МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ЄГОРОВ Андрій Олександрович

ВПЛИВ ФОСФОРУ ТА СІРКИ НА ОПІР РУЙНУВАННЮ І ВЛАСТИВОСТІ ЧАВУНУ ДЛЯ СКЛОФОРМУЮЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

05.02.01 "МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО В МАШИНОБУДУВАННІ"

А в т о р е ф е р а т

дисертації

на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Запоріжжя - 1997

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Запорізьк державному університеті.

Науковий керівник

заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор ВОЛЧОК І.П.

Офіційні опоненти

доктор технічних наук, професор ЛУНЬОВ В.В.

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник ОРЛОВ М.Р.

Провідна організація - Запорізька державна інженерна академія.

Захист дисертації відбудеться "23" вересня 1997р.
о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д08.02.01 при Запорізькому державному технічному університеті
за адресою: 330063, м.Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці університету.

Автореферат розіслано "8" липня 1997р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор ВОЛЧОК І.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Розв'язання задач підвищення ефективності виробництва скловиробів безпосередньо пов'язано із проблемами надійності та довговічності склоформуючого інструменту, основні деталі якого у теперішній час виробляють із чавуну. Деталі працюють в умовах високих температур /крапля скла, що потрапляє до форми має температуру від 1100 до 1480°С /, термоциклічних навантажень, впливу на робочі поверхні активних компонентів розплаву скла. Відповідно, основними причинами усунення їх з експлуатації є термохімічна ерозія робочих поверхонь та виникнення тріщин термовтомленості.

Опір чавуну руйнуванню, зокрема під час роботи склоформ, визначається структурою металевої матриці, кількістю, формою і розподілом включень графіту, а також інших неметалевих включень. Дослідження хімічного складу чавунів, що застосовуються на склозаводах України і за кордоном, виявило, що концентрація фосфору і сірки в них змінюється у широких межах: 0,04-0,30% і 0,03-0,15% відповідно. Відомо, що ці елементи сильно ліквують у чавуні, утворюючи самостійні неметалеві фази з іншими компонентами: фосфор - фосфіди, які входять до складу складної евтектики, сірка - сульфіди. Оцінка впливу цих включень на стандартні фізико-механічні та службові властивості чавуну за літературними даними не є однозначною. Їхню поведінку в умовах, що аналогічні умовам роботи склоформ практично не вивчено. Очевидно, що оптимізація складу чавуну за фосфором та сіркою є резервом підвищення ресурсу склоформуючого інструменту.

Мета і задачі роботи. Метою цієї роботи було дослідження ролі фосфідної евтектики та сульфідів у механізмах руйнування чавуну під впливом статичних та термоциклічних навантажень, в тому числі при взаємодії із розплавом скла, а також у визначенні допустимої /опти-

мальної концентрації фосфору і сірки у чавунах для склоформуючого інструменту. У зв'язку з цим були поставлені і вирішені такі задачі:

- досліджено вплив фосфору (від 0,03 до 2,11%) та сірки (від 0,036 до 0,123%) на фізико-механічні та теплофізичні властивості чавуну;

- запропоновано конструкцію випробного пристрою і застосовано методику кількісної оцінки окрихчувального впливу розплаву скла на чавун, що дозволило визначити ступінь зниження в'язкості руйнування під впливом активних компонентів розплаву скла;

- вивчено залежності швидкості термохімічної ерозії, крайового кута змочування у системі скло-метал, змінювання шорсткості поверхні при взаємодії зі склом і стійкості чавуну від концентрації в ньому фосфору та сірки;

- проведено кількісний аналіз мікромеханізму руйнування чавуну при термоциклічному навантаженні та визначені коефіцієнти зв'язку включень графіту, фосфідної евтектики, сульфідів і зерен матриці з мікротріщинами термовтомленості та повзучості у залежності від ступеню деформації і концентрації фосфору і сірки у чавуні;

- на основі одержаних даних визначено оптимальну концентрацію фосфору (0,3-0,4%) та допустиму концентрацію сірки (до 0,05%) у феритному чавуні, проведено промислові іспити і видано рекомендації по збільшенню експлуатаційного ресурсу деталей склоформ.

<u>Наукова новизна роботи</u> характеризується такими положеннями.

Одержано нові експериментальні дані, які показують позитивний вплив фосфору (до 0,3-0,4%) і негативний вплив сірки на комплекс експлуатаційних властивостей чавуну для склоформ.

Із застосуванням спеціальної методики та зконструйованого випробного пристрою визначено ступінь окрихчувального впливу розплаву скла на структуру чавунів. Установлено, що з підвищенням концентра-

ції фосфору та зниженням концентрації сірки у чавуні окрихчувальний ефект зменшується.

Із використанням засобів високотемпературної металографії встановлено ефект гальмування мікротріщин термовтомленості та повзучості включеннями фосфідної евтектики. Встановлено утворення порожнин біля сульфідів у результаті термоциклування та екстрагування їх із матриці внаслідок взаємодії зі склом.

Одержано залежності коефіцієнтів зв'язку мікротріщин із структурними складовими чавуну від ступеню деформації і концентрації фосфору та сірки за умов термоциклування і на цій основі запропоновано пояснення мікромеханізму руйнування графітованого чавуну, який містить фосфідну евтектику та сульфіди, при термоциклічному навантаженні.

Практична цінність та реалізація результатів роботи полягають в:

- оптимізації складу чавуну за фосфором та сіркою;
- у розробці технології одержання такого чавуну, його промисловому випробуванні;
- у підвищенні стійкості склоформуючого інструменту на 25-35%.

На захист виносяться :

- залежності, які описують вплив фосфору та сірки на показники поверхневого руйнування чавуну внаслідок взаємодії із розплавом скла, і результати феноменологічного аналізу взаємодії фосфідної евтектики та сульфідів із розплавом скла;
- конструкція випробного пристрою для визначення впливу активного середовища на в'язкість руйнування матеріалів і результати кількісної оцінки окрихчувальної дії розплаву скла на чавуни з різною концентрацією сірки та фосфору;
- результати кількісної оцінки участі включень фосфідної евтектики, сульфідів, графіту, а також металевої матриці у зародженні та

розповсюдженні мікротріщин при термоциклічних навантаженнях;

- результати досліджень по визначенню оптимальної концентрації фосфору та допустимої концентрації сірки у чавунах для склоформуючого інструменту.

Апробація роботи. Основні результати та положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Республіканському галузевому семінарі "Научно-технический прогресс в производстве стекла и стеклокристаллических материалов строительного и технического назначения" (Костянтинівка, 1987), IV і V Всесоюзних науково-технічних конференціях "Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий" (Запоріжжя 1989, 1992), V Республіканській науково-технічній конференції "Повышение технического уровня и совершенствование технологических процессов производства отливок" (Дніпропетровськ, 1990), V-VII Республіканських науково-технічних конференціях "Неметаллические включения и газы в литейных сплавах" (Запоріжжя, 1988, 1991, 1994).

Публікації. За матеріалами дисертації видано 12 друкованих праць, одержано 3 авторських свідоцтва на винаходи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти глав, загальних висновків, переліку посилань з 174 назв та додатку, що стосується відомостей щодо практичної реалізації результатів роботи. Дисертація викладена на 193 сторінках, в тому числі: рисунків - 66, таблиць - 11, додаток - 1.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розглядаються: актуальність теми, мета і задачі дослідження, наукова новизна і практичне значення роботи.

Перша глава присвячена аналізу впливу структурних факторів на характер руйнування чавуну для склоформуючого інструменту. Показано, що особливості умов експлуатації деталей формокомплекту вплив розплаву скла і термоциклічні навантаження визначають складність механізму їхнього руйнування, який потребує більш детального вивчення. Встановлено, що склоформи виходять із строю здебільшого в результаті термохімічної ерозії робочих поверхонь і тріщиноутворення при термоциклуванні.

Аналіз літературних джерел показав, що основні зусилля дослідників були спрямовані на вивчення ролі включень графіту і матриці чавуну у руйнуванні. В той же час, відсутні дані про участь фосфідної евтектики та сульфідів, що містяться у структурі більшості марок промислових чавунів, у руйнуванні при взаємодії з розплавом скла і термоциклуванні.

Вплив фосфору та сірки на стандартні механічні та службові властивості чавунних виливків, що використовуються у машинобудуванні, вивчено достатньо повно. Але не з'ясовано питання про вплив цих елементів на показники властивостей чавуну, що враховують специфіку роботи склоформуючого інструменту і визначають його надійність та довговічність: швидкість термохімічної ерозії у росплаві скла та термостійкість у межах термічного циклу роботи склоформ, змочування металу склом і зміна шорсткості робочих поверхонь у процесі експлуатації, а також зміну в'язкості руйнування під дією розплаву скла. Вказані властивості було прийнято як основні критерії оптимізації складу чавуну за фосфором та сіркою.

У другій главі описано методи досліджень властивостей матеріалів. Дослідні плавки чавунів зі зростаючою концентрацією фосфору та сірки проводили в індукційних тигельних печах ІСТ- 0,02 та ІСТ-0,06. Використовували метод фракційної розливки металу, який дозволяє вик-

лючити вплив сторонніх факторів та одержати найбільш точні результати. Ферофосфор електротермічний та сірчасте залізо вводили присадками до тигля печі і до розливного ковша відповідно.

Контроль хімічного складу, мікроструктури, густини та фізико-механічних властивостей при кімнатній та підвищеній температурах проводили стандартними методами. Для оцінки впливу фосфору та сірки на кількість, форму та розміри включень графіту використовували розроблену в ЗГТУ інтегральну характеристику - індекс графіту $J_Г$. Ступінь забруднення чавуну сульфідами визначали лінійним методом (метод " Д ").

Дослідження впливу робочого середовища на опір руйнуванню чавуну проводили на стандартних зразках для визначення в'язкості руйнування з використанням спеціально створеного випробного пристрою. Окрихчувальний вплив середовища оцінювали за допомогою коефіцієнта:

$$B = K_{IC}^{c} / K_{IC} , \qquad (I)$$

де K_{IC}^{c} та K_{IC} - значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень відповідно у розплаві скла і у повітрі.

Про здатність матеріалу чинити опір ерозійному руйнуванню при періодичному контактові із розплавом скла судили за середньою швидкістю втрати маси зразками ϑ та зміною шорсткості поверхні R_a. Випробування проводили на спеціальній установці, яка забезпечувала утримання заданої температури скла (біля 1100^0C) і періодичне із частотою 20 разів за хвилину занурювання у розплав скла зразка з розмірами $1 \cdot 10^{-2} \times 1 \cdot 10^{-2} \times 2 \cdot 10^{-2}$ м.

Адгезійну взаємодію розплаву скла із поверхнею чавуну досліджували за допомогою методу лежачої краплі. Вимірювали крайовий кут змочування θ краплею скла горизонтальної поверхні чавунної під-

кладки.

Для уточнення мікромеханізму ерозії чавуну проводили експерименти, які полягали в одержанні профілограм за трасами, що проходять через включення сульфідів та фосфідної евтектики на поверхні полірованих зразків до і після їхньої взаємодії зі склом.

Термоциклування зразків з перерізом $3 \cdot 10^{-3} \times 3 \cdot 10^{-3}$м у режимі $400 \div 650^0$С зі статичним розтягувальним навантаженням, що утворює нормальні напруження у робочому перерізі приблизно 25 МПа, проводили за відомими методиками на установці ИМАШ -20-75. Термостійкість чавуну оцінювали за кількістю циклів N_t, яку зразок витримував до руйнування.

Роль структурних складових чавуну: включень графіту, фосфідної евтектики, сульфідів, а також металевої матриці,- у зародженні та, частково, розповсюдженні тріщин термовтомленності та повзучості оцінювали за коефіцієнтами зв'язку мікротріщин із мікроструктурою чавуну:

$$K_N = N_i / N_{заг}, \qquad (2)$$

$$K_L = L_i / L_{заг}, \qquad (3)$$

де N_i та L_i - відповідно кількість і сумарна довжина мікротріщин, пов'язаних із певною структурною складовою;

$N_{заг}$ та $L_{заг}$ - відповідно загальна кількість і загальна довжина всіх мікротріщин на базовій довжині підрахунку.

Відносна кількість включень графіту, фосфідної евтектики та сульфідів, що спричиняють зародження мікротріщин, визначали відповідно за формулами:

$$K_г = n^г_{тр} / n^г_{заг}, \quad (4)$$

$$K_ф = n^ф_{тр} / n^ф_{заг}, \quad (5)$$

$$K_{св} = n^{св}_{тр} / n^{св}_{заг}, \quad (6)$$

де $n^г_{тр}, n^ф_{тр}, n^{св}_{тр}$ - відповідно кількість включень графіту, фосфідної евтектики та сульфідів, що брали участь у руйнуванні;

$n^г_{заг}, n^ф_{заг}, n^{св}_{заг}$ - загальна кількість відповідних включень на тій же площі шліфа.

Аналогічними методами розраховували відносні кількості включень фосфідної евтектики, що гальмують і зупиняють розвиток мікротріщин $K^г_ф$, зруйнованих включень фосфідної евтектики $K^*_ф$ і пір, що утворилися біля сульфідів у результаті термоциклування $K^п_{св}$.

Застосування цих методик дозволило вперше кількісно оцінити роль структурних складових у мікромеханізмі руйнування чавуну при високих температурах та термоциклічному навантаженні.

Теплопровідність λ чавуну визначали стаціонарним порівняльним методом на вимірникові ИТЭМ-1М. Дослідження питомої теплоємності c здійснювали порівняльним методом динамічного C-калориметра із тепломіром та адіабатною оболонкою на приладі ИТ-с-400. Температуропровідність a для певної температури розраховували за одержаними даними про теплопровідність λ, питому теплоємність c та густину ρ чавуну при тій же температурі за формулою:

$$a = \lambda / (c \cdot \rho) \quad (7)$$

Третя глава присвячена дослідженням впливу фосфору на фізико-механічні та експлуатаційні властивості чавуну для склоформ із пластинчастим (ЧПГ) і кулястим (ЧКГ) графітом у межах 0,03-1,70% Р та 0,03-2,11% Р відповідно. Експерименти проводили на чавуні базового складу, %: 3,20-3,34 вуглецю, 2,20-2,50 кремнію, 0,40-0,55 марганцю, не більше 0,04 сірки. ЧКГ також містив 0,06 - 0,08% магнію.

Залежності границі міцності ЧПГ та ЧКГ при 20 та 700°С, а також ударної в'язкості при 700°С мали екстремальний характер. Максимум властивостей відповідав 0,3-0,6% фосфору. Твердість чавунів у дослідженому інтервалі зростала на 50-60%. Відносне здовження ЧКГ при 20°С зменшувалось з 12 до 2%, а при 700°С - з 19 до 5%. Відносне здовження ЧПГ при 700 °С також зменшувалось з 10 до 5%, але цей чавун не проявив нахилу до локалізації високотемпературної пластичної деформації. При 20 °С ударна в'язкість ЧКГ зменшувалась із зростанням вмісту фосфору у 23 рази, в той час як ЧПГ виявився практично нечутливим до присутності у структурі крихкої фази - фосфідної евтектики.

Зростаючі концентрації фосфору сприяли зниженню показників в'язкості руйнування ЧКГ і, менш суттєво,- ЧПГ при 20 °С та зростанню цих показників при 700°С. Встановлено зниження в'язкості руйнування чавунів у розплаві скла. Ефект, що спостерігали, пояснюється хемосорбцією активних складових частин скла, насамперед атомів Na, в області вершин концентраторів напружень. З підвищенням вмісту фосфору окрихчувальна дія розплаву скла зменшувалась (зростання коефіцієнту β - табл.1).

Із зростанням вмісту фосфору знижувалися густина та теплопровідність чавунів. Залежності теплоємності та температуропровідності мали відповідно мінімум і максимум при 0,3-0,4% фосфору.

Таблиця I - Вплив фосфору та сірки на властивості експериментальних чавунів

Концентрація в чавуні %		Коефіцієнт $\beta = K_{1c}^{c}/K_{1c}$	Крайовий кут змочування у системі чавун-розплав скла, θ град.	Швидкість термохімічної ерозії υ, г/(м^2 год.)	Шорсткість поверхні внаслідок взаємодії із склом R_a, мкм	Термостійкість N_t, цикли
[P]	[S]					
0,03	0,02-0,04	0,81[1]/0,88	78/94	21,0/15,5	0,27/0,20	26/76
0,34	— " —	0,83/ 0,88	96/105	19,4/11,6	0,26/0,17	41/80
0,56	— " —	0,78/0,90	100/108	16,8/11,0	0,23/ -	34/41
0,92	— " —	0,80/0,94	103/109	14,3/10,0	0,23/0,16	27/33
1,15	— " —	0,89/0,96	108/116	14,5/10,2	0,19/0,14	20/29
1,70	— " —	0,92/ -	121/ -	13,6/ -	0,15/ -	22/ -
2,11	— " —	-	- /123	- / 9,8	- / 0,10	-
0,03-0,04	0,036	0,84	81	24,7	0,80	21
— " —	0,061	0,57	77	23,0	1,20	20
— " —	0,080	0,54	74	29,5	1,30	23
— " —	0,098	-	71	38,9	1,90	23
— " —	0,123	0,48	62	44,1	2,10	24

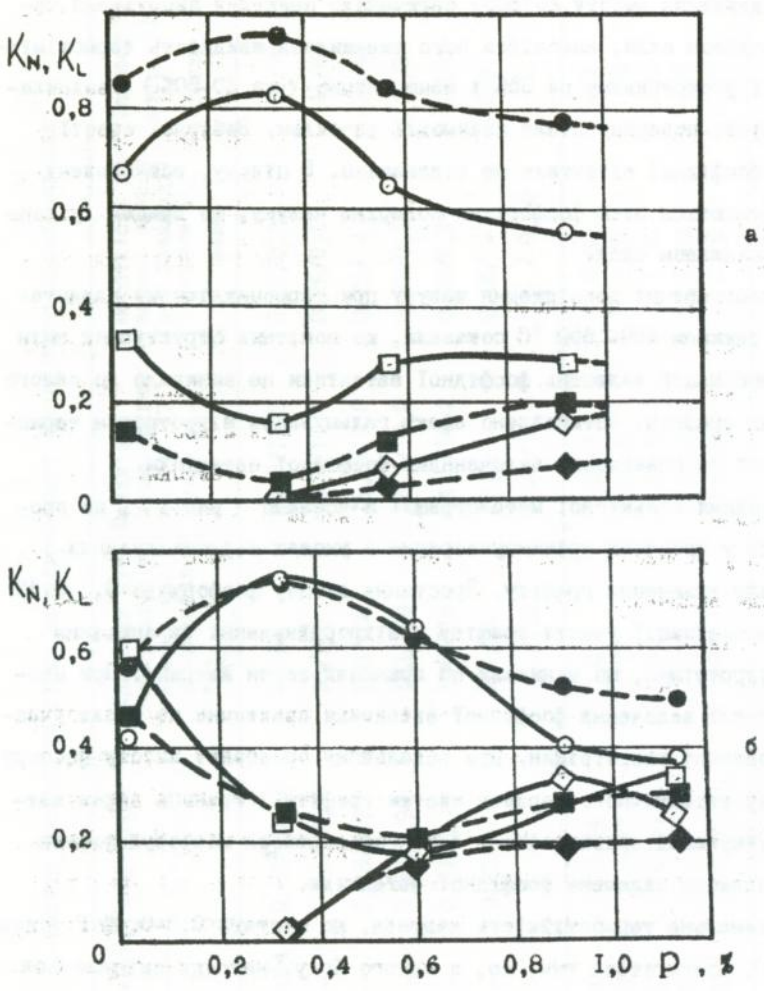
[1] Чисельник - ЧПГ
знаменник - ЧКГ

Підвищення вмісту фосфору спричинило зниження змочування чавунів розплавом скла, внаслідок чого зменшилася швидкість термохімічної ерозії у середньому на 35% і менш значно (на 40-50%) змінилася шорсткість поверхні після взаємодії із склом. Вибірної ерозії включень фосфідної евтектики не відзначено. В цілому, встановлені явища пояснюються дією фосфору на поверхню чавуну, що працює у контакті з розплавом скла.

Металографічні дослідження чавуну при термоциклічному навантаженні за режимом 400÷650 °С показали, що помітних структурних змін і мікродеформацій включень фосфідної евтектики не виникало до самого руйнування зразків. Встановлено ефект гальмування мікротріщин термовтомленості та повзучості включеннями фосфідної евтектики.

Методами кількісної металографії з'ясовано (рис.1) , що провідну роль у процесах тріщиноутворення в умовах термоциклування відігравали включення графіту. Зростання вмісту фосфору до 0,3-0,4% сприяло активізації участі графіту у мікроруйнуванні та зниженню частки мікротріщин, що виникали на границях зерен матриці. При цьому ізольовані включення фосфідної евтектики практично не брали участі у зародженні мікротріщин. При подальшому зростанні вмісту фосфору і розвитку евтектичного каркасу частки графіту і границь зерен матриці у руйнуванні зрівнювалися. Інтенсифікувалося мікроруйнування матриці навколо включень фосфідної евтектики.

Максимальна термостійкість чавунів, що містять 0,3-0,4% Р (див. табл. 1) , пояснюється тим, що, з одного боку, матриця зміцнюється розчиненим в невеликій кількості фосфором, з іншого - ізольовані, рівномірно розподілені включення евтектики не перешкоджують реалізації високотемпературної пластичності матриці та гальмують за таких умов розвиток мікротріщин. Одночасне розкриття порожнин, в яких містяться графітові включення, і мікроруйнування матриці біля



○ - графіт; □ - матриця; ◇ - фосфідна евтектика

Рисунок I - Вплив вмісту фосфору на величини K_N та K_L для складових структури ЧПГ (а) і ЧКГ(б)

цих включень сприяють релаксації термічних напружень у металі. Підвищення вмісту фосфору понад 0,5% та розвиток сітки фосфідної евтектики, особливо у разі її нерівномірного розподілу, активізує міжзеренне руйнування матриці, як наслідок утруднених деформацій, завдяки жорскому евтектичному каркасу. Відповідно, отримали зниження термостійкості чавунів.

Проведені лабораторні дослідження дозволили рекомендувати для промислового випробування як матеріалів склоформуючого інструменту феритних чавунів з пластинчастим та кулястим графітом, що містять 0,3-0,4% фосфору і мають у струкутрі ізольовані включення фосфідної евтектики.

<u>У четвертій главі</u> наведено результати досліджень впливу зростаючих від 0,036 до 0,123% концентрацій сірки на фізико-механічні, теплофізичні та експлуатаційні властивості сірого чавуну.

В дослідженому інтервалі концентрацій сірка практично не вплинула на ступінь графітизації чавуну, через те що експериментальний метал містив марганець у кількості 0,47-0,55% , достатньої для зв'язування сірки у сульфіди.

Зростання вмісту сірки суттєво не позначилося на механічних властивостях при 20 ^{0}C та в'язкості руйнування при 20 і 700 ^{0}C. При 700^{0}C границя міцності та ударна в'язкість зменшувалася на 10 та 28% відповідно.

Підвищення концентрації сірки помітно не змінило густини та теплоємності чавуну, але спричинило зниження теплопровідності та температуропровідності на 20-25%.

З підвищенням вмісту сірки у розглянутому інтервалі крайовий кут змочування у системі розплав скла-чавун зменшувався на 20-25%, швидкість термохімічної ерозії зростала на 70-80%, а шорсткість поверхні після взаємодії зі склом - на 160% (див.табл.1) . Отримані

результати, на наш погляд, зумовлені зростанням кількості сульфідів у структурі чавуну. Це підтверджується експериментально встановленим фактом утворення "кратерів" замість сульфідних включень при взаємодії поверхні чавуну з розплавом скла.

Підсилення адгезії у системі скло-чавун, певно, пояснює активізацію окрихчувальної дії розплава скла із зростанням вмісту сірки в чавуні.

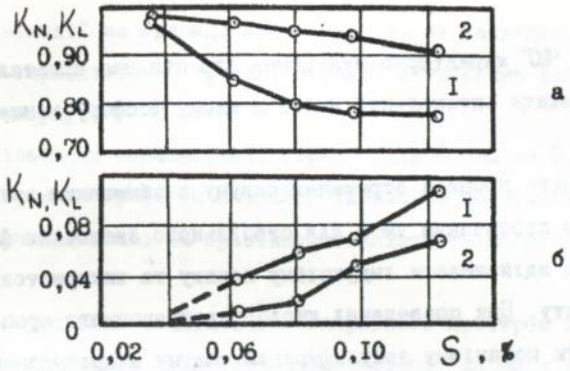
Досліджено механізм ерозійного руйнування сульфідних включень у структурі чавуну за умов періодичної взаємодії з розплавом скла. Встановлено, що внаслідок термоциклування сульфіди втрачають зв'язок з металевою матрицею з утворенням порожнин навколо включень. Таким чином полегшується екстрагування зазначених включень з поверхні розплавом скла, що стимулює високотемпературну ерозію чавуну.

Методами кількісної металографії визначено, що сульфіди не відігравали помітної ролі в утворенні мікротріщин за умов термоциклування (рис.2,3). Більшість мікротріщин зароджувалось на включеннях графіту. Однак навколо більше ніж 95% сульфідних включень через термоциклічне навантаження утворювалися порожнини, що негативно впливало на ерозійну стійкість.

Результати лабораторних досліджень показали, що кількість сульфідів у структурі чавуну, що взаємодіє з розплавом скла, треба зводити до мінімуму, у зв'язку з чим рекомендовано обмежувати вміст сірки концентрацією, необхідною для утворення ефективних центрів графітизації (0,05%).

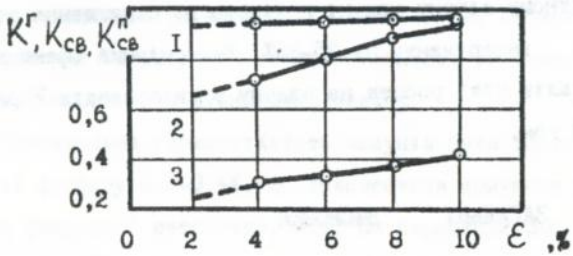
П'ята глава присвячена технологічним особливостям отримання чавуну з оптимальним вмістом фосфору і обмеженим вмістом сірки.

Для підвищення концентрації фосфору рекомендовано легування ферофосфором, що вводять як в піч, так і у ливарний ківш без суттєвих змін технології плавки. Внаслідок того, що для відливків з



I - K_N 2 - K_L

Рисунок 2 - Залежності коефіцієнтів K_N та K_L для графіту (а) і сульфідів (б) від вмісту сірки в чавуні



I - $K^п_{св}$ (пори навколо сульфідів),

2 - $K^г$ (тріщини біля графіту),

3 - $K_{св}$ (тріщини біля сульфідів)

Рисунок 3 - Залежності коефіцієнтів $K^г, K_{св}, K^п_{св}$ від ступеню деформації зразка

фосфористого ЧКГ характерно утворення пір під час кристалізації, потрібно обмежити оптимальний вміст в ньому фосфору концентрацією 0,2-0,3%.

Розглянуто процеси отримання чавуну з обмеженим вмістом сірки та одночасним створенням умов для стабільного засвоєння фосфору. Запропоновано здійснювати індукційну плавку та використовувати чисту за сіркою шихту. При проведенні кислого ваграночного процесу доцільно застосувати позапічну десульфурацію чавуну випробуваними в умовах скляних заводів методами.

Відзначено стабілізуючий вплив фосфору на евтектоїдний цементит. Відливки із запропонованого чавуну, отримані у піщаних формах, підлягають низькотемпературному феритизуючому відпалу при температурі 750 °С.

Результати промислового випробування та впровадження довели, що оптимізація вмісту фосфору (0,3-0,4%) і обмеження вмісту сірки до 0,05% у феритному сірому чавуні призвело до підвищення стійкості склоформуючого інструменту на 25-35%. Економічний ефект від впровадження матеріалів цієї роботи на одному з склозаводів України становить 45978 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Для чавунів, що застосовуються на склозаводах України як матеріал для деталей склоформуючого інструменту, характерний широкий діапазон розкиду концентрацій фосфору (0,04-0,30%) та сірки (0,03-0,15%). Концентрація цих елементів у багатьох випадках не контролюється і не регламентується.

2. Дослідження взаємодії сірого та високоміцного чавунів із розплавом скла показало, що підвищення концентрації фосфору, в межах 0,03- 1,70% та 0,03-2,11% відповідно, сприяло зниженню адге-

зійної взаємодії на границі метал-скло і, як наслідок, зменшенню швидкості термохімічної ерозії, а також збереженню високої якості поверхні чавуну.

3. Збільшення концентрації сірки від 0,036 до 0,123% у чавуні із пластинчастим графітом сприяло підсиленню змочування його склом, що негативно впливало на ерозійну стійкість та шорсткість поверхні чавуну.

4. Використання спеціального випробного пристрою дозволило встановити, що внаслідок підвищення концентрації фосфору і зниження сірки в чавуні зменшується окрихчувальна дія на нього розплаву скла.

5. Методами кількісної металографії із застосуванням високотемпературної мікроскопії показано, що ведучу роль у зародженні та розвитку тріщин термовтомленості у графітизованих чавунах, у структурі яких міститься фосфідна евтектика і сульфіди, грають включення графіту незалежно від форми, розмірів і розподілу останніх.

6. Експериментально встановлено, що включення фосфідної евтектики при підвищених до 400-650°С температурах є бар'єрами на шляху розповсюдження мікротріщин термовтомленості та повзучості, що позитивно впливає на опір руйнуванню чавуну.

7. Максимальна термостійкість чавунів була досягнута при концентрації фосфору 0,3-0,4%, що пояснюється армуючою дією ізольованих включень фосфідної евтектики, які, не перешкоджуючи реалізації високотемпературної пластичності матриці, гальмують мікроруйнування. Розвиток сітки фосфідної евтектики, особливо при нерівномірному її розподілу викликає стиснення пластичної деформації та стимулює міжзеренне руйнування матриці, що є причиною зниження термостійкості.

8. Сульфіди у структурі чавуну помітної участі у тріщиноутворенні при термоциклуванні не приймали. Проте знакозмінні термічні напруження та деформації спричиняють утворення порожнин навколо вклю-

чень. Підвищена адгезія сульфідів до розплаву скла сприяє їхньому екстрагуванню із матриці, утворенню мікрокаверн та інтенсифікації поверхневого руйнування чавуну.

9. Комплекс досліджень із метою оптимізації складу чавуну за фосфором та сіркою показав перспективність використання як матеріалу для деталей склоформуючого інструменту феритного чавуну, що містить у структурі ізольовані, рівномірно розподілені включення фосфідної евтектики, при концентрації фосфору 0,3 - 0,4 у ЧПГ та 0,2 - 0,3% у ЧКГ. Концентрація сірки у чавуні не повинна перевищувати 0,05%, щоб звести до мінімуму кількість сульфідів у структурі.

10. У промислових умовах відпрацьована технологія виробництва чавуну з оптимальною концентрацією фосфору та обмеженою концентрацією сірки, що передбачає проведення індукційної плавки на чистій за сіркою шихті і введення ферофосфору до тигля печі або до дивар-ного ковша з наступним феритизуючим відпалом відливків.

11. Впровадження запропонованого чавуну дозволило підвищити стійкість склоформуючого інструменту на 25-35% і одержати економічний ефект у сумі 45978 гривень за рік.

Основні положення та результати дисертації були опубліковані у таких роботах:

1. Егоров А.А. К вопросу о высокотемпературной эрозии чугуна в расплавах силикатов // Придніпровський науковий вісник.- 1997.- № 4.- С.13-16.

2. Егоров А.А. Влияние серы и фосфора на свойства чугуна для стеклоформующего инструмента // Придніпровський науковий вісник.- 1997.- № 8.- С.15-17.

3 Егоров А.А. Экономнолегированный чугун для стеклоформующего инструмента // Новые конструкционные материалы и эффективные

методы их получения и обработки: Сборник науч.трудов.- К.: УМК ВО, 1988.- С.94-96.

4 Колотилкин О.Б., Волчок И.П., Егоров А.А. и др. Влияние металлургических и структурных факторов на качество стеклоизделий, вырабатываемых в стеклоформах из чугуна // Научно-технический прогресс в производстве стекла и стеклокристаллических материалов строительного и технического назначения: Материалы респ. отраслевого семинара.- Константиновка, 1987.- С.40-41.

5 Волчок И.П., Белоус Л.Л., Егоров А.А. Повышение надежности и долговечности стеклоформ из чугуна // Молодые ученые и специалисты - реализации целевых комплексных программ, ускорения научно-технического прогресса, активизации НТТМ: Тез.докл. III обл.конф.- Запорожье, 1988.- С.28-29.

6. Колотилкин О.Б., Егоров А.А., Качалов Ю.А. Влияние механизма разрушения стеклоформ из чугуна на качество стеклоизделий // Молодые ученые и специалисты - реализации региональных целевых комплексных программ, ускорению научно-технического прогресса, активизации НТТМ: Тез.докл. III обл.конф.- Запорожье,1988.-С.29-30.

7 Егоров А.А. Исследование влияния рабочей среды на склонность чугуна к хрупкому разрушению // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: Тез.докл. IV Всес.науч.-техн.конф.-Запорожье,1989.- С.225-226.

8 Лисовский А.В., Егоров А.А. Влияние фосфора на жаростойкость высокопрочного чугуна // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: Тез.докл. 5-ой респ. науч.-техн. конф.- Запорожье, 1988.- С.243-244.

9 Колотилкин О.Б., Егоров А.А. Оптимизация состава чугуна для стеклоформующего инструмента // Повышение технического уровня

и совершенствование технологических процессов производства отливок: Тез.докл. V респ. науч.-техн. конф.- Днепропетровск, 1990.- Т.I.- С.72.

10. Егоров. А.А. Влияние фосфора на свойства чугуна // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: Тез.докл. 6-ой респ. науч.-техн. конф.- Запорожье, 1991.- С.123.

11 Егоров А.А., Колотилкин О.Б. Влияние серы и фосфора на механизм разрушения чугуна для стеклоформующего инструмента // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: Тез.докл. V науч.-техн. конф.- Запорожье, 1992.- С.171-172.

12 Егоров А.А., Колотилкин О.Б. Сульфидные включения и высокотемпературная эрозия чугуна // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: Тез.докл. VII респ. науч.-техн. конф.-Запорожье, 1994.- С.90.

13 А.с. 1796960 СССР МКИ^5 G 01 N 1/28. Образец для определения вязкости разрушения / О.Б.Колотилкин, А.А.Егоров, И.П.Волчок - 4 с.

14 А.с. 1713968 СССР МКИ^5 C22 C 37/10. Чугун для стеклоформующего инструмента / О.Б.Колотилкин, И.П.Волчок, А.А.Егоров. Ю.А.Качалов.- 6 с.

15 А.с. 1674492 СССР МКИ^5 C 03 B 9/24. Черновая форма / О.Б.Колотилкин, И.П.Волчок, А.А.Егоров и др.- 4 с.

Yegorov A.A. Influence of phosphorus and sulphur on fracture resistance and properties of cast iron for glass-shaping tool.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences on speciality 05.02.01 - Material science in machine industry. Zaporozhye State Technical University. Zaporozhye, 1997.

New experimental results on positive influence of phosphorus (up to 0,3 - 0,4%) and harmful effect of sulphur on service properties of ferritic flaky and nodular graphite cast iron for glass-shaping tool were obtained. Phenomenon of retardation of thermal-fatigue and creep microcracks by phosphide eutectic inclusions was determined. Participation of sulphides in surface destruction of the material under cyclic interaction with molten glass was revealed. Manufacturing technology was developed and cast iron with optimized phosphorus and limited sulphur content was introduced in glasswork practice.

Егоров А.А. Влияние фосфора и серы на сопротивление разрушению и свойства чугуна для стеклоформующего инструмента.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 - Материаловедение в машиностроении. Запорожский государственный технический университет. Запорожье, 1997.

Получены новые экспериментальные результаты, показывающие положительное влияние фосфора (не более 0,3 - 0,4%) и негативное влияние серы на комплекс эксплуатационных свойств ферритного чугуна (ЧПГ и ЧШГ) для стеклоформующего инструмента. Установлен эффект торможения микротрещин термоусталости и ползучести включениями фосфидной эвтектики. Определено участие сульфидов в разрушении поверхности материала при периодическом взаимодействии с расплавом стекла. Отработана технология получения и осуществлено промышленное внедрение чугуна с оптимальной концентрацией фосфора и ограниченным содержанием серы.

Ключові слова: чавун, фосфор, сірка, евтектіка, розплав скла, термоциклічне навантаження, руйнування.

Подписано к печати 18.06.97 Объем 4 п.л. Тираж 100 экз Заказ № 630
330600 г.Запорожье, ЗГТУ, Типография, ул.Гоголя, 64