

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| <b>ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №1.</b> Термографічний контроль вуглецевого еквівалента чавуну. Вплив вуглецевого еквівалента на властивості сірого чавуну..... | 4  |
| <b>ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №2.</b> Графітізувальне модифікування чавуну.....   | 11 |
| <b>ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №3.</b> Сфероїдизувальне модифікування чавуну...  | 15 |
| <b>ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №4.</b> Металографічний аналіз мікроструктури чавунів.....  | 20 |
| <b>ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №5.</b> Дослідження ливарних властивостей чавуну з кулястим графітом.....   | 24 |
| <b>ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №6.</b> Дослідження процесу внутрішньоформового модифікування чавуну сфероїдизувальними добавками                               | 29 |
| <b>ДОДАТКИ</b> .....  | 36 |
| <b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b> .....  | 37 |

Мета лабораторних робіт з дисципліни «Виробництво виливків із чавуну» та розділу "Чавунне литво" дисципліни "Чавунне, сталеве та кольорове литво" – розвинути у студентів навички прийняття самостійних рішень в умовах, наближених до реальної виробничої діяльності інженера-технолога чавуноливарного цеху.

У методичних вказівках сформульована мета кожного лабораторного заняття та наведена стисла теоретична інформація за темою роботи. Сформульовані загальні вказівки до проведення послідовних операцій виконання роботи, аналізу та оформлення її результатів.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1**

### **Термографічний контроль вуглецевого еквівалента чавуну. Вплив вуглецевого еквівалента на властивості сірого чавуну**

Мета роботи – засвоєння методики термографічного контролю чавуну, вимірювання глибини вибілення, твердості та тимчасового опору при розриванні чавуну; експериментальне визначення впливу вуглецевого еквівалента на механічні та технологічні властивості сірого чавуну.

#### **1.1. Вуглецевий еквівалент чавуну**

Вуглецевим еквівалентом чавуну називають алгебраїчну суму добутків масової частки кожного елемента у сплаві на основі заліза на коефіцієнт, який вказує на напрямок і ступінь зміщення координати евтектичної точки або інших критичних точок діаграми стану *залізо – вуглець* під впливом одного масового відсотка даного елемента.

Вуглецевий еквівалент реального чавуну розраховують за формулою:

$$C_e = \sum_{i=1}^n \pm a_i Q_i, \quad (1.1)$$

де  $C_e$  – вуглецевий еквівалент чавуну, %;  $a_i$  – коефіцієнт, який враховує ступінь і напрямок впливу  $i$ -го елемента на зміщення критичної точки діаграми стану *залізо-вуглець*;  $Q_i$  – масова частка  $i$ -го елемента у сплаві із залізом, %.

Коефіцієнт  $a_i$  у формулі (1.1) при масовій частці вуглецю у сплаві із залізом дорівнює одиниці. Для інших елементів він менший за одиницю. Знак “ + ” попереду коефіцієнта  $a_i$  означає, що  $i$ -й елемент зміщує критичну точку на діаграмі стану *залізо – вуглець* у бік зменшення вмісту вуглецю (вліво) або у бік підвищення температури (вгору). Знак “ - ” означає, що  $i$ -й елемент зміщує критичну точку в бік підвищення вмісту вуглецю (вправо) або в бік зниження температури (вниз).

Вуглецевий еквівалент дає змогу прогнозувати мікроструктуру, механічні та ливарні властивості, оптимальну температуру заливання та температуру термічного оброблення багатокomпонентного сплаву на основі заліза (чавуну) за допомогою плоскої двокомпонентної діаграми стану *залізо – вуглець*.

Інтенсивність впливу будь-якого елемента на координати різних точок діаграми стану залізо – вуглець (ліквідус, солідус, евтектика, евтектоїд, тощо) не однакова. Тому знаки і числові значення коефіцієнтів  $a_i$  у формулі (1.1) змінюють залежно від критичної точки, яку аналізують.

Найбільш важлива критична точка чавуну – вміст вуглецю в евтектиці. Відомо, що найкращі ливарні властивості має сірий чавун евтектичного складу. Отже, вуглецевий еквівалент такого чавуну має дорівнювати 4,25...4,35 %. Оптимальні ливарні властивості має високоміцний чавун з вуглецевим еквівалентом 4,6...4,8 %. Щоб запобігти графітизації ковкого чавуну в литому стані, його вуглецевий еквівалент необхідно тримати у межах 3,1...3,2 %. Половинчасту структуру чавуну перед графітизувальним модифікуванням досягають при вуглецевому еквіваленті 3,3...3,5 %.

При визначенні вмісту вуглецю в евтектиці або ступеня евтектичності вуглецевий еквівалент чавуну розраховують за формулою:

$$C_e = C + 0,31Si - 0,03Mn + 0,33 P + 0,40 S + 0,07 Ni + 0,05 Cr \quad (1.2)$$

З достатньою для практичного застосування точністю формула (1.2) набуває спрощеного вигляду:

$$C_e = C + Si/3, \% \quad (1.3)$$

Наприклад, чавун, який вміщує 3,48 % *C* та 2,16 % *Si*, має оптимальні ливарні властивості, бо його вуглецевий еквівалент за формулою (1.3) майже збігається із вмістом вуглецю в евтектиці за бінарною діаграмою стану залізо – вуглець:

$$C_e = 3,48 + 2,16 / 3 = 4,20 (\approx 4,26...4,30 \%).$$

## 1.2. Термографічний контроль вуглецевого еквівалента

Потоковий (експресний) контроль хімічного складу чавуну в плавильному агрегаті в сучасних ливарних комплексах виконують хімічні лабораторії, з'єднані з плавильною дільницею пневмопоштою. Безпосередньо на плавильній дільниці склад рідкого чавуну можна контролювати опосередкованими методами. Одним з найшвидших і достатньо точних опосередкованих методів контролю вуглецевого еквівалента чавуну є термографічний метод. Він базується на майже лінійній залежності температури ліквідус від вуглецевого еквівалента:

$$C_e = A - B t_l, \quad (1.4)$$

де *A* і *B* – коефіцієнти, які залежать від умов охолодження порції чавуну, яку контролюють (від швидкості охолодження); *t<sub>l</sub>* – температура ліквідус чавуну, яку контролюють, °C.

Під час термографічного контролю в пробницю заливають порцію рідкого чавуну, вуглецевий еквівалент якого потрібно визначити, і записують криву охолодження цього чавуну. Пробниця (рис. 1.1) виконана у ливарній формі 1 з піщаної суміші 2 у металевому жакеті 3. Робоча частина форми 1, виготовлена у вигляді зрізаного конуса із середнім діаметром 80 мм і висотою 100 мм та вміщує 3 кг сплаву.

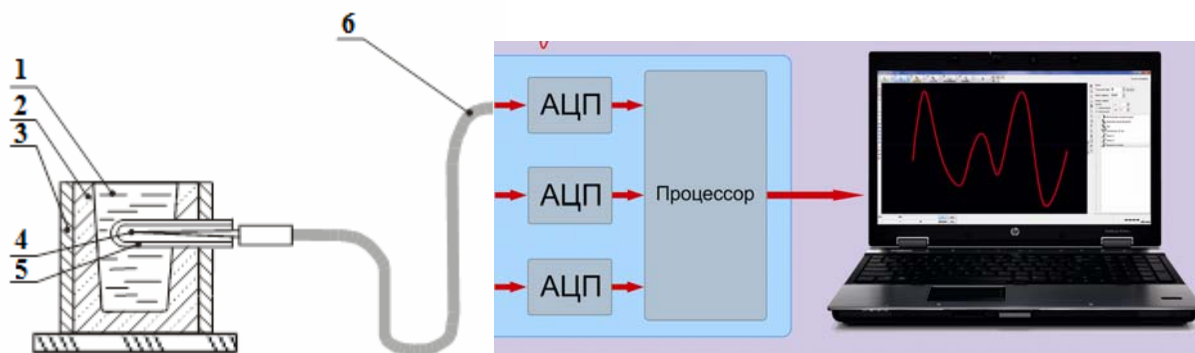


Рисунок 1.1 - Прилад для термографічного експрес-контролю вуглецевого еквівалента рідкого чавуну

Вимірювання температури проводять за допомогою платина-платино-родієвої термопари 4, спай якої від прямого контакту з рідким чавуном захищений кварцовим наконечником 5. Термопара 4 компенсаційним кабелем 6 з'єднана з аналого-цифровим перетворювачем, який передає сигнал на персональний комп'ютер і за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє отримати на ньому в режимі «он-лайн» криву охолодження, одна шкала (по осі «у») якої проградуєвана у  $^{\circ}\text{C}$ , а друга (по осі «х») – у секундах (рис. 1.2).

Під час кристалізації проби чавуну, яку контролюють, на кривій охолодження з'являється теплова зупинка у вигляді площадки, яка пов'язана з ендотермічністю реакції кристалізації первинного аустеніту. Під час цієї зупинки визначається температура ліквідус (зона 1, рис. 1.2). У подальшому продовжується фазове перетворення рідкого чавуну в твердий у температурному інтервалі ліквідус-солідус (між зоною 1 та 2, рис. 1.2), яке закінчується

кристалізацією евтектики з тривалою тепловою зупинкою на кривій охолодження (зона 2, рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Типові криві охолодження

Для пробниці 1 залежність температури ліквідус від вуглецевого еквівалента відповідає функції:

$$C_e = C + Si/3 = (12,87628 - 0,00736t)_l \pm 0,07 \quad (1.5)$$

### 1.3. Методика дослідження

Об'єктом дослідження впливу вуглецевого еквівалента на властивості сірого чавуну є експериментальні виливки (рис. 1.3) масою близько 10 кг, який одержують заливанням рідкого металу в піщану форму по-сірому. Крім ливникової системи, вилівок складається з технологічної клинової проби 1 на вибілення, ступінчастої проби 2 для вимірювання твердості при різних швидкостях охолодження в перерізах товщиною 10, 20 і 30 мм та трьох циліндричних зразків 3 з робочим діаметром 12 мм для випробовування на розтяг і визначення тимчасового опору чавуну при розриванні.

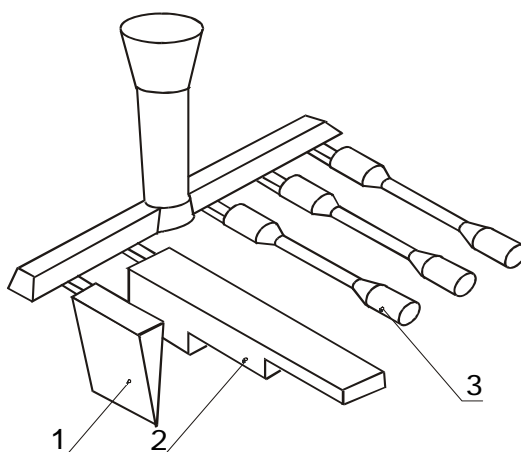


Рисунок 1.3 – Експериментальні виливки

Для визначення межі (глибини) вибілення чавуну необхідно охолоджену суху клинову пробу розбити на дві частини по висоті. На трикутному зламі клина візуально виявляється межа переходу від чорного кольору макроструктури до кристалічно-білого. Товщину зламу клинової проби на цій межі, виміряну штангенциркулем, називають глибиною вибілення  $\delta_{виб}$  (мм). Перерізи стінок реальних виливків з такого чавуну більшої товщини кристалізуються за стабільною системою без ледебуритної евтектики. Перерізи меншої товщини – за метастабільною системою з евтектичним цементитом (вибіленням).

Твердість чавуну  $HB$  на зачищеній від пригару наждачним каменем поверхні перерізів товщиною  $\delta_{пер} = 10, 20, 30$  мм вимірюють методом Бринеля згідно з ГОСТ 9012-59.

Тимчасовий опір при розриванні  $\sigma_e$  чавуну в литому стані на циліндричних зразках діаметром 12 мм визначають випробовуванням на розтягування згідно з вимогами ГОСТ 1497-73 і підраховують за формулою:

$$\sigma_e = Q_{max} \cdot 10^3 / 114 (\text{МПа}) = Q_{max} \cdot 10^2 / 114 (\text{кгс} / \text{мм}^2), \quad (1.6)$$

де  $Q_{max}$  – максимальне навантаження, яке передуює початку розриву зразка, кН;

114 – початкова площа поперечного перерізу зразка,  $\text{мм}^2$ .

Роботу виконують чотири бригади студентів. Кожна бригада самостійно виконує повний обсяг досліджень однієї експериментальної точки (рівня значень вхідного фактора  $x$ ), а результати досліджень (вихідні параметри оптимізації функції  $y$ , яку досліджують) заносять до табл. 1.1.

За результатами роботи студенти роблять висновок про вплив вуглецевого еквівалента на властивості сірого чавуну.

#### 1.4. Послідовність виконання роботи

1.4.1. Виплавити в індукційній печі чавун з вуглецевим еквівалентом, близьким до евтектичного значення.

1.4.2. Заформувати по моделі ливарну форму для отримання експериментальних виливків (див. рис. 1.3).

1.4.3. Проконтролювати вуглецевий еквівалент чавуну за методикою п. 1.2 і занести його значення з відповідною температурою ліквідус до табл. 1.1.

1.4.4. Залити чавуном ливарну форму. Після охолодження вибити експериментальний виливок, відокремити ливникову систему, відокремити кожний елемент виливка та зачистити його.

1.4.5. Виміряти глибину вибілення  $\delta_{виб}$ , тимчасовий опір при розриванні  $\sigma_6$ , твердість  $HV$  у перерізах 10, 20 і 30 мм за методикою п. 1.3 і занести результати до табл. 1.1.

**Таблиця 1.1 – Вплив вуглецевого еквівалента на властивості чавуну**

| Контрольований параметр        | Позначення, розмірність параметра | Бригада 1 | Бригада 2 | Бригада 3 | Бригада 4 |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Температура ліквідус           | $t_l, ^\circ\text{C}$             |           |           |           |           |
| Вуглецевий еквівалент          | $C_e, \%$                         |           |           |           |           |
| Глибина вибілення              | $\delta_{виб}, \text{мм}$         |           |           |           |           |
| Твердість                      | $HV (\delta_{пер}=10 \text{ мм})$ |           |           |           |           |
| Твердість                      | $HV (\delta_{пер}=20 \text{ мм})$ |           |           |           |           |
| Твердість                      | $HV (\delta_{пер}=30 \text{ мм})$ |           |           |           |           |
| Тимчасовий опір при розриванні | $\sigma_6, \text{МПа}$            |           |           |           |           |



1.4.6. Зменшити або збільшити попереднє значення  $C_e$  відповідно додаванням у рідкий метал сталевого брухту або електродної стружки (чи феросиліцію).

1.4.7. Повторити пп.1.4.2 – 1.4.5 кожною наступною бригадою студентів.

## 1.5. Зміст звіту

- назва та мета роботи, визначення, стислий зміст, розрахункові формули, ескізи та принципові схеми вимірювання, розмірність та інші відомості про вуглецевий еквівалент;

- табл. 1.1 з результатами вимірювань;

- графічні залежності  $\delta_{виб} = f_1(C_e)$ ,  $HB = f_2, f_3, f_4(C_e)$  (при  $\delta_{неп} = 10, 20, 30$  мм),

$\sigma_s = f_5(C_e)$  (див. додаток 1);

- загальні висновки за результатами роботи (див. додаток 2).

Література: [1-9].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Графітизувальне модифікування чавуну

Мета роботи – засвоєння методики ковшового графітизувального модифікування рідкого чавуну феросиліцієм; експериментальне дослідження впливу кількості графітизувального модифікатора, який додають у ківш з рідким металом, на механічні і технологічні властивості чавуну.

### 2.1. Графітизувальне модифікування чавуну

Модифікування – це зміна умов кристалізації додаванням поза плавильним агрегатом у рідкий метал спеціальних елементів-модифікаторів з метою підвищення властивостей сплаву у виливках. Ефект модифікування, на відміну від

легування, зникає в разі тривалої витримки металу в рідкому стані та в разі переплавлення твердого звороту.

Графітизувальне модифікування сприяє кристалізації сірого чавуну за стабільною системою *залізо – вуглець*, тобто без вибілення тонких перерізів стінок виливка. Одночасно елементи-модифікатори забезпечують формування тугоплавких сполук, які виступають як додаткові зародки твердої фази в рідкому металі (інокулятори), що сприяє диспергуванню первинного аустенітного і евтектичного зерна, зниженню розмірів і завихренню форми пластинчастого графіту і, як наслідок, підвищенню міцності чавуну у виливках. У деяких випадках модифікуванням попереджують кристалізацію міждендритного графіту, який роз'єднує металевий зв'язок між первинними аустенітними зернами і значно знижує міцність сірого чавуну. Графітизувальні модифікатори, які містять церій та рідкоземельні метали, сприяють кристалізації вермикулярного і навіть компактного графіту, що значно підвищує міцність чавуну.

Як графітизувальні модифікатори використовують різноманітні метали і сплави, з яких найпоширенішим у промисловості є феросиліцій марки ФС75 (сплав заліза з 75 % кремнію). Модифікатор найчастіше додають на дно розливающего ковша під час його заповнення чавуном. Іноді модифікатор додають на жолоб плавильного агрегату під час заповнення ковша. Додавання феросиліцію ФС75 у ківш знижує температуру чавуну під час заливання форм на 50...80 °С. При витримці чавуну в ковші більше 15...20 хв. ефективність модифікування майже зникає. Тому найбільшого ефекту досягають при додаванні модифікатора безпосередньо в ливарну форму: у ливникову чашу, у зумпф стояка, у відцентровий шлаковловлювач або у спеціальну реакційну камеру ливникової системи. При збільшенні температури і маси чавуну, який модифікують, оптимальний розмір часток подрібненого феросиліцію підвищується від 2...5 до 30...40 мм. В усіх випадках частки модифікатора мають без залишку розчинитися в рідкому чавуні до початку його кристалізації.

Встановлено, що графітизувальне модифікування найефективніше виявляє себе у доевтектичних чавунах з відносно низьким вуглецевим еквівалентом

3,3...3,4 %. Такі чавуни отримують додаванням у шихту значної кількості сталевого брухту. Без модифікування вони здебільшого кристалізуються за метастабільною системою залізо – цементит, тобто з повним або частковим вибіленням. Після модифікування такі чавуни кристалізуються без вибілення із дрібнозернистою структурою й рівномірно розподіленим дрібним завихреним графітом і, як наслідок, вони мають підвищену міцність і щільність. При вуглецевому еквіваленті 3,8 % і більше різниця у розмірах зерен немодифікованого і модифікованого чавунів незначна. Більш того, кремній у складі модифікатора як графітизувальний елемент підвищує долю фериту і знижує долю перліту в металевій матриці, що призводить до зменшення міцності сірого чавуну.

Оптимальну кількість модифікатора, який додають у рідкий чавун, встановлюють експериментально. З цією метою і виконують лабораторну роботу.

## **2.2. Методика дослідження**

Об'єкт дослідження та параметри його оптимізації (вихідні функції  $y$ ) такі ж самі, як у лабораторній роботі № 1 (див. п. 1.3). Вхідним фактором  $x$  в роботі є кількість феросиліцію марки ФС75, який додають на дно ковша перед заповненням рідким металом, у відсотках від маси чавуну в розливному ковші, яка дорівнює 10 кг.

## **2.3. Послідовність виконання роботи**

2.3.1. Виплавити в індукційній печі чавун із вуглецевим еквівалентом 3,2...3,4 % і перевірити термографічним методом за методикою, описаною в п. 1.2.

2.3.2. Заформувати по моделі ливарну форму, щоб отримати експериментальні виливки (див. рис. 1.3).

2.3.3. Додати на дно розливного ковша подрібнений до часток 5...10 мм феросиліцій ФС75 у кількості, вказаній у табл. 2.1 для кожної бригади студентів.

Після набору в ківш 10 кг рідкого чавуну перемішати модифікатор сталеву штангою і зняти шлак з поверхні металу.

2.3.4. Залити чавуном ливарну форму. Після охолодження вибити експериментальні виливки, обрубити ливникову систему, відокремити кожний елемент вилівка, зачистити технологічні проби.

2.3.5. Виміряти глибину вибілення  $\delta_{виб}$ , тимчасовий опір при розриванні  $\sigma_{\epsilon}$ , твердість  $HV$  у перерізах 10, 20 і 30 мм за методикою п. 1.3 (с. 8) і занести результати до табл. 2.1.

2.3.6. Повторити пп. 2.3.2 ... 2.3.5 кожною наступною бригадою студентів.

**Таблиця 2.1. Вплив графітизувального модифікування на властивості чавуну**

| Контрольований параметр        | Позначення, розмірність параметра | Бригада 1 | Бригада 2 | Бригада 3 | Бригада 4 |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Кількість феросиліцію          | ФС75, %                           | 0         | 0,1       | 0,3       | 0,5       |
| Глибина вибілення              | $\delta_{виб}$ , мм               |           |           |           |           |
| Твердість                      | $HV$ ( $\delta_{пер}=10$ мм)      |           |           |           |           |
| Твердість                      | $HV$ ( $\delta_{пер}=20$ мм)      |           |           |           |           |
| Твердість                      | $HV$ ( $\delta_{пер}=30$ мм)      |           |           |           |           |
| Тимчасовий опір при розриванні | $\sigma_{\epsilon}$ , МПа         |           |           |           |           |

## 2.4. Зміст звіту

- назва та мета роботи, визначення, стислий зміст технології та мета графітизувального модифікування сірого чавуну;

- табл. 2.1 з результатами вимірювань;

- графічні залежності  $\delta_{виб} = f_1(\text{ФС75})$ ,  $HV = f_2, f_3, f_4$  (ФС75)

(при  $\delta_{пер} = 10, 20, 30$  мм),  $\sigma_{\epsilon} = f_5$  (ФС75) (див. додаток 1);

- загальні висновки за результатами роботи (див. додаток 2).

Література: [1-9].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### Сфероїдизувальне модифікування чавуну

Мета роботи – засвоєння методики ковшового сфероїдизувального модифікування рідкого чавуну феросиліцій-магнієвим модифікатором; експериментальне дослідження впливу кількості сфероїдизувального модифікатора, який додається у ківш з рідким металом, на механічні та технологічні властивості чавуну.

#### 3.1. Сфероїдизувальне модифікування чавуну

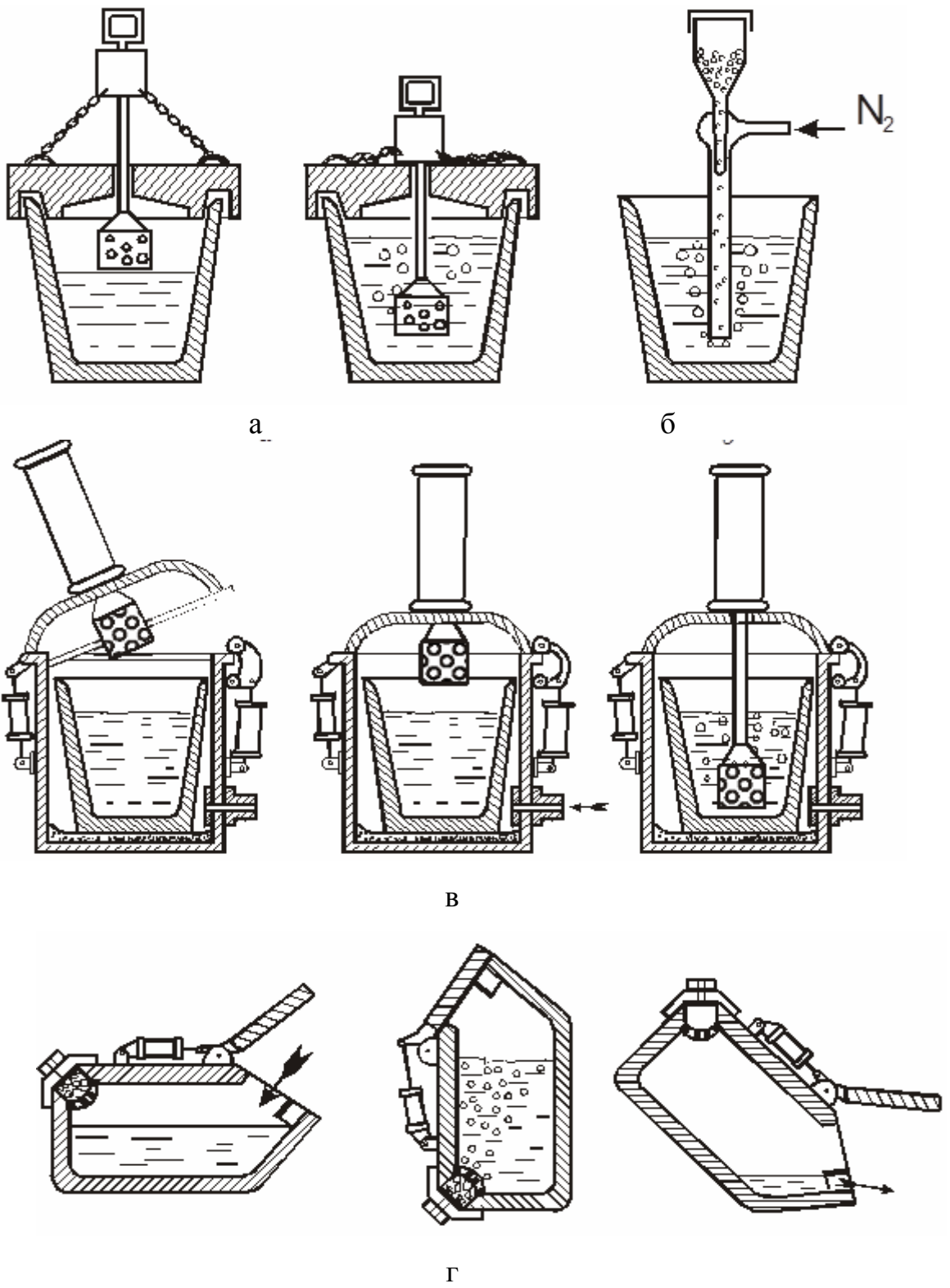
Сфероїдизувальне модифікування рідкого чавуну проводять з метою отримання у виливках після їх кристалізації високоміцного чавуну з кулястим графітом. Кулястий графіт, на відміну від пластинчастого, не створює значних локальних концентраторів напружень і лише на 8...12 % послаблює живий переріз металеві матриці. Механічні властивості високоміцного чавуну та вуглецевої сталі майже збігаються, а ливарні властивості чавуну – значно кращі (для цього чавун здебільшого має евтектичний склад із вуглецевим еквівалентом 4,2...4,4 %). Вартість чавунних виливків удвічі дешевша. Тому чверть загальної світової кількості виливків, у т. ч. таких, які раніше виготовляли з вуглецевої сталі, на початку XXI сторіччя виробляють з високоміцного чавуну з кулястим графітом.

Найважливіший етап технологічного процесу виробництва виливків з високоміцного чавуну – сфероїдизувальне модифікування рідкого металу. У промисловості як сфероїдизувальний елемент-модифікатор найпоширенішим є магній. Температура кипіння металевого магнію 1107 °С, а температура рідкого чавуну під час модифікування 1380...1480 °С. Тому додавання металевого магнію в рідкий метал супроводжується виплесками чавуну з ковша, піроефектом та виділенням білого диму оксиду магнію. При цьому корисне засвоєння магнію сплавом (до потрібного для сфероїдизації графіту залишкового значення в чавуні виливків, яке дорівнює 0,03...0,05 % $Mg_{зал}$ ) незначне і нестабільне.

Для запобігання виплесків, піроефекту, димовиділення та стабілізації коефіцієнта корисного засвоєння, металевий магній додають на дно ковша з рідким чавуном у вогнетривкому стакані з отворами на штанзі крізь отвір у важкій захисній кришці (рис. 3.1, а), у герметизованому автоклаві при надлишковому тиску, який підвищує температуру кипіння магнію до 1300...1380 °С (рис. 3.1, в) або інжектують крізь вогнетривку фурму в потоці нейтрального газу (рис. 3.1, б). Досі поширеним є метод модифікування чавуну магнієм у герметизованому повертальному ковші конверторного типу (рис. 3.1, г).

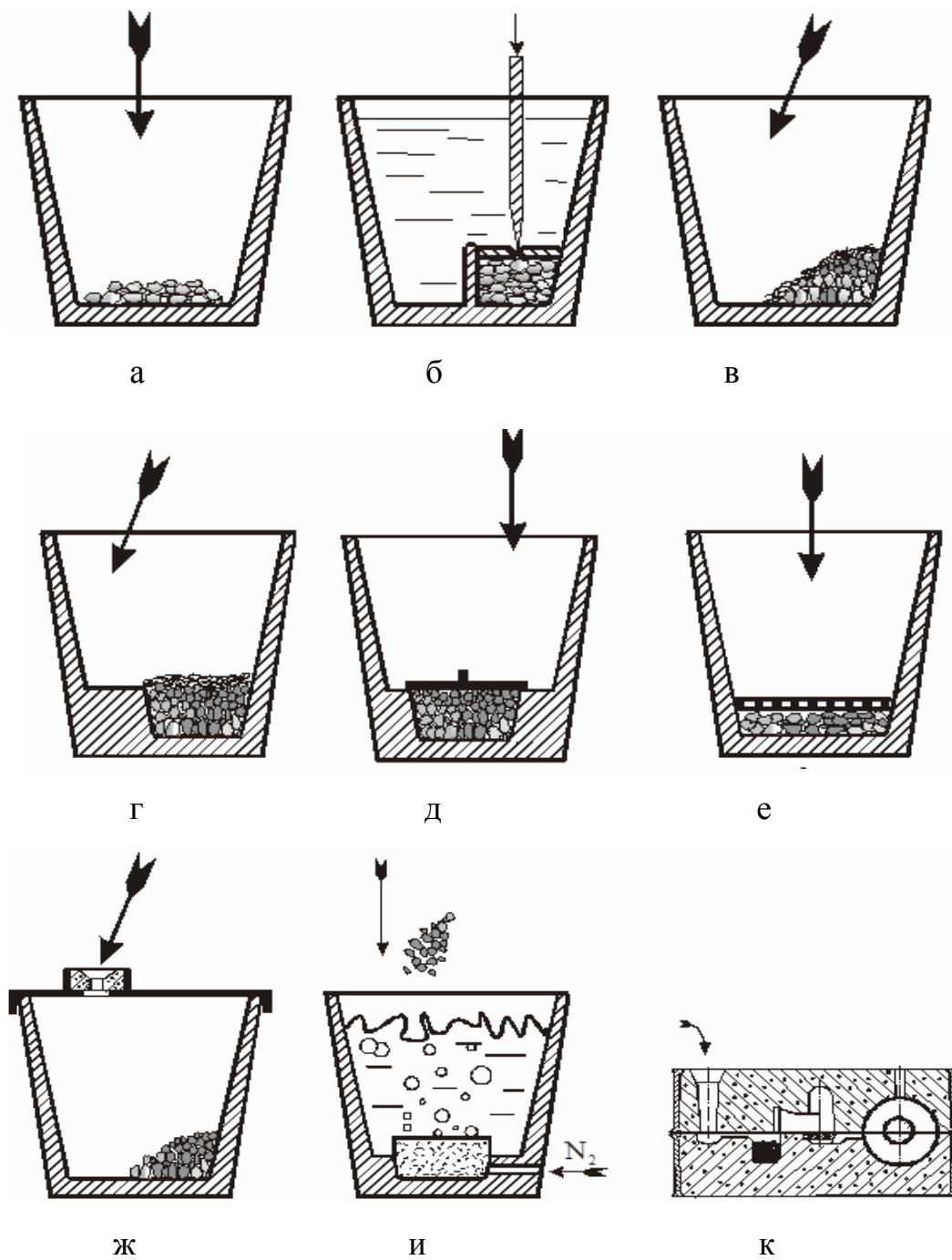
Замість металевого магнію чавун модифікують менш активними сплавами нікелю з 15...20 % магнію, або феросиліцію (43...46 % кремнію) з 6...8 % магнію. Важкий нікель-магнієвий модифікатор НМг-15...НМг-20 здебільшого додають на дно відкритого ковша перед заповненням рідким чавуном (рис. 3.2, а). Щоб уникнути передчасного спливання легкого феросиліцій-магнієвого модифікатора ФСМг6...ФСМг8, його іноді прикривають карбідом кальцію з наступним проколюванням спеченої кірки сталеву штангою (рис. 3.2, б); привантажують чавунною стружкою на дні ковша (рис. 3.2, в), у тому числі в спеціальній кишені футерівки дна – так званий сендвіч-процес (рис. 3.2, г); привантажують чавунним диском (рис. 3.2, д) або механічно утримують зафутерованим біля днища стрижнем з отворами (рис. 3.2, е). Зниження піроефекту досягають використанням кришки з ливниковою воронкою (рис. 3.2, ж).

Менш розповсюджений метод додавання легкого модифікатора в ківш з рідким чавуном у вогнетривкому стакані з отворами на штанзі (див. рис. 3.1, а) або на поверхню з одночасним продуванням чавуну нейтральним газом крізь пористу вогнетривку вставку у футерівці днища ковша (рис. 3.2, и). Знайшов розповсюдження метод модифікування чавуну безпосередньо у ливарній формі – так званий інмолд-процес, коли подрібнений феросиліцій-магнієвий сплав розміщують у спеціальній реакційній камері ливникової системи, і він рівномірно та повністю розчиняється в потоці чавуну під час заливання ливарної форми (рис. 3.2, к). Пошук ефективного стабільного безпечного методу сфероїдизувального модифікування чавуну продовжується й досі.



а – плунжер; б – інжекція; в – автоклав; г – поворотальний ківш

Рисунок 3.1 – Найбільш поширені способи модифікування чавуну металевим магнієм



а – пур-овер; б – тригер; в – з прикриттям; г – сендвіч;  
 д – з привантаженням; е – з вогнетривкою сіткою; ж – тандиш; и – газал;  
 к – інмолд

Рисунок 3.2 – Найбільш поширені способи модифікування чавуну модифікаторами, які вміщують магній

Чавун, який з метою сфероїдизації графіту оброблений металевим магнієм або нікель-магнієвим модифікатором, завжди кристалізується за метастабільною



системою, тобто з вибіленням. Тому одночасне або вторинне його модифікування феросиліцієм для усунення вибілення у литому стані (без додаткового термічного оброблення вибілених виливків) – звичайна практика при виробництві високоміцного чавуну. При сфероїдизувальному модифікуванні чавуну феросиліцій-магнієвим модифікатором типу ФСМг додаткове графітизувальне модифікування чавуну феросиліцієм не обов'язкове.

### **3.2. Методика дослідження**

Об'єкт дослідження та параметри його оптимізації (вихідні функції  $y$ ) такі ж самі, як у лабораторній роботі № 1 (див. п. 1.3). Вхідним фактором  $x$  в роботі є кількість феросиліцій-магнієвого модифікатора ФСМг7 (Fe + 44 % Si + 7 % Mg), який додають на дно відкритого ковша перед заповненням рідким металом, у відсотках від маси чавуну в розливному ковші, яка дорівнює 10 кг.

### **3.3. Послідовність виконання роботи**

3.3.1. Виплавити в індукційній печі чавун з  $C_e = 4,2 \dots 4,4 \%$  і перевірити термографічним методом за методикою описаною в п. 1.2.

3.3.2. Заформувати по моделі ливарну форму для отримання експериментальних виливків (див. рис. 1.3).

3.3.3. Додати на дно розливного ковша подрібнений до часток 5...10 мм феросиліцій-магнієвий модифікатор ФСМг7 у кількості, вказаній у табл. 3.1 для кожної бригади студентів. Після набору в ківш 10 кг рідкого чавуну перемішати модифікатор сталевною штангою і зняти шлак з поверхні металу.

3.3.4. Залити чавуном ливарну форму. Після охолодження вибити експериментальні виливки, обрубити ливникову систему, відокремити кожний елемент виливка, зачистити технологічні проби.

3.3.5. Виміряти глибину вибілення  $\delta_{виб}$ , тимчасовий опір при розриванні  $\sigma_6$ , твердість  $HB$  у перерізах 10, 20 і 30 мм і занести результати до табл. 3.1.

**Таблиця 3.1 – Вплив сфероїдувального модифікування на властивості**

**чавуну**

| Контрольований параметр        | Позначення, розмірність параметра | Бригада 1 | Бригада 2 | Бригада 3 | Бригада 4 |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Кількість модифікатора         | ФСМГ7, %                          | 0         | 1,0       | 1,5       | 2,0       |
| Глибина вибілення              | $\delta_{виб}$ , мм               |           |           |           |           |
| Твердість                      | $HB$ ( $\delta_{пер} = 10$ мм)    |           |           |           |           |
| Твердість                      | $HB$ ( $\delta_{пер} = 20$ мм)    |           |           |           |           |
| Твердість                      | $HB$ ( $\delta_{пер} = 30$ мм)    |           |           |           |           |
| Тимчасовий опір при розриванні | $\sigma_b$ , МПа                  |           |           |           |           |

3.3.6. Повторити пп. 3.3.2...3.3.5 кожною наступною бригадою студентів.

### 3.4. Зміст звіту

- назва та мета роботи, визначення, стислий зміст технології та мета сфероїдувального модифікування чавуну;

- табл. 3.1 з результатами вимірювань;

- графічні залежності  $\delta_{виб} = f_1$  (ФСМГ7),  $HB = f_2, f_3, f_4$  (ФСМГ7)

(при  $\delta_{пер} = 10, 20, 30$  мм),  $\sigma_b = f_5$  (ФСМГ7) (див. додаток 1);

- загальні висновки за результатами роботи (див. додаток 2).

Література: [1-9].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### Металографічний аналіз мікроструктури чавунів

Мета роботи – засвоєння методики металографічного аналізу мікроструктури чавунів різних типів згідно з ГОСТ 3443-77; набуття досвіду

прогнозування якості, механічних властивостей і марки чавуну за даними його металографічного аналізу.

#### **4.1. Металографічний аналіз чавунів**

Металографічний аналіз – один із головних методів визначення причин невідповідності механічних і технологічних властивостей вимогам технічної документації для тієї чи іншої марки чавуну. У деяких випадках конкретна мікроструктура зумовлена технічною документацією на придатні виливки як обов'язкова характеристика чавуну.

Металографічний аналіз проводять за допомогою металографічних оптичних мікроскопів на відполірованій до дзеркального блиску поверхні зразка металу (шліфі), виготовленого з технологічної проби або з частки звороту власного виробництва виливка. При аналізі нетравленого шліфа в полі зору мікроскопа на білому фоні металевій матриці спостерігають темні неметалеві вкраплення, головним з яких є чорно-колірний графіт. Якщо шліф протравлений 4 %-м спиртовим розчином азотної кислоти, в полі зору мікроскопа, крім графіту, спостерігають павутиноподібні межі між окремими евтектичними зернами, а також межі між окремими структурними складовими сплаву. При цьому зерна гомогенного фериту мають матово-білий колір. Гетерогенні продукти розпаду аустеніту у вигляді евтектоїдної механічної суміші фериту і цементиту (зерна перліту) мають строкате забарвлення, а більш дисперговані суміші (зерна трооститу, сорбіту, бейніту, мартенситу відпуску) – темне. Окремі вкраплення кристалів цементиту мають блискучо-білий колір. Евтектична механічна суміш цементиту з продуктами розпаду аустеніту (ледебурит) проявляється у вигляді блискучо-білих кристалів з кулястими або строкатими темними вкрапленнями.

Металографічний аналіз мікроструктури чавунів проводять відповідно до вимог ГОСТ 3443-87 "Виливки з чавуну з різною формою графіту. Методи виявлення структури". Структуру чавуну на шліфі в полі зору мікроскопа візуально порівнюють з фотографіями еталонних структур різних типів чавунів,

наведених в обов'язковому додатку № 3 до ГОСТу 3443-87 при однаковому збільшенні (найчастіше – стократному).

Умовний індекс під фотографією з найбільш близькою подібністю структури до структури в полі зору шліфа і є її металографічною характеристикою.

Форму вкраплень пластинчастого графіту в сірому чавуні визначають за шкалою 1А, вермикулярного графіту – 2А, кулястого графіту у високоміцному чавуні – 3А, компактного (пластівцевого) графіту відпалу в ковкому чавуні – 4А. Якщо в структурі графіт має різну форму, визначають відсоткову долю кожної форми і характеризують їх окремо. Довжину пластинчастих графітових вкраплень оцінюють (у мкм) за шкалою 1Б, діаметр кулястих вкраплень (у мкм) – 3Б, компактних (у мкм) – 4Б. Розподіл вкраплень пластинчастого графіту характеризують за шкалою 1В, вермикулярного – 2В, кулястого – 3В. Кількість включень пластинчастого графіту (у % площі, зайнятої на мікрошліфі) оцінюють за шкалою 1Г, кулястого – 3Г. Кількість кулястого графіту в структурі чавуну з вермикулярним графітом (у відсотках від загальних 100 %) визначають за шкалою 2В.

Тип металевої матриці чавуну (ферит, пластинчастий перліт, зернистий перліт, троостит, бейніт, мартенсит), при необхідності, визначають на травленому шліфі за шкалою 5.

Залежно від відсотка перліту або фериту в металевій матриці (перліт плюс ферит дорівнює 100 %), структуру сірого чавуну у великих і середніх виливках з малою швидкістю охолодження оцінюють за шкалою 6А Ряд 1, сірого чавуну в тонкостінних виливках з підвищеною швидкістю охолодження – 6Б Ряд 2, чавуну з вермикулярним графітом – 6В Ряд 3, чавуну з кулястим графітом – 6Г Ряд 4, виливків з ковкового чавуну – 6Д Ряд 5.

Кількість вкраплень цементиту або цементиту ледебуриту (у відсотках площі, зайнятої на мікрошліфі) визначають за шкалою 10А, а їх площу (у мкм<sup>2</sup>) – 10Б.

## 4.2. Послідовність виконання роботи

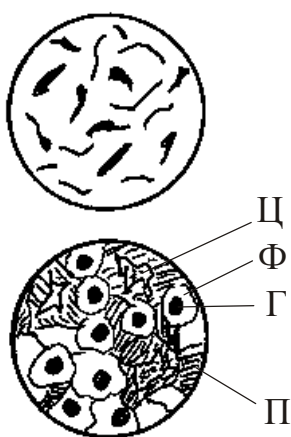
4.2.1. Ознайомитись із вимогами ГОСТ 3443-87 (п. 4.1) і додатком 3 до нього.

4.2.2. Встановити на металографічний мікроскоп перший зразок шліфа з колекції зразків чавунів різних типів і марок, мікроструктуру яких необхідно оцінити під час виконання роботи.

4.2.3. У колі діаметром 40...50 мм замалювати ескіз мікроструктури зразка.

4.2.4. Використовуючи додаток 3 до ГОСТ 3443-87, провести повний металографічний аналіз структури чавуну. Результати аналізу записати поряд з ескізом мікроструктури.

*Приклад:*



Зразок № 15 (не травлено)

ПГф2 (пластинчаста завихрена) – ПГд180 –

ПГр1 (рівномірне) – ПГ6

Зразок № 16 (травлено)

ШГф5 (куляста правильна) – ШГд25 – ШГр1 (рівномірне) ШГ6 – П45(Ф55) – Ц4 – Цп6000

4.2.5. Провести аналогічний аналіз усіх зразків шліфів з колекції чавунів різних типів і марок.

## 4.3. Зміст звіту

- методика металографічного аналізу структури чавунів (п. 4.1);
- ескізи мікроструктур з колекції чавунів різних типів і марок із записом результатів їх металографічного аналізу (див. *приклад*).

Література: [3,7].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

### Дослідження ливарних властивостей чавуну з кулястим графітом

Мета роботи – дослідити вплив витрати сфероїдизувального модифікатора на ливарну та об'ємну усадку чавуну з кулястим графітом.

#### 5.1. Усадка

Важливою ливарною властивістю є усадка – зміна об'єму та лінійних розмірів виливків у результаті термічного стискання, фазових перетворень та взаємодії з ливарною формою в процесі тверднення та охолодження.

Зниження температури викликає зменшення об'єму металу на 1,1...1,8 % на кожні 100 °С, а графітизація чавуну, навпаки, дає збільшення об'єму на 2,2% на 1,0% графіту, що виділився.

Об'ємна усадка рідкого металу  $\square_{wжс}$  тим більша, чим більший коефіцієнт об'ємної усадки рідкого металу та вища початкова температура, а об'ємна усадка при твердінні  $\square_{wз}$  тим більша, чим менший вуглецевий еквівалент, чим більший інтервал кристалізації та чим менше графіту виділяється безпосередньо з рідкого розчину.

Усадка в твердому стані визначається зазвичай як лінійна та складається з наступних етапів (рис. 5.1): передусадкового розширення  $\epsilon_{рас}$ , яке відбувається в діапазоні найвищих температур, близьких до евтектики, доперлітної усадки  $\epsilon_{g.n}$ , розширення при розпаді аустеніту  $\epsilon_{\gamma \rightarrow \alpha}$ , післяперлітна усадка  $\epsilon_{n.n}$ . від початку перлітного перетворення до нормальної температури.

Виділяють повну усадку  $\epsilon_n$  (від точки максимального передусадкового розширення до розміру, який відповідає нормальній температурі) та ливарну усадку  $\epsilon_{лив.}$  – від температури кристалізації чи початку передусадкового розширення до нормальної температури.

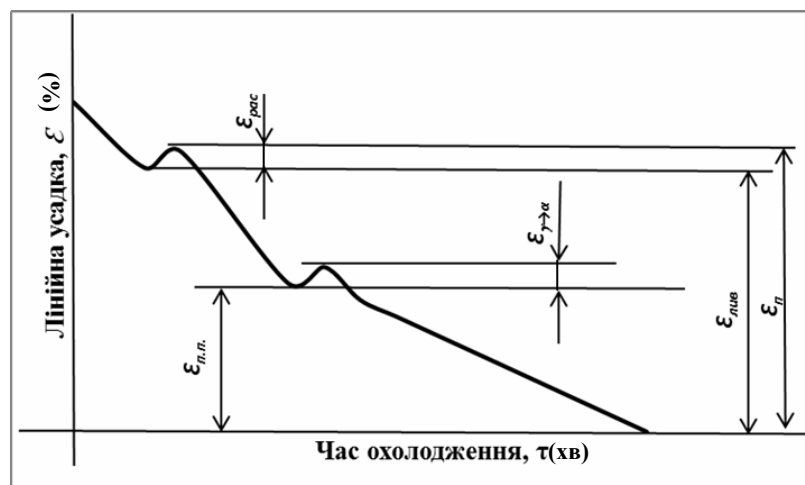


Рисунок 5.1 – Етапи усадки чавуну

Значення ливарної усадки на різних етапах та об'єму усадкових раковин для різних чавунів наведені в табл. 5.1.

**Таблиця 5.1 – Ливарна усадка різних видів чавуну**

| Чавун                    | Етап ливарної усадки, % |                  |  |                   |                   | Об'єм усадкових раковин, % |
|--------------------------|-------------------------|------------------|--|-------------------|-------------------|----------------------------|
|                          | $\epsilon_{рас}$        | $\epsilon_{г.п}$ | $\epsilon_{\gamma \rightarrow \alpha}$ | $\epsilon_{п.п.}$ | $\epsilon_{лив.}$ |                            |
| Білий                    | <0,1                    | 1,2...1,4        | 0,02...0,40                            | ~1,0              | 1,8...2,2         | 5,0...6,0                  |
| Ковкий                   | <0,1                    | 1,2...1,4        | 0,02...0,40                            | ~1,0              | 1,8...2,2         | 5,0...6,0                  |
| Сірий                    | 0,10...0,25             | 0,1...0,5        | 0,04...0,20                            | ~1,0              | 0,9...1,3         | 0...4,0                    |
| З кулястим графітом      | 0,3...1,0               | -0,4...0,4       | 0,04...0,20                            | ~1,0              | 0,3...0,6         | 2,5...12,0                 |
| З вермикулярним графітом | 0,2...0,6               | -0,2...0,5       | 0,04...0,20                            | ~1,0              | 0,6...0,9         | 2,0...7,0                  |

Відмінна особливість чавуну з кулястим графітом – високе передусадкове розширення, що є основною причиною схильності чавуну до утворення усадкових дефектів – концентрованих раковин, макро- та мікропористості, утяжин.

Передусадкове розширення чавуну з кулястим графітом починається ще в момент, коли основна маса металу (тепловий центр) знаходиться в рідкому стані, проте вже утворилася зовнішня кірка виливка. Отже, джерелом передусадкового розширення в цей період є об'ємні зміни в цій кірці, обумовлені виділенням та

ростом графітових вкраплень, газовиділенням, кристалізаційним тиском, графітизацією в твердій кірці.

Основний вплив належить графітизації кірки, яка і визначає величину передусадкового розширення.

В залежності від хімічного складу чавуну, швидкості охолодження, умов модифікування, поверхнева кірка може кристалізуватися з утворенням аустенітно-цементитно-графітної, аустенітно-графітно-цементитної чи аустенітно-графітної евтектики. При кристалізації поверхневої кірки з аустенітно-графітною евтектикою, зокрема, в чавунах з високим вуглецевим еквівалентом чи з мінімальним вмістом сфероїдизувальних елементів, передусадкове розширення невелике. В чавунах, близьких за складом до евтектичних, поверхнева кірка кристалізується з аустенітно-цементитно-графітною евтектикою. Процеси графітизації цементиту в цій кірці інтенсифікуються теплом центральної частини, обумовлюють велике передусадкове розширення.

Формування усадкових раковин відбувається після утворення на поверхні виливка достатньо міцної твердої кірки, яка має самостійну усадку, що відрізняється від об'ємної усадки затверділої серцевини. При інших однакових умовах, об'єм усадкової раковини тим більший, чим більша об'ємна усадка серцевини в процесі охолодження та твердіння, а також чим менша за той же час усадка твердої поверхневої кірки.

Об'ємна усадка чавуну при твердінні знаходиться в прямій залежності від процесу графітизації. Чим повніше відбувається процес графітизації за рахунок евтектичного розпаду рідини на аустеніт та графіт, тим менша об'ємна усадка і, навпаки, чим більша графітизація відбувається в затверділій частині (за рахунок розпаду цементиту), тим більша усадка при твердінні і тим більший об'єм усадкових раковин. Крім того, розпад цементиту призводить до збільшення розмірів зовнішньої кірки і тим самим сприяє більшому розвитку раковин.



## 5.2. Методика дослідження

Об'єктом дослідження обрана проба з вираженим спрямованим твердінням, яка вказана на рис.5.1 Вхідним фактором  $x$  в роботі є кількість феросиліцій-магнієвого модифікатора ФСМг7 (Fe + 44 % Si + 7 % Mg), який додають на дно відкритого ковша перед заповненням рідким металом, у відсотках від маси чавуну в розливному ковші, яка дорівнює 10 кг.

## 5.3. Послідовність виконання роботи

5.3.1. Виплавити в індукційній печі чавун з  $C_e = 4,2...4,4$  % і перевірити термографічним методом за методикою, описаною в п. 1.2.

5.3.2. Підготувати сфероїдизувальний модифікатор в кількості 1,0; 1,5; 2,0 % від маси металу.

5.3.3. Виміряти температуру розплавленого чавуну, провести ковшове сфероїдизувальне модифікування чавуну. Виміряти температуру чавуну після модифікування та залити технологічні проби для визначення ливарної усадки та об'єму усадкових раковин (рис. 5.1).

5.3.4. Записати ливарну усадку чавуну з фіксацією значень крізь кожні 10 с. після заливання проби та визначити величину передусадкового розширення з використанням приладу Большакова.

5.3.5. Пробу для визначення усадкової раковини охолодити, вибити, очистити від формувальної суміші, відокремити ливникову систему.

6. Виміряти об'єм концентрованої усадкової раковини  $V_{к.р.}$ , заповнивши її керосином.

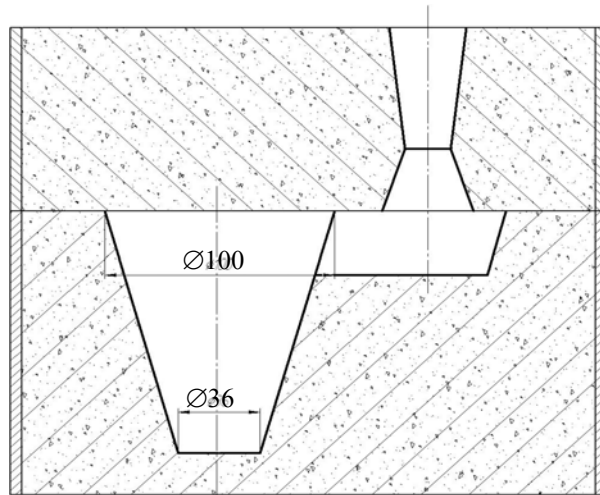


Рисунок 5.1 – Технологічна проба для визначення об'єму усадкових раковин

5.3.7. Результати досліджень занести в табл. 5.2.

**Таблиця 5.2 – Результати визначення параметрів усадки чавуну**

| Витрата сфероїдизувального модифікатора, % | Величина передусадкового розширення $\varepsilon_{рас}$ , % | Об'єм концентрованої усадкової раковини, $V_{к.р.}$ , $см^3$ |
|--|---|--|
| 0  |   |  |
| 1,0  |   |  |
| 1,5  |   |  |
| 2,0  |   |  |

5.3.8. Побудувати графічні залежності об'ємів концентрованої усадкової раковини від витрати модифікатора та від величини передусадкового розширення (рис. 5.2.,5.3.).



Рисунок 5.4 – Залежність об'єму концентрованої усадкової раковини від величини передусадкового розширення

## 5.4. Зміст звіту

- назва та мета роботи, визначення, стислий зміст технології дослідження;

- табл. 5.2. з результатами вимірів;

- графічні залежності  $V_{к.р.} = f$  (витрата модифікатора,%),  $V_{к.р.} = f$  ( $\square_{рас}$ , % )

(див. додаток 1);

- загальні висновки за результатами роботи (див. додаток 2).

Література: [1-9].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### Дослідження процесу внутрішньоформового модифікування чавуну сфероїдизувальними добавками

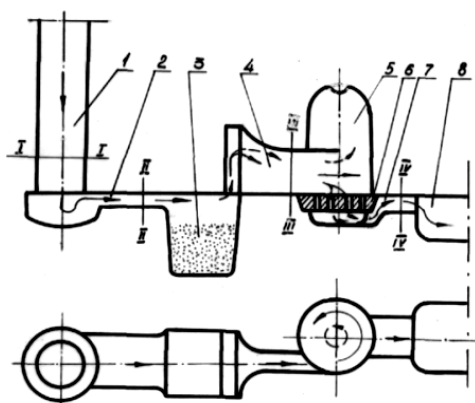
Мета роботи – засвоїти методику внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування чавуну феросиліцій-магнієвим модифікатором; дослідити вплив гранулометричного складу сфероїдизувального модифікатора на структуру та властивості чавуну.

#### 6.1. Внутрішньоформове сфероїдизувальне модифікування чавуну

Більшість загальноприйнятих процесів сфероїдизувального модифікування чавуну характеризуються низьким засвоєнням модифікувальних елементів, що призводить до підвищеної їх витрати та збільшення вартості однієї тонни чавуну. Крім того, недоліком більшості процесів сфероїдизувального модифікування є те, що температура рідкого чавуну при обробленні модифікаторами в ковші знижується, а ефект модифікування при витримці розплаву зменшується. Це призводить до браку литва, особливо в умовах масового конвеєрного виробництва. Істотним недоліком більшості процесів модифікування є забруднення атмосфери цеху.

З метою усунення ряду перерахованих недоліків розроблено метод модифікування чавуну в ливарній формі, відомий в літературі під такою назвою, як Інмолд-процес.

Модифікування рідкого чавуну цим методом здійснюється безпосередньо в ливарній формі зернистою або порошкоподібною добавкою, розміщеною на шляху руху розплаву до виливка в спеціальній порожнині ливникової системи – проміжній проточній реакційній камері. Під час заливання форми модифікатор в реакційній камері розчиняється в потоці рідкого металу, переміщується в порожнину форми, де і засвоюється остаточно металом виливка (рис. 6.1).



1 – стояк; 2,4 – вхідний і вихідний ливникові ходи; 3 – реакційна камера з модифікатором; 5 – шлаковловлювач; 6 – фільтрувальна сітка; 7 – живильник; 8 – виливок

Рисунок 6.1 – Схема способу модифікування чавуну в реакційній камері ливарної форми

З початку впровадження процесу внутрішньоформового модифікування закордонна промисловість використовувала сплав із 5,0...8,0 % магнію з феросиліцієм “Прокалой 16” або VL63 з розміром гранул 1...5 мм. При використанні феросплаву із вмістом магнію менше 5,0 % у мікроструктурі чавуну з’являється пластинчастий графіт. При застосуванні феросплавних модифікаторів із підвищеним до 10...15 % вмістом магнію тиск його парів у реакційній камері може призвести до часткового руйнування форми, зворотних виплесків рідкого металу з ливникової чаші і одержання дефектних виливків.

В наш час в Україні для внутрішньоформового модифікування як сфероїдизувальний заряд реакційних камер використовують переважно подрібнені до гранул 1,0...5,0 мм феросиліцій-магнієві модифікатори марок ФСМг6...ФСМг8 (ТУ 14-5-134-86). Подібні модифікатори з 5,0...8,0 % магнію з незначним додаванням РЗМ, а також домішками кальцію, алюмінію та інших елементів за рахунок відносно низької теплоти та температури плавлення достатньо повно розчиняються в потоці чавуну. Наявність барію підсилює сфероїдизувальний ефект і уповільнює карбідоутворення в тонкостінних виливках. Наявність РЗМ в модифікаторах нейтралізує негативний вплив елементів-демофідікаторів (сірка, олово, алюміній, свинець, мідь) на сфероїдизацію графіту. Серед елементів-ремодифікаторів, які підвищують стабільність сфероїдизувального та графітизувального ефекту модифікування переважають церій, а також ітрій і лантан.

Важливим чинником, який впливає на ефективність технологічного процесу модифікування металу в ливарній формі, є гранулометричний склад модифікатора. Встановлено, що під час модифікування у ливарній формі засвоєння сфероїдизувального феросиліцій-магнієвого (4,0...5,0 % магнію) модифікатора з розміром часток 3...15 мм складає 85...95 %, а з розміром часток 0,5...3,0 мм і 15...20 мм відповідно 40 і 50 %. Відзначається, що заливання форм з модифікатором, який має розмір часток 6...12 мм відбувається спокійніше, ніж з розміром часток 12...25 мм. При послідовному двостадійному сфероїдизувальному та графітизувальному обробленні чавуну в ливарній формі відмічена доцільність використання нікель-магнієвого модифікатора з розмірами зерен 2...10 мм.

Залежно від гранулометричного складу, розглядаються три можливі механізми міжфазної взаємодії модифікатора з потоком металу в реакційній камері. Дрібнодисперсний пилоподібний модифікатор (розміром меншим за 1,0 мм) контактує з чавуном переважно за поверхневим механізмом (рис. 6.2, а). При цьому площа міжфазного контакту приблизно дорівнює площі горизонтального перерізу реакційної камери. Гранульований модифікатор без пилоподібної фракції

припускає фільтрацію чавуну на певну глибину заряду камери та пошарово розчиняється в потоці металу (рис. 6.2, б). Кусковий модифікатор (розміром більше 10 мм) припускає фільтрацію чавуну за повним обсягом реакційної камери і розчиняється в потоці металу за об'ємним міжфазним механізмом (рис. 6.2, в). Можливі комбіновані механізми взаємодії твердої та рідкої фази у реакційній камері ливникової системи форми.

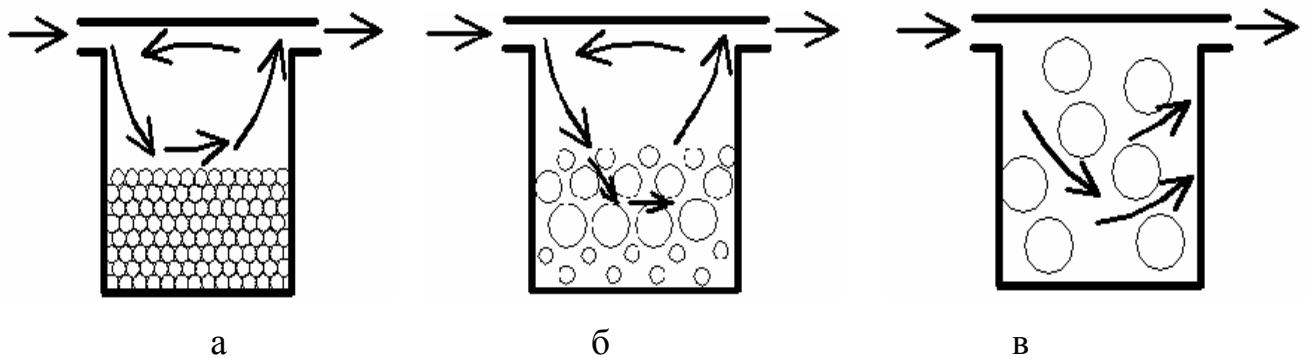


Рисунок 6.2 – Схема поверхневого (а), пошарового (б) та об'ємного (в) механізму взаємодії часток модифікатора різного гранулометричного складу з потоком рідкого чавуну в реакційній камері

Крім гранулометричного складу модифікатора важливе значення для забезпечення ефективного модифікування чавуну в ливарній формі має температура розплаву.

Для феросиліцій-магнієвих лігатур коливання температури заливання в межах 1380...1430 °С помітно не впливає на кінетику розчинення модифікатора. Але при температурі нижче 1380 °С перші порції чавуну залишаються не модифікованими. Сплав “Прокалой 16” не розчиняється при температурі чавуну нижче 1350 °С. Для цього модифікатора припустимий діапазон коливань температури заливання складає 1365...1450 °С, а в умовах масового виробництва – 1380...1420 °С.

## 6.2 Методика дослідження

Об'єктом дослідження обрана здвоєна ступінчаста проба масою  $5,0 \pm 0,2$  кг з перерізами стінок 5, 10, 20, 30, 40, 50 мм та ливниковою системою, яка включала кубічну реакційну камеру з ребром 40 мм (рис. 6.3).

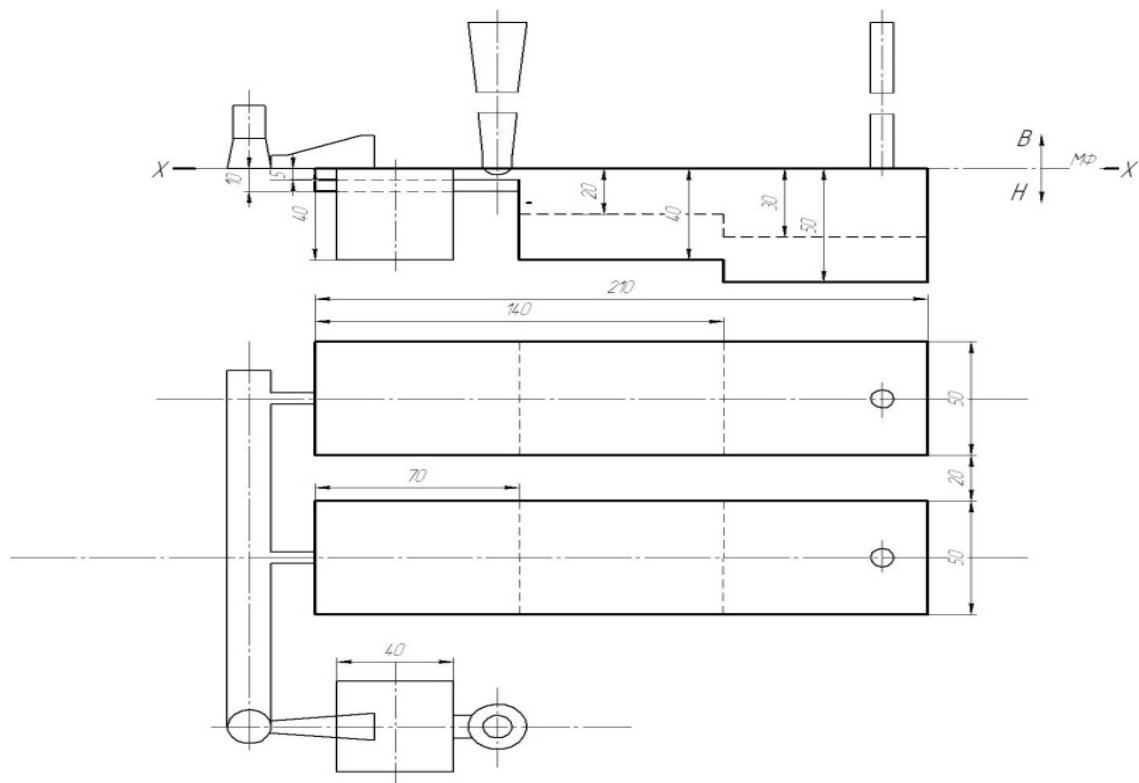


Рисунок 6.3 – Здвоєна ступінчаста проба з ливниковою системою і реакційною камерою

Вхідним фактором  $x$  в роботі є гранулометричний склад феросиліцій-магнієвого модифікатора ФСМг7 (Fe + 44 % Si + 7 % Mg) розміром до 1,0 мм, 1,0...5,0 мм, 10...20 мм, який додають в реакційну камеру ливникової системи перед складанням ливарної форми. Параметрами його оптимізації (вихідними функціями  $y$ ) є :об'єм отриманої після затвердіння реакційної камери та мікроструктура різних перерізів стінок виливків.

### **6.3. Послідовність виконання роботи**

6.3.1. Виплавити в індукційній печі чавун з  $C_e = 4,2...4,4$  % і перевірити термографічним методом за методикою, описаною в п. 1.2.

6.3.2. Заформувати по моделі ливарні форми для отримання експериментальних виливків (див. рис. 6.3).

6.3.3. Засипати в реакційні камери форм модифікатор ФСМг7, в кількості 2,0% від маси вилівка гранулометричного складу, вказаного у табл. 6.1.

6.3.4. Скласти ливарні форми і залити їх чавуном при температурі 1400...1450 °С. Після охолодження кожній бригаді вибити експериментальні виливки, очистити від формувальної суміші, відокремити ливникову систему від виливків.

6.3.5. Виміряти об'єм отриманих реакційних камер і занести дані в табл. 6.1

6.3.6. Вирізати з кожного експериментального вилівка зразки на мікрошліфи.

6.3.7. Виготовити мікрошліфи та провести мікроаналіз структур у відповідності до ГОСТ 3443-87 (методика проведення мікроаналізу див. ЛР№ 4).

6.3.8. Дослідити структури не травлених і травлених шліфів вихідного чавуну та після модифікування, замалювати або сфотографувати їх. Розмір ескізів або сфотографованих картинок складає 40×40 мм.

6.3.9. На ескізах чи фотографіях структур, які досліджуються, вказати основні структурні складові (графіт, перліт, ферит) (див. п. 4.2.4).

6.3.10. Біля ескізів чи фотографій не травленого чи травленого шліфа вказати параметри, за якими проводили аналіз графітових вкраплень чи металевої матриці (основи) сірого та високоміцного чавунів (див розд. 4.2.4).



**Таблиця 6.1 – Вплив гранулометричного складу сфероїдизувального модифікатора на об'єм реакційної камери**

| Контрольований параметр   | Позначення, розмірність параметра | Бригада 1                         | Бригада 2 | Бригада 3 | Бригада 4 |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Розмір зерен модифікатора | мм                                | Реакційна камера без модифікатора | до 1,0    | 1,0...5,0 | 10...20   |
| Об'єм реакційної камери   | м <sup>3</sup>                    |                                   |           |           |           |

#### **6.4. Зміст звіту**

- назва та мета роботи, визначення, стислий зміст технології сфероїдизувального внутрішньоформового модифікування чавуну;
  - табл. 6.1 з результатами вимірювань об'єму реакційних камер;
  - ескізи мікроструктур зразків виливків із записом результатів їх металографічного аналізу (див. приклад ЛР№ 4 рис. 4.2.5).
  - загальні висновки за результатами роботи (див. додаток 2).
- Література: [1-9].

## ДОДАТКИ

### Додаток 1

#### Приклад оформлення графічної залежності за результатами роботи

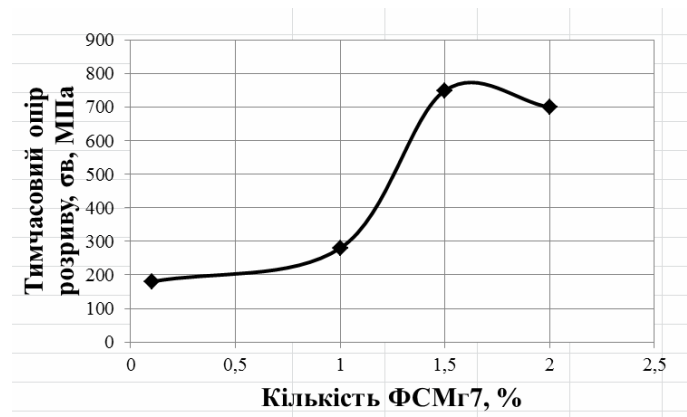


Рисунок 3.1 – Вплив кількості сфероїдизувального модифікатора ФСМг7, який додають у рідкий метал, на тимчасовий опір розриванню

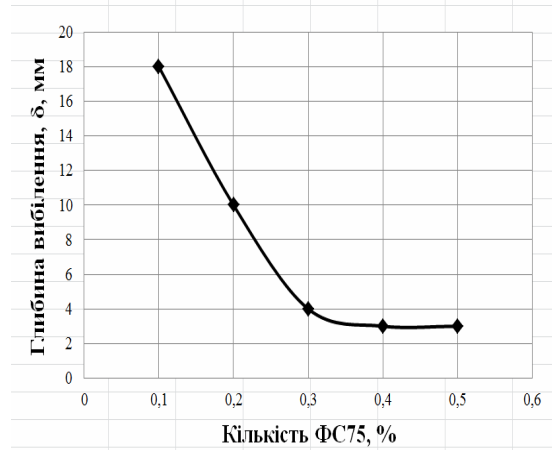


Рисунок 2.2 – Вплив кількості графітизувального модифікатора ФС75, який додають у рідкий метал, на глибину вибілення чавуну

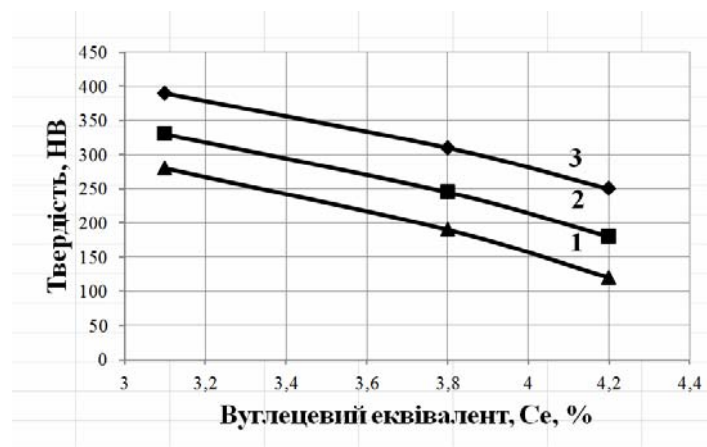


Рисунок 1.3 – Вплив вуглецевого еквівалента на твердість сірого чавуну у перерізах: 1 – 10 мм, 2 – 20 мм, 3 – 30 мм

## Приклад оформлення висновків за результатами роботи

### Висновки:

1. Збільшення кількості сфероїдизувального модифікатора ФСМг7, який додають у рідкий сплав, від 0,5 до 1,5...2,0 % підвищує тимчасовий опір при розриванні чавуну від 150...180 до 700...750 МПа. Це пояснюється зміною форми графіту з пластинчастої і, частково, вермікулярної на правильну кулясту і, як наслідок, зниженню негативного впливу концентраторів напружень на міцність металевої матриці чавуну.

2. ...

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Чугун*: Справ.изд. / Под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. - М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
2. *Гиршович Н.Г.* Кристаллизация и свойства чугуна в отливках.- М.-Л.: Машиностроение, 1966. - 562 с.
3. *Справочник по чугунному литью* / Под ред. Н.Г.Гиршовича. - 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
4. *Ващенко К.И., Шумихин В.С.* Плавка и выпечная обработка чугуна для отливок: Учеб. пособие. – К.: Вища шк., 1992. – 246 с.
5. *ГОСТ 1497-84* Металлы. Методы испытания на растяжение. - Введен 01.01.86.
6. *ГОСТ 9012-59* Металлы. Измерение твердости по Бринеллю. - Введен 01.01.60.
7. *ГОСТ 3443-87* Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. - Введен 01.07.88.
8. *Щебатинов М.П.* Высокопрочный чугун в автомобилестроении / Щебатинов М.П., Абраменко Ю.Е., Бех Н.И. – М.: Машиностроение, 1988. – 216 с.
9. *Захарченко Э.В.* Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В. Захарченко, Ю.Н. Левченко, В.Г. Горенко, П.А. Вареник. – Киев, Наук. Думка, 1986. – 248 с.