

І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 669.15:621.43

Д-р техн. наук Слинько Г. І., Слинько В. В.
Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ І КЕРУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ФОСФОРИСТИХ ЧАВУНІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

Мета роботи. Підвищення механічних та експлуатаційних властивостей деталей двигунів внутрішнього згорання шляхом керування структуроутворенням фосфористих чавунів.

Методи дослідження. Досліджували графітізовані та відбілені фосфористі чавуни з пластинчастим і кулястим графітом лабораторних і промислових плавок, виплавлених в індукційних електричних печах з легуванням і модифікуванням та фракційним заливанням в сухі піщані форми. Хімічний склад, мікроструктуру, фізико-механічні властивості визначали за стандартними методиками. Неруйнівний контроль якості деталей двигунів, статистичний аналіз експериментальних даних та детермінований факторний аналіз впливу структурних складових на властивості дослідних чавунів виконували за методиками, розробленими за участі авторів. Стендові і шляхові моторні випробування деталей з чавунів оптимальних складів проводили на двигунах за стандартними і заводськими методиками у відповідності з державними стандартами.

Отримані результати. Визначено загальні закономірності і принципи формування мікроструктури чавунів з пластинчастим і кулястим графітом в залежності від ступеня їх легування фосфором і впливу масштабного чинника. Встановлено, що фосфідна евтектика в кількості до 5,8 % є зміцнюючою структурною складовою і підвищує міцність, твердість, зносостійкість, термостійкість, оброблюваність лезовим інструментом фосфористих чавунів. Негативний вплив фосфідної евтектики на пластичні властивості і циклічну тріщиностійкість менш значний, ніж вплив зростаючих кількостей фериту, розмірів його зерен і графіту. Рекомендовано оптимальні хімічні склади та мікроструктури фосфористих чавунів для деталей двигунів внутрішнього згорання.

Наукова новизна. Вперше розроблено комплексну систему керування властивостями фосфористих чавунів, включаючи аналітичне визначення необхідних характеристик структурних складових і технологію їх отримання.

Практична цінність. Розроблено способи і технології плавки, легування, модифікування, термічної обробки та поверхневого зміцнення фосфористих чавунів, які дозволяють забезпечити необхідний рівень механічних і експлуатаційних властивостей деталей двигунів внутрішнього згорання.

Ключові слова: чавун, фосфідна евтектика, структуроутворення, властивості, деталі двигунів внутрішнього згорання.

Вступ

Ресурс двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) до капітального ремонту, а також їх безвідмовність та паливна економічність обмежуються, головним чином, низькими властивостями конструкційних матеріалів їх деталей. В конструкції ДВЗ широко використовуються литі чавунні деталі. Це, в першу чергу, деталі з сірого чавуну з пластинчастим графітом (ЧПГ) для таких деталей як блоки, головки, гільзи циліндрів, розподільчі вали, напрямні втулки, сідла клапанів та інш. Значне застосу-

вання у двигунобудуванні знаходять деталі з чавуну з кулястим графітом (ЧКГ), такі як розподільчі вали, шатуни, поршні і поршньові кільця та інш. Найбільш навантаженими вузлами двигунів є клапанний механізм газорозподілення та циліндро-поршнева група. Деталі цих вузлів працюють в умовах підвищених температур, знакомінних навантажень з обмеженим змащенням.

Аналіз літературних джерел, постановка проблеми

Проблема підвищення механічних та експлуатаційних властивостей деталей ДВЗ є комплексною і вклю-

час в себе багато складних взаємопов'язаних питань, таких як застосування структурно зміцнених матеріалів із заданими властивостями, прогресивних технологічних методів їх виробництва і зміцнення поверхонь тертя. В цьому плані найбільш перспективними є леговані фосфором чавуни. Легування фосфором дозволяє підвищити механічні і службові властивості сірих, високоміцних та легованих чавунів [1–4]. З іншого боку, легування чавунів фосфором сприяє зниженню їх механічних властивостей [5–6].

Отже, при виготовленні литих заготовок деталей ДВЗ фосфор можна розглядати з одного боку, як шкідливий хімічний елемент, а з іншого – як легувальний, при внесенні якого в розплав, в чавунах утворюється фосфідна евтектика та підвищуються їх механічні властивості. За відсутності комплексних досліджень у цьому напрямі метою даної роботи було дослідження структуроутворення у фосфористих чавунах за різних умов кристалізації та впливу структури на фізико-механічні та експлуатаційні властивості деталей ДВЗ.

Методика досліджень

Виходячи з результатів попередніх досліджень щодо розподілу хімічних елементів у структурних складниках чавуну були виплавлені і досліджені синтетичні фосфористі чавуни з пластинчастим і кулястим графітом, складу, мас. %: 2,8...2,9 C; 2,4...2,8 Si; 0,7...0,9 Mn; до 0,008 S; 0,06 Cr; до 0,2 Ni (у ЧПГ); 0,4...0,5 Ni та 0,03...0,05 Mg (у ЧКГ); Fe – решта. Плавлення чавунів вели в індукційній тигельній електропечі з використанням стандартних шихтових матеріалів, модифікаторів, лігатури і карбюризатора. При фракційному zalиванні дослідних зразків у сухі стержневі форми чавуни легували зростаючими домішками фосфору у межах 0,015...1,0 %.

Результати досліджень

Металографічний аналіз синтетичних фосфористих чавунів показав, що їх структура в литому стані складалася з перлітної металевої матриці, вкраплень графіту пластинчастої або кулястої форми (в залежності від типу чавуну), фосфідної евтектики (ФЕ) та фериту, який оточував графітові вкраплення (рис. 1). В чавунах з вмістом фосфору 0,04...0,055 % (рис. 1а, з) ФЕ не утворювалась у зв'язку з повним розчиненням фосфору в залізі. ФЕ величиною до 50 мкм утворювалась при вмісті 0,08...0,09 % фосфору в чавунах (рис. 1б, д). Слід відзначити, що в чавуні з пластинчастим графітом окрім ФЕ з'явилися ще й вкраплення фериту, який розташовувався у безпосередній близькості до графітових вкраплень прямолинійної форми (рис. 1б), що вказує на графітизуючу дію фосфору в чавунах. При збільшенні вмісту фосфору в дослідних чавунах до 0,35...0,50 % кількість та розміри ФЕ збільшувались (при 0,35 % P) та утворювали розірвану сітку (при 0,5 % P). Подальше збільшення домішок фосфору в розплаві сприяло утворенню при кристалізації чавуну суцільної сітки ФЕ по межах зерен евтектоїду (рис. 1в, е). При цьому в

дослідних чавунах утворювався ферит в безпосередній близькості до графітових вкраплень, а також цементит у вигляді пластин в структурі фосфідної евтектики.

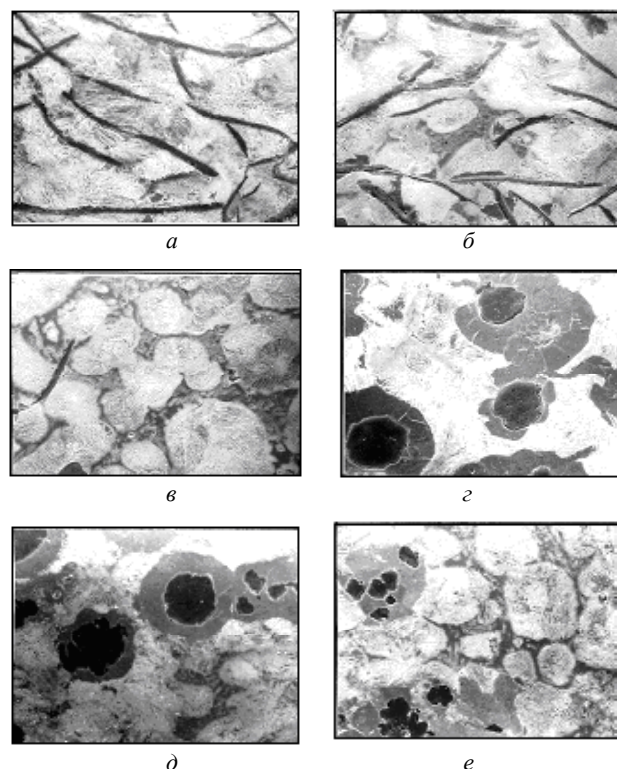


Рис. 1. Вплив домішок фосфору на утворення фосфідної евтектики в чавунах ($\times 350$):

Вміст фосфору в чавунах, %: а – 0,055; б – 0,09; в – 0,76; з – 0,04; д – 0,08; е – 0,75а, б, в – чавун з пластинчастим графітом; з, д, е – чавун з кулястим графітом

Наявність незначної кількості цементиту в структурі фосфористого чавуну вказує також на слабку карбідоутворюючу дію фосфору в чавунах з пластинчастим та кулястим графітом. Будова ФЕ залежала від кількості домішок фосфору в чавунах. Відповідно до ГОСТ 3443-87 її класифікували як потрійну дрібнозернисту (ряд 1 ФЕ 3 в кількості до 45 %), потрійну гольчасту (ряд 1 ФЕ 4 в кількості до 50 %) та потрійну з пластинами цементиту (ряд 1 ФЕ 5 в кількості близько 10 %). Об'ємний вміст ФЕ і розміри її вкраплень збільшувалися зі збільшенням домішок фосфору. Більші розміри вкраплень ФЕ були в ЧКГ.

Аналіз взаємозв'язку розмірних параметрів ФЕ та графіту дав можливість дійти висновку, що оптимальні властивості можуть мати чавуни з вмістом 0,25...0,35 % фосфору. Довжина вкраплень фосфідної евтектики і графіту в ЧПГ не перевищує 85 мкм, в ЧКГ вкраплення ФЕ перебувають в межах 85...115 мкм, а діаметр графітових куль – 40...55 мкм.

Дослідження впливу масштабного чинника на структуру фосфористих чавунів показало, що у литих

зразках діаметром 10 мм незалежно від вмісту фосфору структура матриці була перлітною. Максимальна кількість фериту не перевищувала 6 % для чавунів, легованих 1,0 % Р.

При збільшенні діаметра зразків до 100 мм у структурі чавунів з вмістом фосфору 0,015 % кількість фериту збільшилась до 20 (ЧКГ) і 30 (ЧПГ) відсотків. При легуванні тих же чавунів фосфором до 1,0 %, коли у зв'язку зі зниженням швидкості евтектичної кристалізації та охолодження чавунів ФЕ розташовувалась у вигляді суцільної сітки, кількість фериту в них зросла до 40 % (ЧКГ) і 50 % (ЧПГ), що вказує на значну феритизуючу дію фосфору у масивних виливках [7, 8].

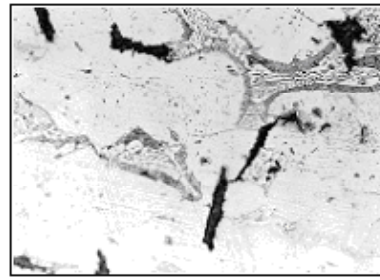
У відпалених зразках встановлено зростання діаметра зерен фериту під дією зростаючих домішок фосфору. У ЧПГ їх величина збільшувалась від 10,0 (при 0,015 % Р) до 24,0 (при 1,0 % Р) мкм, а у ЧКГ – від 20,0 (при 0,015 % Р) до 35,0 (при 1,0 % Р) мкм. Найбільш інтенсивне зростання діаметра зерен до 19,0 (у ЧПГ) і 30,0 (у ЧКГ) мкм було встановлено при збільшенні домішок фосфору в чавунах у межах 0,015...0,35 %. Подальше легування чавунів фосфором (до 1,0 %) спричинило незначне зростання діаметра зерен фериту: до 24,0 мкм (у ЧПГ) та до 35,0 мкм (у ЧКГ).

Після відпалювання чавунів з вмістом фосфору до 0,35 % фосфідна евтектика перетворилась на псевдоподвійну (фосфід і ферит) ряд 1 ФЕ1 (рис. 2а) та (фосфід і цементит) ряд 1 ФЕ2 (рис. 2б). В той же час у високофосфористих чавунах ФЕ з цементитною пластиною (ряд 1 ФЕ5) змінилася на потрійну (ряд 1 ФЕ3 та ФЕ4). Такі зміни свідчать, що перетворення цементиту в графіт проходили дифузійну під дією високих температур. Фосфор, на наш погляд, не брав участі у цих перетвореннях, бо він був відсутній у цементиті.

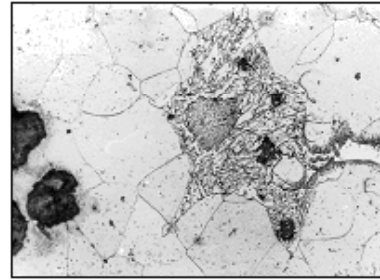
Рекристалізація та високотемпературне нормалізування дослідних чавунів з температури 870 °С не вплинули на будову ФЕ, а лише спричинили утворення перлітної та сорбітної матриць чавуну.

Статистичний аналіз взаємозв'язку характеристик ФЕ, графіту і металевої матриці показав, що між ними існує тісний кореляційний зв'язок (коефіцієнти кореляції $r \sim 0,95$). Встановлено також прямі і зворотні аналітичні і графічні залежності між всіма досліджуваними характеристиками структурних складників, що дає можливість аналітично визначити структурний склад фосфористих чавунів за наявності хоча б одного структурного складника, або фази, наприклад графіту.

В результаті вивчення впливу мікроструктури на фізико-механічні, технологічні та експлуатаційні властивості фосфористих чавунів встановлено, що провідну роль щодо впливу на вказані властивості відіграє ФЕ. Аналітично визначено вплив фосфідної евтектики на границю міцності феритних фосфористих чавунів при розтягу [9]. Аналітичний вираз має вигляд:



а



б

Рис. 2. Фосфідна евтектика в графітізованих фосфористих чавунах, легованих 0,4 % Р ($\times 500$): а – чавун з пластинчастим графітом; б – чавун з кулястим графітом. Травлено 4 % HNO_3

$$\sigma_e^p = \sigma_e^m / \Phi(\varepsilon, \lambda, a_1, a_2), \quad (1)$$

де σ_e^p – розрахункова міцність фосфористого чавуну, МПа;

σ_e^m – міцність матриці феритного чавуну, МПа;

ε – коефіцієнт, який враховує співвідношення модуля зсуву вкраплення ФЕ до модуля зсуву чавуну;

λ – параметр форми вкраплення ФЕ;

a_1, a_2 – коефіцієнти, які враховують співвідношення довжини вкраплення ФЕ до середніх відстаней між вкрапленнями ФЕ по горизонталі (a_1) та вертикалі (a_2).

Встановлено, що розрахункова крива має екстремальний характер. Максимальна міцність досягається за наявності у чавуні 2...3 % ФЕ, розташованої у вигляді окремих вкраплень в металевій матриці. Оптимальною є наявність у чавуні до 5,8 % ФЕ. Експериментально підтверджено розрахункові дані. Розбіжність між розрахунковими і експериментальними даними склала $\pm 3,5\%$, що підтверджує коректність аналітичних досліджень.

Експериментально встановлено три типи залежностей властивостей чавунів від зростаючих кількостей в них ФЕ: з екстремумом; зростаючі; спадаючі.

До першого типу залежностей належать: міцність при розтягу (при 20 °С і 450 °С) і стиску, оброблюваність лезовим інструментом, термостійкість. Екстремальний характер залежностей пояснюється поступовим зміцненням матриці фосфором за твердорозчинним механізмом (чавуни, що містять 0,015...1,0 % Р), за дисперсійним механізмом – окремими вкрапленнями ФЕ у чавунах, що містять 0,15...0,3 % Р. При легуванні ча-

вунів фосфором у кількості 0,20...0,25 %, коли довжина вкраплень ФЕ є близькою 90 мкм, досягаються екстремальні значення досліджуваних властивостей. При подальшому збільшенні домішок фосфору до 0,35...0,50 %, коли вкраплення ФЕ збільшуються у розмірах і утворюється розірвана сітка – починається поступове зниження міцнісних характеристик, а потім і катастрофічне руйнування чавунів, що містять 0,70...1,0 % P, коли ФЕ розташована по межах зерен у вигляді суцільної сітки. Армувальні властивості ФЕ наочно проявляються у зміцнених нею, чавунів при 450 °С. При середньому зниженні міцності при розтягу на 42,0 % найбільш стійкими до впливу високої температури виявились чавуни, леговані 1,0 % P, міцність яких знизилась лише на 7 (ЧПГ) і 23 (ЧКГ) %, відповідно за рахунок наявності в них термостійкого, порівняно з матрицею, структурного складника – фосфідної евтектики.

До зростаючих властивостей фосфористих чавунів належать твердість, зносостійкість та порогові характеристики циклічної тріщиностійкості. При зміцненні феритних чавунів за вказаними вище механізмами їх твердість зростає майже вдвічі (95,5...184 НВ для ЧПГ і 123...219 НВ для ЧКГ). Зміна матриці з феритної на перлітну і сорбітну сприяла загальному підвищенню твердості нелегованих чавунів в 1,4 (перлітні) та 2,5 (сорбітні) рази. Характер підвищення їх твердості при легуванні фосфором був аналогічний феритним чавунам. Характеристики зносостійкості ЧПГ і ЧКГ різко зростали при легуванні їх фосфором у межах 0,015...0,35 %. Збільшення домішок фосфору до 0,6 % сприяло підвищенню зносостійкості чавунів, але менш інтенсивно. Легування чавунів у межах домішок фосфору 0,6...1,0 % стабілізувало процес зношування як чавунних зразків, так і контргіл із загартованої сталі 45. Зношування чавунів знижувалось від 0,044 до 0,006 кг/м²·год в межах їх легування від 0,3 до 1,0 % P. Як бачимо, армувальні та фрикційні властивості ФЕ виявляються дуже ефективно у разі випробувань чавунів (особливо ЧКГ) на зношувальність [10].

До властивостей, що знижуються під впливом зростаючих домішок фосфору або кількості ФЕ належать густина $\left(\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10^3\right)$, характеристики міцності та пластичності:

відносне подовження при 20 (δ, %) і 450 °С (δ^t, %); міцність при вигині (σ_в^{виг}, МПа) і стріла прогину (f, мм); відносне зменшення висоти зразка при стиску (ε, %); ударна в'язкість (КС, кДж/м²); міцність призматичних зразків при трьохточковому статичному навантаженні (σ_N, МПа); стріла їх прогину (f_N, мм) та період зростання тріщини (N_p, цикл · 10³). Виходячи з аналізу графічного зображення вказаних характеристик, можна відзначити, що абсолютна їх більшість взагалі мають подібність та відрізняються між собою лише величиною показників. А в разі їх співпадання – абсолютною величиною, яка залежить від виду випробувань. Характерним є те, що у всіх видах випробувань більші значення мали чавуни з кулястим графітом.

Встановлено, що збільшення розмірів литих заготовок сприяє зменшенню абсолютної величини їх властивостей, а зміна структури чавуну з феритної на перлітну та сорбітну – підвищенню, що відповідає відомим даним інших дослідників. Характер впливу фосфідної евтектики у зразках різних діаметрів є ідентичним [7].

Зміцнення поверхні дослідних зразків методом плазмового оплавлення, спричинило зміни у мікроструктурі поверхневого шару (на глибині близько 1 мм), яка була ледебуритною (0,015...0,1 % P) однорідною та складалася з цементитних голок, спрямованих перпендикулярно до поверхні оплавлення, і легованого фосфором аустеніту. У ЧКГ цементитні голки були більш грубими, що, мабуть, пов'язано зі стабілізуючою карбіді дією магнію. В межах домішок фосфору 0,2...0,3 % мікроструктура оплавленого шару була представлена дисперсним конгломератом двох основних фаз: ледебуритом та ФЕ. Мікротвердість ФЕ (H_{μ50} = 470...500 МПа) була трохи нижчою, але співмірною з мікротвердістю ледебуритного цементиту (H_{μ50} = 620...700 МПа). Структура перехідної зони суттєво не змінилася, але була насичена вкрапленнями ФЕ та дрібнодисперсного графіту. Збільшення домішок фосфору до 1,0 % спричинило створення несприятливих умов для подрібнення структурних складників та розчинення графіту в оплавленому шарі.

Для визначення частки впливу характеристик структурних складників на властивості фосфористих чавунів з пластинчастим і кулястим графітом застосували детермінований факторний аналіз. Аналізували міцність і пластичність при розтягуванні та твердість дослідних чавунів. Ці властивості є найпоширенішими представниками, встановлених нами, типів залежностей «властивість – кількість ФЕ». Встановили, що ФЕ в кількості до 5,8 % є зміцнювальним структурним складником і підвищує міцність фосфористих чавунів. Загальна частка впливу ФЕ є співмірною з часткою впливу металевої матриці при домішках фосфору у межах 0,09...0,55 %. Фосфідна евтектика сприяє підвищенню твердості чавунів більше, ніж металева матриця. Пластичність фосфористих чавунів знижується у всьому діапазоні домішок фосфору. При цьому, все ж, слід відзначити позитивну роль легування їх фосфором. У межах його домішок 0,015...1,0 % частка участі матриці у підвищенні пластичності чавуну зростає на 25 %, що, в принципі, співпадає з відомими даними.

В цілому легування чавунів фосфором негативно позначається на їх пластичності. Проте, частка впливу ФЕ у зниженні пластичності в 1,2 рази менше у порівнянні з дією графіту та в 2,7 рази менше у порівнянні із дією зростаючих кількості фериту та діаметру його зерен.

Виходячи з результатів, виконаних досліджень і вимог щодо матеріалів для деталей двигунів внутрішнього згорання, вважаємо доцільним виготовляти гільзи та

блоки циліндрів, розподільні вали і втулки напрямні клапанів з легованих фосфором ЧПГ, а коромисла клапанів та поршневі кільця – з ЧКГ. Розроблені і застосовані формули для визначення необхідних значень основних властивостей чавунів (HV , $\sigma_{\epsilon}^{розт}$, δ , $\sigma_{\epsilon}^{виг}$, $\sigma_{\epsilon}^{стиск}$, KC , зношування) для деталей ДВЗ. За результатами розрахунків та на підставі попередньо отриманих результатів досліджень рекомендовано межі легування базових чавунів фосфором: 0,1...0,35% – для ЧПГ і 0,1...0,23% для ЧКГ. Подальші дослідження і оптимізацію хімічного складу і мікроструктури чавунів виконували із застосуванням технологічних методів, до яких входили і методи та обладнання для експрес аналізу хімічного складу чавунів та система автоматизованого регулювання технологічного процесу і структури чавуну.

Дослідження впливу мікроструктури і режимів опалення ЧПГ і ЧКГ на структуру і властивості зміцненого поверхнього шару кулачків розподільних валів (рис. 3) і носиків коромисел клапанів (рис. 4) показали, що зміцнення чавунів фосфідною евтектикою в межах 1,5...4,0% сприяє утворенню опаленого шару, структура якого складається з конгломерату ледебуриду, пластинок цементиту та дисперсних вкраплень фосфідної евтектики.

Така структура поверхнього шару забезпечила високу твердість (53...58 HRC) та зносостійкість поверхонь тертя кулачків розподільних валів та носиків коромисел у двигунах внутрішнього згорання.

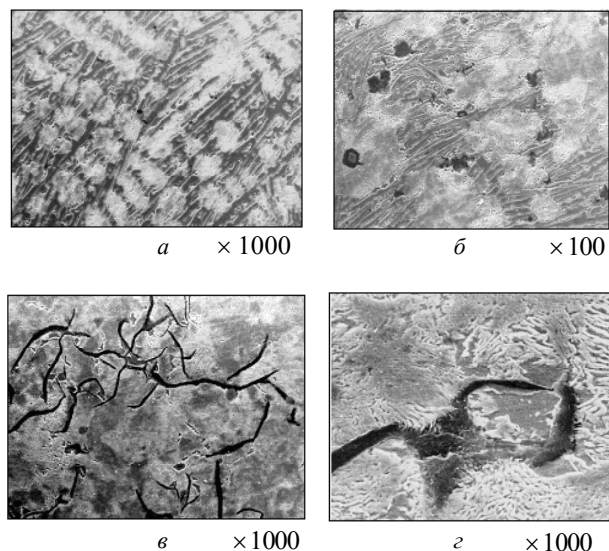


Рис. 3. Зміни мікроструктури по глибині кулачка, зміцненого методом плазмового опалення:

- a* – ледебурит, цементит, фосфідна евтектика;
 - б* – бейніт, дрібнодисперсний графіт, фосфідна евтектика;
 - в* – троостосорбіт, фосфідна евтектика, графіт пластинчастий;
 - г* – перліт, фосфідна евтектика, графіт пластинчастий.
- Травлено 4% розчином HNO_3 в спирті

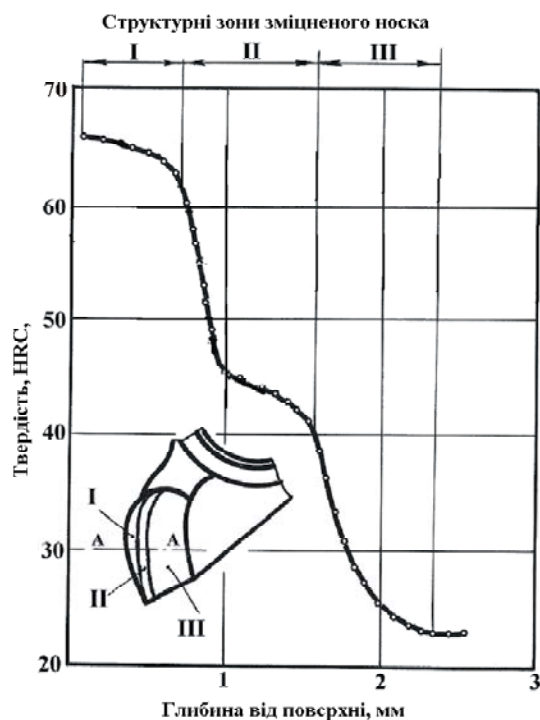


Рис. 4. Зміни твердості по глибині носка коромисла, зміцненого методом плазмового опалення:

- I – опалена поверхня; II – перехідна зона; III – зона основного металу; А-А – лінія заміру твердості

Висновки

Узагальнюючи результати досліджень, відзначимо, що при легуванні фосфором чавунів з пластинчастим та кулястим графітом в них утворюється фосфідна евтектика, кількість і будова якої залежать від домішок фосфору та швидкості кристалізації чавунів. Визначено вплив фосфідної евтектики на процеси структуроутворення фосфористих чавунів при легуванні їх фосфором у межах 0,015...1,0%.

Проведеними всебічними дослідженнями впливу ФЕ на механічні, технологічні та експлуатаційні властивості ЧПГ і ЧКГ встановлено, що оптимальним є легування чавунів фосфором в кількості 0,6%, при цьому утворюється фосфідна евтектика, яка є армувальним структурним складником. Її кількість рекомендується в залежності від призначення та умов експлуатації чавунних деталей. Твердість опаленого поверхнього шару чавуну підвищується зі збільшенням домішок фосфору за рахунок утворення ледебуриду з дисперсними вкрапленнями фосфідної евтектики, що рекомендовано застосувати при виробництві розподільних валів та коромисел клапанів. Із застосуванням комплексного статистичного аналізу взаємозв'язку властивостей фосфористих чавунів з їх фазовим складом підтвердили, що провідну роль у зміцненні чавунів відіграє фосфідна евтектика, а за її відсутності – зміцнена фосфором металева матриця. Методом детермінованого факторно-

го аналізу підтверджено, що пластичність фосфористих чавунів знижується при легуванні їх фосфором у межах 0,015...1,0 %. Встановлено, що частка впливу фосфідної евтектики в зниженні пластичності у 1,2 рази менше у порівнянні з дією графіту та в 2,7 рази менше порівняно з дією металевої матриці. В результаті проведених аналітичних і технологічних досліджень визначені оптимальні хімічні склади та мікроструктури чавунів для деталей двигунів внутрішнього згорання різних класів.

Список літератури

1. Малиночка Я. Н. О структуре фосфидной эвтектики в чугунах / Малиночка Я. Н., Осада Н. Г. // Литейное производство. – 1960. – № 7. – С. 21–24.
2. Гринберг Б. М. Исследование процессов формирования фосфидной эвтектики в серых чугунах и её влияние на износостойкость : автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.16.01 / Гринберг Б. М. – Моск. автомех. ин-т. – М., 1997. – 22 с.
3. Чугун : Справ. изд. / Под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. – М. : Металлургия, 1991. – 576 с.
4. Влияние микроструктуры на низкотемпературную циклическую трещиностойкость высокопрочных чугунов // Физико-химическая механика материалов / [Осташ О. П., Костик Э. М., Андрейко И. М., Дронюк М. М.]. – 1997. – № 1. – С. 57–69.
5. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М. : Машиностроение, 1966. – 562 с.
6. Литовка В. И. Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. – К. : Наукова думка, 1987 – 208 с.
7. Слынько Г. И. Влияние масштабного фактора на структуру износостойкость фосфористых чугунов // 2nd International Conference “Research and Development in Mechanical Industry” RaDMI 2002. – Vrnjanska Banja, Yugoslavia, 01–04 September, 2002. – Vol. 1. – P. 391–398.
8. Слынько Г. И. Особенности формирования микроструктуры фосфористых чавунів / Слынько Г. И. // Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів. – Запоріжжя: ЗДТУ. – 1998. – С. 165–166.
9. Математична модель для аналізу впливу структури на міцність фосфористих чавунів / [Стадник М. М., Слынько Г. И., Горбачевський І. Я., Волчок І. П.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2000. – № 2. – С. 100–103.
10. Трибологічні властивості високоміцних чавунів з фосфідною евтектикою / [Широков В. В., Волчок І. П., Слынько Г. И., Арендар Л. А.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2003. – № 1. – С. 51–53.

Одержано 21.12.2020

Слынько Г. И., Слынько В. В. Структурообразование и управление свойствами фосфористых чугунов для деталей двигателей внутреннего сгорания

Цель работы. Повышение механических и эксплуатационных свойств деталей двигателей внутреннего сгорания путем управления структурообразованием фосфористых чугунов.

Методы исследования. Исследовали графитизированные и отбеленные фосфористые чугуны с пластинчатым и глобулярным графитом лабораторных и промышленных плавок, выплавленных в индукционных электрических печах с легированием модифицированием и фракционной разливкой в сухие песчаные формы. Химический состав, микроструктуру, физико-механические свойства определяли по стандартным методикам. Неразрушающий контроль качества деталей двигателей, статистический анализ экспериментальных данных и детерминированный факторный анализ влияния структурных составляющих на свойства исследуемых чугунов выполняли по методикам, разработанным с участием авторов. Стендовые и дорожные моторные испытания деталей из чугунов оптимальных составов проводили в двигателях по стандартным и заводским методикам в соответствии с государственными стандартами.

Полученные результаты. Определены общие закономерности и принципы формирования микроструктуры чугунов с пластинчатым и шаровидным графитом в зависимости от степени их легирования фосфором и влияния масштабного фактора. Установлено, что фосфидная эвтектика в количестве до 5,8 % является упрочняющей структурной составляющей и повышает прочность, твердость, износостойкость, термостойкость, обрабатываемость лезвийным инструментом фосфористых чугунов. Отрицательное влияние фосфидной эвтектики на пластические свойства и циклическую трещиностойкость менее значительно, чем влияние увеличивающихся количеств феррита, размеров его зерен и графита. Рекомендованы оптимальные химические составы и микроструктуры фосфористых чугунов для деталей двигателей внутреннего сгорания.

Научная новизна. Впервые разработана комплексная система управления свойствами фосфористых чугунов, включая аналитическое определение необходимых характеристик структурных составляющих и технологию их получения.

Практическая ценность. Разработаны способы и технологии плавки, легирования, модифицирования, термической обработки и поверхностного упрочнения фосфористых чугунов, которые дают возможность обеспечить необходимый уровень механических и эксплуатационных свойств деталей двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: чугуны, фосфидная эвтектика, структурообразование, свойства, детали двигателей внутреннего сгорания.

Slynko G., Slynko V. Structure forming and managing of properties of phosphorous cast irons for parts of internal combustion engine

Purpose. Improving the mechanical and operational properties of details of internal combustion engines by managing the structure formation of phosphorous cast irons.

Research methods. Graphitized and bleached phosphorous cast irons with lamellar and globular graphite of laboratory and industrial melts, melted in electric induction furnaces with alloying modification and fractional casting into dry sand molds were investigated. Chemical composition, microstructure, physical and mechanical properties were determined using standard methods. Non-destructive quality control of engine parts, statistical analysis of experimental data and deterministic factor analysis of the influence of structural components on the properties of the cast irons were carried out according to the methods developed with the participation of the authors. Bench and road motor tests of optimal composition cast irons details were carried out in engines according to standard and factory methods in accordance with state standards.

Obtained results. The general laws and principles of the formation of the microstructure of cast irons with lamellar and nodular graphite are determined depending on the degree of their alloying with phosphorus and the influence of the scale factor. It has been established that phosphide eutectic in an amount of up to 5.8 % is a strengthening structural component and increases strength, hardness, wear resistance, heat resistance, and machinability of phosphorous cast irons with blade tools. The negative effect of phosphide eutectic on plastic properties and cyclic fracture toughness is less significant than the effect of increasing amounts of ferrite, its grain size and graphite. Optimal chemical compositions and microstructures of phosphorous cast irons for internal combustion engines details are recommended.

Scientific novelty. For the first time, a comprehensive system for managing the properties of phosphorous cast irons has been developed, including the analytical determination of the required characteristics of structural components and the technology for their production.

Practical value. Methods and technologies for melting, alloying, modifying, heat treatment and surface hardening of phosphorous cast irons have been developed. They make it possible to provide the required level of mechanical and operational properties of internal combustion engines details.

Key words: cast iron, phosphide eutectic, structure forming, properties, parts of internal combustion engines.
