

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

Методичні вказівки

до лабораторних робіт з дисциплін
“Ливарні сплави та плавка чавунів” та
“Основи теорії плавки та виробництва чавунних виливків”
для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка»
та 136 «Металургія» всіх форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисциплін “Ливарні сплави та плавка чавунів” та “Основи теорії плавки та виробництва чавунних виливків” для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка» та 136 «Металургія» всіх форм навчання / Укладачі: В.Г. Іванов, Є.М. Парахневич, С. О. Шустов. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2020. – 62 с.

Укладачі: В.Г. Іванов, доцент, д.т.н.,
Є.М. Парахневич, доцент, к.т.н.,
С.О. Шустов, асистент

Рецензент: В.В. Луньов, професор, д.т.н.

Відповідальний
за випуск: В.Г. Іванов, зав.каф.МіТЛВ, д.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри
“Машини і технологія
ливарного виробництва”
Протокол № 1 від 18.08.2020 р.

Затверджено
на засіданні НМК
Інженерно-фізичного факультету
Протокол № 1 від 08.09.2020 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ	6
Лабораторна робота №1. Формування структури чавунів в процесі кристалізації за метастабільною (Fe – Fe₃C) та стабільною (Fe - C) діаграмами	7
1.1 Загальні відомості.....	7
1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	12
1.3 Контрольні запитання для самоперевірки.....	12
1.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання.....	13
1.5 Порядок виконання лабораторної роботи.....	13
1.6 Зміст звіту.....	13
Лабораторна робота №2. Вплив хімічного складу та швидкості охолодження на структуру чавунних виливків ...	14
2.1 Загальні відомості.....	14
2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	18
2.3 Контрольні запитання для самоперевірки.....	19
2.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання.....	19
2.5 Порядок виконання лабораторної роботи.....	20
2.6 Зміст звіту.....	20
Лабораторна робота №3. Оцінка структури чавунів та її вплив на механічні властивості	21
3.1 Загальні відомості.....	21
3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	26
3.3 Контрольні запитання для самоперевірки.....	26
3.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання.....	27
3.5 Порядок виконання лабораторної роботи.....	27
3.6 Зміст звіту.....	27
Лабораторна робота №4. Графітізуючий відпал виливків з білого чавуну	28
4.1 Загальні відомості.....	28
4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	32
4.3 Контрольні запитання для самоперевірки.....	32
4.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання.....	32
4.5 Порядок виконання лабораторної роботи.....	32
4.6 Зміст звіту.....	33

Лабораторна робота №5. Вплив вуглецевого еквіваленту на ливарні властивості сірих чавунів.....	34
5.1 Загальні відомості.....	34
5.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	36
5.3 Контрольні запитання для самоперевірки.....	36
5.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання.....	36
5.5 Порядок виконання лабораторної роботи.....	37
5.6 Зміст звіту.....	37
Лабораторна робота №6. Модифікування сірого чавуну..	38
6.1 Загальні відомості.....	38
6.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	41
6.3 Контрольні запитання для самоперевірки.....	41
6.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання.....	41
6.5 Порядок виконання лабораторної роботи.....	42
6.6 Зміст звіту.....	43
Лабораторна робота №7. Плавка синтетичного чавуну в індукційній печі	43
7.1 Загальні відомості.....	44
7.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	47
7.3 Контрольні запитання для самоперевірки.....	48
7.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання.....	48
7.5 Порядок виконання лабораторної роботи.....	48
7.6 Зміст звіту.....	49
Лабораторна робота №8. Отримання високоміцного чавуну з кулястим графітом.....	50
8.1 Загальні відомості.....	50
8.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	53
8.3 Контрольні запитання для самоперевірки.....	53
8.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання.....	53
8.5 Порядок виконання лабораторної роботи.....	54
8.6 Зміст звіту.....	55
Рекомендована література.....	56
Додаток А.....	57
Додаток Б.....	58
Додаток В.....	59

ВСТУП

Даний збірник лабораторних робіт створений з метою закріплення студентами теоретичного матеріалу, що викладається з дисциплін “Ливарні сплави та їх плавка чавунів” та “Основи теорії плавки та чавунних виробництва виливків”.

Під час виконання лабораторних робіт студенти набувають навичок з розробки технології плавки чавунів, дослідження їх структури та властивостей.

Збірник створений на основі літературних даних та багаторічних досліджень та досвіду колишніх (Г.Ю Шульте, Юзвак В.М., Бондаренко І.М. та ін.) та діючих викладачів і співробітників кафедри «Машини і технологія ливарного виробництва» з чавунного литва для багатьох галузей машинобудування та металургії.

Перед початком виконання лабораторних робіт проводиться ввідна бесіда про задачі роботи та її організації, а також інструктаж з техніки безпеки.

Студенти приступають до виконання тільки після ознайомлення з обладнанням та інструментом, що будуть задіяні у лабораторній роботі, а також після засвоєння теоретичного матеріалу з методичних вказівок та літературних джерел.

Лабораторні роботи оформлюються у зошитах у вигляді звіту.

ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

1 Перед виконанням лабораторної роботи уважно ознайомтесь із завданням, з правилами безпеки робіт, обладнанням, матеріалами та інструментом.

2 Не вмикайте і не вимикайте без дозволу викладача або учбового майстра вмикачі, рубильники або інші прилади.

3 При роботі в лабораторії виконуйте тільки ту роботу, яка Вам доручена. Категорично забороняється виконувати роботу за власною ініціативою без дозволу викладача.

4 Не заходьте до лабораторії, в якій не працює ваша група.

5 Під час виконання завдань не ходіть без потреби по лабораторії, так як цим Ви заважаєте працюючим, що може привести до нещасного випадку.

6 При плавці обов'язково виконувати усі необхідні правила техніки безпеки, що діють у ливарному залі. Плавку чавунів виконують робітники, що мають відповідну спеціальність та допуск до робіт з рідким металом.

7 Плавильник повинен мати спеціальний одяг, взуття та засоби індивідуального захисту від рідкого металу: костюм з вовняного сукна або зі спеціальних сучасних волокон, що мають підвищений захист від високих температур та рідкого металу; валянки; повстяні рукавиці та шапку (шлем); окуляри або маску.

8 У роботі слід використовувати пофарбований вапняною фарбою та просушений інструмент. Підлога печі повинна бути сухою і не заваленою сторонніми речами.

9 Обробку розплав у електropечі треба проводити при відключеній напрузі.

10 Нагляд за процесами плавки та розливу слід проводити з безпечної відстані.

11 Не торкатися виливків, кусків шихти та інших речей, попередньо не пересвідчившись у тому, що вони холодні.

12 Не знаходитись поблизу вантажів, які переміщуються.

13 негайно попередьте викладача або учбового майстра про виявлені недоліки і порушення правил безпеки.

14 По закінченню роботи приведіть у порядок власне робоче місце. Потім заявіть викладачеві про закінчення роботи і тільки після його дозволу можете залишити лабораторію.

Лабораторна робота №1

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ЧАВУНІВ В ПРОЦЕСІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЗА МЕТАСТАБІЛЬНОЮ (Fe – Fe₃C) ТА СТАБІЛЬНОЮ (Fe - C) ДІАГРАМАМИ

Мета роботи – вивчити макро- та мікроструктури чавунів при їх кристалізації за метастабільною та стабільною діаграмами.

1.1 Загальні відомості

Чавунами прийняти називати залізовуглецеві сплави, що містять більш 2,14 % вуглецю та мають у своєму складі евтектику. Завдяки останній чавуни мають високі ливарні властивості та є найпоширенішими сплавами.

Вивчають структуру чавунів за діаграмою стану залізо – вуглець (згадайте дисципліну «Матеріалознавство»).

Вуглець у сплавах із залізом може існувати у різних станах: у складі хімічної сполуки – **цементиту** (Fe₃C), або у вільному стані – у вигляді **графіту**. Тому існує дві діаграми, що описують умови рівноваги фаз у системах залізо – цементит та залізо – вуглець. Перша діаграма (Fe — Fe₃C) називається цементитною (метастабільна), інша (Fe - C) - графітною (стабільна). Ці діаграми викреслюють разом. Такий варіант двох систем носить назву подвійної діаграми залізо – вуглець (рис. 1.1).

При метастабільному ході перетворень за лініями CD та ES виділяється карбід заліза – Fe₃C, а за лініями ECF та PSK утворюється евтектика та евтектоїд (перліт), в яких складовою є – Fe₃C (цементит).

При стабільному ході перетворень за лініями C'D' та E'S' виділяється графіт, а евтектика, що утворюється за лінією E'C'F' і також має графіт в якості складової.

Характер кристалізації чавуну за стабільною чи метастабільною системою залежить від багатьох факторів, головним з яких є швидкість охолодження.

При високій швидкості охолодження утворюється **білий чавун** (метастабільна система), при повільній – **сірий** (стабільна система).

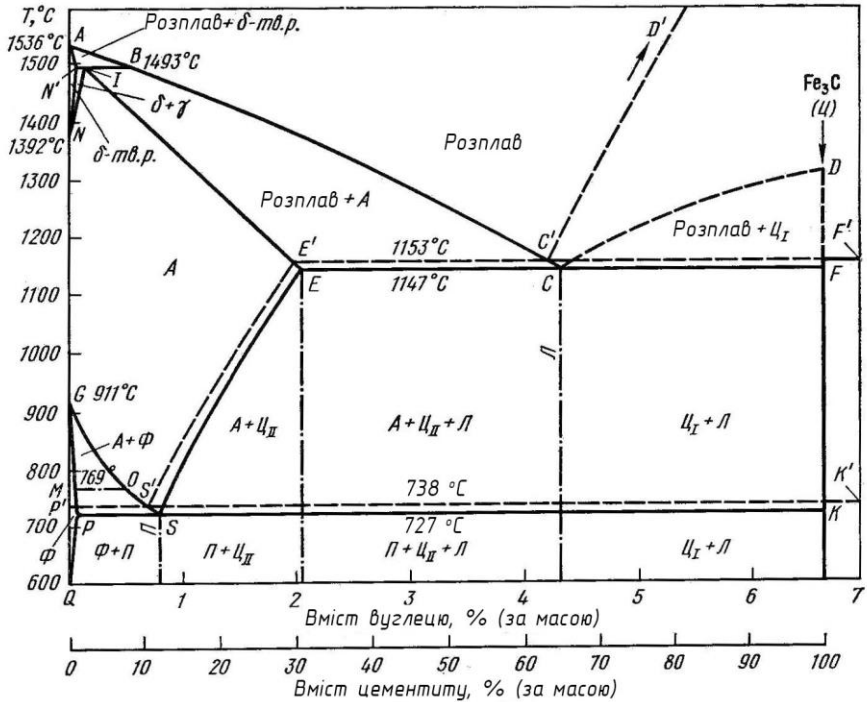


Рисунок 1.1 – Подвійна діаграма стану залізо – вуглець: стабільна Fe – C (пунктирні лінії) та метастабільна Fe – Fe₃C (суцільні лінії) системи

Графіт зафарбовує злам чавуну в темно-сірий колір тому такий чавун називають сірим. Вуглець, зв'язаний у карбіди заліза, не затемнює колір зламу, а навпаки надає йому яскраво-білий колір. Тому такий чавун називають білим. У проміжних умовах охолодження у злам чавуну можуть існувати ділянки як сірого, так і білого кольору. Такий чавун називається **“половинчастим”** (рис.1.2). Таким чином вуглець у чавуні може знаходитися у вигляді цементиту чи графіту, або одночасно в обох формах.

Вміст вуглецю у чавунах коливається за подвійною діаграмою залізо – вуглець у межах від 2,14 до 6,67 %. У евтектиці міститься 4,3%С. Тому чавуни можуть бути, в залежності від вмісту вуглецю

(або вуглецевого еквіваленту), *доевтектичними* (більше 2,14 до 4,3%С), *евтектичними* (4,3 %С) або *заявтектичними* (більше 4,3 до 6,67 %С).

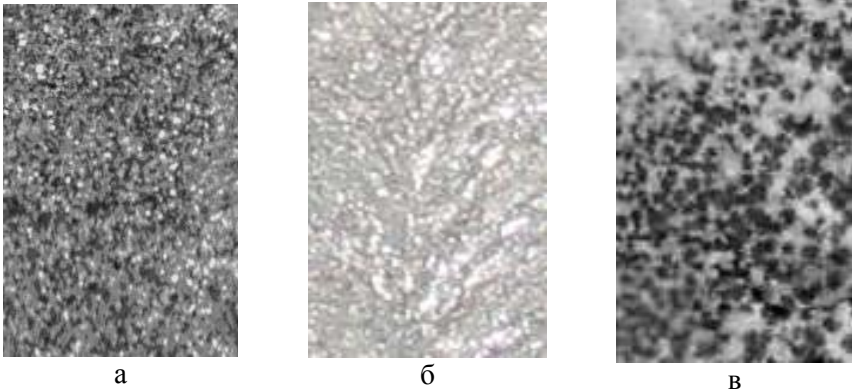


Рисунок 1.2 – Макроструктура зламів чавуну, ($\times 10$):
а – сірий чавун; б – білий чавун; в – половинчастий чавун

При кристалізації за метастабільною діаграмою доевтектичного чавуну у рідині першим виділяється аустеніт. Потім, при досягненні евтектичного перетворення, уся рідина перетворюється на евтектику - ледебурит (в інтервалі температур 1147 – 727 °С складається з аустеніту та цементиту). Зі зниженням температури відбувається зменшення розчинності вуглецю у аустеніті (за лінією ES), що супроводжується виділенням цементиту вторинного. При евтектоїдному перетворенні аустеніт перетворюється на перліт. Кінцева структура доевтектичного чавуна містить три складові — *перліт, ледебурит, вторинний цементит* (рис. 1.3 а).

Перліт це евтектоїдна суміш фериту з цементитом., що утворюється за лінією PSK.

Ферит це твердий розчин втілення вуглецю у α -залізі. Розчинність вуглецю у фериті складає 0,02 %. Ферит має невисоку твердість: 100...150 НВ.

Цементит, наводилось вище, уявляє собою хімічне з'єднання – карбід заліза, і містить 6,67 % вуглецю. У чавунах може бути присутні різні фази: цементит первинний, цементит вторинний, цементит третинний. Хімічні та фізичні властивості цих фаз однакові. Цементит є дуже твердою (НВ 800), але крихкою фазою.

Перліт спостерігається під мікроскопом у вигляді темних зерен, частина цементиту вторинного – світлих оболонок навкруги перлітних зерен, а інша частина зливається з цементитом ледебуриту і під мікроскопом як окрема складова не спостерігається; ледебурит має вигляд ділянок з невеликими темними зернами округлої або витягнутої форми перліту, рівномірно розташованих у білій цементитній основі.

Евтектичний чавун складається з **ледебуриту** — механічної суміші перліту з цементитом (рис. 1.3, б).

Заевтектичний чавун має дві структурні складові – первинний цементит і ледебурит (рис. 1.3, в). Ведучою фазою при кристалізації тут виступає цементит.

Білі чавуни надто крихкі та тверді, погано обробляються різальним інструментом і використовуються дуже рідко (зірочки для очистки литва від пригару, кулі млинів), зазвичай вони йдуть на виготовлення ковкого чавуну (до евтектичного складу).

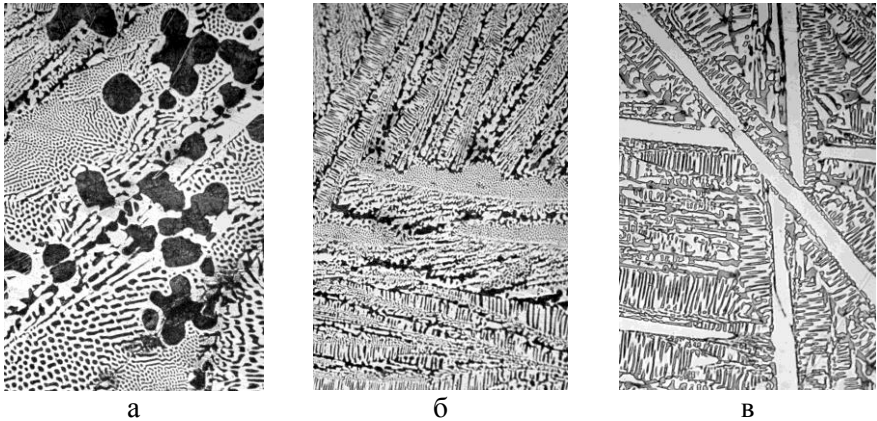


Рисунок 1.3 – Мікроструктури білих чавунів, ($\times 100$):
а – доевтектичного; б – евтектичного; в – заевтектичного

У випадку кристалізації чавунів за стабільною діаграмою фазові перетворення при наявності графіту відбуваються при більш вищих температурах, ніж аналогічні перетворення при наявності цементиту. Критичні точки C' , E' , S' відповідають меншому вмісту вуглецю, ніж аналогічні точки C , E , S метастабільної діаграми. Замість фази – цементиту, у всіх областях діаграми утворюється фаза – графіт.

Кристалізації доєвтектичного чавуну за стабільною діаграмою починається з виділення аустеніту. Під час проходження евтектичного перетворення (лінія $E'C'F'$) рідина перетворюється на аустеніто - графітну евтектику. Зі зниженням температури зменшується розчинність вуглецю в аустеніті за лінією $E'S'$ і він виділяється у вигляді графіту. Після проходження евтектоїдного перетворення (лінія $P'S'K'$) аустеніт перетворюється на перліт, що може розпадатися повністю або частково на ферит та графіт.

Заєвтектичні чавуну кристалізуються аналогічно, але первинною фазою тут виступає графіт.

Евтектичні чавуни кристалізуються без інтервалу з утворенням спочатку аустеніто-графітної, а потім ферито-графітної евтектики.

Структура доєвтектичного, евтектичного та заєвтектичного чавунів при кристалізації за стабільною діаграмою на полірованих шліфах під мікроскопом спостерігається майже однаковою – на білій основі розташовані пластини графітових включень різного розміру (рис.1.4). Як правило найменший рівномірно розташований графіт спостерігається у евтектичного чавуну. Дуже часто міждендритний графіт спостерігається у доєвтектичного чавуну, найбільший – у заєвтектичного, бо тут графіт є первинною фазою, на якому потім виділяється евтектичний графіт.

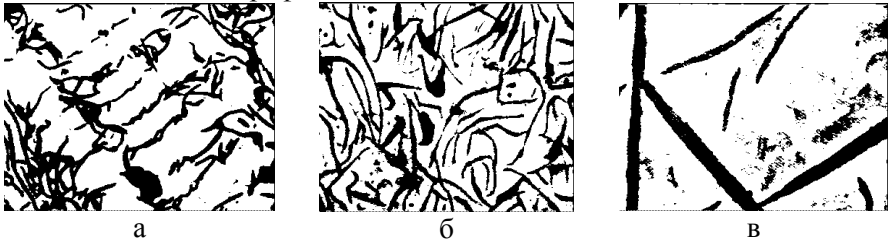


Рисунок 1.4 – Мікроструктури сірих чавунів ($\times 100$, не травлено): а – доєвтектичного; б – евтектичного; в – заєвтектичного

Після обробки шліфів спеціальними розчинами (наприклад, 4-% розчином азотної кислоти у спирту) можна побачити структуру металевої основи чавунів, але на відміну від білих чавунів, де евтектика – ледебурит добре розрізняється, у сірих чавунів *ферито-графітна евтектика* при невеликих збільшеннях не спостерігається (рис.1.5).

Графіт, що присутній у чавунах, надає можливість їх легко піддавати механічній обробці, а також надає високі антифрикційні, демпферні, теплові та інші властивості литим виробам. Завдяки цьому графітізовані чавуни є придатними для виготовлення різноманітних деталей різного технологічного призначення для усіх галузей господарства.



Рисунок 1.5 – Мікроструктури металевої основи сірих чавунів ($\times 100$, травлено 4-х % розчином азотної кислоти):
а – феритна; б – ферито-перлітна; в – перлітна (5 % фериту)

1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Перед виконанням лабораторної роботи треба уважно ознайомитися з теоретичним матеріалом, що стосується структури чавунів.

Необхідно згадати визначення фаз, що можуть існувати у залізвуглецевих сплавах (аустеніт, цементит, ферит, перліт, ледебурит, графіт тощо). Вивчити, які можуть бути чавуни в залежності від вмісту вуглецю та характеру кристалізації. Ознайомитися з фотографіями мікроструктур доєвтектичних, евтектичних та заєвтектичних сірих та білих чавунів.

1.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1. Які сплави називаються чавунами?
2. Які чавуни називають білими, які сірими?
3. За якою діаграмою стану кристалізуються чавуни?
4. Яка діаграма називається метастабільною? Які чавуни кристалізуються за цією діаграмою?

5. Яка діаграма називається стабільною? Які чавуни кристалізуються за цією діаграмою?
6. Який чавун називають половинчастим? За якою діаграмою він кристалізується?
7. Які бувають чавуни по відношенню до евтектики?
8. З яких фаз складається евтектика у білих та сірих чавунах?
9. Яка кількість вуглецю міститься у евтектиці?
10. Які умови кристалізації білих та сірих чавунів?

1.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

1. Металографічний мікроскоп МИМ-7.
2. Набір зразків чавунів з різною макроструктурою зламів.
3. Набір мікрошліфів чавунів з різним вмістом вуглецю, що отриманні при різних умовах охолодження.

1.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з метою роботи, вивчити теоретичні основи кристалізації чавунів за стабільною та метастабільною діаграмою.
2. Провести аналіз зразків чавунів з різним вмістом вуглецю (2,5; 4,3; 5,0 %), що кристалізувалися за метастабільною та стабільною діаграмою, при збільшенні у 100 та 400 разів.
3. Схематично замалювати та описати структуру зразків чавунів та позначити їх на подвійній діаграмі.

1.6 Зміст звіту

1. Викласти мету роботи.
2. Замалювати подвійну діаграму залізо-вуглець та коротко описати кристалізацію чавунів за стабільною та метастабільною діаграмою
3. Нанести на подвійну діаграму вертикальні лінії, що відповідають вмісту вуглецю: 2,5; 4,3; 5,0 %.
4. Навести замальовані структури чавунів – доевтектичних, евтектичних та заевтектичних, що кристалізувалися за стабільною та метастабільною системою.
5. Зробити висновки за результатами роботи.

Лабораторна робота №2

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ НА СТРУКТУРУ ЧАВУННИХ ВИЛИВКІВ

Мета роботи – вивчити вплив хімічного складу та швидкості охолодження на структуру чавунних виливків; навчитися користуватися структурними діаграмами чавуну для визначення структури чавунних виливків в залежності від їх товщини стінки та хімічного складу.

2.1 Загальні відомості

Сучасний рівень технології отримання чавунів не дозволяє отримувати чисті двокомпонентні сплави залізо – вуглець.

На практиці чавун є багатокомпонентним сплавом, у якому крім заліза та вуглецю присутні постійні домішки (кремній, марганець, сірка, фосфор тощо), які потрапляють в процесі первинної плавки, наступного переплаву та позапічної обробки чавуну.

Крім хімічного складу, як було показано у попередній роботі, на структуру чавунів дуже сильно впливає швидкість охолодження, яка буде залежати від товщини стінки вилівка та умов кристалізації у ливарній формі.

Важливим процесом, що визначає структуру чавунів, а відповідно і його властивості – є *графітизація*, тобто процес утворення графіту. Найбільший вплив на графітизацію, крім вуглецю, має кремній. Він збільшує активність вуглецю, зменшує його розчинність у рідкому та твердому стані, також зменшує стійкість Fe_3C .

Усі елементи, що можуть бути у чавунах, відповідно розділяють на такі, що сприяють графітизації, і такі – що не сприяють графітизації [1, 2]:

+ Si, Al, C, Ti, Ni, Cu, P, Zr, [Nb], W, Mn, Cr, V, S, Mg, Ce, Te, B –

Елементи, що розташовані в цьому ряду зліва від Nb, є такими, що сприяють графітизації, ті, що правіше – діють у протилежному напрямку.

Перші елементи сприяють кристалізації чавуну за стабільною діаграмою залізо – вуглець, другі – за метастабільною.

Формування структури у реальних виливках відбувається у нерівноважних умовах і залежить від багатьох факторів, що не врахову-

ється діаграмами стану. Для того, щоб мати можливість забезпечувати у виливках задану мікроструктуру і, відповідно, певні службові властивості в залежності від товщини стінки користуються спеціальними **структурними діаграмами**. Вони описують вплив хімічного складу та швидкості охолодження на структуру чавунів [4].

Так структура чавунних виливків протягом довгого часу визначалася за **діаграмою Маурера** в залежності від вмісту вуглецю та кремнію в сплаві (рис.2.1). Діаграма має п'ять структурних зон. З цієї діаграми виходить, що для отримання певної структури при збільшенні вмісту кремнію треба зменшувати кількість вуглецю, і навпаки, зі збільшенням вмісту вуглецю потрібно зменшувати вміст кремнію.

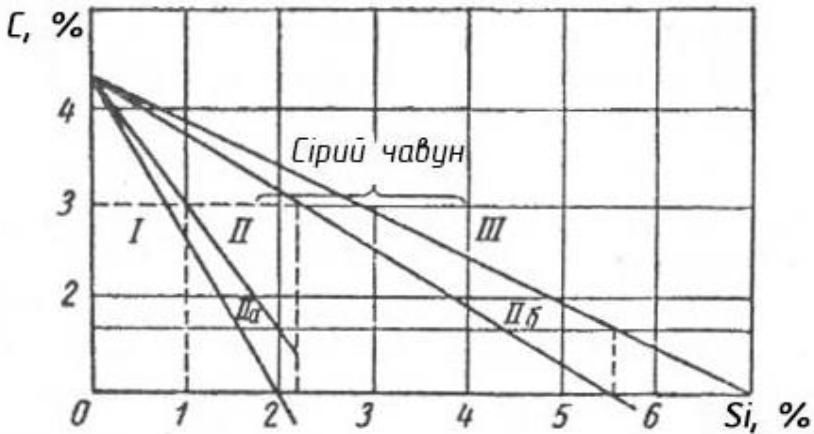


Рисунок 2.1 – Структурна діаграма Маурера:

I – зона білого чавуну (П+Ц);

IIa – зона половинчастого чавуну (П+Ц+Г);

II – зона перлітного сірого чавуну (П+Г);

IIб – зона ферито-перлітного чавуну сірого чавуну (П+Ф+Г);

III – зона феритного чавуну (Ф+Г)

Мікроструктура чавуна відповідних структурних зон наведена на рис.2.2.

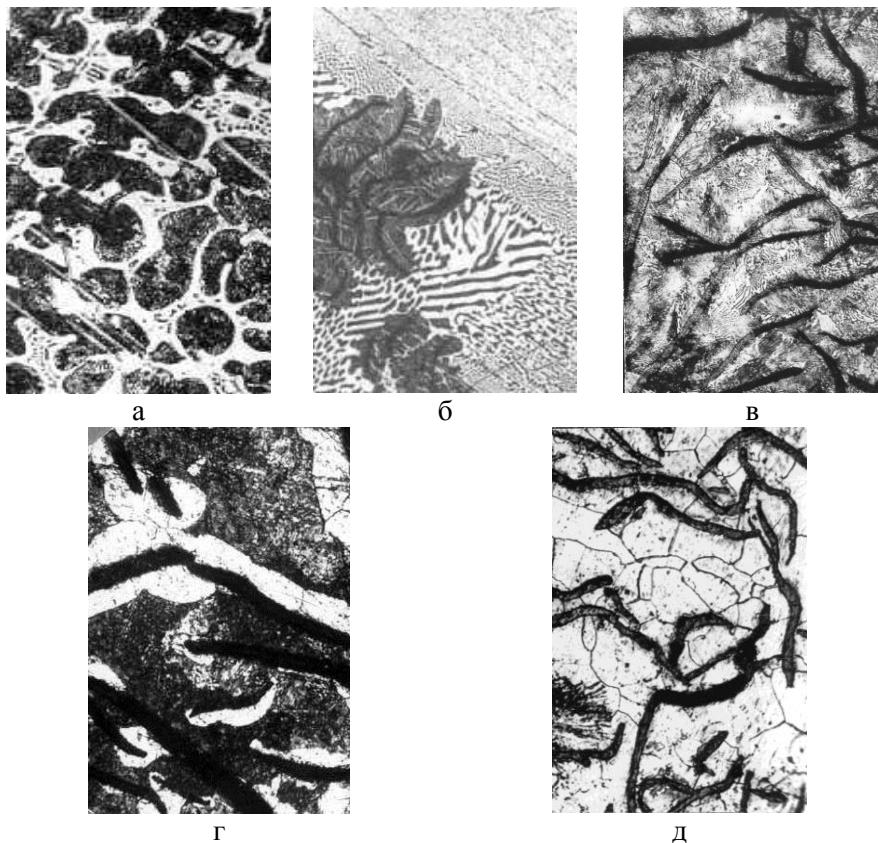


Рисунок 2.3 – Мікроструктура чавунів відповідних зон діаграми Маурера, ($\times 100$):

а – білого чавуну (П+Ц);

б – половинчастого чавуну (П+Ц+Г);

в – перлітного сірого чавуну (П+Г);

г – ферито-перлітного чавуну сірого чавуну (П+Ф+Г);

д – феритного чавуну (Ф+Г)

При будуванні цієї діаграми малось на увазі, що виливки кристалізуються при якійсь середній швидкості охолодження, що відповідає виливкам з приведеним розміром $R=12,5$ мм, де R може відповідати

половині товщини плаского або чверті діаметру циліндричного виливка або одній шостій діаметру шару.

Загальне рівняння прямих, що створюють межі структурних зон

$$C+nSi=\text{const}=4,3\%, \quad (2.1)$$

де n – коефіцієнт, що характеризує співвідношення здатностей до графітизації, що надають вуглець та кремній.

Практика використання діаграми Маурера показала, що вона задовільно узгоджується з експериментальними та виробничими даними лише при значеннях вуглецю та кремнію, характерних для звичайних марок сірого чавуну (2,9...3,4 % C та 1,8...3,2 % Si) і майже не враховує швидкості охолодження чавунних виливків.

З метою врахування швидкості охолодження виливків застосовується *структурна діаграма Грейнера і Клінгенштейна* (рис.2.3), на одній з вісей якої відкладена товщина стінки виливка, а на іншій - сума вмісту вуглецю та кремнію. Діаграма має також п'ять структурних зон, аналогічно зонам діаграми Маурера.

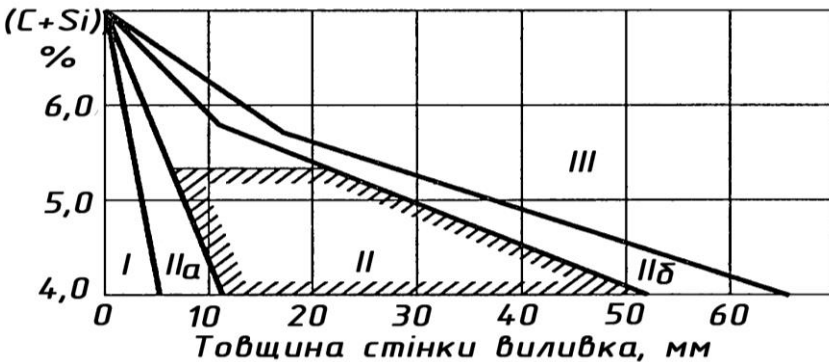


Рисунок 2.3 – Діаграма Грейнера і Клінгенштейна [3]

Область перлітних чавунів обмежена зверху горизонтальною лінією, що відповідає сумарному вмісту вуглецю та кремнію – 5,3 %. Нижче цієї межі властивості поліпшуються найбільше у зв'язку зі зменшенням сумарного вмісту вуглецю та кремнію за рахунок зменшення кількості графіту.

З діаграми видно, що перлітний чавун має властивість давати однорідну структуру (П+Г) при коливаннях товщини стінки у широких межах. Ця властивість чавуну отримала назву – квазіізотропії, вона притаманна у більшому ступені чавунам з низьким сумарним вмістом вуглецю та кремнію [3].

Існують [2] також діаграми для більших розмірів стінки, металевої форми, а також діаграми, що пов'язують хімічний склад чавунів та їх властивості (міцність, твердість тощо). Деякі діаграми наведені у додатку А.

Структурні діаграми дають змогу з високою вірогідністю прогнозувати отримання потрібної мікроструктури чавуну за його хімічним складом та в залежності від товщини стінки, або навпаки, задаючись необхідною структурою, визначати необхідний хімічний склад і оптимальну товщину стінку виливків, в яких буде забезпечена така структура. В цьому полягає практична цінність структурних діаграм.

Для виливків з різною товщиною стінок хімічний склад чавуну повинен бути також різним. У зв'язку з цим у ливарних цехах виливки розподіляють за масою (чим більше маса, тим товще стінка), і для кожної групи отримують чавун різного хімічного складу. Як відомо, усі конструкційні чавуни маркуються за механічними властивостями, і згідно технічних вимог хімічний склад нестрогий, факультативний, та коливається у досить значних межах.

На практиці для контролю впливу хімічного складу чавуну на умови його структуроутворення користуються спеціальними технологічними пробами. Наприклад, для цього можна використовувати ступінчасту пробу (рис. 2.4). Зі ступенів різної товщини вирізають зразки для металографічного аналізу, а на пласких ступенях також зручно заміряти твердість.

2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Перед виконанням лабораторної роботи треба уважно ознайомитися з теоретичним матеріалом, що стосується впливу хімічного складу та швидкості охолодження на структуру чавунів за літературою [1 – 5]. Звернути увагу на структурні діаграми, їх види та області застосування.

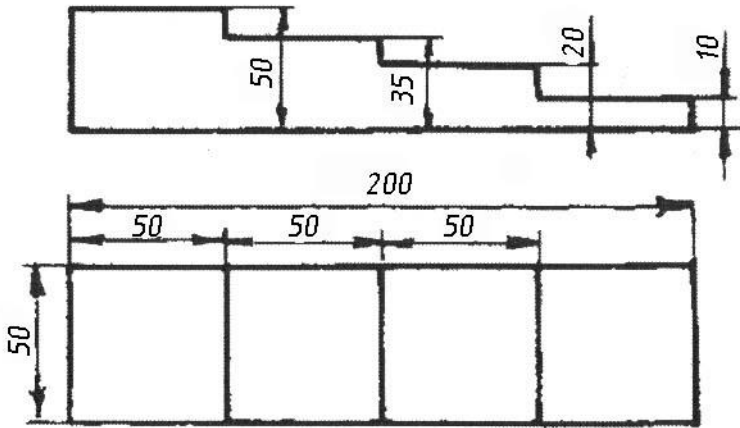


Рисунок 2.4 – Технологічна ступінчаста проба чавуну

2.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1. Як впливають домішки на структуру чавунів?
2. Як класифікують елементи по відношенню до графітизації?
3. Які елементи сприяють графітизації?
4. Які елементи підвищують стійкість цементиту?
5. Який механізм впливу кремнію на графітизацію чавунів?
6. Як впливає швидкість охолодження на структуру чавунів?
7. Які структури утворюються у чавунах в залежності від хімічного складу та швидкості охолодження?
8. Що описують структурні діаграми? Які структурні діаграми Вам відомі?
9. Яка практична цінність структурних діаграм?
10. За якими технологічними пробами можна визначити структуру чавунів

2.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

1. Індукційна піч ICT-0,01.
2. Шихтові матеріали: чушковий чавун, сталевий брухт, феросиліцій, феромарганець.
3. Термопара занурення.

4. Ливарна форма для ступінчастої проби.
5. Відрізний верстат.
6. Полірувальний верстат. Набір абразивів для полірування.
7. 4 % розчин азотної кислоти у спирті.
8. Металографічний мікроскоп МИМ-7.

2.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Залити чавуном заданого складу ступінчасту пробу (рис.2.4).
2. Після охолодження проби відрізати зразки з кожної частини.
3. Виготовити шліфи та провести їх обробку 4 % розчином азотної кислоти у спирті. (За браком часу можна скористатися наперед заготовленими зразками).
4. Дослідити мікроструктуру чавунів, що отримані за різною швидкістю охолодження. Описати структури чавунів.
5. Виконати індивідуальне завдання, що закріплює вміння користуватися структурними діаграмами: за заданими варіантами вмісту вуглецю та кремнію, а також товщини стінки вилівка визначити мікроструктуру чавунів.
6. Вказати місцезнаходження чавунів на структурних діаграмах, дати оцінку ливарних властивостей, визначити приблизну марку чавунів (додаток Б). Одержані дані звести у таблицю 2.1.
7. Зробити висновки за результатами роботи.

Таблиця 2.1 – Результати аналізу дослідних чавунів

Товщина стінки, мм	Хімічний склад, мас. частка, %			Мікро-структура	Приблизна марка чавуну
	C	Si	C+Si		

2.6 Зміст звіту

1. Викласти мету роботи.
2. Замалювати структурні діаграми
3. Навести замальовані структури чавунів, що отримані за різною швидкістю охолодження.
4. Описати наведені структури чавунів.
5. Зробити висновки за результатами роботи.

Лабораторна робота №3

ОЦІНКА СТРУКТУРИ ЧАВУНІВ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Мета роботи – навчитися робити оцінку мікроструктур чавуну згідно ГОСТ 3443 – 87; навчитися прогнозувати механічні властивості чавунів на основі металографічних досліджень та визначення хімічного складу чавунів

3.1 Загальні відомості

У виробництві чавунних виливків обов'язковим є контроль придатного литва. Контроль обов'язково здійснюється за механічними властивостями та за хімічним складом, який як було показано у попередній роботі, обумовлює структуру чавунів.

Для оцінки структури чавунів використовують металографічний аналіз, що проводять за допомогою металографічних оптичних мікроскопів на відполірованих шліфах, виготовлених з технологічної проби, або з частини виливка.

Як правило, металографічний аналіз полягає у порівняльній візуальній оцінці реальних мікроструктур з еталонними зображеннями.

В останній час для усунення суб'єктивності оцінок починають використовувати різні комп'ютеризовані комплекси, але широко розповсюдження вони поки не набули.

У вітчизняному ливарному виробництві металографічний аналіз мікроструктури чавунів проводять відповідно до вимог ГОСТ 3443-87 "Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры".

Оцінка структури чавуну виконується візуально співвідставленням структури, що спостерігається у мікроскопі, зі структурою еталону відповідної шкали. Ці шкали наведені в обов'язковому додатку № 3 до ГОСТу 3443-87. Умовний індекс (іноді з текстовим додатком) під фотографією з найбільш близькою подібністю структури до структури в полі зору шліфа і є її металографічною характеристикою.

Оцінку структури чавунів проводять за графітом та металевою основою. Оцінка за графітом відбувається на шліфах, що не оброблені реактивами. Для виявлення структури металевої основи шліфи підда-

ють обробці 4 % розчином азотної кислоти у спирті або іншими реактивами згідно ГОСТ.

Оцінка за графітом здійснюється за такими показниками:

- за формою включень графіту (форму включень пластинчастого графіту в сірому чавуні визначають за шкалою 1А, вермикулярного графіту – 2А, кулястого графіту у високоміцному чавуні – 3А, компактного (пластівчастого) графіту відпалу у ковкому чавуні – 4А);

- за розмірами включень графіту, мкм (довжину пластинчастих графітових включень оцінюють за шкалою 1Б, діаметр кулястих включень – 3Б, компактних – 4Б).

- за розподілом включень графіту (розподіл пластинчастого графіту характеризують за шкалою 1В, вермикулярного – 2Б, кулястого – 3В);

- за кількістю включень графіту, % (для пластинчастого графіту за шкалою 1Г, кулястого – 3Г; кількість кулястого графіту в структурі чавуну з вермикулярним графітом – за шкалою 2В).

Оцінка за металевою основою здійснюється за такими показниками:

- за типом металевої основи (ферит, пластинчастий перліт, зернистий перліт, троостит, бейніт, мартенсит за шкалою 5);

- за кількістю перліту або фериту, % (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);

- за дисперсністю перліту (шкала 8);

- за фосфідною евтектикою (будова включень фосфідної евтектики – шкала 9А, розподіл включень фосфідної евтектики – шкала 9Б, діаметр вічок сітки фосфідної евтектики – шкала 9В, площа включень фосфідної евтектики – шкала 9Г);

- за кількістю цементиту або цементиту ледебуриту (кількість цементиту або цементиту ледебуриту – шкала 10А, площа включень цементиту або цементиту ледебуриту за шкалою 10Б)

Як видно з вище наведеного, оцінка структури чавуну дещо складна і ретельна. Це пояснюється тим, що фізико-механічні властивості чавуну можна з досить високою вірогідністю спрогнозувати навіть тільки за результатами металографічного аналізу.

Так, практика показує, що для сірих чавунів визначним фактором впливу є графітова фаза. Тобто форма, розміри і розподіл включень графіту, а не металева основа. В принципі механічні властивості металевої основи чавуну такі ж, як і у сталі з аналогічною структурою, але графітові включення послаблюють металеву матрицю, зменшуючи її робочий переріз та можуть діяти навіть у ролі надрізів (у випадку пластинчатих графітових включень), значно зменшуючи механічні властивості. Негативний вплив графіту тим нижче, чим менше його кількість та розміри окремих включень а їх форма наближається до кулястої [5]. Але завдяки наявності графітових включень чавун набуває і багато позитивних властивостей: високу теплопровідність, термостійкість, демпферну здатність, меншу чуттєвість до надрізів та багато інших.

Не слід забувати, що оцінка структури здійснюється за випадковими перерізами зразків чавуну, а реальна форма графітових включень значно складніша, ніж її перерізи. Так методами стереоскопічної металографії виявлена реальна форма включень графіту у сірому чавуні, що виглядає у перерізі як пластинчаста (рис.3.1).

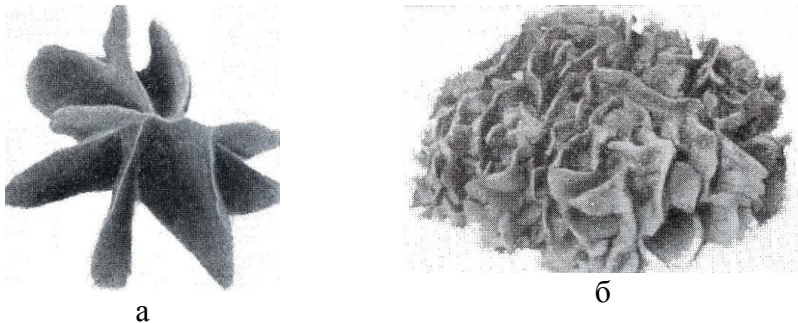


Рисунок 3.1 – Реальна форма включення графіту у сірому чавуні, ($\times 2000$) [2]:

- а – у чавуні, що охолоджувався повільно;
- б – у чавуні, що охолоджувався швидко.

З іншого боку, чим більше у структурі перліту і менше фериту, тим міцніше металева основа. Кількість перліту та фериту при даному загальному вмісті вуглецю є також функцією кількості графіту.

За даними роботи [6] межа міцності на розтяг металевої основи сірого чавуну можна орієнтовно виразити емпіричною формулою

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\pi} \Pi + \sigma_{\phi} \Phi}{100} \quad (3.1)$$

де σ_{π} – тимчасовий опір під час розтягання перліту;

σ_{ϕ} – тимчасовий опір під час розтягання фериту;

Π – кількість перліту, %;

Φ – кількість фериту, %.

Послаблення металевої матриці графітом визначається виразом

$$\eta = C_{\text{гр}} + 1,0 \quad (3.2)$$

де $C_{\text{гр}}$ – кількість графіту, %.

Тоді теоретичний тимчасовий опір під час розтягання сірого чавуну з врахуванням впливу графіту буде таким

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{\sigma_{\pi} \Pi + \sigma_{\phi} \Phi}{(C_{\text{гр}} + 1,0) 100} \quad (3.3)$$

Кількість графіту визначається різницею між загальною кількістю вуглецю у чавуні і кількістю вуглецю у зв'язаному стані (у перліті)

$$C_{\text{гр}} = C_{\text{заг}} - C_{\text{зв}} \quad (3.4)$$

Відповідно діаграмі залізо – вуглець кількість вуглецю у перліті складає 0,8 %, тоді

$$C_{\text{зв}} = \frac{\Pi \cdot 0,8}{100} \quad (3.5)$$

Теоретичний тимчасовий опір під час розтягання перліту та фериту складає відповідно 100 кгс/мм² та 40 кгс/мм² [6].

Після виконання усіх перетворень формула (3.3) набуває наступного вигляду

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{75C_{\text{зв}} + 40}{C_{\text{гр}} + 1,0} \quad (3.6)$$

Кількість зв'язаного графіту ($C_{\text{зв}}$) можна змінювати на практиці шляхом зміни кількості елементів, які сприяють графітизації та елементів, що сприяють утворенню карбідів. У окремому випадку це полегшує завдання правильного вибору необхідної кількості кремнію у чавунах.

Той самий підхід дає можливість встановити залежність між міцністю та твердістю (НВ) сірого чавуну, адже твердість також визначається кількістю зв'язаного вуглецю. Цю залежність можна виразити наступною формулою [6]

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{0,4 \text{ НВ}}{C_{\text{гр}} + 1,0} \quad (3.7)$$

В літературі також зустрічаються аналогічні емпіричні формули для розрахунку фізико-механічних властивостей чавунів з іншою формою графіту (кулястим, пластивчастим та ін.).

Так, Юзваком В.М. [7], запропоновано для комплексного вивчення впливу графіту на властивості чавуну використовувати інтегральну безрозмірну характеристику, що враховує кількість, форму та розміри графітових включень – індекс графіту I_{Γ} . Цей показник визначається методом випадкових перерізів на шліфах чавунів та уявляє собою відношення суми максимальних розмірів включень графіту $l_{i \text{ max}}$, що потрапили у переріз, до загальної довжини підрахунку L

$$I_{\Gamma} = \frac{\sum l_{i \text{ max}}}{L} \quad (3.8)$$

де L повинна бути більше 120 мм, 90 мм та 45 мм для чавуну з пластинчастим, вермікулярним та кулястим графіту відповідно.

Між індексом графіту та механічними властивостями чавунів існують надійні залежності

$$\sigma_{\text{н}}=907,5 - 459,6 \cdot I_{\Gamma}, \text{ МПа} \quad (3.9)$$

$$\sigma_{\text{в}}=525,3 - 289,1 \cdot I_{\Gamma}, \text{ МПа} \quad (3.10)$$

$$f=2,92 \cdot I_{\Gamma}^{-0,5}, \text{ мм} \quad (3.11)$$

$$\delta=0,6 \cdot I_{\Gamma}^{-1,2}, \% \quad (3.12)$$

де $\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{\text{н}}$, f та δ - відповідно тимчасовий опір під час згинання, тимчасовий опір під час розтягання, стріла прогину та відносне подовження чавуну.

Таким чином, правильна оцінка структури чавуну дозволяє визначити механічні властивості, встановити марку чавуну та його придатність до експлуатації.

Марки чавунів згідно технічних умов наведені у додатку Б.

3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Ознайомитися з ГОСТ 3443-87 "Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры".

Вивчити методику оцінки структури чавунів.

Встановити вплив форми графіту та металевої основи на властивості чавунів.

3.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1. Яка форма графіту може бути у чавунах?
2. Яка металева основа зустрічається у чавунах?
3. За якими показниками оцінюють структуру чавунів?
4. Яка вимога до зразків чавунів, що піддають металографічному аналізу?
5. Якими реактивами оброблюють зразки чавунів для виявлення графіту та металевої основи?
6. При яких збільшеннях проводять аналіз структури чавунів?
7. Яка кількість вуглецю у перліті?
8. Як визначити кількість зв'язаного вуглецю у чавуні?

9. Як впливає графітова фаза на фізико-механічні властивості чавунів?
10. Яка форма графіту найбільше погіршує механічні властивості?

3.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

1. Набір зразків сірого та високоміцного чавунів.
2. 4 % розчин азотної кислоти у спирті.
3. Металографічний мікроскоп МИМ-7.

3.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Зробити оцінку структури сірого та високоміцного чавунів за графітом та металевою основою згідно ГОСТ 3443.
2. Схематично замалювати та детально описати структуру зразків чавуну.
3. Розрахувати властивості чавунів за емпіричними формулами (3.4 – 3.12), використовуючи дані їх хімічного та металографічного аналізів.
4. Зробити висновки за результатами роботи.

3.6 Зміст звіту

1. Викласти мету роботи.
2. Замалювати структури дослідних чавунів.
3. Зробити опис структури чавунів.
4. Навести розрахунки механічних властивостей чавунів та визначити їх приблизну марку (див. додаток Б).
5. Зробити висновки за результатами роботи.

Лабораторна робота №4 ГРАФІТИЗУЮЧИЙ ВІДПАЛ ВИЛИВКІВ З БІЛОГО ЧАВУНУ

Мета роботи – вивчити процес отримання ковкого чавуну шляхом графітизуючого відпалу білого чавуну, засвоїти стадії відпалу білого чавуну та їх вплив на структуру та властивості ковкого чавуну.

4.1 Загальні відомості

Умови експлуатації литих деталей машин та устаткувань часто вимагають високих властивостей: міцності, пластичності, герметичності, зносостійкості, здатності витримувати динамічні навантаження та ін. Але з економічних міркувань, треба зменшувати металоємкість литих виробів, тобто забезпечувати необхідні властивості при мінімально допустимій товщині стінок виливків. Сірий чавун не задовольняє цим вимогам внаслідок низьких механічних та експлуатаційних властивостей, а вуглецева сталь – внаслідок поганої рідкотекучості, складності отримання тонкостінного лиття без дефектів.

Поєднання високих технологічних та механічних властивостей втілюється у ковкому чавуні внаслідок компактного графіту. Основні переваги ковкого чавуну полягають у однорідності його властивостей за перерізом, майже відсутності напруг у виливках, високих механічних властивостях і здатності до обробці різанням [1].

Свою назву – *ковкий чавун* (КЧ) отримав внаслідок своїх високих показників міцності (перша цифра у марці чавуну) та пластичності, що може коливатися від 1,5 до 12,0 % (друга цифра у марці чавуну). Але куванню він не підлягає, хоча може піддаватися невеликій правці при жолобленні.

Виробництво виливків з ковкого чавуну відбувається у два етапи: перший – виробництво виливків з *білого доєвтектичного* чавуну; другий – графітизуючий відпал цих виливків. Тобто у процесі відпалу хімічно – зв'язаний вуглець у вигляді цементиту розпадається і виділяється у вигляді включень графіту *пластівчастої форми* (не плутати з пластинчастою), або як його ще називають, вуглецю відпалу



Типовий графік відпалу білого чавуну наведений на рис.4.1.

Графітізуючий відпал білого чавуну складається з двох стадій: високотемпературної та низькотемпературної.

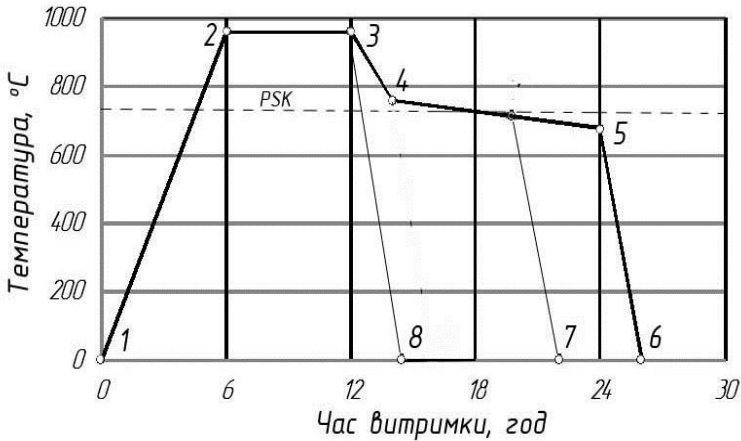


Рисунок 4.1 – Графік відпалу білого чавуну

На першій стадії при температурах 960 – 980 °С відбувається розкладання евтектичного цементиту. Після витримки при цих температурах структура чавуну складається з аустеніту та пластівчастих включень вуглецю відпалу. Після проведення першої стадії графітізації температура виливків у термічних печах автоматично знижується до 780 °С та починається друга стадія графітізації, мета якої - отримати феритну структуру металеві основи ковкого чавуну.

Друга стадія графітізації відбувається в інтервалі температур 780 – 680 °С. Під час повільного охолодження в цьому інтервалі температур відбувається евтектоїдне перетворення аустеніту з утворенням фериту та подальшим зростанням раніше утворених включень вуглецю відпалу.

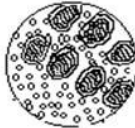
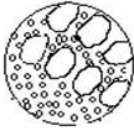
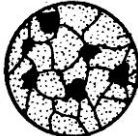


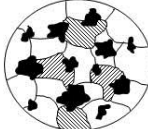

Таким чином, перша стадія графітізації визначає кількість та форму графітових включень, друга – металеву основу ковкого чавуну.

При незавершеній першій стадії у структурі чавуну буде присутній евтектичний цементит, що не розпався, і це є ознакою **браку**. Якщо повністю не завершена друга стадія, тоді у структурі спостерігається підвищений вміст перліту. При цьому пластичні властивості ковкого чавуну різко знижуються. Такий брак є виправним та видаляється-

ся повторною термообробкою.

Структура чавуну, що відповідає точкам на рис. 4.1 наведена у табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Зміна структури чавунів при відпалі ковкого чавуну

Номер точки на рис.4.1	Умовний вигляд структури	Структура
1		$P+L+C_{II}$
2		$A+C$
3		$A+\Gamma_{\text{від}}$
4		$A+\Phi+\Gamma_{\text{від}}$
5 та 6		$\Phi+\Gamma_{\text{від}}$
7		$\Phi+P+\Gamma_{\text{від}}$
8		$P+\Gamma_{\text{від}}$

У свій час, крім феритного ковкого чавуну широкого розповсюдження набули і чавуни з перлітною основою. Такі чавуни мають високу міцність та зносостійкість у поєднанні із задовільним відносним подовженням та ударною в'язкістю. Уповільнення або унеможливлення розпаду евтектоїдного цементиту досягається зміною технологічних режимів термічної обробки або корегуванням хімічного складу чавуну.

Так для виливків потужних ліній електропередач були розроблені та впроваджені технологічні процеси виробництва перлітного ковкого чавуну КЧ50 – 5 з високими експлуатаційними властивостями [8].

Але у сучасному ливарному виробництві спостерігається тенденція зниження виробництва ковкого чавуну (не більше 1,5 – 2,0 % від усього литва). Вірогідно, що у майбутньому ковкий чавун буде повністю витіснений чавуном з кулястим графітом. Це пов'язано з економічними та технічними передумовами.

До умов технічного характеру відносять поперед всього обмеження за вагою та товщиною стінок виливків (до 50 мм), до економічних – висока тривалість та енергоємність відпалу.

Для зниження тривалості відпалу, полегшення розпаду цементиту та утворення зародків графіту слід обмежувати вміст хрому (до 0,06 %) та модифікувати розплав білого чавуну бором, алюмінієм або вісмутом.

Для отримання наскрізного вибілу у початковому чавуні обмежують також вміст вуглецю та кремнію. Концентраціями марганцю та сірки при плавіці у вагранках можна керувати формою включень графіту відпалу. Дослідженнями [9] було встановлено, що форма графітових включень у ковкому чавуні, що модифікований алюмінієм (0,015- 0,020 %), визначається складом сульфідних включень, тобто співвідношенням в них сульфідів заліза (FeS) та марганцю (MnS). Так, наприклад при співвідношенні $Mn/S=1,0$ в сульфідах переважають FeS і графіт має глобулярну форму, при $Mn/S=3,5$ сульфідні складаються переважно з MnS, а форма включень графіту – пластівчаста; при $Mn/S=2,0\div 2,5$ сульфідні являють собою тверді розчини (Fe,Mn)S, а форма графіту компактна (рис. 4.2).

Найбільш високі механічні властивості ковкого чавуну спостерігаються при глобулярній формі включень графіту, але при наявності незв'язаної сірки значно збільшується час відпалу. Тому на практиці приймають співвідношення Mn/S, що забезпечує компактну форму графіту. Контроль цього співвідношення здійснюється за технологічними пробами.

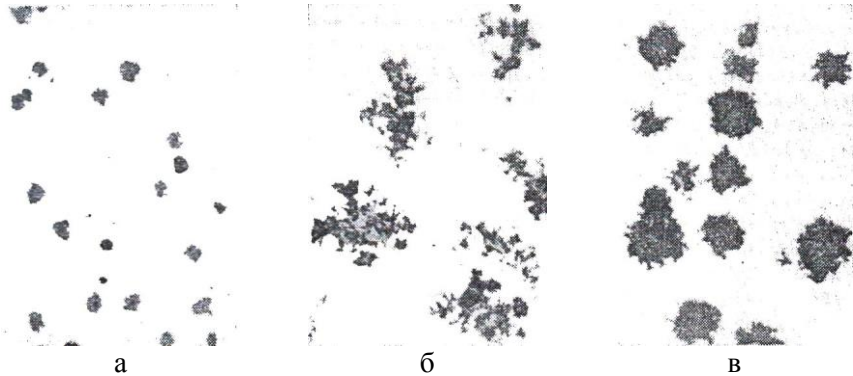


Рисунок 4.2 – Вплив співвідношення марганцю до сірки на форму графіту, ($\times 70$) [9]:

а – глобулярний ($Mn/S=1,25$); б – пластівчастий ($Mn/S=3,5$);
в – компактний ($Mn/S=2,3$)

4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Ознайомитися з технологією відпалу білого чавуну з метою отримання ковкого [1 – 6].

Визначити, яким чином можна регулювати структуру металевої основи ковкого чавуну та як вона впливає на властивості [1 – 6, 9, 10].

4.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1. Який білий чавун по відношенню до евтектики використовують для відпалу на ковкий? Чому саме такий?
2. Чому ковкий чавун має таку назву?
3. Який фактор є визначним для властивостей ковкого чавуну?
4. В результаті якого процесу утворюється графіт відпалу? Які структурні складові відбувають перетворення?
5. Які особливості першої стадії відпалу?
6. Які особливості другої стадії відпалу?
7. Яким чином отримують ковкий чавун з феритною металевою основою?
8. Яким чином отримують ковкий чавун з ферито - перлітною металевою основою?

9. Яким чином отримують ковкий чавун з перлітною металевою основою?

10. Яким чином можна зменшити тривалість відпалу?

4.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

1. Набір зразків ковкого чавунів.
2. 4 % розчин азотної кислоти у спирті.
3. Металографічний мікроскоп МИМ-7.
4. Прес Брінеля.

4.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Проаналізувати зразки чавунів: початковий білий та декілька варіантів відпаленого ковкого чавуну.
2. Оцінити металеву матрицю зразків з ковкого чавуну. Приділити увагу наявності або відсутності перліту.
3. Заміряти твердість зразків чавуну та встановити зв'язок між твердістю та кількістю перліту у ковкому чавуну.
4. Зробити висновки за результатами роботи

4.6 Зміст звіту

1. Викласти мету роботи.
2. Стисло описати методику відпалу ковкого чавуну. Навести графік відпалу.
3. Замалювати мікроструктури чавуну під час проходження стадій відпалу. Зробити опис структури чавунів.
4. Побудувати графік залежності твердості чавуну від кількості перліту.
5. Зробити висновки за результатами роботи.

Лабораторна робота №5

ВПЛИВ ВУГЛЕЦЕВОГО ЕКВІВАЛЕНТУ НА ЛИВАРНІ ВЛАСТИВОСТІ СІРИХ ЧАВУНІВ

Мета роботи – дослідити вплив вуглецевого еквіваленту на рідкотекучість та ливарну усадку сірих чавунів.

5.1 Загальні відомості

Частка виливків з сірого чавуну з пластинчатим графітом досягає 70 – 90 % від усього чавунного литва. Не в останню чергу це пов'язано з дуже добрими ливарними властивостями, що дозволяє виготовляти тонкостінні та навіть художні виливки (наприклад, каслінське литво).

Висока рідкотекучість сірих чавунів пояснюється наявністю ферито-графітної евтектики та домішок – кремнію і, особливо, фосфору. У художніх виливках вміст фосфору досягає 1,0 % та навіть більше. При виготовленні поршневих тонких кілець (товщиною біля 3 мм) вміст фосфору складає 0,6 %.

Ці ж елементи обумовлюють положення чавуну по відношенню до евтектики (формули 5.1 та 5.2). Тобто положення чавуну певного складу до евтектики обумовлюється не тільки концентрацією вуглецю, а й інших елементів. Тому застосовують такі характеристики як *вуглецевий еквівалент* ($C_{\text{екв}}$) та *ступінь евтектичності* (S_e). Для визначення цих показників враховують вміст найбільш впливових елементів: вуглецю, кремнію фосфору та ін.

Відомо, що 1 % кремнію знижує вміст вуглецю у евтектиці приблизно на 0,3 %. Тому для визначення місцезнаходження чавуну певного складу на діаграмі залізо – вуглець потрібно до фактичного вмісту додати 0,3 % кремнію. Ця сума отримала назву вуглецевого еквіваленту ($C_{\text{екв}}$)

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{1}{3} \text{Si} \quad (5.1)$$

або

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{1}{3} (\text{Si} + \text{P}) \quad (5.2)$$

де C – вміст вуглецю, %;

Si – вміст кремнію, %;

P – вміст фосфору, %.

Ступенем евтектичності називається відношення вмісту вуглецю в чавуні до вмісту в евтектиці

$$S_e = \frac{C}{4,3 - 0,3(Si + P)} \quad (5.3)$$

або

$$S_e = \frac{C_{\text{екв}}}{4,3} \quad (5.4)$$

де 4,3 – вміст вуглецю у евтектиці за діаграмою стану, %.

Якщо $C_{\text{екв}}=4,3$ %, а $S_e=1$ тоді такий чавун називається евтектичним. Якщо $C_{\text{екв}}<4,3$ %, $S_e<1$, то чавун доевтектичний, якщо $C_{\text{екв}}>4,3$ %, $S_e>1$ то чавун заевтектичний.

Зі збільшенням вуглецевого еквіваленту зростає кількість графіту, і внаслідок цього зменшується об'ємна та ливарна усадка. Відомо [2], що 1% графіту збільшує об'єм приблизно на 2,2 %, а лінійні розміри на 0,7%. Таким чином виділення графіту компенсує зменшення об'єму чавуну при його кристалізації. Тому сірі чавуну часто отримують без масивних надливів, а при отриманні заевтектичних чавунів їх взагалі не потрібно.

Відомо [5], що процес графітизації суттєво зменшує доперлітну усадку, але не впливає на післяперлітну, що складає приблизно 1,0 %.

Збільшення вуглецевого еквіваленту також сприяє збільшенню рідкотекучості. В певних умовах максимальну рідкотекучість мають заевтектичні чавуни, де графіт кристалізується в якості первинної фази, але не утворює жорсткого каркасу та не перешкоджає текучості.

На практиці іноді дуже важливо визначати вуглецевий еквівалент зважаючи на його значний вплив на рідкотекучість та ливарну усадку промислових чавунів.

Вуглецевий еквівалент можна визначити розрахунковим шляхом на основі хімічного або спектрального аналізу проб чавуна (за формулами 5.1 та 5.2) або практичним шляхом на основі термографічного аналізу кристалізації чавуну, тобто визначенні температур ліквідусу і солідусу та інтервалу кристалізації. У евтектичного чавуну інтервал кристалізації буде відсутній.

5.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

За літературою [1 - 5] ознайомитися з теоретичним матеріалом щодо ливарних властивостей чавуну та факторів, які впливають на них. Згадати, за якими технологічними пробами визначають ливарні властивості та яким чином контролюють кристалізацію сплавів. Згадати, які види рідкотекучості бувають та як вони вимірюються

5.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1. Що називається вуглецевим еквівалентом? За якою формулою він визначається.
2. Яке значення вуглецевого еквіваленту відповідає евтектичному чавуну?
3. Які значення вуглецевого еквіваленту відповідають доевтектичному чавуну?
4. Які значення вуглецевого еквіваленту відповідають заевтектичному чавуну?
5. Як впливає графітна фаза на ливарні властивості?
6. Чому для сірих чавунів не використовують масивні надливи для компенсації усадки? Чому у сірих чавунах не утворюється усадкова раковина (особливо у заевтектичних чавунах)?
7. Якими методами визначають вуглецевий еквівалент промислових чавунів?
8. Чому у евтектичного чавуну температури ліквідусу та солідусу співпадають?
9. Які види рідкотекучості Ви знаєте?
10. Для чого необхідно визначати ливарну усадку та рідкотекучість чавунів?

5.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

1. Індукційна піч ICT-0,06.
2. Шихтові матеріали: чушковий чавун, сталевий брухт, феросиліцій, феромарганець.
3. Термопара занурення (ПП-30/6) та вторинний записуючий прилад (КСП-4)

4. Ливарні форми (3 комплекти) для визначення лінійної усадки та рідкотекучості.

5. Прилад І.Ф. Большакова для визначення усадки.

5.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Розрахувати шихту для виплавки сірого чавуну доевтектичного складу та кількість добавки феросиліцію (ФС75) для досягнення евтектичного та заевтектичного складу.

2. Виплавити заданий хімічний склад чавуну. Відібрати з печі метал та залити комплект ливарних форм (на рідкотекучість та усадку) при температурі 1300 °С.

3. Додати у піч задану кількість феросиліцію для досягнення евтектичного складу, перегріти та випустити метал у ківш.

4. Залити другий комплект ливарних форм при температурі 1300 °С.

5. Додати у піч задану кількість феросиліцію для досягнення заевтектичного складу, перегріти та випустити метал у ківш залишок металу.

6. Залити третій комплект ливарних форм при температурі 1300 °С.

7. Після охолодження форм виміряти рідкотекучість та ливарну усадку дослідних сплавів.

8. Порівняти розрахунковий вуглецевий еквівалент з даними термографічного аналізу.

9. Побудувати графіки залежності практичної рідкотекучості та лінійної усадки від вуглецевого еквіваленту.

5.6 Зміст звіту

1. Викласти мету роботи.

2. Стисло описати вплив хімічного складу сірого чавуну на його ливарні властивості.

3. Навести графіки залежності рідкотекучості та лінійної усадки від вуглецевого еквіваленту.

4. Зробити висновки за результатами роботи.

Лабораторна робота №6 МОДИФІКУВАННЯ СІРОГО ЧАВУНУ

Мета роботи – вивчити вплив модифікування на структуру і властивості сірого чавуну.

6.1 Загальні відомості

З кожним роком зростають вимоги до якості чавуну, його міцності та службових характеристик. Велика різноманітність цих вимог обумовлює створення та використання чималої кількості типів та марок чавуну. Як правило підвищення властивостей сплавів досягають головним чином за рахунок керування процесом кристалізації. У чавунах керування кількістю, формою, розмірами і характером розподілу графітових включень, а також типом металевої основи дозволяє суттєво впливати на якість та властивості виливків.

Одним з найбільш розповсюджених методів впливу на рідкий метал у процесі кристалізації є **модифікування**. Методи модифікування чавуну розділяють на **графітизуюче, стабілізуюче та сфероїдизуюче**.

Графітизуюче модифікування збільшує кількість центрів кристалізації графіту, що приводить до зменшення переохолодження та збільшення ступеня графітизації. У структурі сірого чавуну утворюються дрібні, рівномірно розподілені графітові включення.

Таке модифікування зменшує схильність до утворення структури білого чавуну (відбілювання), усувається міждендритний графіт, зменшуються розміри пелюсток графіту.

Найбільш розповсюдженими графітизуючими модифікаторами є кремнієві - феросиліцій ФС75 (74 – 80 %Si; 1,5 % Al), силікокальцій СК30 (62 %Si; 30 % Ca; 2 % Al), силікобарій ФС65Ба4 (65 % Si; 4 % Ba). Також використовують інші комплексні кремнієві модифікатори, що містять кальцій, алюміній, барій, цирконій, стронцій та інші елементи. Вживають також і безкремнієві модифікатори – алюміній, графіт, порошок коксу та ін.

Відомо [10], що графітизуюче модифікування є обов'язковою технологічною операцією для чавунів з низьким ступенем евтектичності ($S_e=0,65 - 0,85$). В іншому випадку графітові включення мають небажа-

не міждендритне розташування, а у металевій матриці з'являється цементитна складова, що не дозволяє отримувати високі ливарні та механічні властивості. Модифікування чавунів, що наближені за хімічним станом до евтектичних ($S_e=0,85 - 0,98$), проводять при виробництві тонкостінних і різностінних виливків, а також в умовах швидкого охолодження, високого перегріву, підвищеного вмісту у шихті сталюого скрапу та взагалі в умовах значного переохолодження.

Стабілізуюче модифікування використовують для підвищення механічних та експлуатаційних властивостей сірого чавуну за рахунок формування перлітної основи, зменшенню розмірів графітних включень та їх кількості. Стабілізуючі модифікатори звичайно містять марганець, хром, мідь, олово, сурму та ін. Таке модифікування в основному використовується для чавунів з високим ступенем евтектичності.

Стабілізуючі модифікатори з вісмутом, бором, телуrom та ін. іноді застосовують для запобігання виділення графіту у білому чавуні, який далі буде використовуватися при відпалі на ковкий.

Сфероїдизуюче модифікування застосовують для радикального підвищення властивостей чавунів за рахунок зміни форми включень графіту: з пластинчатої на вермикулярну або кулясту (компактну). Для цього використовують присадки магнію, церію, ітрію та ін. у чистому вигляді або в лігатурі (див. лаб. роб. №8).

Модифікатори у рідкий чавун можуть вводити декількома способами: у плавильний агрегат; на струмінь металу при його випуску з печі; у ківш; у автономні проміжні спеціальні пристрої; на струмінь розплаву при заливці ливарної форми; безпосередньо у ливарну форму [10]. Найбільш розповсюдженими методами є введення модифікаторів у ківш та безпосередньо у ливарну форму.

Перед введенням модифікатори подрібнюють та просіюють до розміру 2 – 15 мм. Кількість добавки модифікатору залежить від хімічного складу, його призначення, товщини стінки виливка, матеріалу ливарної форми. Зазвичай додають 0,1 – 1,0 % від маси чавуну. Модифікування проводять при температурах 1350 – 1420 °C [5].

Введення модифікатора у рідкий чавун з температурою нижче 1350 °C недоцільно внаслідок неповного засвоєння та вірогідності отримання неякісних виливків.

На ефект модифікування суттєвий вплив має також час від моменту введення модифікатора у рідкий чавун до заливки у ливарну форму та твердіння. Максимальний ефект, як правило, досягається у

перші секунди. Протягом часу ефект модифікування знижується, а після 10 – 12 (іноді до 30) хвилин повністю зникає. Тобто час від моменту введення модифікатора до заливки металу у форму необхідно зменшувати. У зв'язку з цим перевагу слід надавати так званому «пізньому» модифікуванню – на струмінь розплаву при заливці ливарної форми або безпосередньо у ливарну форму[10] .

Ефективність графітизуючого модифікування можна оцінити за спеціальною технологічною пробою у вигляді клину (рис. 6.1). Розміри клину залежать від середньої товщини стінки виливка. Проба вибивається з форми зразу після твердіння та охолоджується у воді. За висотою відбіленого шару у зламі оцінюють ефект модифікування. Заливають немодифікований та модифікований чавун. Типові злами таких проб надані на рис. 6.2.

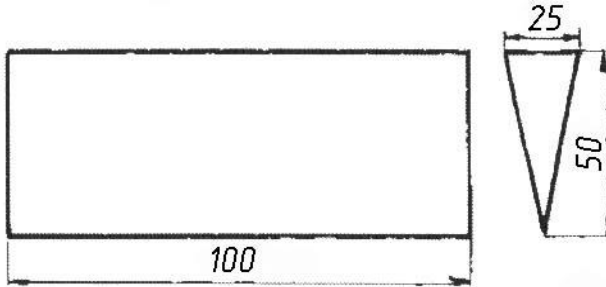


Рисунок 6.1 – Технологічна клинова проба для оцінювання відбілювання чавунів



Типові макроструктури зламів сірого чавуну:
 а – злам немодифікованого сірого чавуну
 б – злам модифікованого сірого чавуну;

Високі марки сірого чавуну неможливо отримати без використання модифікування.

6.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

За літературою [1-5, 10] ознайомитися з теоретичним матеріалом щодо модифікування чавуну та факторів, які впливають на його ефективність. Вивчити вплив модифікування на структуру та властивості чавунів. Ознайомитися зі способами введення модифікаторів та методами оцінки ефективності модифікування.

6.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1. З якою метою застосовують модифікування чавунів?
2. У чому полягає механізм графітізуючого модифікування?
3. Які модифікатори використовують для модифікування сірих чавунів?
4. Які елементи можна використовувати для графітізуючого модифікування сірих чавунів?
5. Яке модифікування називається стабілізуючим? З якою метою воно проводиться?
6. Які елементи можна використати для стабілізуючого модифікування?
7. Яка температура є оптимальною для проведення модифікування?
8. Яка тривалість ефекту модифікування?
9. У чому полягає різниця технологічних варіантів модифікування чавунів з різним ступенем евтектичності?
10. Яку підготовку проходять модифікатори перед застосуванням?
11. Які існують способи введення модифікаторів?
12. Як оцінити ефект модифікування?

6.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

1. Індукційна піч ІСТ-0,06.
2. Шихтові матеріали: чушковий чавун, сталевий брухт, феросиліцій, феромарганець.

3. Модифікатор (феросиліцій ФС75, СК30 або ФС65Ба4).
4. Термопара занурення для контролю температури.
5. Проба - «клин».
6. Проби для визначення механічних властивостей та структури (циліндри: діаметром 30 мм, довжиною 350 мм).

6.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з обладнанням, приладами, оснасткою, що необхідна для виконання роботи. Вивчити інструкції по експлуатації обладнання та техніки безпеки.
2. Розрахувати шихту для плавки сірого чавуну, підготувати шихтові матеріали, модифікатори.
3. Виготовити форми для зразків та клинної проби.
4. Виплавити чавун, перегріти до заданої температури та залити перший комплект форм немодифікованим чавуном.
5. Здійснити модифікування чавуну заданою кількістю модифікатора та залити другий комплект форм.
6. Після охолодження чавуну вибити форми.
7. Заміряти глибину вибіленого шару немодифікованого та модифікованого чавуну.
8. З циліндричних заготовок вирізати зразки для дослідження мікроструктури (зразки товщиною по 15 мм відрізують на відстані 20 мм від низу заготівки).
9. Виготовити шліфи для проведення металографічного аналізу згідно ГОСТ 3443-87.
- 10.3 циліндричних заготівок виготовити зразки для механічних випробувань. (За браком часу можна скористатися наперед заготовленими зразками).
11. Провести металографічний аналіз та механічні випробування зразків модифікованого та немодифікованого чавунів.
12. Результати занести у табл.6.1.
13. Замалювати структури чавунів
14. Зробити висновки за результатами роботи

Таблиця 6.1 – Результати дослідження модифікування чавунів

Вид чавуну	Номер проби	Тип модифікатору	Кількість модифікатора, %	Глибина вибіленого шару, мм	Механічні властивості		Структура чавуну згідно ГОСТ 3443-87
					Тимчасовий опір під час розтягання σ_B , МПа	Твердість НВ	
немодифікований							
модифікований							

6.6 Зміст звіту

1. Викласти мету роботи.
2. Стисло описати теорію модифікування чавунів.
3. Навести результати дослідження модифікування на структуру та властивості чавунів.
4. Зробити висновки за результатами роботи.

Лабораторна робота №7 ПЛАВКА СИНТЕТИЧНОГО ЧАВУНУ В ІНДУКЦІЙНІЙ ПЕЧІ

Мета роботи – ознайомитися з технологією плавки синтетичних чавунів в індукційній печі.

7.1 Загальні відомості

Зазвичай первинний чавун отримують на металургійних заводах при доменній плавці зі звичайних шихтових матеріалів: залізної руди, сталевого лому, коксу. В результаті такої технології отримують чавун із значною кількістю різних домішок: кремнію, марганцю, сірки, фос-

фору та ін. Більшість такого чавуну переробляють в сталь, тому він називається *переробним*, а деяку частину можуть розлити, у так звані – чушки, для ливарної промисловості. Іноді, спеціально у доменній печі, виплавляють *ливарний* чавун, що у порівнянні з переробним містить збільшену кількість кремнію (до 3,6 %).

Ці чушкові ливарні та переробні чавуни є основними шихтовими матеріалами з додаванням сталевого брухту і феросплавів для виробництва чавунних виливків. Зрозуміло, що усі домішки та гази, що були присутні у доменному чушковому чавуні залишаються у металі та будуть визначати структуру і властивості виливків.

Основним плавильним агрегатом до останнього часу у чавуно-ливарних цехах були вагранки, у яких можливості отримання якісного металу досить обмежені (високий вміст сірки та фосфору, невисока температура плавки та перегріву).

В останні роки все частіше у сучасних ливарних цехах виплавляють так званий «*синтетичний*» чавун, який отримують в електричних печах шляхом насичення вуглецем сталевого брухту. Тобто чушковий чавун може бути взагалі відсутнім. Це з одного боку здешевлює шихтові матеріали, а з іншого – менша кількість домішок у сталі обумовлює високі властивості виплавленого чавуну.

Синтетичний чавун при однаковому хімічному складі має кращі властивості ніж ваграночний (табл.7.1).

Таблиця 7.1 – Механічні властивості синтетичних і звичайних чавунів, що відповідають хімічному складу марки СЧ15

Вид чавуну	Механічні властивості				
	Тимчасовий опір під час розтягання σ_B , МПа	Тимчасовий опір при згинанні σ_{II} , МПа	Ударна в'язкість КСУ, МДж/м ²	Стріла прогину f , мм	Твердість НВ
Звичайний ваграночний	172	353	0,028	2,0	220
Синтетичний	301	513	0,055	3,6	220

Такі високі фізико-хімічні властивості синтетичний чавун має не тільки внаслідок зниженого вмісту сірки (0,015 – 0,030 %), фосфору (0,02 – 0,04 %) газів (~0,0003 % Н; 0,004 % N; 0,002 % О) і неметалевих включень, але і тому, що використання сталі у шихті дозволяє по-

кращити форму графіту та взаємне розташування його включень. При цьому графіт набуває форму ізольованих пластин із округленими краями. Підвищення міцності синтетичного чавуну при збільшенні кількості сталі у шихті пов'язано з більшою дисперсністю перліту, ніж у звичайному чавуні (рис. 7.1).

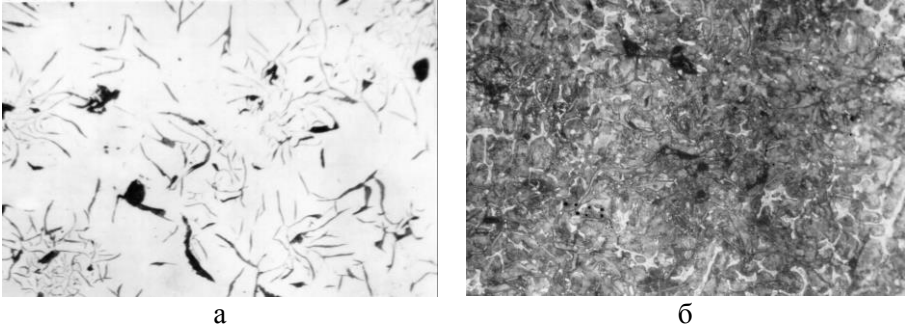


Рисунок 7.1 – Мікроструктура синтетичного чавуну, ($\times 100$):
а – графітова фаза; б – металева основа (травлено)

Синтетичний чавун має більшу схильність до переохолодження, кристалізації за метастабільною системою, утворення структурно-вільного цементиту та міждендритного графіту [1, 11]. Графітізуюче модифікування сприяє більш різкому збільшенню властивостей ніж у звичайному чавуну.

Константа графітизації ($K_{\Gamma'}$), і відповідно, графітізуюча здатність як функція вмісту вуглецю та кремнію у синтетичного чавуну дещо менша, ніж у звичайного (K_{Γ}), особливо при відсутності модифікування. Внаслідок цього для отримання однакової структури вміст кремнію у синтетичному чавуні повинен бути більшим, ніж у звичайному

$$K_{\Gamma'} = C + (C/2,1)Si \quad (7.1)$$

$$K_{\Gamma} = C + (C/1,5)Si \quad (7.2)$$

Ця тенденція зберігається і при модифікуванні, тому кількість модифікатору, що додають у синтетичний чавун на 0,1 – 0,2 % більше.

Фізичні властивості синтетичного сірого чавуну практично не відрізняються від властивостей звичайного чавуну, аналогічного скла-

ду та структури. Дещо кращі службові властивості, насамперед зносостійкість та герметичність. З технологічних властивостей можна відзначити дещо меншу здатність до оброблення різанням у зв'язку зі збільшеною міцністю та твердістю. З ливарних властивостей слід відзначити меншу рідкотекучість та більшу усадку. Але ці незначні погіршення властивостей можливо перекрити корегуванням вмісту вуглецю, кремнію, зміною температури перегріву, а також застосуванням модифікування.

Краща якість спостерігається і у інших синтетичних чавунів: ковких та високоміцних.

Таким чином, наведені дані свідчать про доцільність використання синтетичного чавуну для покращення якості та властивостей виливків.

Шихтовими матеріалами при виробництві синтетичних чавунів є *сталевий брухт* у вигляді відходів прокатного, ковальського, пресоного виробництва, або обробки різанням (залишки від обрізу, висікання, стружка та інші відходи виробництва), а також *карбюризатори* – вуглецеві добавки (електродний бій, графітізований порошок, кокс, кам'яне вугілля) та феросплави (феросиліцій, феромарганець, ферохром та ін.).

Розрахунок необхідної кількості карбюризатору або феросплаву здійснюється за формулою

$$P = \frac{Q \cdot x \cdot 100}{C \cdot y} \quad (7.3)$$

де P – розрахункова кількість карбюризатору або феросплаву, кг;

Q – маса металозавалки, кг;

x – відсутня кількість елемента для отримання заданого складу, %;

C – вміст елемента у карбюризаторі або феросплаві, %;

y – засвоєння елемента у карбюризатору чи феросплаву, %.

Найбільш часто синтетичний чавун виплавляють у індукційних печах внаслідок наступних переваг: високого ККД, однорідності хімічного складу та температури завдяки інтенсивному електромагнітному перемішуванню, відсутності забруднення металу сіркою, зменшенням шуму та забруднення навколишнього середовища, можливістю

використання дешевих шихтових матеріалів, меншим угаром, тривалій витримці металу у печі без суттєвої зміни властивостей, практично необмеженим можливостям перегріву та виключенню спадковості властивостей початкових шихтових матеріалів, можливістю автоматизації процесу та ін.

Засвоєння вуглецю в індукційній печі при додаванні матеріалів у вигляді частинок розміром 3 – 5 мм складає 90 – 95 %. Кремній з феросиліцію засвоюється на 95 – 98 %, марганець – 80 – 95 %.

Плавка у кислій індукційній печі складається з наступних операцій: завантаження шихти, розплавлення, доведення за хімічним складом та температурою, випуск плавки.

Шихта може завантажуватися різними методами, що залежать від місткості індукційної печі: вручну або за допомогою завантажувальних пристроїв. Разом з металеву частину шихти завантажують 75 % карбюризатору від розрахованої кількості. Це знижує температуру плавлення металу та зменшує угар елементів. Решту карбюризатору присаджують зразу після розплавлення всього металу.

Якщо плавка відбувається у індукційних печах промислової частоти то найбільш ефективно використовувати залишок рідкого металу від попередньої плавки – «болота», що складає близько 1/3 об'єму тигля. Якщо процес плавки щодобово переривається, тоді наплавлення металу з твердої шихти доцільно проводити у нічну зміну, коли вартість електроенергії менша.

Після розплавлення всього металу за даними експрес – аналізу в піч додають розраховану кількість феросиліцію та феромарганцю. В разі необхідності для корегування хімічного складу за вуглецем на дзеркало металу додають карбюризатор. Через 10 – 15 хвилин після присадок феросплавів метал добре перемішують, беруть пробу на хімічний аналіз, видаляють шлак та випускають метал у ківш при температурі 1400 – 1420 °С. Заливку форм проводять при температурах 1280 – 1350 °С в залежності від конфігурації та маси виливків.

7.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

За літературою [1, 11] ознайомитися з теоретичним матеріалом щодо синтетичного чавуну та особливостями його плавки та властивостей. Згадати устрій, види футерівок та етапи плавки чавуну в індукційній печі.

7.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1. Який чавун називають синтетичним?
2. У яких печах можливо виплавити синтетичний чавун?
3. Які переваги і недоліки синтетичного чавуну у порівнянні з чавуном, що отриманий на чушкових чавунах?
4. Які відмінності у структурі синтетичних чавунів?
5. Які шихтові матеріали використовуються при плавці синтетичного чавуну?
6. Які карбюризатори використовують для синтетичного чавуну? В чому їх відмінність?
7. Які особливості плавки синтетичного чавуну?
8. Як розраховують необхідну кількість карбюризатору та феросплавів? Які фактори впливають на цю кількість?
9. Яким чином покращують властивості синтетичних чавунів?
10. Чому феросиліцій та феромарганець додають наприкінці плавки?

7.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

1. Індукційна піч ІСТ-0,06.
2. Шихтові матеріали: чушковий чавун, сталевий брухт, феросиліцій, феромарганець, вороття, карбюризатор.
3. Модифікатор (феросиліцій ФС75, СК30 або ФС65Ба4).
4. Термопара занурення для контролю температури.
5. Проба - «клин».
6. Проби для визначення механічних властивостей та структури (циліндри: діаметром 30 мм, довжиною 350 мм).

7.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з обладнанням, приладами, оснасткою, що необхідна для виконання роботи. Вивчити інструкції по експлуатації індукційної печі та техніки безпеки при плавці.
2. Розрахувати шихту для плавки синтетичного сірого чавуну, підготувати шихтові матеріали, карбюризатори, модифікатори.
3. Виготовити форми для зразків та клинної проби.

4. Виплавити чавун з докладним хронометражем технологічних операцій та електричного режим (табл.7.1).

5. Перегріти чавун до заданої температури, здійснити модифікування чавуну заданою кількістю модифікатору та залити комплект форм.

6. Після охолодження чавуну вибити форми.

7. Заміряти глибину відбілу синтетичного чавуну.

8. З циліндричних заготівок вирізати зразки для дослідження мікроструктури (зразки товщиною по 15 мм відрізають на відстані 20 мм від низу заготівки).

9. Виготовити шліфи для проведення металографічного аналізу згідно ГОСТ 3443-87. (За браком часу можна скористатися наперед заготовленими зразками).

10. З циліндричних заготівок виготовити зразки для механічних випробувань. (За браком часу можна скористатися наперед заготовленими зразками).

11. Провести металографічний аналіз та механічні випробування зразків синтетичного чавуну. Порівняти їх з звичайним чавуном.

12. Замалювати структури синтетичного чавуну.

13. Зробити висновки за результатами роботи

Таблиця 7.1 – Хронометраж плавки

Час, хв	Технологічні операції	Електричний режим			Хімічний склад, %		Температура, °С
		Сила струму I, А	Напруга U, В	Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	Вуглець С	Кремній Si	

7.6 Зміст звіту

1. Викласти мету роботи.

2. Стисло описати особливості плавки та властивостей синтетичних чавунів.

3. Навести результати хронометражу плавки та дослідження на структури та властивості синтетичних чавунів.

4. Навести структуру синтетичного чавуну.

5. Зробити висновки за результатами роботи.

Лабораторна робота №8

ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ З КУЛЯСТИМ ГРАФІТОМ

Мета роботи – ознайомитися з методами отримання високоміцного чавуну з кулястим графітом.

8.1 Загальні відомості

Для отримання *високоміцного чавуну з кулястим графітом* застосовують сфероїдизуюче модифікування.

Високоміцний чавун переважає у декілька разів сірий за рівнем міцності та пластичності, має більшу корозійну стійкість, зносостійкість та жаростійкість. Головною причиною різкого зростання властивостей є зменшення негативного впливу графітної фази, тобто кулясті включення графіту на відміну від пластинчатих не мають високої розгалуженості у металевій матриці та не викликають значних концентрацій напружень по краям включень.

Графіт кулястої форми можливо отримати шляхом додавання у розплав чавуну *магнію, церію, ітрію*. Найчастіше для модифікування використовують магній, але використання металевого магнію дещо ускладнено внаслідок його низької температури кипіння (1107 °С) та малої щільності (1700 кг/м³). При введенні чистого магнію відбувається інтенсивне пароутворення, що може викликати викидання металу з ковша. Для усунення цього недоліку використовують спеціальні заходи: вводять магній під тиском у автоклавах, вдувають у струмені інертного газу та ін. або використовують спеціальні лігатури з магнієм. Широке розповсюдження набули *нікель - магнієві лігатури (важкі)*, а також *на основі феросиліцію (легкі)*. Вміст магнію у цих лігатурах коливається від 1,5 до 15,0 %.

Хімічний склад найбільш розповсюджених лігатур наведено у додатку В (табл.В.1 та В.2).

Нікель – магнієві лігатури відносно коштовні, але їх використання дозволяє отримувати більш стабільні результати та надає можливості відмовитися від застосування герметичних ковшів та автоклавів. Модифікування можна здійснювати у звичайних ковшах, найчастіше «сандвіч» - процесом. Після сфероїдизуючого модифікування необхідно проводити

вторинне графітизуюче модифікування (феросиліцієм, силікокальцієм або силікобарієм) у кількості 0,5 – 1,0 % від маси металу.

Перевагами лігатур на основі феросиліцію є: слабкий піроефект, низька вартість, відсутність вторинного графітизуючого модифікування, але внаслідок невисокої ваги отримання стабільних результатів модифікування дещо ускладнено.

Витрата модифікатора, а також стабільність та ефективність процесу модифікування залежить від способу введення, температури металу, **кількості сірки у чавуні**, наявності шкідливих домішок (вісмуту, свинцю, сурми та ін.). Орієнтовно кількість магнію для утворення кулястого графіту можна розрахувати за формулою [1]

$$N = \frac{0,76 \cdot S - Mg_{\text{зал}}}{\eta \cdot Mg_p} \quad (8.1)$$

де S – масова частка сірки у початковому чавуні, %;

$Mg_{\text{зал}}$ – необхідна (залишкова) кількість магнію у виливках, %;

η – коефіцієнт засвоєння магнію;

Mg_p – вміст магнію у реагенті, %.

Для отримання графіту кулястої форми необхідно, щоб залишкова кількість магнію складала **0,04 – 0,06 %** (рис.8.1 а). Коефіцієнт засвоєння магнію залежить від типу модифікатора, способу його введення, температури металу та інших факторів і може коливатися від 15 до 60 %.

При недостатній кількості залишкового магнію утворюється змішаний або **вермикулярний** графіт (рис.8.1 б), при надлишку – часткове або повне утворення структури білого чавуну або навіть перемодифікування. Правильне дозування визначається, як правило, дослідним шляхом в залежності від вмісту сірки у початковому чавуні, товщині стінки виливка, матеріалу форми та інших виробничих умов [6].

До теперішнього часу створено багато способів обробки чавуну сфероїдизуючими модифікаторами. Вибір способу введення модифікатора у розплав чавуну визначається характером та умовами виготовлення виливків. Деякі способи введення модифікаторів наведені у додатку В (рис.В.2 та В.3).

Виплавку чавунів для модифікування доцільно здійснювати у електричних печах, де можна забезпечити низький вміст сірки та не-

обхідний перегрів металу. Оптимальна температура модифікування складає 1420 – 1550 °С. Хімічний склад чавуну для модифікування вибирають близьким до евтектичного ($C_{\text{свт}}=4,0\div 4,4\%$) [5, 12].

Слід пам'ятати, що ефект модифікування обмежений у часі і рідко перевищує 20 – 25 хвилин, тому нерідко використовують модифікування безпосередньо у ливарній формі (див. додаток В, рис. В.3). Але цей спосіб вимагає високої культури виробництва, строгого додержання необхідної температури, фракції та кількості модифікатора, також необхідно застосування ускладненої ливникової системи для ефективного очищення від неметалевих включень.

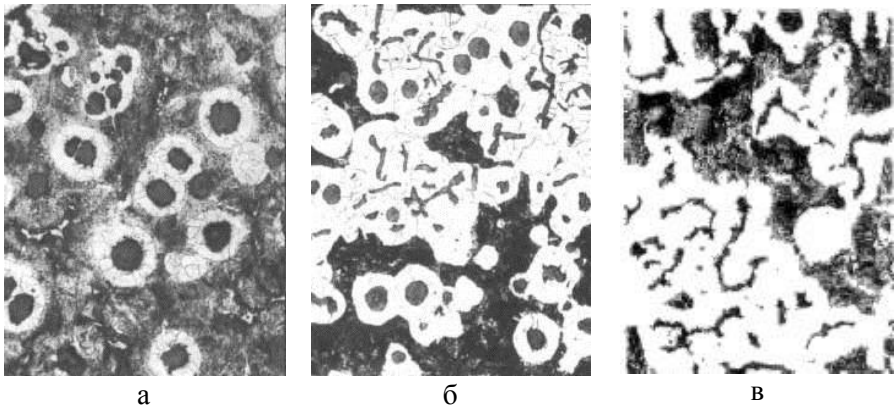


Рисунок 8.1 – Структура високоміцного чавуну ($\times 100$):
 а – ферито-перлітний чавун з кулястим графітом [13];
 б – ферито-перлітний чавун зі змішаним графітом
 (недостатня кількість магнію) [13];
 в – ферито-перлітний чавун з вермикулярним графітом
 (еталон ЧВГ П45 (Ф55) ГОСТ 3443-87)

Високі властивості чавунів можуть бути досягненні не тільки забезпеченням кулястої форми графіту, але і при отриманні інших компактних форм. В останні роки набуває широкого розповсюдження виробництво чавунних виливків з графітом *вермикулярної* форми (рис. 8.1 в). Такі включення графіту уявляють собою розрізнені потовщені утворення з округлими краями. Чавун з вермикулярним графітом характеризується високою міцністю (більше 350 МПа), пластичністю, низькою чуттєвістю до зміни швидкості охолодження, зниженою

усадкою та схильністю до кристалізації за метастабільною системою, добре піддається обробці різанням та ін. Чавун з вермикулярним графітом відомий з часів коли був винайдений і чавун з кулястим графітом (приблизно 40-і роки ХХ століття), але спочатку вважався браком, бо отримувався при менших залишкових концентраціях магнію (0,02 – 0,03 %). Технологія отримання вермикулярного графіту аналогічна технології отримання кулястого графіту.

Найбільш надійні результати отримання чавуну з вермикулярним графітом дає модифікування лігатурами комплексного складу, що містять магній, РЗМ, барій з наступним вторинним графітізуючим модифікуванням.

У наш час щорічне світове виробництво виливків з високоміцного чавуну наближається до 100 млн. т. В Україні також спостерігається тенденція до збільшення виробництва високоміцного чавуну. На чавуни з кулястим та вермикулярним графітом розроблені державні стандарти ДСТУ 3925-99 та 3926-99.

8.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

За літературою [1-5, 12, 13] ознайомитися з теоретичним матеріалом щодо технології отримання чавуну з компактним графітом. Звернути увагу, які умови будуть впливати на утворення у чавуні кулястої та вермикулярної форми графіту. Ознайомитися зі способами введення сфероїдизуючих модифікаторів у чавун. Розглянути структуру та властивості високоміцних чавунів. Ознайомитися з хімічним складом та властивостями чавунів згідно ДСТУ 3925-99 та 3926-99.

8.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1. Для чого у чавуні отримують графіт кулястої форми?
2. Які модифікатори використовують для отримання графіту кулястої форми?
3. У якому вигляді вводять модифікатори у рідкий чавун?
4. Які існують технологічні варіанти внесення модифікаторів у чавун?
5. Яка тривалість ефекту модифікування? Від чого вона залежить?

6. Як розрахувати кількість модифікатора для утворення кулястої форми графіту?

7. Як впливає сірка на процес утворення кулястої форми графіту? Яка концентрація сірки є прийнятною при модифікуванні?

8. При яких температурах проводять модифікування чавунів?

9. З якою метою використовують вторинне модифікування?

10. Які плавильні агрегати доцільно використовувати для отримання чавуну з кулястою формою графіту?

11. Яким чином отримують чавун з вермикулярною формою графіту? Які його переваги?

12. Які переваги модифікування чавуну у ливарній формі?

8.4 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

1. Індукційна піч ICT-0,01.

2. Шихтові матеріали: чушковий чавун, сталевий брухт, феросиліцій, феромарганець, модифікатор (нікель – магнієва лігатура).

3. Термопара занурення для контролю температури.

4. Проба - «клин».

5. Проби для визначення механічних властивостей та структури згідно ДСТУ 3925-99 (рис. В.1).

8.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з обладнанням, приладами, оснасткою, яка необхідна для виконання роботи. Вивчити інструкції по експлуатації індукційної печі та техніки безпеки при плавці.

2. Особливу увагу приділити небезпеці модифікування чавуну магнієм та лігатурами з ним.

3. Розрахувати шихту для плавки початкового сірого чавуну, підготувати шихтові матеріали, модифікатори.

4. Виготовити форми для зразків та клинкової проби.

5. Виплавити чавун заданого складу.

6. На дно ковша закласти розраховану та подрібнену (2-4 мм) порцію модифікатору (Ni - Mg).

7. Перегріти чавун до заданої температури та випустити у ківш першу порцію металу, після проходження реакції залити перший комплект форм.

8. Далі знову на дно ковша закласти розраховану кількість модифікатору (Ni - Mg) та зверху присипати графітизуючим модифікатором (ФС75 або СК20 або ФС65Ba4) у кількості 0,5 % від маси металу.

9. Перегріти чавун до заданої температури та випустити у ківш другу порцію металу, після проходження реакції залити перший комплект форм.

10. Після охолодження чавуну вибити форми.

11. Заміряти глибину відбілювання чавунів.

12. З проби вирізати зразки для дослідження мікроструктури.

13. Виготовити шліфи для проведення металографічного аналізу згідно ГОСТ 3443-87. (За браком часу можна скористатися наперед заготовленими зразками).

14. Виготовити зразки для механічних випробувань. (За браком часу можна скористатися наперед заготовленими зразками).

15. Провести металографічний аналіз та механічні випробування зразків чавуну з кулястим графітом. Порівняти їх зі звичайним сірим чавуном. Результати навести у табл.8.1.

Таблиця 8.1 – Результати отримання та властивостей високоміцного чавуну

Склад чавуну	Вуглецевий еквівалент $C_{екв}$, %	Модифікатор		Властивості		
		Тип	Кількість, %	Глибина вибіленого шару, мм	Твердість НВ	Тимчасовий опір під час розтягання σ_B , МПа

16. Замалювати структури отриманого чавуну.

17. Зробити висновки за результатами роботи

8.6 Зміст звіту

1. Викласти мету роботи.

2. Стисло описати технологію отримання високоміцного чавуну з кулястим та вермикулярним графітом.

3. Навести результати дослідження властивостей високоміцних чавунів (табл.8.1).

4. Навести структуру отриманих високоміцних чавунів.

5. Зробити висновки за результатами роботи.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

- 1 Справочник по чугунному литью [Текст]/под ред. Н.Г. Гиршовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 758 с.
- 2 Гиршович, Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках [Текст]/ Н.Г. Гиршович. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1966. – 562 с.
- 3 Трухов, А.П. Литейные сплавы и плавка [Текст]: учеб. / А.П. Трухов, А.И. Маляров. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с. – Библиогр.: с. 334-336. – ISBN 5-7695-1276-8.
- 4 Чугун [Текст]: спра. изд. / под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
- 5 Лабораторные работы по технологии литейного производства [Текст]: учеб. / под ред. А. В. Курдюмова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с. – ISBN 5-217-00857-1.
- 6 Ланда, А. Ф. Основы получения чугуна повышенного качества. Состав, структура, термообработка [Текст] / А.Ф. Ланда. – М.: Машгиз, 1960. – 238 с.
- 7 Волчок, И. П. Повышение стойкости изделий из чугуна / И. П. Волчок, О. Б. Колотилкин, В.М. Юзвак.-К.: УМК ВО, 1990.-54 с.
- 8 Бондаренко, И. Н. Структура и особенности ударно - усталостного разрушения ковких чугунов [Текст] / И. Н. Бондаренко, С.Н. Билер – Сироткина, Г. Ю. Шульте // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. - №9. – С. 51 – 53.
- 9 Шульте, Г. Ю. О форме графита в ковком чугуне. [Текст] / Г. Ю. Шульте, Г. Н. Бидуля.//Литейное производство.-1962. - №1-С. 28.
- 10 Кобелев, Н. И. Повышение качества чугунных отливок модифицированием. Обзор [Текст] / Н. И. Ключнев, И. А. Дибров, А. А. Романович. – М.: НИИмаш, 1982. – 52 с.
- 11 Шумихин, В. С. Синтетический чугун. [Текст] / В.С. Шумихин, П. П. Лузан, М. В. Жельнис. – К.: Наукова думка, 1971. – 158 с.
- 12 Ващенко, К. И. Плавка и выпечная обработка чугуна для отливок [Текст]: учеб. / К. И. Ващенко, В. С. Шумихин. – К.: Вища шк., 1992. – 246 с.
- 13 Большаков, В.И. Атлас структур металлов и сплавов [Текст] / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин. – Днепропетровск: ГВУЗ «ЛГАСА», 2010. – 174 с.: с ил.

Додаток А

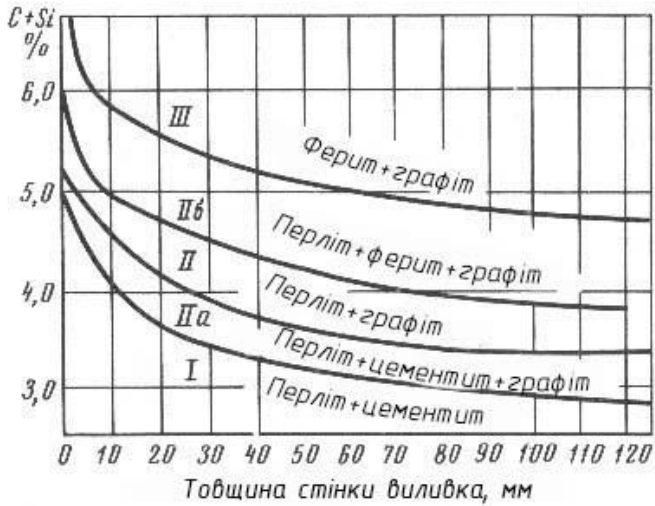


Рисунок А.1 – Уточнена структурна діаграма Маурера

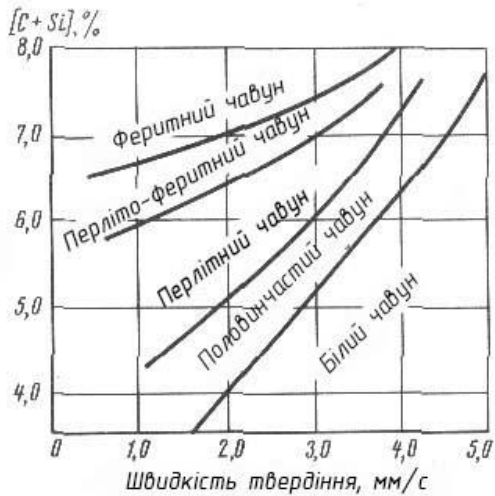


Рисунок А.2 – Структурна діаграма чавуну при литті у металеві форми

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Хімічний склад чавуну в залежності від товщини стінки виливків [1]

Потрібна міцність, кгс/мм ² (10 ⁷ Па)	Товщина стінки виливка, мм	Масова частка елементів, %					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
					не более		
15	≤10	3,2–3,8	2,4–2,7	0,5–0,8	0,65	0,15	—
	10–20	3,2–3,8	2,3–2,6		0,65	0,15	—
	20–30	3,1–3,6	2,2–2,5		0,65	0,14	—
	>30	3,0–3,5	2,1–2,4		0,50	0,13	—
20	≤20	3,2–3,5	2,0–2,3	0,5–0,8	0,65	0,14	—
	20–30	3,1–3,4	1,9–2,2	0,5–0,8	0,65	0,14	—
	30–40	3,1–3,3	1,8–2,1	0,6–0,9	0,40	0,17	≤0,15
	>40	3,0–3,3	1,6–2,0	0,7–1,0	0,30	0,17	≤0,20
25	≤20	3,0–3,4	1,7–2,1	0,7–1,1	0,30	0,12	≤0,3
	20–30	2,9–3,3	1,4–1,9	0,7–1,2	0,25		≤0,4
	30–40	2,9–3,2	1,7–1,6	0,8–1,5	0,20		≤0,5
	>40	2,8–3,2	1,0–1,6	0,9–1,5	0,20		≤0,5
30	20–30	2,8–3,2	1,4–1,8	1,0–1,4	0,35	0,12	0,2–0,3
	30–40	2,8–3,1	1,3–1,7	1,1–1,5	0,30		0,2–0,4
	>40	2,8–3,1	1,0–1,6	1,1–1,5	0,25		0,3–0,5
35	25–30	2,8–3,1	1,3–1,7	1,0–1,4	0,30	0,12	0,2–0,3
	30–40	2,7–3,0	1,2–1,6	1,1–1,5	0,25		0,3–0,4
	>40	2,7–3,0	0,9–1,6	1,1–1,5	0,20		0,4–0,5
40	30–40	2,7–3,1	1,0–1,6	1,1–1,5	0,25	0,12	0,3–0,4
	>40	2,7–3,0	0,8–1,5		0,20		0,4–0,5

Додаток В

Таблиця В.1 – Хімічний склад типових модифікаторів на основі нікелю (мас. частка, %) [13]

Тип	Ni	Mg	Si	Fe	Інші елементи
1	15-20	5-15	45-50	решта	-
2	20-50	5-15	до 30	теж саме	-
3	50-55	15-18	25-30	»	-
4	40	25-32	до 30	»	-
5	76-84	14-16	-	-	до 1 % Се
6	10-45	5-17	-	50	-
7	65-70	5-15	-	до 5	до 20 % С

Таблиця В.2 – Склад комплексних модифікаторів для отримання чавунів з кулястим графітом (мас. частка, %) [13]

Марка	Mg	Ca	PЗМ	Si	Al, не більше	Fe та ін.
ФСМГ9	8,5-10,5	0,2-1,0	0,3-1,0	50-60	1,2	решта
ФСМГ7	6,5-8,5	0,2-1,0	0,3-1,0	45-55	1,2	теж саме
ФСМГ5	4,5-6,5	0,2-1,0	0,3-1,0	45-55	1,2	»
ФСМГ4	3,5-4,5	0,2-1,0	1,0-2,0	45-65	1,2	»
ФСМГ3	2,5-3,5	2,0-4,0	1,0-2,0	55-70	2,5	»
ФСМГ2	1,5-2,5	2,0-4,0	1,0-2,0	55-70	2,5	»

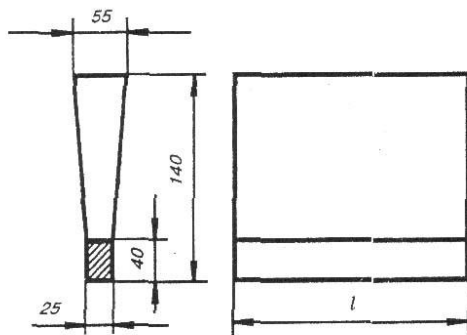


Рис.В.1 – Проба чавуну з кулястим графітом для вирізання зразків на механічні властивості (місце вирізання зразків заштриховане)

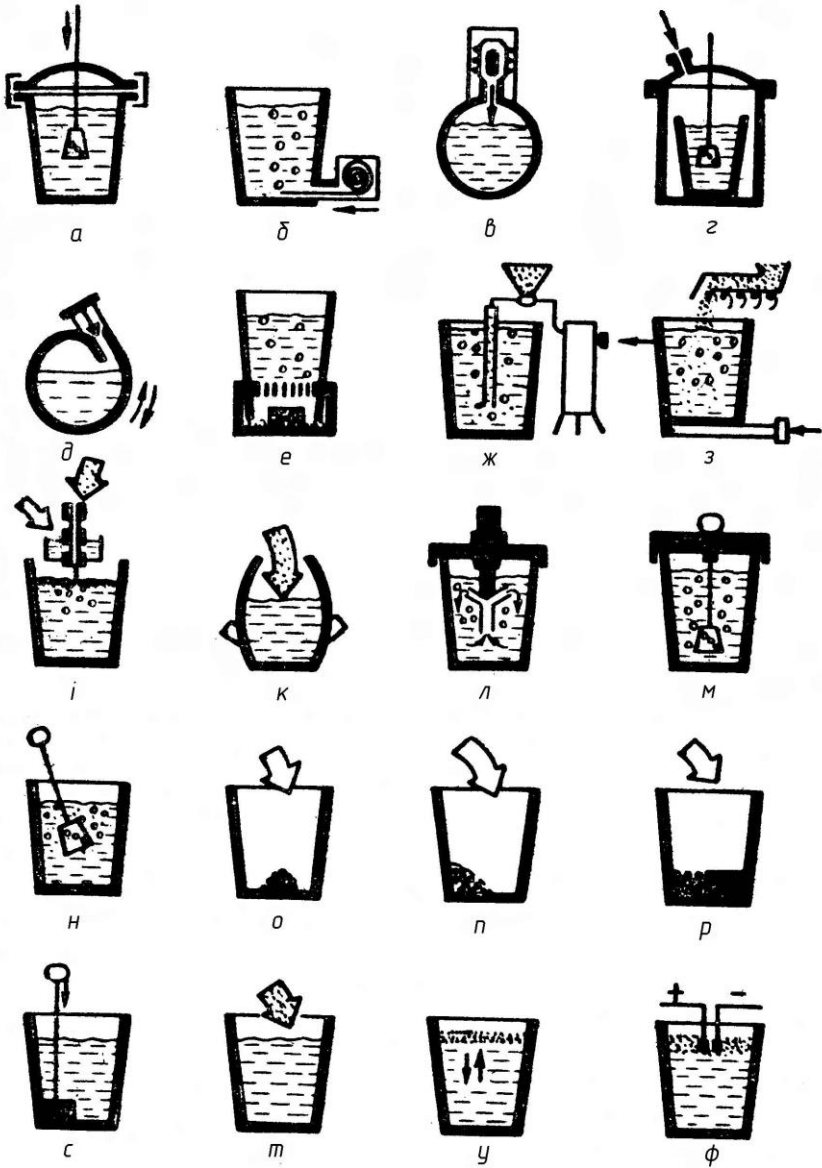
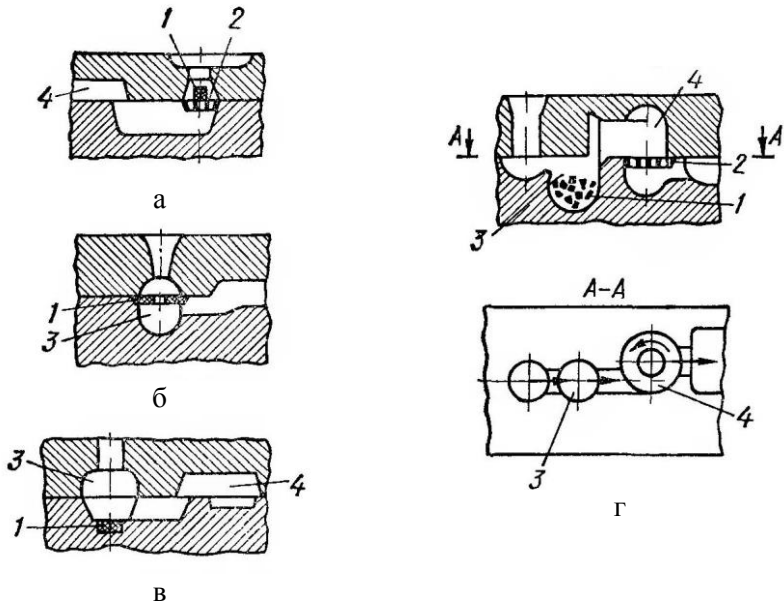


Рисунок В.2 – Способи обробки чавуну сфероїдируючими модифікаторами [1]:

- а – у герметичному ковші або копильнику;
- б – у відкритому ковші або копильнику за допомогою магнієвого дроту;
- в – у герметичному ковші пароподібним магнієм;
- г – у автоклаві під надлишковому тиску 0,5-0,6 МПа;
- д – у поворотному герметичному ковші;
- е – у ковші за допомогою брикетів насичених магнієм;
- ж – вдуванням порошкоподібного магнію за допомогою інертного газу;
- з – продуванням інертним газом для створення циркуляційних потоків, що захоплюють модифікатори з поверхні (спосіб «Осмос» або «Газаль»);
- і – у проміжному пристрої за допомогою порошкоподібного магнію;
- к – у ковші, що обертається або струшується для покращення перемішування;
- л – у ковші з механічним перемішуванням керамічними мішалками (спосіб «Остберг», або «Райншталь»);
- м – у ковші з масивною кришкою;
- н – у ковші за допомогою ручної реакційної камери – «дзвоника»;
- о – у ковші з лігатурою на дні;
- п – у ковші з лігатурою, що вкрита сталевим листом або скрапом;
- р – у ковші з лігатурою, що розташована у кармані та прикрита зверху сталевією висічкою (спосіб «Сандвіч»);
- с – у ковші з лігатурою, що розташована у кармані та прикрита зверху шаром CaC_2 (спосіб «Тригер»);
- т – додавання лігатури на поверхню металу;
- у – обробки реактивними покривними флюсами;
- ф – за допомогою електролізу флюсів, що складаються з хлоридів кальцію та магнію.



1 – модифікатор;
3 – реакційна камера;

2 – фільтр;
4 – шлаковловлювач

Рисунок В.3 – Варіанти модифікування чавуну у ливарній формі (спосіб «Інмолд») [13]:

а – у стояку перед фільтром;
б – під стояком через модифікатор;
в – під стояком на модифікатор;

г – у спеціальній реакційній камері, куди засипається розрахована наважка подрібненого модифікатору