуну Е, МПа.

Особливості модифікувального впливу КМ вивчали в лабораторних умовах на технічних чавунах. Чавуни плавили в силітовій печі. В якості модифікаторів використовували КМ, отримані сплавленням лігатури з РЗМ на залізо-кременистій основі з індивідуальними РЗМ, феротитаном, міддю і карбонільним залізом. Метал після розплавлення і доведення за хімічним складом перегрівали до температури $1550 \pm 10^\circ\text{C}$, після чого піч відключали і при досягненні необхідної температури чавун модифікували в печі методом примусового занурення модифікатора. Після модифікування метал випускали і заливали форми діаметром 15 ... 25 і висотою 130 ... 150 мм. З отриманих виливків вирізали зразки для хімічного аналізу і визначення фізико-механічних властивостей.

В результаті проведеного експерименту встановлено, що до оптимальних параметрів КМ слід віднести вміст РЗМ - 10 і кремнію 15, титану 20 і міді 25%, при яких комплексний показник якості чавуну D мав максимальне значення 0,92, що в 2,4 ... 2,5 рази перевищує показник D вихідних чавунів. Лігатуру оптимального складу ФС15Т20М25РЗМ10 виплавляли спеціально в індукційній печі для подальшого дослідження в промислових умовах.

Четверта серія досліджень була присвячена розробці та удосконаленню технології лиття прокатних валків з комплексно модифікованих чавунів. Оскільки ЧВГ займає проміжне положення між ЧШГ і ЧПГ, дослідні плавки проводили, з одного боку - для заміни валків виконання СШХН, а з іншого - СПХН і ЛП. Метою цієї серії досліджень була розробка раціонального способу модифікування розплавів для лиття прокатних валків нових виконань - СВХН і ЛВ з використанням для модифікування розплавів сумішей, що складаються з комплексних модифікаторів ФС30РЗМ30, ФС15Т20М25РЗМ10 і КМг9.

За розробленою технологією шихтові матеріали розплавляли, після доведення металу за хімічним складом і при досягненні температури 1400 ... 1410°C весь метал випускали в підігрітий ківш з завантаженим в нього необхідною кількістю комплексних модифікаторів. Після випуску металу ливарний ківш передавали на стенд для видалення шлаку і при досягненні температури 1340 ... 1345°C здійснювали заливання валкових форм.

З метою відпрацювання технологічного процесу лиття в умовах вальцеливарного цеху були відлиті три дослідно-промислові партії прокатних валків з використанням для оброблення розплавів механічної суміші, що складається з двох лігатур: ФС30РЗМ30 і ФС15Т20М25РЗМ10 в співвідношенні 1:3. Сумарна кількість лігатур було в межах 1,8 ... 2,5% від маси розплаву. Обидві лігатури мали фракцію 60 ... 80 мм. Лігатури завантажували на дно підігрітого до 400 ... 500°C ливарного ковша. Порядок завантаження лігатур в ківш був наступним: спочатку ФС30РЗМ30, потім - ФС15Т20М25РЗМ10. Для порівняльного аналізу провели також дослідження валків-представників поточного виробництва - виконань СШХН-47, СПХН-60 і ЛП-58.

Робочий шар валка поточного виробництва виконання СШХН-47 мав структуру, що складається з графіту кулястої і компактної форм, перліту і цементиту, дисперсність перліту відповідала балу ПД1,0 і ПД0,5. У дослідному валку комплексна обробка забезпечила отримання графітних включень вермикулярної форми при невеликій кількості включень компактної форми. Кількість цементиту, графіту і дисперсність перліту в чавуні валків-представників поточного виробництва і дослідної партії були приблизно однаковими, проте кількість інших компонентів структури відрізнялося: фериту в чавуні дослідного валка практично не було, а перліту - на 7 ... 11% більше, ніж в чавуні валка пото-

чного виробництва. Мікротвердість цементиту в чавуні робочого шару дослідного валка була на 8% вище.

Структура чавуну робочого шару валка-представника поточного виробництва СПХН-60 складалася з перлітної матриці і невеликих кількостей графіту і фериту, а також карбідів і ледебуричної евтектики стільникової будови. Перліт мав дисперсність ПД0,5, графітні включення характеризувалися балами ПГФ2 і ПГФ3. У чавуні робочого шару валка-представника дослідної партії, відлитого з розплаву зі зниженим вмістом нікелю і обробленого сумішшю модифікаторів, перліт мав дисперсність ПД0,5 і ПД1,0. Графітні включення мали, в основному, вермикулярну форму, частково дрібно пластинчасту. Мікротвердість цементиту і перліту в валку поточного виробництва була вище.

На відстані 10 мм від поверхні валок з чавуну виконання ЛП-58 мав структуру доевтектичного чавуну, в розташуванні структурних складових спостерігалася стовпчатість. З віддаленням від робочої поверхні структура була грубішою, з'являлися графітні включення форми ПГФ2, зменшувалася кількість цементиту. Чавун робочого шару валка дослідної партії мав подібну до валка поточного виробництва структуру, відмінність полягала в декілька більшій кількості перліту (на 7 ... 9%) і меншій - фериту (на 15 ... 19%).

Проведені випробування механічних властивостей чавуну валків-представників показали, що більш високі міцнісні властивості в порівнянні з валками поточного виробництва мали дослідні валки СВХН-60 і ЛВ-58. Валки поточного виробництва і дослідні виконання СВХН-47 мали приблизно однакові властивості міцності, а твердість в дослідному валку була на 11...15% вище. Таким чином, результати проведених досліджень показали, що перспективною є заміна валків виконань СШХН-47 на СВХН-47, а СПХН-60 і ЛП-58 на СВХН-60 і ЛВ-58, тобто з ЧВГ.

Висновки

1. Досліджено вплив РЗМ на структуру і властивості валкових чавунів з різним вмістом сірки при швидкостях охолодження 5,5 і 0,5 град/с. Встановлено інтервали залишкових концентрацій РЗМ, що забезпечували отримання графітних включень вермикулярної форми.

2. Встановлено області виділення вермикулярних графітних включень в валкових чавунах, в тому числі з різним вмістом сірки при обробленні розплавів лігатурою ФС30РЗМ30 і феротитаном. Область концентрацій РЗМ_{залиш} для стабільного отримання графітних включень вермикулярної форми при введенні титану розширювалася.

3. Проведеним комплексом досліджень встановлено оптимальні вмісти міді при обробленні розплавів, які сприяли отриманню в структурі матриці чавунів тільки перлітної складової. Показано, що міцнісні властивості комплексно модифікованих і легованих чавунів в порівнянні з вихідними підвищуються. Встановлено необхідні вмісти РЗМ, ти-

тану і міді в валкових чавунах з різним вмістом сірки при різних швидкостях охолодження, що забезпечують отримання графітних включень вермикулярної форми. Визначено оптимальний склад лігатури для лиття прокатних валків - ФС15Т20М25РЗМ10.

4. У промислових умовах випробувані варіанти отримання ЧВГ при литті валків виконань СВХН-60, СВХН-47 і ЛВ-58 замість валків виконань СПХН-60, СШХН-47 і ЛП-58 з використанням для модифікування розплаву механічної суміші, що

складається з двох лігатур - ФМС30РЗМ30 і ФС15Т20М25РЗМ10 в співвідношенні 1:3. Таке оброблення дозволяло отримати перлітно-карбідно-графітні чавуни з високою дисперсністю перліту в матриці і графітними включеннями вермикулярної форми. Дослідженнями фізико-механічних властивостей чавунів від валків дослідних партій підтверджено, що розроблені нові типи валків можуть бути застосовані замість валків виконань СПХН-60, ЛП-58 і СШХН-47 в умовах високих до них вимог.

Библиографический список

1. Кривошеев, А.Е. Литые валки (теоретические и технологические основы производства) / А.Е.Кривошеев. – М.: Металлургиздат, 1957. – 360 с.
2. Бунин, К.П. Строение чугуна /К.П.Бунин, Ю.Н.Таран. – М.: Металлургия, 1972. –200 с.
3. Таран, Ю.Н. Структура эвтектических сплавов /Ю.Н. Таран, В.И. Мазур.–М.: Металлургия, 1968. – 312 с.
4. Белаї, Г.Е. Исследование влияния модифицирования на кристаллизацию чугуна, структуру и свойства листопрокатных валков: Дис. ... канд. техн. наук: 05.323. – Д., 1967. – 298 с.
5. Estes, I.W. New high strength cast irons, produced by injections methods/ I.W. Estes, R. Schneidewind // AFS Transaction.–1955. □–Vol.63.– P. 541–542.
6. Shelleng, R.D. Effect of certain elements on the form of graphite in cast iron/ R.D. Shelleng // AFS Cast Met. Res. J.–1967.–Vol.3, №1.–P. 30–38.
7. Колотило, Е.В. Прокатные валки из модифицированного чугуна с вермикулярным графитом / Е.В.Колотило, О.П.Кондратьев, И.И.Ануфриев, И.Г. Ермолин // Совершенствование технологических процессов литья в мелкосерийном и единичном производстве: Науч.–техн. конф. литейщиков Урала. Пермь, 23–24 апр. 1979 г. – Пермь, 1980.–С. 18–19.
8. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В. Захарченко, Ю.Н. Левченко, В.Г. Горбенко, П.А. Вареник. – К.: Наук. думка, 1986. –248 с.
9. Механизм формирования вермикулярного графита в чугуне / Х.Ито-фудзи, Ю.Кавано, Н.Инояма, Т.Ниси // Имоно. – 1984.–Т.56, №6.–С. 329–336.
10. Захарченко, Э.В. Строение и пространственная форма вермикулярного графита в медленно затвердевших термостойких чугунах/ Э.В. Захарченко, К.Р. Лопер // Литые чугуны со специальными свойствами: Сб. науч. тр. ИПЛ АН УССР. –К., 1987.– С.27–32.
11. Riposan, J. Fonta cu grafit vermicular / J.Riposan, L. Sofroni.–Bucuresti, 1984.– 335 s.
12. Kolotilo, E.V. Vermicular graphite iron. A promising mill roll material / E.V Kolotilo, L.Kh. Ivanova //Soviet castings technology.-1989.-№6.– P.3-4 (Scopus)
13. Ivanova, L.Kh. Improving the service properties of cast iron rolls by modifying the melts with rare-earth metals / L.Kh. Ivanova, E.V. Kolotilo, Y.S Maimur., D.V. Mukha // Metallurgical and mining industry.– 2012.– Vol. 1, № 1.– P.17-18. (Scopus)
14. Николаев, Н.А. Исследование влияния химического состава и некоторых технологических факторов на качество листопрокатных валков: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.323/ Днепрпетр. металлург. ин-т.–Д., 1968.–21 с.
15. Колотило, Е.В. Исследование и усовершенствование процессов производства листопрокатных валков из модифицированных чугунов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. – Д., 1977. – 207 с.
16. Руденко, Н.Г. Изучение ремодифицирующего влияния церия, лантана и титана на процессы формообразования графита при кристаллизации чугуна: Автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.323/ ИПЛ АН УССР.–К., 1969.–24 с.
17. Репина, Н.И. Влияние меди на формирование структуры серого чугуна: Дис. ... канд. техн. наук: 05.320.–Д., 1968.–223 с.
18. Иванова, Л.Х. Теоретические основы и практические методы получения литых прокатных валков из комплексномодифицированных чугунов: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.04. – Д., 2008. – 499 с.

References

1. Kryvosheyev, A.E. Lyti valky (teoretychni ta tekhnolohichni osnovy vyrobnystva) / A.E.Krivosheev.- M. : Metallurhyzdat, 1957. -360 s.
2. Bunin, K.P. Budova chavunu /K.P.Bunin, YU.N.Taran.- M.: Metalurhiya, 1972. 200 s.
3. Taran, YU.N. Struktura evtektichnykh splaviv /YU.N. Taran, V.I. Mazur.-M.: Metalurhiya, 1968. - 312 s.
4. Belay, H.YE. Doslidzhennya vplyvu modyfikuvannya na krystalizatsiyu chavunu, strukturu i vlastyosti lystoprokatnykh valiv: Dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.323.- D., 1967.- 298 s.

5. Estes, I.W. New high strength cast irons, produced by injections methods / I.W. Estes, R. Schneidewind // AFS Transaction.-1955.-Vol.63.- P. 541-542.
6. Shelling, R.D. Effect of certain elements on the form of graphite in cast iron / R.D. Shelling // AFS Cast Met. Res. J.-1967.-Vol.3, №1.-P. 30-38.
7. Kolotylo, E.V. Prokatni valky z modyfikovanoho chavunu z vermikulyarnym hrafitom / E.V.Kolotilo, O.P.Kondrat'ev, I.I.Anufriev, I.H. Ermolyn // Udoskonalennya tekhnologichnykh protsesiv lyttya v dribnose-rynomu i odynychnomu vyrobnytstvi: Nauk.-tekhn. konf. lyvarnykiv Uralu. Perm, 23-24 kvit. 1979 h. - Perm, 1980.-S. 18-19.
8. Vidlyttya z chavunu z kulyastym i vermikulyarnym hrafitom / E.V. Za-Kharchenko, YU.N. Levchenko, V.H. Horbenko, P.A. Varenyk. - K.: Nauk. dumka, 1986. -248 s.
9. Mekhanizm formuvannya vermikulyarnoho hrafitu v chavuni / KH.Itofudzy, YU.Kavano, N.Inoyama, T.Nisi // Imon. - 1984.-T.56, №6.-S. 329-336.
10. Zakharchenko, E.V. Budova i prostorova forma vermikulyarnoho hrafitu v povilno zatverdilykh termostykykh chavunakh / E.V. Zakharchenko, K.R. Loper // Lyttya chavuniv zi spetsialnymy vlastyvostyamy: Zb. nauch. tr. YPL AN URSSR. -K., 1987.- S.27-32.
11. Riposan, J. Fonta cu graphit vermicular / J.Riposan, L. Sofroni.-Bucuresti, 1984.- 335 s.
12. Kolotilo, E.V. Vermicular graphite iron. A promising mill roll material / E.V Kolotilo, L.Kh. Ivanova // Soviet castings technology.-1989 №6.- P.3-4 (Scopus)
13. Ivanova, L.Kh. Improving the service properties of cast iron rolls by modifying the melts with rare-earth metals / L.Kh. Ivanova, E.V. Kolotilo, Y.S Maimur., D.V. Mukha // Metallurgical and mining industry.- 2012 Vol. 1, № 1.- P.17-18. (Scopus)
14. Mykolayiv, N.A. Doslidzhennya vplyvu khimichnoho skladu i deyakykh tekhnologichnykh faktoriv na yakist' lystoprokatnykh valiv: Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.323 / Dnipropetr. metalurh. in-t.-D., 1968.-21 s.
15. Kolotylo, E.V. Doslidzhennya ta udoskonalennya protsesiv vyrobnytstva lystoprokatnykh valiv z modyfikovanykh chavuniv: Dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.16.04.- D., 1977.- 207 s.
16. Rudenko, N.H. Vyvchennya remodifitsiruyushcheho vplyvu tseriyu, lantanu i tytanu na protsesy formoutvorennya hrafitu pry krystalizatsiyi chavunu: Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.323 / YPL AN USSR.-K., 1969.-24 c.
17. Ryepina, N.I. Vplyv midi na formuvannya struktury siroho chavunu: Dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.320.- D., 1968.-223 s.
18. Ivanova, L.Kh. Teoretychni osnovy i praktychni metody oderzhannya lytykh prokatnykh valkiv z kompleksnomodifitsirovanykh chavuniv: Dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.16.04. - D., 2008. - 499 s.

Стаття поступила 1.11.2018