

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

ІВАНОВ ВАЛЕРІЙ ГРИГОРОВИЧ

УДК 621.74.002.6:669.131.6

**РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ВПЛИВУ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ  
ВИЛИВКІВ ІЗ СІРИХ ЧАВУНІВ**

05.16.04 – Ливарне виробництво

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор **Луньов Валентин Васильович**, завідувач кафедри машин і технології ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, **Верховлюк Анатолій Михайлович**, заступник директора з наукової роботи, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ

доктор технічних наук, доцент, **Могилатенко Володимир Геннадійович**, професор кафедри ливарного виробництва чорних і кольорових металів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

доктор технічних наук, професор **Лисенко Тетяна Володимирівна**, завідувача кафедрою технології та управління ливарними процесами, Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.084.02 Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.02,  
доктор технічних наук, професор

Т. М. Миронова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Чавунні виливки залишаються найбільш затребуваною ливарною продукцією для сучасного машинобудування та металургії. На світовому ринку лиття доля чавунних виливків складає біля 70% (більше 70 млн. т). В Україні, при щорічному випуску лиття приблизно 40...42 тис. тон, чавунні виливки складають більше 50 %. Наявність у чавунах графітної фази різної морфології дозволяє варіювати комплексом їх властивостей у дуже широких межах та конкурувати зі сталлю у литому і деформованому стані, а також з іншими матеріалами. У чавунах можуть утворюватися графітові полікристалічні вкраплення різної форми: пластинчасті, вермикулярні, кулясті або пластівчасті. Таке різноманіття утворюється відповідною орієнтацією базисних та призматичних площин графіту. Не зважаючи на багаторічні дослідження, сучасні широкі можливості дослідного апаратного забезпечення та комп'ютерного моделювання багато аспектів процесу утворення тієї чи іншої форми вкраплень графіту та власне механізм їх формоутворення залишаються нез'ясованими та дуже суперечливими.

Завдяки роботам Н. Г. Гиршовіча, К. П. Буніна, Ю. М. Тарана, А. В. Черновола, А. Є. Кривошеєва, К. І. Вашенко, А. О. Жукова, В. С. Шуміхіна, О. О. Баранова, О. В. Соценко, А. М. Верховлюка, Д. Н. Худокормова, Е. І. Маруковича, D. M. Stephanesku, H. Morgogh, T. Skaland та ін. з'ясовано багато питань формоутворення графіту у чавунах, що дозволило впровадити у практику ливарного виробництва різні методи плавлення та позапічної обробки чавунів з метою покращення форми вкраплень графіту, керування їх розмірами та процесами розподілення у металевій матриці. Висунуто значну кількість гіпотез формоутворення графітних вкраплень, що пов'язують з багатьма явищами: поверхневого натягу або опору середовища, наявністю домішок, природою, формою або будовою зародків графіту, співвідношенням росту різних граней графіту тощо. Але жодна з них не стала загальноприйнятою до сьогодні.

Також нез'ясованими залишились особливості виникнення зародків графіту у рідкому чи твердому стані при гомогенному або гетерогенному зародженні. Не визначено в достатній мірі вплив газової фази, контроль якої у практиці чавуноливарного виробництва майже не виконується. Крім того, формоутворення графітної фази відбувається при високих температурах (близько 1000 °C та вище), коли термодинамічно стійкими є субоксиди елементів, що входять до складу чавунів (кремнію, магнію, алюмінію та ін.). Вплив цих субоксидів на формування вкраплень графіту майже не вивчався. Недостатньо досліджено закономірності утворення графіту різної форми при зміні фізико-хімічних умов кристалізації чавунів та їх технологічних параметрів.

Таким чином, розвиток теоретичних основ керування структурою та властивостями виливків з сірих чавунів, оптимізація хімічного складу, вмісту

шкідливих домішок, процесів модифікування, рафінування та інших технологічних параметрів лиття є актуальною науково-технічною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами та планами.** Дисертація виконана відповідно тематичних планів Національного університету «Запорізька політехніка» (Запорізького національного технічного університету), виконання держбюджетних науково-дослідних робіт кафедри машин і технології ливарного виробництва, а саме № 02612 «Вдосконалення складу сплавів чорних і кольорових металів та технологій ливарних процесів для покращення якості виливків», № держ. реєстрації – 0115U002569; № 02615 «Дослідження впливу складу і технологічних параметрів виробництва на якість виливків з чорних та кольорових сплавів»; № 02618 «Вплив технологічних факторів виробництва виливків з чавуну, сталі, кольорових та спеціальних сплавів на фізико-механічні властивості та показники якості» та господарсько-договірних робіт із підприємствами України, де здобувач був відповідальним виконавцем (договір №534040767/1144 з ВАТ «Нижняодніпровський трубопрокатний завод» на тему «Вдосконалення технології плавки чавуну та виробництва виливниць із середньою стійкістю сімдесят наливів»).

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягала у розвитку теоретичних основ керованого впливу технологічних параметрів лиття на структуру виливків з сірих чавунів, включаючи розподілення, розміри та форму графітних вкраплень та інших фаз, для покращення властивостей відповідно вимогам їх застосування.

**Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні основні завдання:**

1. Встановити вплив субоксидних сполук, що утворюються під час плавки, кристалізації та охолодження чавунів, у формуванні їх структури і, зокрема у зародженні та зростанні графітних вкраплень у чавунних виливках.

2. Провести порівняльний аналіз будови графіту, що виділяється у рідкому та твердому стані чавуну, в тому числі, що утворюється у порах та усадкових раковинах.

3. Визначити вплив технологічних параметрів виробництва чавунних виливків, що сприяють зміні фізико-хімічних реакцій під час їх кристалізації та охолодження у ливарній формі на особливості утворення графітних вкраплень.

4. Дослідити вплив рафінування, вакуумування та електрошлакового переплавлення чавуну на форму та розміри графітних вкраплень.

5. Проаналізувати вплив сірки та кисню на утворення вкраплень графіту у чавунних виливках.

6. Оптимізувати технологічні параметри виробництва чавунних виливків (хімічний склад, умови плавки, заливки тощо) для забезпечення в них потрібної структури та необхідного рівня властивостей.

7. Використати одержані результати для розвитку наукових основ чавуноливарного виробництва у промисловості та у навчальному процесі.

**Об'єкт дослідження.** Процес виникнення вкраплень графіту різної форми у чавунних виливках.

**Предмет дослідження.** Закономірності формування структури виливків з сірого чавуну при різних технологічних параметрах виготовлення.

**Методи дослідження.** При вирішенні поставлених задач використовували методи математичного планування експериментів, сучасні методи плавки, аналізу і контролю структури, ливарних, фізичних і службових властивостей чавунів, а також спеціальні удосконалені методики дослідження із застосуванням обчислювальної техніки та сучасних програмних продуктів. Обладнання та засоби вимірювальної техніки пройшли відповідну метрологічну перевірку або калібрування. Результати експериментальних досліджень опрацьовані з використанням методів математичної статистики.

**Наукова новизна.** Наукову новизну мають наведені нижче результати теоретичних та експериментальних досліджень.

**1. Вперше встановлено наявність та визначено закономірності утворення субоксидів кремнію і магнію у виливках з сірих чавунів які містять 2,5...4,0% вуглецю, 1,9...2,8% кремнію, 0,1...1,0% марганцю, 0,01...0,30% фосфору, 0,01...0,12% сірки та до 0,5% магнію (за масою).**

Такі дані раніше відомі не були. Під час розчинення та засвоєння кремнію або магнію у розплаві чавунів при температурах 1200...1350 °С відбувається утворення оксидів зниженої валентності - субоксидів. Врахування встановлених закономірностей дозволить підвищити ефективність модифікування, легування та рафінування чавунів.

**2. Вперше визначено механізм впливу субоксидів кремнію, що утворюються в результаті реакції кремнію з монооксидом вуглецю та проявляють властивості поверхнево-активних речовин на формоутворення графіту у виливках з сірого чавуну.**

Такі дані раніше відомі не були. Формоутворення вкраплень графіту пластинчастої форми відбувається через реакцію взаємодії кремнію, що додають при 1200...1350 °С у розплав чавуну, з киснем монооксиду вуглецю, в результаті чого відбувається утворення поверхнево-активного субоксиду кремнію (SiO). Зі зниженням температури в інтервалі 1200...900 °С субоксид кремнію диспропорціонує на вищий оксид (SiO<sub>2</sub>) та кристалічний кремній. Врахування цього явища дозволяє керувати структуроутворенням виливків з сірих чавунів, забезпечувати необхідні параметри структури - розміри, розподіл та кількість вкраплень графіту.

**3. Вперше встановлено, що повнота проходження реакції кремнію з монооксидом вуглецю у рідкому чавуні, що містить 2,5...4,0 % вуглецю та 1,9...2,8% кремнію (за масою), є вирішальним фактором, який впливає на форму графітних вкраплень у виливках.**

Таких відомостей раніше не було. При температурах 1300...1350 °С і

повному розчиненні кремнію дрібної фракції (1...7 мм) у рідкому чавуні відбувається утворення поверхнево-активного субоксиду кремнію ( $\text{SiO}$ ), його диспропорціонування, а також, як наслідок, подрібнення та рівномірне розподілення графітних вкраплень. При неповному розчиненні кремнію внаслідок низької температури (1100...1200 °C) або крупної фракції (8...15 мкм) утворюються додатково інші фази, що містять кремній – низькотемпературні карбіди кремнію та розчини на основі Fe-Si-C, які мають зменшену поверхневу активність, розташовуються на межах первинних кристалів аустеніту, сприяють ліквідації, нерівномірному розподілу графітних вкраплень та погіршують властивості чавунних виливків. Врахування цього явища дозволяє визначати оптимальні технологічні параметри виробництва виливків з сірих чавунів.

**4. Вперше для високоміцних чавунів встановлена залежність форми графіту від повноти проходження реакції між магнієм та монооксидом вуглецю, в результаті якої утворюється субоксид магнію зниженої валентності ( $\text{Mg}_2\text{O}$ ). Повнота проходження реакції визначає розмір та форму вкраплень графіту.**

Таких відомостей раніше не було. Це дозволяє більш точно прогнозувати структуру виливків з високоміцного чавуну і розробляти відповідні умови щодо якості шихтових матеріалів, плавки та твердіння його у ливарній формі для забезпечення отримання необхідної структури та властивостей виливків.

**5. Вперше встановлено, що зниження атмосферного тиску з 0,1 МПа до 2,67 Па над розплавом чавуну сприяє виникненню бульбашок монооксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ), в яких може утворюватися графіт кулястої форми.**

Раніше таких відомостей не було. Встановлені закономірності розширюють уяву щодо структуроутворення в чавунах та дозволяють використовувати нові види обробки розплавів для суттєвого покращення комплексу фізико-хімічних, технологічних та експлуатаційних властивостей чавунних виливків.

**6. Набула подальшого розвитку теорія фрактальної будови графіту. Підтверджено, що кристали та вкраплення графіту різної форми та походження у чавунних виливках за різним масштабним фактором мають самоподібність.**

Такі дані мали фрагментарний характер. Так, вкраплення графіту, що спостерігаються у матриці, а також у порах та раковинах високоміцного чавуну мають самоподібність та наближені до шестигранної елементарної форми гексагональної решітки графіту. Тому утворення кулястих вкраплень відбувається відповідно власній гексагональній природі графіту. Утворення кулястої форми графіту під час обробки чавуну модифікаторами відбувається внаслідок усунення опору середовища на таке природне утворення. Це дозволяє покращити кількісну оцінку графітної фази у чавунах та своєчасно корегувати технологічні параметри плавки та модифікування чавунів.

**7. Набули подальшого розвитку теоретичні відомості впливу домішкових елементів, зокрема S та O, на форму графіту у сірих та високоміцних чавунах, що містять: 2,5...4,0% вуглецю; 1,9...2,8% кремнію; 0,1...1,0% марганцю (за масою).**

Встановлено, що кисень і сірка у чавунах є поверхнево-активними елементами та приймають активну участь у формуванні їх структури та графітних вкраплень. Сірка при високих концентраціях (більше 0,02 %) пригнічує активність монооксиду кремнію та зменшує розгалуженість пластинчатого графіту; у модифікованих магнієм чавунах, сірка при високій концентрації (більше ніж 0,02 %) вступає з ним у взаємодію, і заважає утворенню субоксиду магнію та, у свою чергу, кулястого графіту. Отримані дані дозволяють підвищити ефективність модифікування чавунів для отримання кулястого графіту.

**Практичну цінність** дисертаційної роботи полягає у розробленні методичних прийомів дослідження технологічних способів керування структурою та властивостями виливків із сірих чавунів з різною формою графітних вкраплень, а саме:

- вперше запропоновано та використано комплексну методику дослідження формоутворення графітних вкраплень з використанням петрографічного методу у поєднанні з сучасними діагностичними методами (металографічним, мікрорентгеноспектральним та ін.); дослідження вкраплень графіту не тільки на шліфі у відбивному світлі, але і в прохідному – після екстрагування вкраплень з поверхні шліфа. Це дозволяє відстежити трансформацію вкраплень графіту, на усіх етапах виробництва чавуну. Також така методика дозволяє відрізнити оксиди від субоксидів або фаз нестехіометричного складу, відомості про які необхідні для розкриття механізму їх утворення;

- розроблено технологію отримання чавунних виливниць для колісної сталі, що дозволила збільшити їх стійкість на 35...50 % (довідка про впровадження результатів НДР № 534040767/1144 «Вдосконалення технології плавки чавуну та виробництва виливниць з середньою стійкістю сімдесят наливів» з ВАТ „Нижньодніпровський трубопрокатний завод” від 12.02.19 р);

- вдосконалено технологічний процес виготовлення маслотної заготовки для поршневої кілець відцентровим способом, результатом якого було вибрано раціональний хімічний склад, структуру та режим термічної обробки високоміцного чавуну, що забезпечило його високі експлуатаційні властивості (акт впровадження результатів роботи на ТОВ «ТВИНС-СЕРВИС» від 02.04.19 р);

- розроблені технологічні методи керування структурою у чавунах для маслотної заготовки, що містять у шихті залізни відходи титанового виробництва (акт впровадження результатів роботи на ТОВ «ТВИНС-СЕРВИС» від 02.04.19 р);

- розроблено комплексну лігатуру з відходів магнієвого лиття для отримання чавуну з вермикулярним графітом.

Впровадження в виробництво розробок, що запропоновані в роботі, дозволили підприємствам виготовляти продукцію підвищеної якості. Сумарний очікуваний економічний ефект від впровадження розроблень складає біля 620 тис. гривень.

Наукові результати використовуються в навчальному процесі на кафедрі машин і технології ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка» при вдосконаленні лекційних курсів навчальних дисциплін «Основи теорії плавки та виробництва чавунних виливків», «Ливарні сплави та їх плавка», а також при виконанні студентами лабораторних, практичних і дипломних робіт (акт впровадження від 13.02. 2019 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення дисертації розроблені автором особисто. Здобувачу належить ініціатива у постановці завдань, формулюванні мети, плануванні і проведенні експериментів, підготовці методик, аналізі, обробці та інтерпретації експериментальних даних, виконанні розрахунків, теоретичного обґрунтування впливу технологічних параметрів виробництва чавуну на структуру та властивості виливків, участь у промислових випробуваннях та впровадженні розробок у виробництво і навчальний процес.

Петрографічні дослідження графітних вкраплень у дослідних чавунах виконано спільно з к.т.н., с.н.с. Пирожковой В. П.

Автору належить 11 одноосібних статей у фахових виданнях України та значна доля (30 %) у спільній монографії. Узагальнення отриманих результатів, а також написання спільних статей у співавторстві виконувалося при особистій участі автора. Особистий вклад здобувача в роботах, що опубліковані в співавторстві (за переліком, що наведений в списку опублікованих праць): [1] – механізм утворення усадкових раковин у чавунних виливках, вплив різних технологічних параметрів виробництва чавунних виливків на їх структуру та властивості, вдосконалення методик розрахунку ливарних властивостей, живлення та технології виробництва виливків; [2 – 4, 16 – 22, 26 – 43] – аналіз літературних даних, постановка й обґрунтування мети дослідження, планування та проведення експерименту, дослідження структури та властивостей сплавів, встановлення закономірностей та механізму впливу субоксидів кремнію і магнію на морфологію графіту у чавунних виливках, розроблення теоретичних основ формування графітної фази у чавунах; встановлення впливу хімічного складу, модифікування та обробки чавунів на формування вкраплень графіту різної форми, вдосконалення виробництва виливків, аналіз та опис результатів, підготовка рукопису.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи повідомлені, обговорені та здобули позитивну оцінку на 14 наукових конференціях і форумах, а саме: XI науково-технічній конференції «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах», (м.



Запоріжжя, 19...22 вересня 2006 р.), IX-й Міжнародній науково-технічній конференції «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (м. Запоріжжя, 2005), Міжнародній конференції «Сучасна металургія: проблеми, завдання, рішення. Наука і виробництво» (м. Дніпропетровськ 28...29 квітня 2015 р.), VII науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Київ, 21...22 травня 2015 р.), XI науково-практичній конференції «Литво. Металургія. 2015» (м. Запоріжжя, 26...28 травня 2015 р.), XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» (м. Запоріжжя, 6...9 жовтня 2015 р.), VIII науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Київ, 30...31 травня 2016 р.), XII науково-практичній конференції «Литво. Металургія. 2016» (м. Запоріжжя, 24...26 травня 2016 р.), IV Міжнародній науково-практичній конференції «Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні» (м. Запоріжжя, 2016 р.), XIII науково-практичній конференції «Литво. Металургія. 2017» (м. Запоріжжя, 23...25 травня 2017 р.), XV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» (м. Київ, 11 квітня 2017 р., м. Київ), IX науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Київ, 30...31 травня 2017 р.), VI Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ 25...28 вересня 2017 р.), міжнародному металургійному форумі «Наука та інновації» (м. Київ, 2...3 жовтня 2017 р.).

У повному обсязі робота доповідалась на кафедрі машин і технологій ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка» та кафедрі ливарного виробництва Національної металургійної академії України.

**Публікації.** Основні матеріали та результати дисертації викладені в 43 публікаціях, з них 1 монографія (у співавторстві), 21 стаття (зокрема 11 без співавторів) у наукових фахових виданнях України та іноземних держав, що входять до міжнародних наукометричних баз (зокрема 2 – у Scopus, 14 – у Index Copernicus та/або Google Scholar), та 21 публікація в матеріалах і тезисах конференцій. Перераховані публікації не містять матеріалів кандидатської дисертації здобувача.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, шести глав, загальних висновків, списку із 300 використаних джерел та 7 додатків. Загальний обсяг становить 330 сторінок, у тому числі 270 сторінок основного тексту, містить 34 таблиці, 85 рисунків.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність зазначеної наукової проблеми, показано взаємозв'язок роботи з науковими програмами, наведені мета і задачі дослідження, розглянуто об'єкт і предмет дослідження, а також

використані методи дослідження, викладено наукову новизну, практичну цінність результатів, їх апробацію, впровадження у виробництво та учбовий процес.

**Перший розділ** присвячений аналізу сучасного стану питання про вплив технологічних параметрів виробництва чавунних виливків на формування структури та графітної фази і розгляду основних етапів розвитку теоретичних основ в цій області. Проаналізовано результати робіт провідних вчених (Н. Г. Гиршовіча, К. П. Буніна, Ю. М. Тарана, А. В. Черновола, К. І. Ващенко, А. О. Жукова, В. С. Шуміхіна, О. О. Баранова, О. В. Соценко, А. М. Верховлюка, Д. Н. Худокормова, Е.І. Маруковича, D. M. Stephanescu, H. Mottoggh, T. Skaland та ін.) у галузі вивчення процесів формоутворення графіту при кристалізації з рідкого металу та при виділенні у твердому стані. Розглянуті численні гіпотези і теорії, пов'язані з дослідженнями зародження, утворення та формування графітної фази різної морфології у чавунах.

Вивчено підходи до вирішення завдань управління структурою та морфологією графітної фази у чавунних виливках з метою забезпечення необхідного рівня їх властивостей. Проблема керування структурою та графітовою фазою у чавунах залишається актуальною на даний час за багатьох причин. По-перше, в чавунах сильно проявляються так звані «спадкові» властивості від шихтових матеріалів. По-друге, завдання розробки єдиної теорії формоутворення графіту є до теперішнього часу повністю не вирішеною внаслідок відсутності чіткого уявлення про зародкову фазу, гетерогенність чи гомогенність утворення графіту. По-третє, багатofакторність впливу на процеси графітизації, які майже не можливо розглядати окремо. Як наслідок, відсутність єдиної теорії кристалізації графіту у чавуні не дозволяє пояснити усе різноманіття морфології графітної фази. Виходячи з аналізу досліджень, проведених в даних напрямках, вирішення означених завдань слід шукати шляхом вивчення фізико-хімічних умов формоутворення графітної фази, аналізу утворення високотемпературних сполук при взаємодії активних елементів з газовою фазою та їх впливу на процеси структуроутворення чавунних виливків.

Виходячи з цього сформульовано мету та задачі досліджень.

У **другому розділі** викладені основні методологічні положення роботи.

Матеріалом для досліджень було обрано сірі, високоміцні, ковкі та інші чавуни з широким спектром морфології графітної фази. Також додатково використовували вуглецеві та леговані сталі (ЕЗ, 25ХГСА, ШХ-15 та ін.).

У лабораторних умовах отримували спеціальні чавуни, використовуючи широкий спектр можливих шихтових матеріалів, плавильних агрегатів та обробок чавуну.

Дослідні плавки проводили в ливарній лабораторії Національного університету «Запорізька політехніка» в індукційних печах місткістю від 10 до 60 кг з основною та кислою футерівками. Також використовували високочастотну індукційну вакуумну піч ОКБ-869 та електрошлакове

переплавлення на установці А550У-02 із застосуванням стандартних та спеціальних флюсів.

В якості шихтових матеріалів використовували звичайні чушкові чавуни, марок Л1...Л5, сталевий брукт (Ст. 3), стандартні феросплави (феросиліцій ФС45, феромарганець ФМн78 та ін.), побічний метал (ПМ), що утворюється при виплавці титанового шлаку методом карботермічного збагачення ільменітового концентрату. Для отримання кулястого графіту застосовували нікель-магнієву лігатуру (15 % Mg, 0,6 % Се ), що попередньо виготовляли з електролітичного нікелю, первинного магнію та фероцерію під барієвим флюсом. Також випробували спеціальну дослідну лігатуру з відходів магнієвих сплавів із вмістом титану для отримання вермикулярного графіту. Для графітизуючого модифікування використовували низку добавок: феросиліцій ФС75, феросилікобарій ФС65Ba4, ФС65Ba17, МК-21г та ін.

Для синтетичного чавуну використовували сталеві заготовки (Ст. 3), спеціально підготовлені металеві брикети з порошку заліза (ПЖР 3) та малозольний тигельний графіт.

У виробничих умовах чавуни виплавляли за промисловими та вдосконаленими технологіями у вагранках (продуктивністю до 10 т/год), електродугових (ДСП-1,5; ДСП-6) та індукційних (ІЧТ-1; ІЧТ-2,5; ІЧТ-6) печах.

Для контролю хімічного складу, структури та властивостей чавуну відливали стандартні проби у піщані форми. Також чавуни заливали у металеві форми (відцентрове лиття) та відбирали за допомогою кварцових трубок безпосередньо з плавильного тигля або ковша. Вміст хімічних елементів в чавунах, визначали на сучасному обладнанні, з використанням спектрального, хімічного, кулонометричного та інших методів.

Металографічний аналіз зразків з чавуну та сталі проводили з використанням оптичних мікроскопів МІМ-7, «ZEISS. Epityp-2», Axiovert 200 М (Carl Zeiss), високотемпературного мікроскопа АЛА-ТОО ИМАШ 20-75. Графітову фазу оцінювали порівняльним методом згідно еталонних зображень (ГОСТ 3443, ISO 945) та за геометричними параметрами. Для цього використовували програмно-апаратний комплекс «ВидеоТесТ. Структура 5.0», прикладні програми типу Image Pro та ін. Геометричні параметри графітних вкраплень оцінювали за 20 найменуваннями, крім того застосовували також безрозмірні характеристики: фрактальну розмірність (Fractal Dimension), аспект (Aspect) та кулястість (Roundness).

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили за допомогою електронних растрових мікроскопів SUPRA 40 WDS (Carl Zeiss) та JSM-6360 з приставками INCA 350 Oxford Instrumentals та JED 2300 відповідно.

Петрографічні дослідження виконували у віддзеркаленому світлі на мікроскопі МБІ-6 при збільшеннях 90...1900. Вивчали морфологію (форму, розмір, мікроструктуру, рельєф, колір, віддзеркалену здатність, структури розпаду, топографію - розподіл у металі – на шліфі та інші властивості) графітних та неметалевих вкраплень. Екстрагування вкраплень кулястого

графіту та інших неметалевих вкраплень з поверхні шліфа здійснювали за допомогою препаратурської голки під стереоскопічним мікроскопом МБС-2. Оптичні властивості виділених вкраплень визначали з використанням стандартних наборів імерсійних препаратів на кристалооптичному мікроскопі МІН-8 при збільшеннях 100...1000.

Оптичні властивості надають найбільш наочні дані про фізико-хімічну природу різних сполук (оксидів, карбідів та ін.): зміна прозорості, зафарбованості, і відповідно, величини показників світлопереломлення. Ці показники фіксуються з високою точністю. Визначення оптичної константи — показника світлопереломлення ( $N$ ) можливо з точністю до  $\pm 0,001$  од.

Міжфазні поверхневі властивості графіт – розплав досліджували в атмосфері аргону методом лежачої краплі.

Газовий аналіз проводився на установках Лесо в атмосфері інертних газів.

Математичну обробку експериментальних даних здійснювали з використанням методів кореляційного та регресивного аналізу за допомогою сучасних засобів обчислювальної техніки застосовуючи стандартні та спеціально розроблені прикладні програми.

**Третій розділ** присвячений теоретичним й експериментальним дослідженням графітоутворення у чавунах та формування вкраплень графіту пластинчатої, кулястої та інших форм. Виявлено, що субоксиди заліза, магнію, кремнію та інших елементів беруть активну участь у формуванні вкраплень графіту у чавунах. Також встановлено морфологічні різновиди графіту, з яких складаються його вкраплення у графітізованих чавунах.

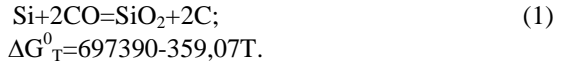
Враховуючи особливість кристалічної структури графіту, більшістю спеціалістів вважається, що визначальна роль у формоутворенні графітної фази належить дії поверхнево-активних елементів у рідкому розплаві та змінам міжфазної енергії.

Технічні чавуни уявляють собою залізовуглецеву систему з різними технологічними домішками та газами (Si, Mn, S, P, O, N, H та ін), деякі з них мають яскраво виражені поверхнево-активні властивості.

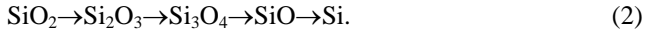
Беззаперечно, найбільш впливовим, елементом на графітизацію чавуну є кремній, який має високу спорідненість до кисню, підвищує активність вуглецю, суттєво змінює фізико-хімічні властивості рідкого розплаву, поверхневий натяг та міжфазову енергію.

Так спеціально проведеними дослідженнями заевтектичного синтетичного чавуну з 5 % вуглецю встановлено, що фракційне додавання кремнію (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 %) у розплав сприяє лінійному зростанню величини кута змочування (з  $107^\circ$  до  $136^\circ$ ) та поверхневого натягу (до 508 мДж/м<sup>2</sup>). При цьому може утворюватися велике різноманіття морфології графітної фази у сірих чавунах, що пов'язано з протіканням певних реакцій.

Так, при високій температурі ( $1300...1360^\circ\text{C}$ ), кремній досить активно може взаємодіяти з окисом вуглецю.



Але з практики виробництва феросплавів, у відповідності з принципом А. А. Байкова відомо, що у системі  $\text{SiO}_2 - \text{Si}$  перетворення відбувається через ряд послідовних стадій:



Таким чином реакція (1) є сумарною, яка відбувається через ряд проміжних, з яких найбільш ймовірно є наступна



Ця реакція протікає дуже бурхливо та може супроводжуватися навіть викидами. В результаті такої взаємодії утворюється пароподібний монооксид кремнію ( $\text{SiO}$ ) і первинні кристали графіту (рис. 1).

Нижчий оксид кремнію  $\text{SiO}$  є стабільним у пароподібному стані та метастабільний у твердому. За кольором і відбивною здатністю графіт та монооксид кремнію дуже близькі і тому погано помітні на шліфі у відбивному світлі. У прохідному світлі, окис кремнію досить легко ідентифікується за характерним буро-червоним забарвленням і високими показниками світлопереломлювання ( $N_q = 2,15$  і  $N_p = 2,06$ ).

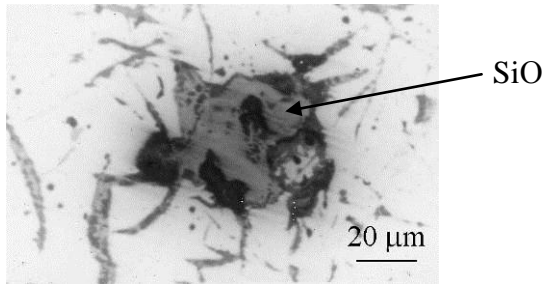


Рисунок 1 – Монооксид кремнію у чавуні з пластинчатим графітом

Утворення монооксиду кремнію іншими авторами спостерігалось у кремнистих електротехнічних марках сталі (Э3), у яких були виявлені скловидні силікатні глобулі. У чавунах газоподібний монооксид кремнію сприяє створенню поверхні розділу у розплаві рідкого чавуну, на якій і відкладається вуглець у вигляді графіту. Потім, при охолодженні, газоподібний монооксид кремнію може дисоціювати за реакцією (4) з утворенням оксиду кремнію (IV) та корольків металевого кремнію:



В певних умовах (наприклад, при високому вуглецевому еквіваленті, більше 4,3 %, недостатній температурі металу, крупній фракції модифікатору та ін.) взаємодія кремнію з окисом вуглецю відбувається з утворенням монооксиду кремнію та карбіду кремнію (реакція С. А. Кукушкіна):



Ця реакція може відбуватися в умовах недолику кисню при температурах 1100...1300 °С. Наявність високотемпературного карбіду кремнію збільшує твердість чавуну, погіршує здатність до полірування при виготовленні шліфів (рис. 2). Петрографічними дослідженнями встановлені високі показники світлопереломлення ( $N_q=2,697$ ;  $N_p=2,654$ ), характерні для карбіду кремнію. Утворенням карбіду кремнію замість графіту приводить до зменшення його кількості та розмірів вкраплень, тобто до зниження ефекту графітизації.

На практиці утворення багатої кількості поверхнево-активних силікатів, карбідів кремнію та твердих розчинів  $\text{SiO} - \text{SiO}_2$ , може відбуватися при неповному розчинення кремнію у розплаві внаслідок крупної фракції модифікатору або недостатньої температури розплаву.

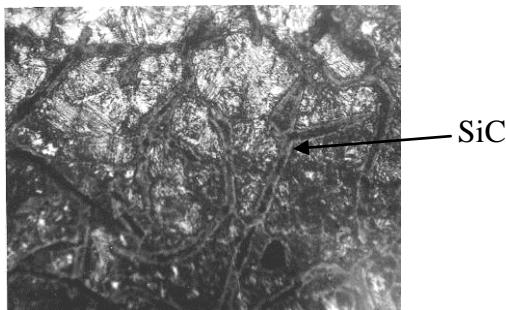
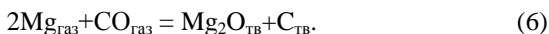


Рисунок 2 – Карбіди кремнію у чавуні з пластинчастим графітом

Встановлено, що у сірому чавуні швидкість і інтенсивність протікання реакції (3) безпосередньо впливає на морфологію пластинчастого графіту. При введенні кремнію у рідкий чавун, а також в інтервалі між ліквідусом і солідусом, можуть утворитися декілька морфологічних форм вкраплень графіту: розеткова, прямолінійно-пластинчаста, гілляста, червоподібна та ін. Ці форми утворюються в різні періоди зниження температури, зміни фізико-хімічних властивостей розплаву і, відповідно, зміни активності реакції (3).

Таким чином, формоутворення вкрапель графіту у сірих чавунах залежить від швидкості та інтенсивності протікання реакції взаємодії кремнію з окисом вуглецю, утворення поверхнево-активного монооксиду кремнію та його впливу на міжфазову енергію структурних складових чавуну.

При модифікуванні чавунів магнієм також утворюються з'єднання зниженої валентності. Взаємодія магнію з окисом вуглецю протікає досить інтенсивно, з «вибухом» і утворенням газової бульбашки, оболонка якого складається з метастабільною субоксиду магнію за реакцією:



Тобто, аналогічно з попереднім механізмом, утворюється не оксид, а субоксид магнію, що був виявлений у чавунах (рис. 3).

Субоксид магнію був світло-сірого кольору зі слабим зеленуватим відтінком, напівпрозорий, ізотропний, що мав показник світлопереломлення  $N=1,770$  та вище. На відміну від субоксиду, оксид магнію ( $\text{MgO}$ ) відрізняється кубічною кристалічною структурою, є прозорий, ізотропний, з показником світлопереломлення  $N=1,737$ , що відповідає стехіометричному складу та легко визначається у прохідному світлі.

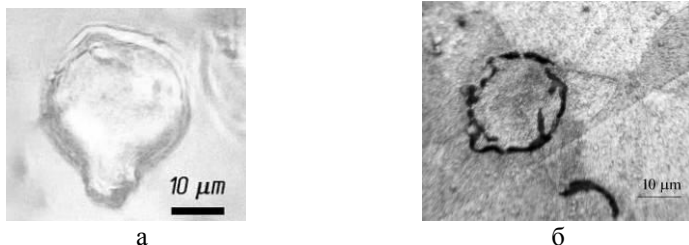
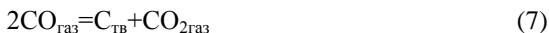


Рисунок 3 – Субоксид магнію у високоміцному чавуні:  
а – у прохідному світлі; б – у відбівному світлі

Оксид вуглецю, досягнувши порожнини бульбашки, диспропорціонує - розпадається на графіт і газ  $\text{CO}_2$  за реакцією:



Такий графіт, у міру надходження  $\text{CO}$  заповнює весь або майже весь обсяг газової бульбашки.

Специфічність реакції (6) полягає в тому, що внаслідок реакції двох газоподібних речовин утворюється оксид магнію нижчої валентності, молярний об'єм якого менш суми молярних об'ємів магнію та кисню. Це спричинює порушення суцільності розплаву і виникнення пор, у яких утворюється зародок графіту.

Розміри цих пор та дефектів, що викликані зменшенням об'єму, повинні бути більше критичного розміру зародку графіту.

Проведеними розрахунками доведено, що при невисокому переохолодженні (до 10 °С) теоретичний розмір зародку графіту є нанорозмірним і складає  $(20 \dots 40) \cdot 10^{-9}$  м, що є значно меншим ніж розмір пор, які утворюються при порушенні суцільності розплаву за реакціями (3) та (6). Повнота протікання цих реакцій і обумовлює високу різноманітність морфології графітної фази.

**Четвертий розділ** присвячений порівняльному дослідженню графітної фази, що утворюється у чавунах в різних умовах: кулясті вкраплення графіту у чавунах, які оброблено магнієм; вкраплення графіту, що витісняються під час кристалізації та відкладаються у порах і раковинах (газових та усадкових); графітна піна (спель), яка виділяється з первинного доменного чавуну та ін. Отримані нові дані про будову графітних вкраплень, з'ясовано також їх фрактальна природа.

Виконані дослідження показали, що форма вкраплень графіту в чавунах після обробки модифікаторами, а також форма графітних комплексів, що виділяються на поверхні усадкових раковин, а також з рідкого доменного чавуну є дуже схожими.

У перерізі шліфа високоміцного чавуну спостерігають найчастіше шість або більше секторів, що утворюють кулясте вкраплення графіту (рис. 4 а). Мікроструктура таких вкраплень є гетерогенною та складається з великої кількості пакетів-агрегатів кристалів графіту різної форми, розмірів, з різними оптичними і фізико-хімічними властивостями, які добре виявляються та визначаються у прохідному світлі в імерсійних препаратах. Так, екстраговані з поверхні шліфа частинки графіту є дуже різноманітними за формою й оптичними властивостями. Деякі з них (тонкі пластинчасті кристали графіту шестигранної форми) світло-сірого кольору, прозорі, оптично анізотропні з високим показником світлозаломлення 1,98...2,03. Інші пакети-агрегати кристалів графіту сірого кольору, ізотропні, непрозорі з матовою поверхнею (рис. 4 б). Поряд з відміченими формами присутні інші комбінації шестиграних агрегатів, а також частинки без кристалографічних границь або плівкові, чорного кольору з металопоподібним блиском.

Витіснення атомів вуглецю з рідкого чавуну та відкладання їх у порах та раковинах утворює майже таку кулясту форму вкраплень графіту, яка спостерігалася у металевій матриці модифікованого магнієм чавуну. За морфологічними ознаками ці вкраплення є ідентичними (рис. 4 в). Дослідження кристалів кіш-графіту (спелі) та екстрагованих вкраплень з поверхні шліфа також виявляє їх подібність, причому ці полікристали мають переважно гексагональну форму та шарувату структуру (рис. 4 б, г).

Тому можливо припустити, що утворення кулястих вкраплень відбувається відповідно власній гексагональній природі графіту. Кристали та вкраплення графіту за різним масштабним фактором мають самоподібність.



Основними будівельними блоками як двомірних (пластинчатих) так і об'ємних (кулястих) графітних вкраплень є гексагональні шарові пластини.

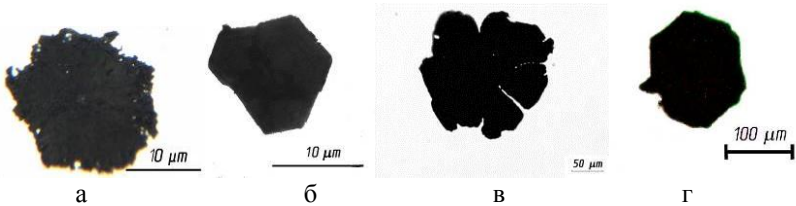


Рисунок 4 – Форма вкраплень графіту в чавунах:

а – вкраплення на шліфі з високоміцного чавуну (ВЧ500-2), (світло - відбивне); б – вкраплення екстраговане з поверхні шліфа, комбінація шестигранних агрегатів графіту (світло - прохідне); в – вкраплення екстраговане з усадкової раковини злитка високоміцного чавуну (світло - прохідне); г – вкраплення спелі доменного чавуну (світло - прохідне)

Власне самоподібність є основною ознакою фрактальної будови графітних вкраплень у чавунах, що знайшло підтвердження у роботах інших дослідників: проф. Соценко О. В., Макаренко К. В., Stephanescu D. M. та ін.

Для подальшого розвинення цієї теорії також зроблено порівняльну морфологічну оцінку графітних утворень, які можна спостерігати у чавунах.

Для прикладу досліджувалися високоміцні чавуни, що були отриманні в лабораторних умовах з використанням звичайних шихтових матеріалів, а також синтетичні сплави, що були отриманні за допомогою особливо чистих шихтових матеріалів.

Графітові вкраплення у дослідних чавунах, тобто їх бінарні зображення представлені на рис. 5. Морфологічних показників графітних вкраплень в дослідних чавунах : фрактальну розмірність лінії, що огинає графітове вкраплення (Fractal Dimension), аспект (Aspect) та кулястість (Roundness) представлено у табл. 1.

Таблиця 1 – Морфологічні показники вкраплень графіту у дослідних чавунах (рис. 5)

Графітове вкраплення, згідно рис. 5	Морфологічні показники		
	Аспект	Кулястість	Фрактальна розмірність
а	1,06	3,48	1,12
б	1,02	1,88	1,04
в	1,05	3,74	1,09
г	1,04	2,21	1,01

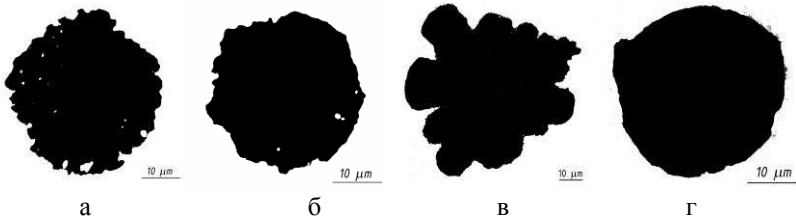


Рисунок 5 – Графітові вкраплення у дослідних чавунах (бінарні зображення):

а – у лабораторному високоміцному чавуні, отриманому на чушкових чавунах у піщаних формах; б – у промисловому чавуні марки ВЧ 500-2, отриманому на чушкових чавунах і відцентровим методом; в – у лабораторному синтетичному високоміцному чавуні, отриманому на шихтових матеріалах підвищеної чистоти; г – промисловий синтетичний чавун для виливка “Супорт”, отриманий на сталевих відходах у піщаній формі

Так найбільш високі значення геометричних параметрів вкраплень графіту спостерігалися у заевтектичного лабораторного чавуна отриманого у піщаних формах (рис. 5 а). Високі показники пояснюються спотворенням кулястих вкраплень внаслідок високого вмісту сірки – активного деглобуляризатора. Також високі значення морфологічних показників були у синтетичного лабораторного чавуну, що був виплавлений на шихтових матеріалах підвищеної чистоти і кристалізувався з високою швидкістю. Вкраплення графіту мають спотворену дедритоподібну форму, іноді вони уявляють собою зростки декількох куль (рис. 5 в).

Зразки промислового чавуну марки ВЧ500 – 2, що кристалізувався у металевій відцентровій формі має найменші за розмірами вкраплення кулястого графіту, що рівномірно розподілений у металевій матриці. У нього спостерігаються майже правильні кулясті вкраплення (рис 5 б). Найменшу фрактальну розмірність та невеликі інші геометричні показники мали вкраплення графіту у промисловому синтетичному чавуні (рис. 5 г). Такий чавун має низький вміст домішок, що негативно впливають на формування кулястої форми вкраплень графіту – сірки, титану, алюмінію, сурьми та ін. Також повільна кристалізація чавуну у піщаній формі сприяє формуванню правильної кулястої форми графіту.

Таким чином підтверджено, що фрактальна розмірність може слугувати кількісним показником вкраплень графіту у чавунах і характеризувати умови утворення та формування графіту. Підвищенні значення (більше одиниці) вказують на спотворення кулястої форми вкраплень графіту і тим більше чим більше це значення. Це може вказувати на недостатню кількість модифікатора або наявність у складі чавуну елементів — демодифікаторів.

Вкраплення графіту з високими показниками фрактальної розмірності можуть вказувати на занадто високу швидкість кристалізації. Отриманні характеристики дають можливість оцінити морфологію графіту, вдосконалити технологічний процес отримання високоміцних чавунів та прогнозувати експлуатаційну надійність литих виробів.

Взагалі морфологія кулястих вкраплень графіту, що спостерігається у чавунах, відрізняється великою різноманітністю будови центральної і периферійних зон, наявністю пір і розривів, присутністю сторонніх фаз і з'єднань

Утворений графіт містить частинки таблітчастої форми (агрегати тонких листочків, прямокутних або шестикутних пластинок) та безліч дрібних частинок різної форми. Найтонші пластини графіту світло-сірого кольору прозорі, анізотропні, показник світлопереломлювання  $N = 1,98$  і вище. Агрегати таких пластин непрозорі, ізотропні, сірого кольору з матовою поверхнею. Деякі пластини і агрегати пластин графіту, що цікаво, магнітні або слабомагнітні. У перетині шліфа розподіл цих агрегатів спостерігається по шести або більше сегментах, починаючи від периферії (відкладаються великі таблітчасті кристали), до центру - дрібні частинки графіту. Потім, у міру надходження окису вуглецю, таблітчасті кристали щільно відкладаються по всьому периметру газової бульбашки, формуючи, таким чином, кулясту форму графіту і заповнюючи її повністю або частково.

Повне заповнення газового бульбашки здійснюється при вільному доступі окису вуглецю - коли відкритий канал живлення, а часткове - коли канал живлення перекритий конденсатом газової фази, розчиненої в рідкому чавуні. Збільшуючись в обсязі бульбашки графіт поступово витісняє газову фазу ( $\text{CO}_2$  та інші гази), що призводить до розриву оболонки бульбашки і, відповідно, до утворення хвилястого або зигзагоподібного контуру вкраплення графіту кулястої форми. Нерідко розриви проходять більш глибоко - на межі того чи іншого сегмента, розриваючи їх повністю або частково.

Значний інтерес становлять вкраплення графіту, в яких не завершився процес сфероїдизації. У таких вкрапленнях виявлений конденсат субоксидів інших елементів (кальцію, алюмінію, кремнію), що розчиняються у рідкому чавуні та перешкоджають повному формуванню кулястих вкраплень графіту.

Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено, що нестехіометричні сполуки заліза, кремнію, магнію та ін. елементів (субоксиди) приймають активну участь при формуванні вкраплень графіту у чавунах.

Наявність субоксидів кремнію, магнію та ін. елементів також пояснює, чому при перерахунку даних хімічного аналізу, дуже часто спостерігається підвищена сума окислів (більше 100 %). Такий перерахунок роблять на стехіометричні оксиди ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та ін.), і якщо сума таких окислів більше 100 % вважають за похибку аналізу.

Для з'ясування внутрішньої будови вкраплень графіту проводили спеціальні дослідження на синтетичному чавуні, що був отриманий на чистих шихтових матеріалах. На рис. 6 наведені злами зразків синтетичного чавуну, що показують внутрішню будову графітних вкраплень.

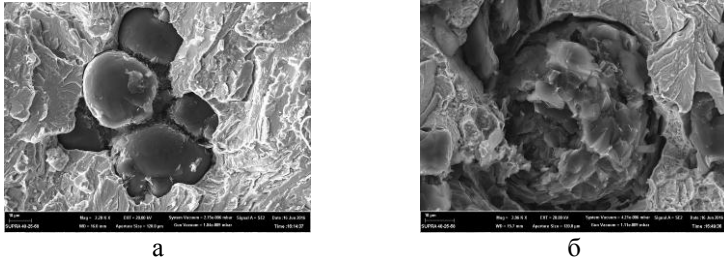


Рисунок 6 – Вкраплення графіту на зламах синтетичного чавуну (5%; C):  
 а – зовнішня поверхня вкраплень графіту;  
 б – внутрішня будова вкраплень графіту

Дослідження графітних вкраплень у синтетичних чавунах виявило їх аналогічну внутрішню будову, що спостерігалася у високоміцних чавунах, виплавлених на звичайних шихтових матеріалах. Встановлено, що у вкрапленнях графіт має таблітчасту форму і складається з безлічі дрібних частинок різної форми. На периферії вкраплень графіту відкладалися крупні таблітчасті кристали, у а центрі – дрібні.

Пластинки, нашаровуючись одна на іншу, утворюють пакети – агрегати різної форми. Ці агрегати вже непрозорі, ізотропні сірого кольору з матовою поверхнею. Найбільш розповсюджена, що часто спостерігалася, була шестигранна форма. При цьому, одні з таких агрегатів мають рівновеликі грані, нерідко наближаючись до округлості (кола), інші – різновеликі. Останні утворюють різні комбінації – призми з пірамідальними вершинами.

Поряд з відміченими шестигранними формами присутні і інші, у тому числі неправильні – частинки без кристалографічних контурів або плівкові з металопоподібним блиском.

Виявлено три морфологічних різновиди форми графіту, що спостерігаються у високоміцних чавунах: чітко огранована кристалічна, агрегати кристалів різної форми та плівкова (прихованокристалічна).

**У п'ятому розділі** викладені теоретичні й експериментальні результати створення наукових і теоретичних основ впливу технологічних параметрів (хімічного складу, умов виплавки, шихтових матеріалів тощо) на структуруоутворення та властивості чавунів.

З даних наведених у четвертому розділі результатів з'ясовано, що при високих температурах у рідкому чавуні можуть утворюватися різні субоксиди, які здатні суттєво впливати на морфологію графіту. Тому

особливу зацікавленість викликає дослідження залежності морфології графіту від газонасиченості та умов виробництва. Причому значення часто має не стільки абсолютний вміст газів, скільки їх стан або форма знаходження у чавунах.

Вивчали вплив вмісту газів на структуроутворення чавунів різних типів (білого, сірого, ковкого, високоміцного), що були виплавлені у різних плавильних агрегатах (вагранках, дугових і індукційних печах).

Рівень газонасиченості ковкого чавуну вимірювався у початковому стані, безпосередньо під час виплавки (у білому чавуні) та у готовому стані – після відпалу (у ковкому чавуні).

Встановлено, що найбільшу концентрацію у чавунах з усіх газів має азот: 0,01...0,016 % у білих і ковких та 0,005...0,008 % у сірих. Причому менші значення концентрації азоту відповідають умовам індукційної плавки. Водень у всіх чавунах мав найменший вміст і не перевищував 0,0003 %. Газонасиченість чавуну помітно змінюється при тривалому високотемпературному відпалу білого чавуну на ковкий, при цьому збільшується вміст азоту (до 0,016 %), а вміст кисню та водню навпаки знижується. Загальний вміст кисню у чавунах був також невеликим (0,005...0,001 %). Найбільші значення відповідають білому чавуну, менші – чавунам з графітною фазою. Як і слід було очікувати, вміст кисню у чавунах суттєво зменшується при модифікуванні магнієм і зміні пластинчатої морфології графіту на кулясту. Але загальний вміст кисню чавунах може коливатися у значних межах. В окремих випадках вміст кисню коливався від 10 ppm до 30 ppm (0,001...0,003 %) і навіть більше. Це, мабуть, пов'язано із залежністю від фізико-хімічних умов плавки (хімічного складу, температури металу, стану модифікатору тощо) та формою існування кисню у чавунах.

Для зменшення кількості факторів впливу додатково дослідження виконувалися на синтетичних чавунах зі зменшеною кількістю шкідливих домішок (фосфору та сірки) в порівнянні з промисловими чушковими чавунами (табл. 2).

Таблиця 2 – Хімічний склад дослідних чавунів

Вид чавуну	Хімічний склад, масова частка, %				
	вуглець	кремній	марганець	сірка	фосфор
Білий чавун	4,60	0,05	0,050	0,020	0,012
Сірий чавун	4,60	1,50	0,045	0,020	0,012
Високоміцний чавун	4,59	2,50	0,042	0,005	0,012

Плавку виконували у відкритій індукційній печі зі спеціально виготовленим графітовим осердям в алундовому тиглі діаметром 35 мм та висотою 100 мм. Після розплавлення шихти і досягнення металом температури 1450 °С до нього фракційно додавали кристалічний кремній та

нікель-магнієву лігатуру. Розмір фракції додавання складав 0,5...1,0 мм. Після засвоєння кожного додавання відбирали порцію металу за допомогою кварцових трубок діаметром 5 мм. Потім з відібраного металу виготовляли проби для газового аналізу та шліфи для металографічних та рентгеноспектральних досліджень.

Вміст кисню у дослідних чавунах наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Вміст кисню у дослідних синтетичних чавунах

Тип чавуну	Вміст кисню,		
	одиниці ppm	мас. частка, %	см <sup>3</sup> / на 100 г металу
Білий чавун	60	0,006	4,2
Сірий чавун	30	0,003	2,1
Високоміцний чавун	20	0,002	1,4

Для з'ясування переважного розподілу кисню між металевою основою та графітною фазою виконували також мікрорентгеноспектральний аналіз сірого та високоміцного чавунів.

Як видно з табл. 3, вміст кисню у чавунах суттєво зменшується під час додавання сильних розкислювачів – кремнію та магнію. Як і слід було очікувати, найменший вміст кисню спостерігали у чавунах з кулястим графітом (0,002 %). Але слід відзначити, що різниця між вмістом кисню у сірому чавуні була досить незначною (0,003 %), на відміну від білого чавуну (0,006 %).

Таким чином підтверджується, що між вмістом газів (особливо киснем) і формою вкраплень графіту існує взаємозв'язок. Одночасно, проявляється загальна тенденція зменшення кількості газів за збільшенням компактності вкраплень графіту.

Додатково виконаний локальний мікрорентгеноспектральний аналіз показав, що кисень головними чином, концентрувався у графітній фазі (до 7% у пластинчатих та до 3,5% у кулястих вкрапленнях), а у металевій матриці був майже відсутній. Інших газів у графітовій фазі не виявлено.

Також поверхнево-активним елементом у чавунах є сірка. У чавунах вплив сірки завжди розглядають разом із марганцем, який нейтралізує її шкідливий вплив і утворює сульфіді або оксисульфіді. Як вже відзначалося, у рідкому чавуні внаслідок високого вмісту сильних розкислювачів (насамперед, кремнію) існує дефіцит кисню та внаслідок цього створюються умови для виникнення оксидів зниженої валентності – Mn<sub>2</sub>O за аналогією з SiO, Mg<sub>2</sub>O та ін.

У високоміцних чавунах сірка вступає у взаємодію з магнієм. Іноді наявність концентраційних піків магнію та сірки у центрі кулястих вкраплень графіту дає змогу вважати, що саме сульфід магнію і є зародком кулястого

графіту. Проте наявність підвищених концентрацій магнію та сірки може спостерігатися необов'язково у центрі вкраплення, що було підтверджено проведеними дослідженнями.

Таким чином, не відкидаючи можливість утворення графітних вкраплень у чавунах на сульфідах марганцю (у сірих чавунах) чи магнію (у високоміцних чавунах), слід зазначити, що такий механізм не є єдино можливим. На наш погляд дія сірки є аналогічною дії іншого поверхневого елементу – кисню. Так, у сірих чавунах головну роль відіграє монооксид кремнію (SiO), а сірка за високої концентрації пригнічує його активність та зменшує розгалуженість пластинчатого графіту.

У високоміцних чавунах формування кулястих вкраплень відбувається також за участі збідненого за киснем поверхнево-активного монооксиду магнію (Mg<sub>2</sub>O). Сірка у разі її надвисокої концентрації (більше ніж 0,02 %) буде вступати у взаємодію з магнієм і заважати утворенню монооксиду магнію.

Усі процеси рафінування (наприклад, позапічна обробка шлаками або електрошлаковий перепад) чавуну, що пов'язані з очищення від кисню та сірки та створенням їх дефіциту у металі суттєво змінюють морфологію графітної фази.

За численними експериментальними даними вітчизняних і зарубіжних дослідників показано, що в чистих залізовуглецевих сплавах, виплавлених у вакуумі, створюється кулястий графіт без використання спеціальних додавань, які надають включенням графіту кулястої форми. Це може свідчити про те, що створення кулястої форми графіту притаманне власне природі графіту, а домішки, насамперед кисню, сірки та ін., пригнічують утворення такого його формоутворення. Таким чином, роль елементів, що сприяють сфероїдизації графіту у промислових чавунах з високим вмістом домішок часто пов'язують з рафінуванням розплаву, видаленням сірки, кисню та інших шкідливих елементів.

Тому для з'ясування цього провели серію експериментів з визначення утворення графіту при плавці чавуну у вакуумі та при електрошлаковому перепаді, при яких відбувається очищення від шкідливих домішок (S, O та ін.).

Плавку синтетичного чавуну проводили у високочастотній індукційній вакуумній печі ОКБ-869 в алундових тиглях, діаметром 35 мм та висотою 100 мм. Тиглі вставляли у спеціально виготовлений графітовий блок. Базовий хімічний склад сплаву (мас. частка, %): 0,05 C; 0,05 Si; 0,04 Mn; 0,012 P; 0,005 S. Вміст вуглецю змінювали з 0,05 до 5,0 % за допомогою додавання малозольного графіту (фракції 0,1...0,2 мм) з метою отримання доевтектичного (3,5 %C), евтектичного (4,3 %C) та заевтектичного (5 %C) чавунів. Після розплавлення шихти і досягнення металом температури 1450 °C сплави утримувалися 5 хвилин та за допомогою спеціального механізму графітовий блок виводився із зони індуктора і охолоджувався разом з алундовими тиглями під вакуумом до кімнатної температури. Залишковий

тиск складав  $2 \cdot 10^{-2}$  мм. рт. ст. (2,67 Па). Швидкість охолодження зразків складала близько 50 °С/хв. Після повного охолодження затверділи зразки сплавів вилучали з тиглів та піддавали дослідженню.

Для синтетичного чавуну були характерні деякі відмінності у морфології графітної фази, що наведені у табл.4.

Таблиця 4 - Оцінка структури дослідних чавунів згідно ГОСТ 3443 – 87

Тип чавуну	Показники структури за графітом			
	форма	розміри	розподіл	кількість
Доевтектичний	ПГф1	ПГд25 - 45	ПГр4	ПГ4
Евтектичний	ПГф1	ПГд90	ПГр1	ПГ10
Заевтектичний	ПГф1	ПГд180	ПГр1	ПГ10

Графітні пластинки відрізнялися прямолінійністю, рівномірним розподіленням, меншою розгалуженістю та кількістю, мали дещо збільшені розміри (довжину). Такі особливості можна пояснити меншим опором дифузії вуглецю та інших поверхнево-активних елементів, а також невисокою швидкістю охолодження металевого розплаву.

У дослідних зразках майже не були виявлені кулясті вкраплення, появу яких можна було очікувати, судячи з літературного огляду. Іноді можна було спостерігати тільки поодинокі компактні вкраплення. Ймовірно це можна пов'язати з недостатньою чистотою шихтових матеріалів, наявністю досить значної кількості сірки, фосфору і, особливо, кисню. Крім того для утворення кулястого графіту у чавуні необхідно дотримуватися також високої швидкості охолодження.

Але під час плавки відбувалися процеси, які викликали особливу зацікавленість і потребують додаткового роз'яснення. Під час розплавлення металу у вакуумі і наявності графітного карбюрзатору відбувалося інтенсивне розкислення металу. Як відомо у вакуумі вуглець набуває збільшеної спорідненості до кисню. Процес розкислення металу відбувався дуже енергійно і тим більше, чим більша кількість графіту знаходилося у тиглі. Тобто у заевтектичного варіанту складу спостерігалось найбільш виражене розкислення металу, що супроводжувалося навіть викидами крапель металу з тиглю. Такі втрати доходили до 10 % металу. Іноді краплі викидалися з плавильної зони, потрапляючи за межі індуктору. Після повного охолодження і відкриття плавильної камери ці крапельки металу були зібрані та піддані металографічному дослідженню.

Зацікавленість краплями цього металу була викликана тим, що цей метал був розкислений (рафінований від кисню) та швидкоохолодженим (бо був дуже швидко винесений з плавильної зони). Тобто в цьому випадку було забезпечено сприятливі умови для утворення кулястого графіту.



Були виявлені окремі поодинокі кулясті вкраплення графіту (рис. 7 а), а також спостерігалися незаповнені графітом кулясті оболонки (рис. 7 б).

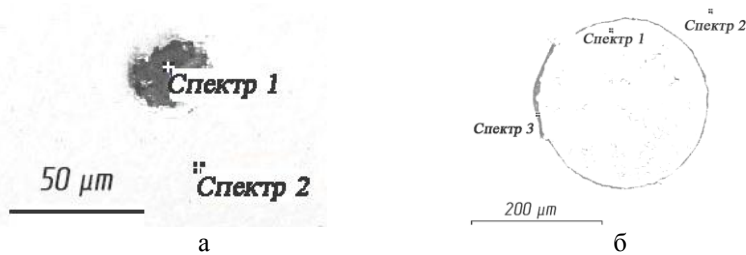


Рисунок 7 – Місця локального мікрорентгеноспектрального аналізу дослідного чавуну:

а – кулясте вкраплення графіту; б – незаповнені графітом глобулі

На подібні глобулі вказували також інші дослідники, але причина їх появи не з'ясована. На наш погляд, це опосередковано може підтверджувати гіпотезу про утворення кулястих вкраплень у різних розривах суцільності розплаву, порах та бульбашках газу.

Точковий мікрорентгеноспектральний аналіз стінок оболонок виявив наявність вуглецю та кисню (рис. 7 б та табл. 5, 6).

Таблиця 5 – Результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу дослідного чавуну (рис. 7 а)

Точка аналізу, згідно рис. 7 а	Вміст елементів, %		
	вуглецю	кисню	заліза
1	89.92	6.20	3.88
2	6.37		93.63

Таблиця 6 – Результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу дослідного чавуну (рис. 7 б)

Точка аналізу, згідно рис. 8 б	Вміст елементів, %		
	вуглецю	кисню	заліза
1	2.53	-	97.47
2	1.04	-	98.96
3	73,36	24,33	2,31

Як видно, дрібні пори (5...45 мкм) були повністю заповненими графітом (рис. 7 а), а більш крупні бульбашки (більше 200 мкм) зберегли тільки оболонку та залишилися незаповненими (рис. 7 б). Вірогідно вони видалялися з металу при плавленні і розкисленні.

За фізико-хімічною теорією швидкість спливання  $v$  (см/сек) бульбашок діаметром менш 0,1 мм підкорюється відомому закону Стокса, тобто дорівнюється спливанню сферичних твердих частинок. При більших розмірах відбувається відхилення від цього закону. Приймаючи динамічну в'язкість за постійну величину, що дорівнює 0,03 г/(см·сек), та нехтуючи щільністю газу СО отримуємо залежності швидкості спливання бульбашок (рис. 8) при постійній температурі досліду (1450 °С).

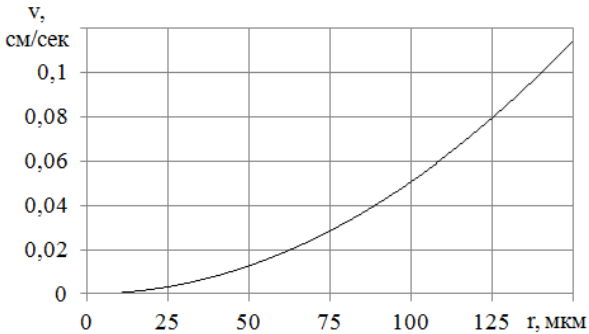


Рисунок 8 – Теоретична залежність швидкості видалення бульбашок з синтетичного чавуну при плаві у вакуумі при постійній температурі (1450 °С)

Тобто судячи з результатів швидкість спливання великих бульбашок є дуже високою і вони видаляються з розплаву, не формуючи кулясту форму графіту. Таким чином, отриманні у роботі результати підтвердили можливість отримання кулястих вкраплень графіту при плаві чавуну у вакуумі на чистих шихтових матеріалах при забезпеченні високої швидкості його охолодження.

Очищення від неметалевих вкраплень, газів досягається також при електрошлаковій обробці чи переплавленні.

Встановлено, що після електрошлакового переплавлення морфологія графітної фази суттєво змінюється. Значно подрібнюється графітові вкраплення, фосфідна евтектика, подавляється «спадковість» структури чушкового чавуну.

Розподіл графітних вкраплень у сірому чавуні стає міждендритним точковим або характерним для графіту переохолодження. Крім того, спостерігається також графіт компактної форми. Структура металевої основи стає строго орієнтовною за фронтом кристалізації. Перлітні ділянки подрібнюються та стають більш дисперсними. Спостерігаються також грубі вкраплення цементиту.

Аналогічна тенденція спостерігається у високоміцному чавуні. Кулясті вкраплення графіту також подрібнюються, як і інші структурні складові. Спостерігається перетворення кулястої форми вкраплень графіту на вермикулярну дисперсну форму. Така структура утворюється внаслідок

високої швидкості кристалізації (більше 0,02 мм/сек).

Таким чином на основі численних експериментів впливу умов плавки, кристалізації, охолодження та обробок розплаву, встановлення закономірностей утворення субоксидних сполук активних елементів хімічного складу чавуну на формування графітної фази можна узагальнити у схемі наведені на рис. 9.

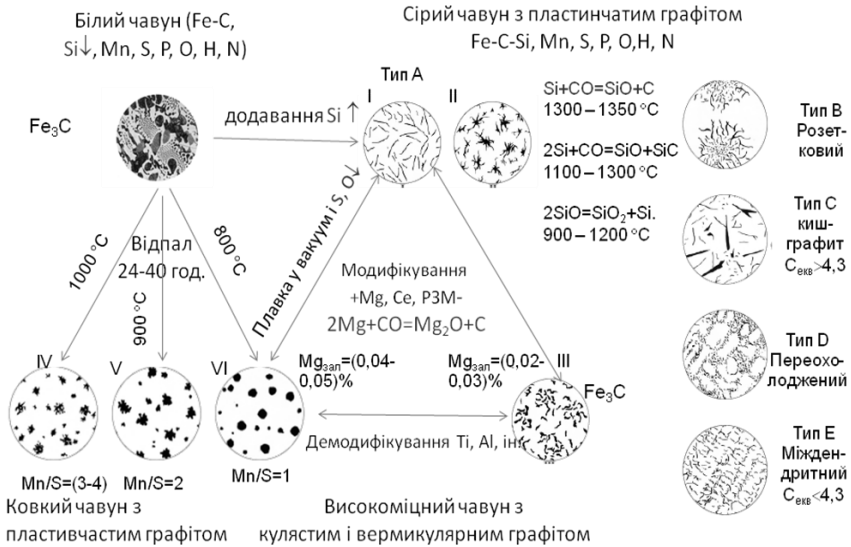


Рисунок 9 – Схема впливу технологічних параметрів чавуну на формування графітної фази

**Шостий розділ** присвячений промислового опробуванню та впровадженню результатів, отриманих у даній роботі, для виробництва високоякісних чавунних виливків різноманітного за призначенням, вагою, методу отримання та ін.

Незважаючи на те, що найбільш вживаним став спосіб безперервного розливання сталі, у ряді випадків, залишився спосіб отримання прокатних, а особливо, ковальських заготовок у виливницях.

Підвищення продуктивності прокатних станів та ковальських пресів передбачає збільшення висоти та маси злитків, тому питання модернізації та поліпшення якості виливниць залишається актуальною проблемою. Так на ВАТ «НТЗ» з переведенням технології виготовлення виливниць у металевих формах (кокілях) стійкість знизилась в середньому на 40%. Причому найменша стійкість спостерігалась у нових спроектованих високих виливницях, призначених для одержання восьмизаготовкових злитків для колісної сталі на заміну шестизаготовкових.

Результати досліджень показали, що зі збільшенням висоти виливниць (відношення висоти до діаметра внутрішньої порожнини становить  $3130/494=6,3$ ) виникає ще більший перепад температур за висотою (150...200 °С) і викликає більш високий торцевий ефект. Технологія лиття в кокіль, з піщаним стрижнем в середині, сприяє появі різномірних структур в стінках виливниць. Прискорене охолодження виливниць з сірого чавуну сприяє появі відбілювання і дрібного графіту. При такій структурі теплопровідність чавуну знизилася на 20%. Виливниці швидко виходять з ладу через утворення тріщин I і II роду. Вкрай нерівномірна виходить мікроструктура за перетином і висотою стінки виливниць, що також сприяє зниженню їх терміну експлуатації. Проведений металографічний аналіз зразків чавуну, вирізаних з виливниць, які вийшли з ладу, показав, що у всіх зразках, як по товщині, так і висоті виливниці спостерігаються вкраплення графіту різної форми: від виділень графіту точкової і ниткоподібної форми - до пластинчастої завихреної з гніздоподібним розподілом і до пластинчастої з прямолінійною формою графіту і значною довжиною вздовж базисної площини. Довжина пластин графіту змінюється від декількох одиниць до декількох десятків і сотень мкм, а окремі пластини досягають 700...1000 мкм і більше.

Така різноманітність форм графіту знижує рівномірність мікрооб'ємів металевої основи і, з урахуванням підвищеної концентрації напружень на кінцях вкраплень, призводить до мікродеформації металу і утворення тріщин.

Для усунення неоднорідності структури чавуну по висоті і товщині стінки виливниць було запропоновано модифікування чавуну. Метою модифікування було вирівняти структуру чавуну, надати їй більшої однорідності з рівномірним прямолінійним графітом. Найбільш прийнятними модифікаторами для чавуну виливниць колісної стали виявилися ФС75 і алюміній в кількості 0,2...0,3%.

Також було оптимізовано хімічний склад за основними та домішковими елементами, склад шихтових матеріалів та технологію виплавки та заливки чавуну, вибрані технологічні параметри плавки, заливки та модифікування чавуну при виплавці у коксовій та газовій вагранках, спроектовано спеціальний бандаж для зміцнення чавунних виливниць; розроблено зміни до технологічних інструкцій щодо виробництва чавунних виливниць з метою покращення їх експлуатаційної стійкості.

Встановлено, що при відхиленні від оптимальних технологічних параметрів модифікування стійкість виливниць навпаки іноді погіршувалась внаслідок утворення висококремневих поверхнево-активних силікатів, карбідів кремнію і твердих розчинів на основі Fe-Si-C. Ці сполуки можуть утворюються в процесі неповного розчинення великої (10...15 мм) фракції модифікатора в розплаві чавуну. Найбільш високий ефект модифікування (утворення рівномірно-зернистою структури з наявністю рівномірно розподіленого графіту) досягається при повному розчиненні дрібної (2...8 мм) фракції модифікатора.

Промислова перевірка в умовах ВАТ «НТЗ» запропонованої технології показала доцільність її впровадження при виробництві колісних виливниць. Стійкість дослідних виливниць виявилася в 1,3...1,5 рази вище стійкості виливниць відлитих за традиційно прийнятої на заводі технології.

Також вдосконалено технологічні процеси виробництва чавунів з пластинчатою та кулястою формами вкраплень графіту для маслотної заготовок поршневих кілець, досліджено можливість використання відходів титанового виробництва та магнієвого лиття у якості шихтових матеріалів для плавки чавунів з різною формою вкраплень графіту, запропоновано раціональний хімічний склад та параметри структури чавунних заготовок поршневих кілець, що дозволило підвищити якість литва та знизити собівартість виливків.

На практиці кільця виробництва ТОВ «Твинс Сервіс» для двотактних двигунів виробництва «МОТОР СИЧ» не завжди відповідали високим вимогам до них і передчасно виходили за лад. Для з'ясування причин низької ресурсу поршневих кілець були проведені металографічні дослідження заготовок, а також кілець до і після експлуатації.

Проведено порівняльне дослідження геометричних параметрів вкраплень графіту у трьох шарах поперекового перерізу маслотної заготовки: зовнішньому, центральному, внутрішньому. Виявлено кількісну різницю у числі, розмірах, формі та шорсткості поверхні вкраплень графіту у центральному шарі вилівка та у шарах, що прилягають до її зовнішньої та внутрішньої поверхні.

Також досліджували декілька десятків аналогічно виготовлених поршневих кілець, що були у експлуатації на двотактних бензинових двигунах та вилучалися з них під час ремонту. Усі поршневі кільця працювали в алюмінієвих циліндрах з хромованим покриттям. Причинами ремонту найчастіше були падіння потужності двигунів та заклинювання поршню.

У табл. 7 наведені характеристики мікроструктури зразків чавунних поршневих кілець до і після експлуатації та показники їх твердості.

Як видно з наведених даних, мікроструктура поршневих кілець та стан графітної фази суттєво різняться, не зважаючи, що усі кільця були одного типорозміру, виготовлені за однією технологією та працювали на аналогічних двигунах бензопил.

Спостерігався кулястий графіт різної компактності, форми, розподілу та розмірів. Поряд з кулястим графітом в деяких кільцях спостерігався і вермикулярний графіт, частка якого могла складати більше 50 %.

Слід відмітити, що суттєвих змін у мікроструктурі поршневих кілець після експлуатації майже не спостерігалось, за деякими виключеннями. Такі зміни, вірогідно, можуть відбуватися тільки, якщо двигун перегрівався під час експлуатації.

Таблиця 7 – Структура та твердість типових поршневих кілець з високоміцного чавуну

Структура згідно	Показники структури				Твердість HRB, одиниці	
	за графітом			за металевою основою		
	форма	розміри	розподіл			кількість
ГОСТ 621	ШГф2 – ШГф5	-	ШГр1	-	сорбітоподібний дрібно пластинчастий перліт, троостомартенсит, бейніт,	98-112
дослідна	ШГф3-5; ВГф3	ШГд15-25	ШГр1-2; ВГр1	ШГ6; ВГ70	троостомартенсит; сорбітоподібний перліт та ферит	105-109; 100-105

Примітка. Різниця показників твердості в межах одного кільця згідно ГОСТ 621 не повинна перебільшувати 4 одиниць HRB.

Аналогічно видно, що експлуатація майже не змінює твердості кілець. Найбільша різниця, більше 4<sup>оx</sup> одиниць HRB, спостерігалася тільки у кільці зі структурними змінами. Структура поршневих кілець до і після експлуатації була троостомартенситною або сорбітною. Зустрічалася також бейнітна структура.

Якщо двигун перегрівався до високих температур, то спостерігалася наявність вже структур розпаду та поява певної долі фериту. Суттєве перегрівання поршневих кілець може відбуватися в разі їх поганого прилягання до стінок хромованого циліндру, в результаті чого вони пропускають вихлопні гази та погано віддають тепло циліндру.

Як показали додатково проведені дослідження та за даними інших авторів температура у зоні поршневих кілець при нормальних умовах експлуатації не перевищує 300...350 °С. Тому зміни у структурі та твердості майже не відбуваються або відбуваються дуже повільно. При перегріві двигуна, які можуть бути викликані відхиленнями у експлуатації (нестачею змащування, детонацією, проривом вихлопних газів тощо), відбувається розпад мартенситу, перліту або інших метастабільних структур, що містять цементит, відбувається падіння твердості, погане прилягання до стінок циліндру, знижується компресія та відбувається падіння потужності двигуна. В крайньому випадку можливо руйнування кільця та заклинювання поршню.

Таким чином високоміцний чавун з перлітною або троостомартенситною структурою та рівномірно розподіленим кулястим графітом при нормальних умовах експлуатації забезпечує необхідний ресурс двотактних бензинових двигунів.

Впровадження результатів роботи дозволило вдосконалити технологічні процеси виробництва чавунів з пластинчатою та кулястою формами вкраплень графіту для маслотної заготовки поршневих кілець, забезпечити використання раціонального хімічного складу та параметрів структури

чавунних заготовок поршневих кілець, дозволило підвищити якість литва та забезпечити значний економічний ефект.

## ВИСНОВКИ

В дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення важливої науково-технічної проблеми, що виявляється у розвитку теоретичних основ впливу технологічних параметрів виробництва чавунних виливків на їх структуру та властивості шляхом наукового обґрунтування закономірностей формування графітної фази внаслідок утворення субоксидних сполук при фізико-хімічних реакціях, що відбуваються при плавці та позапічній обробці чавунів, з метою отримання литих виробів з високими експлуатаційними властивостями для різних галузей машинобудування.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють зробити ряд основних висновків:

1. На основі аналізу науково-технічної літератури показано, що дослідження, спрямовані на розвиток теоретичних основ керованого впливу технологічних параметрів лиття на структуру виливків з сірих чавунів, включаючи розподілення, розміри та форму графітних вкраплень та інших фаз, для покращення властивостей литих виробів відповідно вимогам їх застосування є актуальними.

2. Встановлено, що у чавунах, які містять (мас. частка, %) 2,5...4,0 вуглецю, 1,9...2,8 кремнію, 0,1...1,0 марганцю, 0,01...0,30 фосфору, 0,01...0,12 сірки та до 0,5 магнію, кисень утворює не тільки вищі оксиди, але і нижчі – субоксиди. Показано що:

- у сірому чавуні взаємодія кремнію з окисом вуглецю призводить до утворення монооксиду кремнію та первинних кристалів графіту і саме монооксид кремнію, що має властивості поверхнево-активних речовин, відіграє вирішальне значення у формоутворенні графітних вкраплень різної морфології;

- при температурах 1300...1350 °C і повному розчиненні кремнію дрібної фракції (1...7 мм) у рідкому чавуні відбувається утворенням поверхнево-активного субоксиду кремнію (SiO), його диспропорціонування, а також подрібнення та рівномірне розподілення графітових вкраплень;

- при неповному розчиненні кремнію внаслідок низької температури розплаву (1100...1200 °C) або крупної фракції добавки (8...15 мкм) утворюються додатково інші фази, що містять кремній – низькотемпературні карбіди кремнію та розчини на основі Fe-Si-C, які мають зменшену поверхневу активність, розташовуються на межах литих зерен, сприяють ліквідації, погіршують розподіл графітових вкраплень та властивості чавунних виливків;

- повнота проходження реакції між магнієм та монооксидом вуглецю, в результаті якої утворюється субоксид магнію зниженої валентності (Mg<sub>2</sub>O), визначає розмір та форму вкраплень графіту;

- у високоміцних чавунах утворюється три морфологічних різновиди графіту – чітко огранована кристалічна, агрегати кристалів різної форми та плівкова (прихованокристалічна).

3. Встановлено, що кристали та вкраплення графіту різної форми та походження у чавунах за різним масштабним фактором мають самоподібність та відповідають фрактальній теорії формоутворення графіту.

4. Встановлено, що процеси рафінування, вакуумування або електрошлакового переплаву чавуну, які пов'язані з очищення від кисню та сірки та створенням їх дефіциту у металі суттєво змінює морфологію графітної фази. Показано, що

- при плавці синтетичних чавунів у вакуумі, забезпечені низького вмісту сірки до 0,005% (мас.) і швидкості охолодження більше 50 °C/хв можлива кристалізація кулястого графіту у бульбашках газу CO;

- за результатами теоретичних досліджень бульбашки з розмірами 5...45 мкм мають швидкість спливання до 0,02 см/сек і повністю заповнені графітом; більш крупні бульбашки (більше 200 мкм) зберігають тільки оболонку графіту та видаляються з рідкого чавуну при плавленні і розкисленні.

5. Встановлено, що кисень і сірка у чавунах є поверхнево-активними елементами та приймають активну участь у формуванні їх структури та морфології графітних вкраплень. Сірка при високих концентраціях (більше 0,02 %) пригнічує активність монооксиду кремнію та зменшує розгалуженість пластинчатого графіту; у модифікованих магнієм чавунах, сірка при високій концентрації (більше ніж 0,02 %) вступає з ним у взаємодію, і заважає утворенню субоксиду магнію та, у свою чергу, кулястого графіту.

6. На основі встановлених закономірностей утворення та впливу субоксидних сполук на структуру чавунних виливків, включаючи розподілення, розміри та форму графітних вкраплень, визначені рівні технологічних параметрів їх виробництва, що дозволило забезпечити високі експлуатаційні властивості.

7. Результати роботи впровадженні у виробництво при виготовленні чавунних виливниць (довідка впровадження результатів НДР № 534040767/1144 з ВАТ „Нижньодніпровський трубопрокатний завод” «Вдосконалення технології плавки чавуну та виробництва виливниць зі середньою стійкістю сімдесят наливів» ” від 12.02.19 р) та заготовок для поршневих кілець (акт впровадження результатів роботи на ТОВ «ТВИНС-СЕРВИС» від 02.04.19 р.). Розроблені вдосконалення технологічних параметрів виробництва чавунних виливниць дозволили збільшити їх експлуатаційну стійкість на 35...50 %. Вдосконалення технологічного процесу виробництва чавунів з пластинчатою та кулястою формами вкраплень графіту для маслотної заготовки поршневих кілець, дозволило підвищити якість литва та визначили очікуваний економічний ефект біля 620 тис. грн.



8. Розроблені теоретичні основи формування графітної фази у чавунах впроваджені в навчальний процес кафедри "Машини і технологія ливарного виробництва" Національного університету «Запорізька політехніка» при вдосконаленні лекційних курсів навчальних дисциплін «Основи теорії плавки та виробництва чавунних виливків», «Ливарні сплави та їх плавка», а також при виконанні студентами лабораторних, практичних і дипломних робіт (акт впровадження від 13.02. 2019 р.).

### **Основний зміст дисертації опублікований у роботах,**

#### **в яких висвітлені основні наукові результати дисертації**

1. Кузовов А. Ф., Иванов В. Г., Малый А. В. Технологические расчеты питания отливок. Запорожье: ЗНТУ, 2017. 76 с.
2. Ivanov V., Pirozhkova V., Lunev V. Research of structure and formation of nodular graphite inclusions in ductile cast iron. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 3(5). P. 31 – 36. (НБД Scopus)
3. Ivanov V., Pirozhkova V., Lunev V. Silicon effect on the formation of graphite inclusions in gray cast iron. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №4(12). P. 26 – 30. (НБД Scopus)
4. Иванов В. Г., Кузовов А. Ф., Малый А. В., Каргинов В. П., Колос А. А., Дорошенко А. В. Универсальная добавка для улучшения выживаемости жидкостекольной смеси. *Литейное производство*. 2015. №8. С. 10 – 12. (іноземне видання)
5. Иванов В. Г. Розподіл хімічних елементів у структурі високоміцного чавуну для маслотної заготовки поршневих кілець. *Вісник двигунобудування*. 2016. № 1. С. 121 – 127. (НБД Index Copernicus)
6. Иванов В. Г. Будова крапель графіту у синтетичних чавунах. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. №. 1. С. 16 – 18. (НБД Index Copernicus)
7. Иванов В. Г. Дослідження структури поршневих кілець з високоміцного чавуну після експлуатації у двотактному двигуні. *Вісник двигунобудування*. 2017. №1. С. 156 – 160. (НБД Index Copernicus)
8. Иванов В. Г. Вплив кремнію на графітизацію заевтектичного синтетичного чавуну. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2017. № 1. С. 17 – 22. (НБД Index Copernicus)
9. Иванов В. Г. Вплив умов плавки та газонасиченості на формування графіту в чавунах. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2018. № 1. С. 16 – 20. (НБД Index Copernicus)
10. Иванов В.Г. Самоподібність включень графіту в чавунах. *Металургія*. 2016. Вип. 1 (35). С. 5 – 8. (НБД Google Scholar)
11. Иванов В. Г. Металографічні дослідження графітних крапель у відцентровій заготовці для поршневих кілець. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2016. № 1. С. 40 – 44. (НБД Google Scholar)

12. Іванов В. Г. Оцінка морфології включень графіту у високоміцних чавунах за допомогою фрактальної розмірності. *Наукові нотатки : міжвуз. зб. (за галузями знань "Технічні науки")*. 2016. Вип. 53 (січень-березень). С. 57 — 62. (НБД Google Scholar)

13. Іванов В. Г. Розподіл магнію у синтетичному високоміцному чавуні. *Металургія*. 2016. Вип. 2 (36). С. 5 – 10. (НБД Google Scholar)

14. Іванов В. Г. Особливості формоутворення графіту в синтетичному чавуні під час плавки у вакуумі. *Металургія*. 2017. Вип. 1 (37). С. 11 – 16. (НБД Google Scholar)

15. Іванов В. Г. Роль кисню при формоутворенні графіту в чавунах. *Металургія*. 2018. Вип. 1 (39). С. 34 – 40. (НБД Google Scholar)

16. Іванов В. Г., Паракневич С. М. Вплив електрошлакового переплавлення на морфологію графітної фази в сірих чавунах. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2015. № 1. С. 43 – 45. (НБД Index Copernicus)

17. Іванов В. Г., Голтвяница В. С. Морфологія графіту у заевтектичному синтетичному чавуні. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2015. № 2. С. 23 – 27. (НБД Index Copernicus)

18. Іванов В. Г., Пірожкова В. П., Луньов В. В. Вплив сірки на морфологію графіту в чавунах. *Металургія*. 2017 Вип. 2 (38). С. 14 – 19. (НБД Google Scholar)

19. Іванов В. Г., Луньов В. В. Вплив побічних продуктів карботермічного збагачення ільменівського концентрату на морфологію графітних включень чавуну. *Теорія і практика металургії*. 2015. №3-6. С. 49 – 52.

20. Іванов В. Г., Сажнев В. Н., Дейнега А. В., Кудин В. Т. Повышение эксплуатационной стойкости чугуновых изложниц для колесной стали. *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Технологии машиностроения*. 2007. №4/1. С. 69 – 73.

21. Іванов В. Г., Пірожкова В. П., Лунев В. В. Причины низкой эксплуатационной стойкости изложниц из модифицированного чугуна. *Теорія і практика металургії*. 2006. №1-2. С. 13 – 20.

22. Іванов В. Г., Пірожкова В. П., Лунев В. В. О субоксидной форме кислорода в сталях и чугунах. *Металл и литье Украины*. 2018. №11-12. С. 29 – 34. (НБД Google Scholar)

### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

23. Іванов В. Г. Морфологія графіту при плавці синтетичного чавуну у вакуумі. *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра* [Електрон. ресурс]: матеріали XV Всеукр. наук.-практ. конф., 11 квітня 2017 р. Київ. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 479 – 485.

24. Іванов В. Г. Вибір оптимальної структури високоміцного чавуну для поршневих кілець малопотужних двотактових двигунів. *Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві*: матеріали VI Міжн. наук.-техн. конф., 25 – 28 вересня 2017 р. Краматорськ: ДГМА, 2017. - С. 64 – 66.

25. Іванов В. Г. Вплив газонасиченості на структуроутворення чавунів. *Литве. Металургія. 2018*: матеріали XIV міжн. наук.-практ. конф., 22 – 25 травня 2018 р. Запоріжжя: АА Тандем, 2018. С. 100 – 101.

26. Іванов В. Г., Луньов В. В. Вплив побічних продуктів при виробництві титану на морфологію графітних включень у сірих чавунах. *Сучасна металургія: проблеми, завдання, рішення. Наука і виробництво*: матеріали Міжн. конф., 28 – 29 квіт. 2015 р. Дніпропетровськ: Герда, 2015. С. 63 – 66.

27. Іванов В. Г., Парахневич Є. М. Зміна морфології графітної фази у чавунах після електрошлакового переплавлення. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: матеріали VII наук.-техн. конф., 21 – 22 травня 2015 р. Київ: Вид-во НТТУ “КПІ”, 2015. С. 64.

28. Іванов В. Г., Луньов В. В. Графітизуюче модифікування чавунів, виготовлених з використанням відходів виробництва титану. *Литве. Металургія. 2015р.*: матеріали XI научн.-практ. конф., 26 – 28 мая 2015 г. Запоріжжя: Изд-во ЗТПП, 2015. С. 118 – 120.

29. Іванов В. Г., Пирожкова В. П. О механізмі образования шаровидной формы графита. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах* : збірник тез XIV Міжн. наук.-техн. конф., 6 – 9 жовтня 2015 р. Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. С. 80 – 83.

30. Іванов В. Г., Пирожкова В. П. Будова графітових вкраплень у високоміцних чавунах. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: матеріали VIII наук.-техн. конф., 30 - 31 травня 2016 р. Київ: Вид-во НТТУ “КПІ”, 2016. С. 60 – 61.

31. Іванов В. Г., Пирожкова В. П., Луньов В. В. Мікрорентгеноспектральний та петрографічний аналіз вкраплень графіту у високоміцних чавунах. *Литве. Металургія. 2016*: матеріали XII научн.-практ. конф., 24 – 26 мая 2016 г. Запоріжжя: Изд-во ЗТПП, 2016. С. 100 – 101.

32. Іванов, В. Г., Шаломєєв В. А. Використання відходів магнієвих сплавів для отримання чавуну з вермикулярним графітом. *Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні*: тези доповідей IV Міжн. наук.-практичної конф., Запоріжжя: АТ „Мотор Січ”, 2016. С. 59 – 60.

33. Іванов В. Г., Пирожкова В. П., Луньов В. В. Утворення монооксиду кремнію у сірих чавунах та його вплив на морфологію вкраплень графіту. *Литве. Металургія. 2017*: матеріали XIII міжн. наук.-практ. конф., 23 – 25 травня 2017 р. Запоріжжя, АА Тандем, 2017. С. 110 – 111.

34. Іванов В. Г., Пирожкова В. П. Вплив поверхнево-активного монооксиду кремнію на формування графіту у сірих чавунах. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: матеріали IX міжн. наук.-техн. конф. ,30 – 31 травня 2017 р. Київ: Вид-во НТТУ “КПІ”, 2017. С. 78.

35. Іванов В. Г., Пирожкова В. П., Лунев В. В., Бурова Н. М. О природе неметаллических включений и влиянии их на эксплуатационную стойкость изложниц из модифицированного чугуна. *Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів*: Зб. наук. праць IX-й Міжн. наук.-техн. конф., 2005р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. С. 114 – 116.

36. Луцьов В.В., Іванов В. Г., Сажнів В.М., Колотілкін О. Б. Вдосконалення технології виробництва та хімічного складу чавуну для сталерозливальних виливниць. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах*: Збірник матеріалів XI наук.-техн. конф., 19 – 22 вересня 2006 р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2006. С.119 – 120.
37. Іванов В. Г., Пірожкова В. П. Вплив кисню на формоутворення графіту в чавунах. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: матеріали X міжн. наук.-техн. конф., 24 – 25 квітня 2018 р. Київ: Вид-во НТТУ “КПІ”, 2018. С. 74 – 75.
38. Іванов В. Г. Пірожкова В. П., Луцьов В. В. Роль нижчих оксидів у формоутворенні графіту в чавунах. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах* : збірник тез XV Міжн. наук.-техн. конф., 11 – 21 жовтня 2018 р. Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. С. 67 – 69.
39. Іванов В. Г., Пірожкова В. П. О морфології графіта. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах* : збірник тез XIV Міжн. наук.-техн. конф., 6 – 9 жовтня 2015 р. Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. С. 85 – 86.
40. Іванов В. Г., Луцьов В. В. Особенности виплавки чугунів с использованием отходов титанового производства. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах* : збірник тез XIV Міжн. наук.-техн. конф., 6 – 9 жовтня 2015 р. Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – С. 87 – 88.
41. Яценко Р. В., Іванов В. Г. Количественный металлографический анализ шаровидного графіта в заготовке поршневых колец из высокопрочного чугуна. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах* : збірник тез XIV Міжн. наук.-техн. конф., 6 – 9 жовтня 2015 р. Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. С. 84.
42. Іванов В. Г. Вплив титану на морфологію графітових включень у чавунах. *Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні*: тези доповідей IV Міжн. наук.-практичної конф., Запоріжжя: АТ „Мотор Січ”, 2016. С. 41 – 43.
43. Іванов В. Г., Пірожкова В. П., Луцьов В. В. Вплив нестехіометричних з'єднань кремнію та магнію на морфологію графіту у чавунах. *Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві*: матеріали VI Міжн. наук.-техн. конф., 25 – 28 вересня 2017 р. Краматорськ: ДГМА, 2017. С. 66 – 67.

## АНОТАЦІЯ

*Іванов В. Г. Розвиток теоретичних основ впливу технологічних параметрів на структуру і властивості виливків з сірих чавунів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.04 «Ливарне виробництво» (13 – Механічна інженерія). – Національний університет «Запорізька політехніка», Національна металургійна академія України, Дніпро, 2019.

Дисертаційна робота присвячена подальшому розвитку теоретичних основ структуроутворення чавунних виливків в залежності від умов плавки, кристалізації, охолодження та обробок розплаву, встановленню

закономірностей утворення субоксидних сполук та їх впливу на формоутворення графітної фази і властивості литих виробів.

Розроблено схеми керування технологічними параметрами чавуну для забезпечення заданої морфології графітної фази і високих експлуатаційних властивостей чавунних виливків. Запропоновано та використано комплексну методику дослідження формоутворення графітних вкраплень з використанням петрографічного методу у поєднанні з іншими сучасними методами. Розроблено оптимальні технологічні процеси для отримання необхідної морфології графітної фази для забезпечення високих експлуатаційних властивостей чавунних виливків різноманітного призначення.

**Ключові слова:** чавун, графіт, формоутворення, структура, виливки.

## АННОТАЦІЯ

*Иванов В. Г. Развитие теоретических основ влияния технологических параметров на структуру и свойства отливок из серых чугунов. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.04 «Литейное производство» (13 - Механическая инженерия). – Национальный университет «Запорожская политехника», Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, 2019.

Диссертация посвящена дальнейшему развитию теоретических основ структурообразования чугуновых отливок в зависимости от условий плавки, кристаллизации, охлаждения и обработок расплава, установлению закономерностей образования субоксидных соединений и их влияния на формообразование графитовой фазы и свойства литых изделий.

Выявлено, что субокислы железа, магния, кремния и других элементов принимают активное участие в формировании включений графита в чугунах. Установлено, что графитовая фаза в чугунах формируется в процессе взаимодействия активных элементов с окисью углерода. В сером чугуне взаимодействие кремния с окисью углерода приводит к образованию монооксида кремния и первичных кристаллов графита, и именно монооксид кремния, проявляющий поверхностно-активные свойства, имеет решающее значение в формообразовании графитовых включений различной морфологии (розеточной, прямолинейно-пластинчатой и др.). Процесс формирования шаровидной формы графита связан с реакцией взаимодействия магния с окисью углерода с образованием субокислов магния.

Разработаны схемы управления технологическими параметрами чугунов для обеспечения заданной морфологии графитной фазы и высоких эксплуатационных свойств чугуновых отливок. Предложена комплексная методика исследования формообразования графитовых включений с

использованием петрографического метода в сочетании с другими современными методами. Полученные в работе результаты позволили усовершенствовать технологические параметры производства чугунов, что позволило повысить эксплуатационную стойкость изложниц на 30 - 50% по сравнению с традиционной действующей технологией, а также обеспечить экономическую эффективность получение маслотноных заготовок поршневых колец с рациональной структурой и необходимым уровнем эксплуатационных свойств.

**Ключевые слова:** чугун, графит, формообразование, структура, отливки.

## SUMMARY

*Ivanov V.G. Development of theoretical bases of technological parameters impact on the structure and properties of gray cast iron castings. - Qualification scientific paper manuscript copyright.*

Thesis for a Doctor of Science Degree in specialty 05.16.04 "Foundry" (13 - Mechanical Engineering). - Zaporizhzhia Polytechnic National University, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2019.

The thesis is devoted to the further development of the theoretical foundations of the cast iron casting structure depending on the melting conditions, crystallization, molten mass cooling and processing, establishing the patterns of formation of suboxide compounds and their impact on the graphite phase formation and properties of cast products.

Technological parameters control schemes for cast iron have been developed to provide the given graphite phase morphology and high performance properties of cast iron castings. A complex research technique of graphite inclusions formation using the petrographic method in combination with other modern methods was implemented and used. The use of the obtained results made it possible to improve the technological parameters of cast iron castings production and to ensure their high operational properties.

**Keywords:** cast iron, graphite, molding, structure, castings.