

<https://doi.org/10.15407//plit2024.04.003>

УДК 621.74.046

І.В. Лук'яненко, канд. техн. наук, доцент; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

А.І. Устименко, аспірантка; e-mail: ustymenko@kpi.ua;

<https://orcid.org/0000-0002-5893-6499>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ГРАДІЄНТНОЇ СТРУКТУРИ В ЧАВУННИХ ЗАГОТОВКАХ ДЛЯ ФОРМ СКЛОТАРНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Виробництво скловиробів є важливим сектором промисловості, що забезпечує широкий спектр екологічної продукції — від будівельного скла до лабораторного обладнання. Проте виробництво саме склотари вимагає застосування спеціального оснащення — склоформ, які в процесі експлуатації піддаються значним термічним і механічним навантаженням, що призводить до їх швидкого зношування. Сучасні технології не забезпечують тривалого терміну експлуатації склоформ. Одним із головних завдань є розроблення ефективних методів для отримання градієнтної структури в чавунних заготовках із феритною металевою матрицею, що дозволить суттєво покращити їх характеристики та подовжити термін служби. Розроблено технологію отримання градієнтної структури в чавунних заготовках у литому стані, яка дозволяє підвищити термостійкість і механічні властивості формокомплектів. Відпрацювання технології здійснювали на жаростійкому чавуні, відомому своєю високою теплопровідністю та міцністю. Для отримання градієнтної структури застосовано методи ковшового та внутрішньоформового оброблення чавуну з використанням модифікаторів і охолоджувачів різної товщини.

Основні результати досліджень:

1. Досягнуто направленої зміни структури чавунних заготовок завдяки використанню ковшового і внутрішньоформового оброблення чавуну із застосуванням модифікаторів SB5 та VL63(M). Це дозволило створити градієнтну структуру, яка відрізняється від традиційної однорідної.
2. Використання чавунних холодильників товщиною 10, 20 та 30 мм дозволило контролювати розміри й форму графітових включень. Для чорнових форм було досягнуто оптимальної структури з пластинчастим графітом, що забезпечує високу теплопровідність, необхідну в умовах високих температур.
3. У чистових формах вдалося досягти утворення кулястого графіту в поверхневих шарах, що підвищило стійкість до механічних навантажень та довговічність форм. Ступінь сфероїдизації кулястого графіту досягнуто 70–80 %.
4. Дослідження показали плавний перехід від пластинчастого до кулястого графіту, що покращує теплопровідність і зносостійкість формокомплектів.
5. Металографічні дослідження підтвердили наявність стабільної феритної металевої матриці, стійкої до циклічних навантажень, що дозволяє уникнути додаткового термічного оброблення і знижує собівартість виробництва.

Таким чином, впровадження градієнтної структури в чавунні заготовки для склоформ значно

підвищило їх експлуатаційні властивості та відкриває нові можливості для оптимізації виробничих процесів.

Ключові слова: екологія, чавун, модифікатор, холодильник, структура, графіт, ферит, характер твердіння, високоміцний чавун.

Вступ

Скляне виробництво відіграє важливу роль у багатьох сферах промисловості та побуту, забезпечуючи різноманітними видами продукції — від будівельного скла до лабораторного обладнання. Особливо важливим є виробництво скляної тари, яку широко застосовують у харчовій, фармацевтичній, хімічній та інших галузях. Склотара є екологічно чистим і безпечним матеріалом для зберігання продукції, тому попит на неї стабільно зростає. З огляду на тенденції до відмови від пластику на користь більш екологічних матеріалів, таких як скло, ринок склотари залишається надзвичайно перспективним.

Проте, попри високу актуальність цього ринку, сьогодні не існує універсального підходу, який би значно продовжував термін служби деталей для склоформ. Це стимулює розвиток нових методів і підходів для вирішення проблем вдосконалення структури матеріалів, із яких виготовляються склоформи, з метою здешевлення виробничого процесу та підвищення довговічності продукції.

Однак виробництво склотари та інших видів скла потребує використання спеціальних склоформ, які піддаються інтенсивним навантаженням у процесі експлуатації, що призводить до їх зношування та скорочення терміну експлуатації. На жаль, універсальної технології, яка могла б значно підвищити ресурс склоформ, поки що не існує. Проблема в тому, що матеріали, із яких виготовляють склоформи, повинні витримувати високі температури та механічні навантаження, не втрачаючи своїх властивостей.

Вирішення технічних завдань відкриває нові можливості для наукових досліджень і розробок у галузі металургії, матеріалознавства та виробничих технологій. Наприклад, одним із перспективних напрямків є вдосконалення структури металів і сплавів, що використовуються для виготовлення склоформ, шляхом введення нових компонентів або зміни технології лиття. Інший напрям — це оптимізація процесу

виробництва самих склоформ, що дозволить знизити їх собівартість і підвищити економічну ефективність.

Основний процес виготовлення склотари при масовому виробництві відбувається у складних термоциклічних умовах, а найбільшому впливу цих умов та, як наслідок, зношуванню піддаються чорнові та чистові форми, а саме їх поверхневий шар, який піддається найбільшому нагріванню (рис. 1) [1]. Основними причинами виходу з ладу деталей формокомплекту є наявність окиснених ділянок (рис. 2) у місцях утворення тріщин та вигорання або викришування графітових включень унаслідок структурних трансформацій і послаблення зв'язків між зернами металевої матриці навколо них [2, 3].

Руйнування поверхневого шару форм у вигляді тріщин (сколу) переважно відбувається після накопичення



Рис. 1. Приклад розподілу температурних полів у чистовій формі [1]

знакозмінних термічних і механічних навантажень, які виникають під час вдування розплавленого скла [4].

Продуктивність та собівартість процесу виробництва, кількість придатної склотарної продукції, стійкість і надійність форм безпосередньо залежать від їх матеріалу. Вибір якісного матеріалу, що має комплекс необхідних властивостей, досі вважається одним зі складних питань.

Аналіз літературних джерел дає змогу встановити, що такі властивості чавуну, як хороша оброблюваність, мала чутливість до концентрації напружень, високі показники теплопровідності, низька вартість та простота виготовлення роблять його основним матеріалом для виготовлення деталей формокомплекту [5, 6]. Крім того, автори робіт констатують [7–9], що одним із методів підвищення експлуатаційних властивостей формокомплекту є структуризація матеріалу, а саме створення направленої градієнтної структури. Для чорнових форм, що взаємодіють із високою температурою

скла порядку 750–1100 °C [7, 9, 10], мікроструктура має характерну зміну розмірів пластинчатого графіту від дрібних до великих за перерізом виливка, що, відповідно, і забезпечить високу теплопровідність. У свою чергу, чистові форми піддаються не лише термічному впливу під час дії температури 450–550 °C [2, 9, 10], а й більшому значенню механічного впливу в процесі виготовлення склотари. Тому мікроструктура склоформуючого поверхневого шару чистової форми повинна бути стійкою до структурних трансформацій, тріщин і особливо до дії механічних навантажень при високих температурах [4]. Такі властивості можна забезпечити завдяки наявності включень кулястого графіту (на глибині 5–15 мм) у феритній матриці, яка є стійкою до термічного впливу [2, 9, 12].

У результаті попередньої роботи було проаналізовано технології одержання спрямованої градієнтної структури, однак отримання феритної металевої матриці потребує вдосконалення технологій.

Крім того, важливим завданням є підвищення експлуатаційного ресурсу склоформ за рахунок впровадження інноваційних методів оброблення поверхні, наприклад нанесення захисних покриттів, які зменшують знос і впливають на довговічність оснащення. Усе це спрямоване на зниження виробничих витрат та забезпечення стабільності якості скляної продукції, що врешті-решт позитивно позначиться на ринку.

Ринок скляної продукції та його технологічна база продовжують розвиватися, що створює передумови для подальших інновацій у галузі та підвищення ефективності виробництва.

Метою роботи є розроблення методів управління технологічними процесами та оптимізація виробничих процесів для отримання градієнтної структури в чавунних заготовках із феритною металевою матрицею в литому стані.

Досягнення цієї мети вимагає комплексного підходу, який включає як аналіз фізико-хімічних властивостей чавунних сплавів, так і розроблення методів контролю їх охолодження та кристалізації під час лиття. Особливу увагу буде приділено

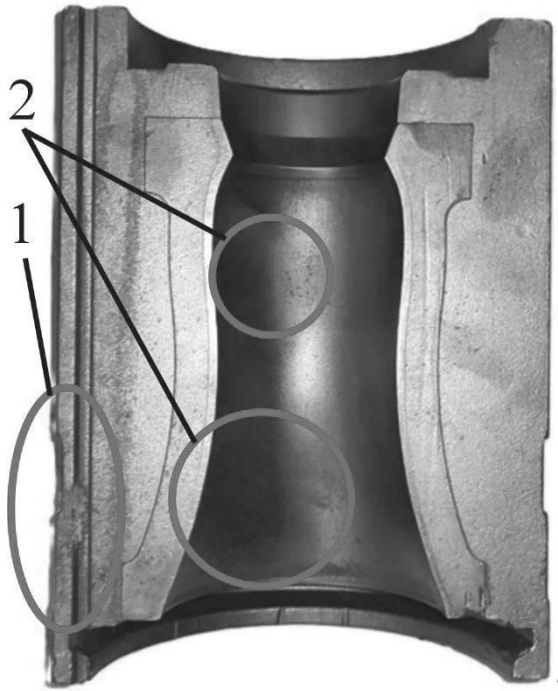


Рис. 2 Дефекти, що спричинили вихід із ладу чорнової форми: 1 — скол форми; 2 — окиснення поверхні

дослідженню умов, що сприяють утворенню градієнтної структури, при якій робоча частина заготовок (поверхневий шар, що безпосередньо контактує із розплавленим склом) має більш високу міцність і пластичність, тоді як зовнішні шари відзначаються підвищеною твердістю та стійкістю до зношування.

Матеріали та методи експерименту

Вибір матеріалу та плавлення чавуну для експериментів, а саме кремнистого жаростійкого чавуну (3,0–3,25 % С, 3,14–3,54 %Si, 0,47–0,67 %Mo, 0,07–0,11 %V) ґрунтувався на попередньо проведених дослідженнях [8].

Для отримання направленої структуризації у виливках для чорнової форми застосовано ковшове оброблення чавуну інокулятором SB5, створено нерівновісні умови кристалізації та охолодження чавуну в порожнині ливарної форми за рахунок використання холодильників різної товщини (10 мм, 20 мм та 30 мм) із чавуну СЧ 200 ДСТУ 8833:2019 (рис. 3, а). Основна роль інокулятора SB5 — це попередження вибілення, створення додаткових центрів кристалізації, збільшення кількості графітових включень та подрібнення розмірів структурних складових [11–14].

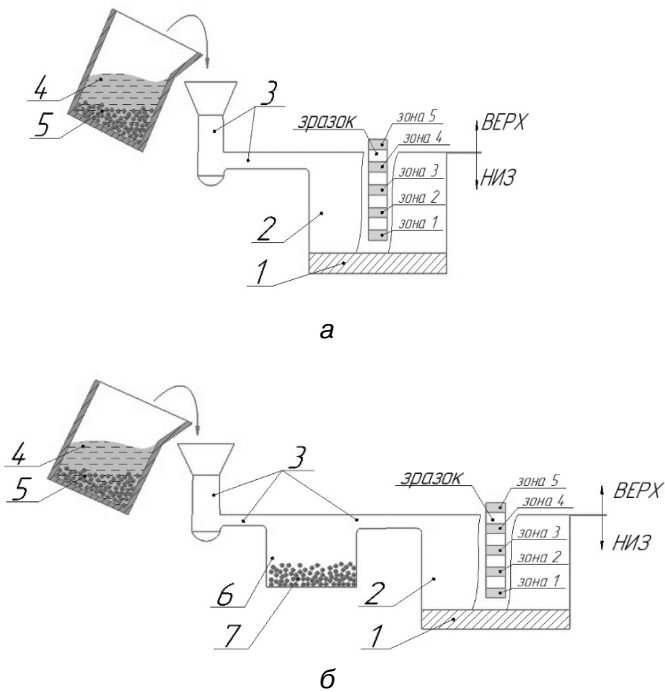


Рис. 3. Схематичне зображення ковшового оброблення чавуну (а) та ковшового оброблення з внутрішньоформовим модифікуванням (б): 1 — холодильник; 2 — порожнина форми; 3 — ливникова система; 4 — ківш із розплавленим чавуном; 5 — модифікатор SB5; 6 — реакційна камера; 7 — модифікатор VL63(M)

З метою отримання градієнтної структури у виливках для чистової форми додатково застосували внутрішньоформове оброблення, особливості якого висвітлено в роботах [13, 14], модифікатором VL63(M), що повинно забезпечити часткове утворення кулястого графіту у виливку за технологічною схемою, наведеною на рис. 3, б. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі iScore, IS.1053-PLMi (Euromex). Визначення та класифікацію графітових включень здійснювали за методикою візуального аналізу відповідно до нормативного документа [15]. Дослідження мікроструктури виконували за перерізом отриманих зразків у п'яти зонах (рис. 4), рівномірно розподілених за висотою зразка.

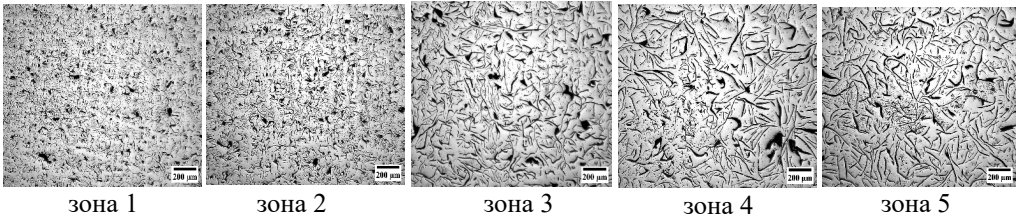


Рис. 4. Зміна розмірів графітових включень за перерізом зразка 1.3

Результати та обговорення

У результаті проведення металографічних досліджень чавунних зразків, отриманих із дослідної заготовки для чорнового формокомплекту, встановлено класифікацію графітових включень залежно від товщини використаного холодильника та визначено їх зональну зміну за перерізом (табл. 1).

Таблица 1

Класифікація графітових включень за перерізом заготовки чорнового формокомплекту залежно від товщини використаних холодильників

Номер зразка	Товщина використаного холодильника, мм	Класифікація за переважною ознакою					
		Ознака класифікації	зона				
			1	2	3	4	5
1.1	10	Тип за формою	I	I	I	I	I
		Тип за розподілом	D	E	A	A	A
1.2	20	Тип за формою	I	I	I	I	I
		Тип за розподілом	D	E	E	A	A
1.3	30	Тип за формою	I	I	I	I	I
		Тип за розподілом	E	E	A	A	A

Визначено, що за перерізом усіх зразків (табл. 1) спостерігається перехід форми графіту від завихреного та прямолінійного пластинчатого, а його розподілення — від міждендритного (характерно для зони 1, 2) до розеткового або прямолінійного (зони 3–5). Міждендритний графіт типу D та E характерний для аналогічної продукції, виготовленої безперервним литтям, що має високі теплопровідні характеристики [16]. Пластинчатий графіт широко застосовується у виробках, які працюють під дією високих термічних навантажень, наприклад гальмівні диски (піддаються циклам нагрівання й охолодження, подібним до умов виготовлення скла), оскільки для нього характерна висока теплопровідність [1]. Найкращі результати щодо послідовної та плавної зміни форми графіту від пластинчатого завихреного до пластинчатого прямолінійного з рівномірним розподіленням спостерігається за перерізом зразка 1.3 (рис. 4.)

Аналіз отриманих результатів зображень мікроструктур усіх зразків встановив зростання середньої довжини графітових включень від 97 мкм до 323 мкм за перерізом залежно від товщини холодильників (рис. 5). Разом із тим на всіх зразках спостерігається зменшення розмірів графітових включень у зоні 5,

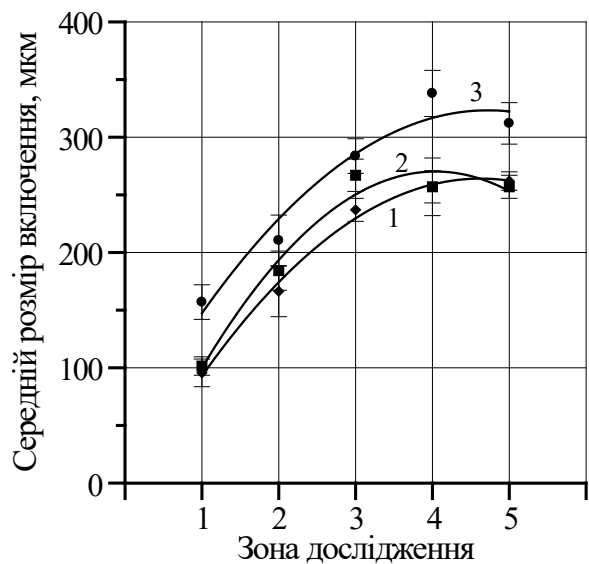


Рис. 5. Середній розмір включень графіту за перерізом зразків 1.1 (1), 1.2 (2) та 1.3 (3)

ється повільніше, що створює сприятливіші умови для зростання графіту. Триваліший час кристалізації дозволяє формуватися більшим графітовим включенням через повільний процес дифузії вуглецю в рідині. Крім того, різниця у термічних градієнтах між цими зонами впливає на мікроструктуру: зона 5 може мати більш щільну структуру з дрібнішими зернами, тоді як у зоні 4 структура може бути грубішою з більшими графітовими включеннями.

Таким чином, ключовою причиною зменшення графітових включень у зоні 5 є інтенсивніше охолодження та швидша кристалізація, що обмежує розвиток великих графітових структур, тоді як повільніше охолодження у зоні 4 сприяє формуванню більших включень.

Під час дослідження зразків із заготовки для чистової форми встановлено, що розподіл та форма включень пластинчастого графіту, незалежно від товщини холодильника, однакові у всіх відповідних зонах усіх зразків. Класифікацію графітових включень за розподілом та формою наведено в табл. 2.

порівняно із зоною 4 (рис. 4), що зумовлено контактом розплаву чавуну з верхньою напівформою.

Зменшення розмірів графітових включень у зоні 5, порівняно із зоною 4, зумовлене різними термічними умовами охолодження під час твердіння чавуну. У зоні 5, що контактує з верхньою напівформою, спостерігається інтенсивніше охолодження через більший тепловий потік до навколишнього середовища. Це призводить до швидшої кристалізації чавуну, що обмежує час для росту графітових включень. У таких умовах атоми вуглецю мають менше часу для дифузії та об'єднання в структурні складові більших розмірів, тому включення залишаються дрібнішими.

У зоні 4 охолодження відбуває-

Таблиця 2

Класифікація графітових включень за перерізом заготовки чистового формокомплекту залежно від товщини використаних холодильників

Номер зразка	Товщина вико- ристаного холо- дильника, мм	Класифікація за переважною ознакою					
		Ознака класифікації	зона				
			1	2	3	4	5
1	10	Тип за формою	I	I	I	I	I
		Тип за розподілом	E	B	B	B	B
2	20	Тип за формою	I	I	I	I	I
		Тип за розподілом	E	B	B	B	C
3	30	Тип за формою	I для пластин- чатого та V–VI для кулястого	I	I	I	I
		Тип за розподілом	E	E	B	B	C

Дослідженням мікроструктури зразків для чистової форми було встановлено найкращі результати — чітке утворення шарів кулястого графіту в зоні 1 зразка 2.3 (зона контакту розплаву з холодильниками) із переходом до включень пластинчастої форми (рис. 6).

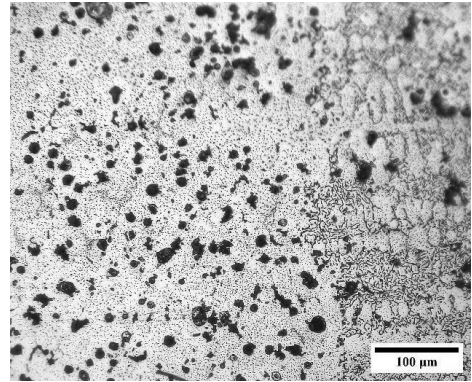
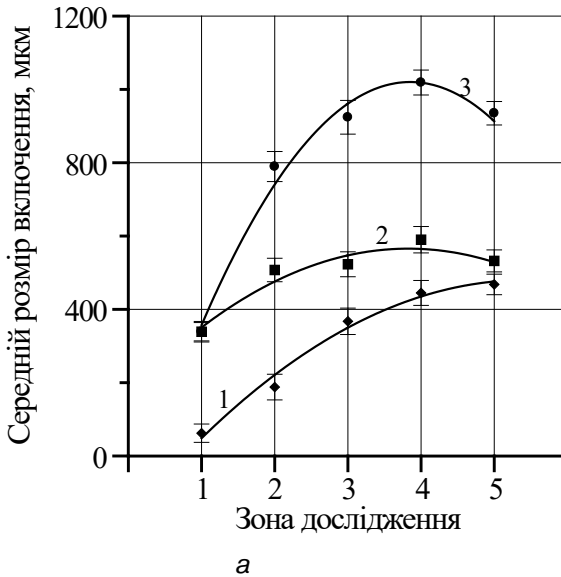


Рис. 6. Середній розмір включень графіту (а) за перерізом зразків 2.1 (1), 2.2 (2), 2.3 (3) та мікроструктура перехідної зони зразка 2.3 (б)

Дослідження структури кулястого графіту в чавунних заготовках показали, що графітові включення у зразках мають тип V та VI, із діаметрами в діапазоні від 0,82 мкм до 16,85 мкм (рис. 6). Такий перехід від пластинчастого завихреного до прямолінійного графіту та наявність кулястих включень типу V і VI зумовлені процесами кристалізації чавуну, температурними умовами, швидкістю охолодження та застосуванням модифікаторів.

Модифікатори, такі як SB5 і VL63(M), впливають на структуру графіту, сприяючи утворенню дисперсного кулястого графіту. Вони діють як центри кристалізації, запобігають вибіленню та подрібнюють розміри графітових включень. Це дозволяє досягти високого ступеня сфероїдизації, що забезпечує підвищені механічні властивості матеріалу в робочому шарі форми.

Високі температури лиття забезпечують утворення завихреного пластинчастого графіту в початковій стадії кристалізації. У міру охолодження розплаву структура трансформується в більш прямолінійний пластинчастий графіт, що краще проводить тепло і, як наслідок, збільшує термін експлуатації формокомплектів.

Плавний перехід від пластинчастого завихреного графіту до прямолінійного в зразках у межах від 62 до 1018 мкм додатково покращує характеристики теплопровідності, що важливо для склоформ, які працюють в умовах значних термічних навантажень.

Ступінь сфероїдизації кулястого графіту перебуває на рівні 70–80 %, що свідчить про високу якість отриманого матеріалу. Така структура забезпечує покращені механічні властивості матеріалу, зокрема підвищену стійкість до зносу та механічних навантажень.

Отримана градієнтна структура дозволяє забезпечити оптимальні механічні й теплові властивості, що підвищує довговічність і надійність склоформ при інтенсивних робочих навантаженнях.

Таким чином, досліджена технологія дозволяє досягти оптимального балансу між міцністю і теплопровідністю форм, підвищує їх експлуатаційний ресурс та ефективність у виробничому процесі.

Отримані форма й розподіл графіту в литих зразках для чорнової та чистової форм тотожні мікроструктурам аналогічної продукції світових виробників, яким

притаманне застосуванням чавуну з пластинчастим графітом для чорнових форм і кулястим графітом для чистових форм. Виробники [1, 16] пропонують чавун із пластинчастим графітом розподілу типу А в середині заготовки та типу D і Е на периферії, а виробники [17] пропонують чавун з однорідним пластинчастим (для чорнової форми) або кулястим графітом (для чистової форми) за перерізом усієї заготовки. Однак такі характеристики позиціонуються на стійкості форм тільки за однією характеристикою — або до термічного (теплопровідність), або до механічного впливу, тоді як технологічні методи, досліджені в даній роботі, дозволяють застосовувати матеріали, що будуть стійкими під час термічного та механічного впливів одночасно за рахунок зміни параметрів графітових включень за перерізом заготовки.

Графітові включення виконують важливу функцію в розсіюванні тепла та запобіганні термічному стресу, що виникає під час циклів нагрівання й охолодження в процесі формування скляної тари. Проте їх ефективність багато в чому визначається матрицею, яка має витримувати високі термічні та механічні навантаження. Стійкість поверхневого шару чорнових і чистових склоформ залежить від кількох ключових факторів, зокрема розмірів, форми та розподілу графітових включень, а також від властивостей матриці, у якій ці включення знаходяться.

Утворена феритна металева матриця відіграє критично важливу роль, оскільки вона забезпечує загальну міцність і термостійкість склоформ. Дослідження мікроструктури травлених зразків показали, що феритна матриця є термодинамічно стабільною, тобто не піддається значним структурним змінам під впливом високих температур і циклічних навантажень. Це важливо, оскільки термодинамічна стабільність матриці дозволяє зменшити ймовірність утворення тріщин та інших дефектів, які можуть з'являтися через термічний удар або механічний вплив.

За результатами металографічного дослідження чорнових і чистових склоформ можна відзначити ключові переваги отриманої феритної матриці:

- феритна матриця має хорошу стійкість до високих температур і механічного зносу, що забезпечує довговічність робочої частини склоформ;
- стабільність матриці допомагає уникнути розвитку мікротріщин і викришування графітових включень, що важливо для підтримки цілісності поверхні склоформ під час їх експлуатації;
- феритна матриця разом із графітовими включеннями сприяє ефективному відведенню тепла, що особливо важливо для чорнових форм, які піддаються найбільшому тепловому впливу.

Крім того, структура та хімічний склад матриці визначають загальні експлуатаційні властивості склоформ. Наявність легувальних елементів, таких як кремній, дозволяє покращити механічні характеристики матриці, підвищуючи її твердість і зносостійкість. Це забезпечує більшу стійкість до деформації і втрати міцності в умовах інтенсивних термоциклічних навантажень.

Таким чином, феритна металева матриця є не лише основою для графітових включень, але й ключовим компонентом, який визначає загальні характеристики склоформ. Завдяки термодинамічній стабільності, міцності й здатності до відведення тепла вона забезпечує довговічність і надійність формокомплектів у виробництві скляної тари, що дозволяє знизити частоту їх заміни та підвищити ефективність виробничого процесу.

Мікромеханічні властивості зразків підтвердили наявність легованого фериту з підвищеною твердістю: від 135 HV до 251 HV для чорнових форм і від 156 HV до 277 HV для чистових. Ці показники відповідають рівню твердості чавунних заготовок провідних світових виробників [1, 16, 17]. При цьому в досліджуваних зразках відсутня термодинамічно нестабільна перлітна складова, яка негативно впливає на експлуатацію в умовах циклічних термічних навантажень. Отримана структура зразків дозволяє уникнути додаткового термічного оброблення, а легований ферит забезпечує покращені механічні властивості та збільшує термін служби.

Висновки

За результатами роботи можна сформулювати висновки відповідно до груп поставлених завдань:

- Ефективне управління структурою виливків досягнуто з використанням ковшового та внутрішньоформового оброблення розплаву чавуну, а також застосування чавунних холодильників із високими теплофізичними властивостями дозволяє створювати градієнтну структуру в литих виливках. Це забезпечує високу якість чавунних заготовок для склоформ, підвищуючи їх експлуатаційні характеристики.

- Досягнуто оптимізації виробництва чорнових форм — рекомендовано використовувати ковшове оброблення жаростійкого чавуну з модифікатором SB5 та чавунний холодильник товщиною 30 мм. Це дозволяє отримати направлену структуризацію виливка з пластинчастими графітовими включеннями, середній розмір яких збільшується від 97 мкм до 323 мкм, що забезпечує необхідну теплопровідність і зносостійкість.

- Досягнуто оптимізації виробництва чистових форм — рекомендовано застосовувати ковшове оброблення з модифікатором SB5 та внутрішньоформове модифікування VL63(M), що дозволяє отримати кулястий графіт у поверхневих шарах виливка з рівнем сфероїдизації 70–80 %. Така структура суттєво покращує механічні властивості форми та її стійкість до зношування.

- Покращено теплопровідність і зносостійкість завдяки плавному переходу від кулястого графіту в зоні 1 до пластинчастого в зоні 2, що забезпечує ефективне відведення тепла й підвищену зносостійкість склоформувальної поверхні.

- Збільшено термін експлуатації чорнових і чистових форм за рахунок наявності термодинамічно стабільної феритної металевої матриці, що сприяє підвищенню стійкості до термоциклічних навантажень, покращенню теплопровідності та загальному збільшенню терміну експлуатації формокомплектів.

Список літератури

- 1 Available: <https://emhartglass.com/sites/default/files/publications/2020-10/TNB255%20-20VertiFlow%20Assist%20for%20AIS%20machines.pdf>
- 2 Леушин И.О., Чистяков Д.Т., Володин В.А. Влияние структуры чугуна на образование эксплуатационных дефектов склоформирующей оснастки. *Наука и образование*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. Т. 15. № 11. с. 111–123, 2015.
- 3 Hollands L. The Glass to Metal Interface during Container Forming Processes, The University of Sheffield, March 1998.
- 4 Stradomski G., Gzik S., Jakubus A., Nadolski M. The assessment of resistance to thermal fatigue and thermal shock of cast iron. *Archives of Foundry Engineering*. Vol. 18. № 3. pp. 173–178, 2018. <https://doi.org/10.24425/123621>
- 5 Степнов И.Е., Гладштейн И.Е. Конструирование форм для стеклянных изделий. Москва: Изд-во «Легкая индустрия», 1974, с. 208.
- 6 ДСТУ 8851:2019 Виливки з легованого чавуну зі спеціальними властивостями. 2019.
- 7 Леушин И.О., Зиновьев Ю.А., Чистяков Д.Г. Упрочняющие фазы чугунных деталей стеклоформ с градиентной структурой литья. *Литье и металлургия*. 2014. Т. 1, № 74. С. 62–67.8.
- 8 Устименко А.І., Лук'яненко Д.Е. Вплив технології ливарної форми на утворення градієнтної структури виливків із жаростійкого чавуну. *Процеси лиття*. 2024. № 2 (156). С. 47–55. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.047>
- 9 Александров М.В., Чистяков Ч.Г. Формирование градиентной структуры в деталях стеклоформ из чугунов с различной морфологией графита. *Металлургия и материаловедение*. 2013. № 3 (100). С. 219–229.
- 10 Племянников М.М., Яценко А.П., Пилипенко І.В., Корнілович Б.Ю. Інноваційні технології у виробництві спеціального та побутового скла, Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.

- 11 Ковальчук А. Г., Ямшинський М. М., Федоров Е. Г. Усовершенствование технологических процессов поверхностного легирования заготовок в литейной форме. *Метал и литье Украины*. 2017. Т. 1 з 28–10, № 291–293, С. 55–63.
- 12 Ковальчук А. Г., Ямшинський М. М., Федоров Е. Г. Виробництво виливків з диференційованими властивостями поверхні. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2017. № 6. С. 74–80.13.
- 13 Бубликов В. Б., Бачинський Ю. Ж., Нестерук О. П. Підвищення пластичності високоміцного чавуну внутрішньоформовим модифікуванням розплаву зі зменшенням вмістом кремнію. *Процеси лиття*. 2023. Т. 3. № 153. С. 3–11
- 14 Ясинский А. А., Бубликов Ю. Д., Берчук О. П., Зелёная Л. А., Ясинская Е. А. Влияние метода модифицирования и содержания кремния на структуру и механические свойства высокопрочного чугуна. *Металл и литье Украины*. 2015. Т. 6, № 265. С. 13–17.
- 15 ДСТУ EN ISO 945-1:2022 Microstructure of cast irons - Part 1: Graphite classification by visual analysis, 2022.
- 16 fimaolimpia.it [Online]. Available: http://www.fimaolimpia.it/en/area-vetro_ghise.php.
- 17 www.unitedcastbar.com [Online]. Available: <https://www.unitedcastbar.com/es/products-materials/unibar-250>.

Надійшла 04.10.2024

References

- 1 Emhartglass.com [Online]. Available: <https://emhartglass.com/sites/default/files/publications/2020-10/TNB255%20-%20VertiFlow%20Assist%20for%20AIS%20machines.pdf>
- 2 Leushin I. O., Chistjakov D. G., Volodin V. A. Influence of cast iron structure on the formation of operational defects of slopforming tooling. *Science and Education. Bauman Moscow State Technical University. Electronic journal*. Vol. 15. 11. pp. 111–123, 2015 [in Russian].
- 3 Hollands L. The Glass to Metal Interface during Container Forming Processes. The University of Sheffield, March 1998.
- 4 Stradomski G., Gzik S., Jakubus A., Nadolski M. The assessment of resistance to thermal fatigue and thermal shock of cast iron. *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 18. № 3. pp. 173–178, 201. <https://doi.org/10.24425/123621>
- 5 Stepnov I. Ye., Gladshtein I. Ye., Design of moulds for glassware. Moscow, Consumer goods industry, 1974, p. 208. [in Russian].
- 6 DSTU 8851:2019 «Alloy iron castings with special properties», 2019 [in Ukrainian].
- 7 Leushin I. O., Zinov'ev Yu. A., Chistjakov D. G. Strengthening phases of cast iron parts of glass moulds with gradient casting structure. *Casting and metallurgy*. Vol. 1. 74. pp. 62–67, 2014 [in Russian].
- 8 Ustimenko A. I., Iukianenko I. V. The casting mold technology influence on the heat-resistant cast iron castings gradient structure formation. *Casting processes*. Vol. 2. 156. pp. 47–55, 2024. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.047> [in Ukrainian].
- 9 Alexandrov M. V., Chistjakov D. G. Formation of gradient structure in glass mould parts made of cast irons with different graphite morphology. *Metallurgy and materials science*. Vol. 3 (100), pp. 219–229, 2013 [in Russian].
- 10 Plemiannikov M. M., Yatsenko A. P., Pylypenko I. V., Kornilovych B. Yu. Innovative technologies in the production of special and household glass. Kyiv: National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2018, p. 298 [in Ukrainian].
- 11 Kovalchuk A. G., Yamshinskij M. M., Fedorov G. Ye. Improvement of technological processes of surface alloying of workpieces in casting moulds. *Metal and castings of Ukrainian*. Vol. 28–10. No. 291–293, pp. 55–63, 2017 [in Russian].
- 12 Kovalchuk O. G., Yamshinskij M. M., Fedorov G. Ye. Production of castings with differentiated surface properties. *Scientific news of NTUU «KPI»*. Vol. 6, pp. 74–80, 2017 [in Ukrainian].

- 13 Bublikov V.V., Bachynsky Yu.D., Nesteruk O.P. Increasing the ductility of high-strength cast iron by in-mould modification of melt with reduced silicon content. *Processes of casting*. Vol. 3. No. 153, pp. 3–11, 2023. <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.003>. [in Ukrainian].
- 14 Yasinskij A.A., Bublikov V.B., Berchuk D.M., Zeljonaja L.A., Yasinskaja Ye.A. Effect of modification method and silicon content on structure and mechanical properties of high-strength cast iron. *Metal and castings of Ukrainian*. Vol. 6. No. 265, pp. 13–17, 2015 [in Russian].
- 15 DSTU EN ISO 945-1:2022 Microstructure of cast irons - Part 1: *Graphite classification by visual analysis*, 2022 [in Ukrainian].
- 16 fimaolimpia.it [Online]. Available: http://www.fimaolimpia.it/en/area-vetro_ghise.php.
- 17 www.unitedcastbar.com, [Online]. Available: <https://www.unitedcastbar.com/es/products-materials/unibar-250/>.

Received 04.10.2024

I. Lukianenko, PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>; Scopus Author ID: 57224367323, Researcher ID: J- 7294-2017

A. Ustymenko, PhD student; e-mail: ustymenko@kpi.ua; <https://orcid.org/0000-0002-5893-6499>

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

FEATURES OF OBTAINING A GRADIENT STRUCTURE IN CAST IRON BILLETS FOR GLASS PACKAGING INDUSTRY MOULDS

Glass manufacturing is an important industry sector that produces a wide range of environmentally eco friendly products, and from building glass to laboratory equipment. However, the production of glass containers requires the use of special equipment - glass moulds that are subjected to significant thermal and mechanical stress during operation, which leads to their rapid wear. Current technologies do not ensure a long service life for glass moulds. One of the main tasks is to develop effective methods for obtaining a gradient structure in cast iron billets with a ferrite metal matrix, which will significantly improve their characteristics and extend their service life. A technology has been developed to create a gradient structure in cast iron billets in the cast state, which improves the heat resistance and mechanical properties of castings. The technology was tested on heat-resistant cast iron, which is known for its high thermal conductivity and strength. To obtain the gradient structure, the company used pour over and in-mold methods of cast iron with modifiers and chillers of different thicknesses.

Main research results:

1. A targeted change in the structure of cast iron billets was achieved through the use of pour over and in-mold methods of processing of cast iron using SB5 and VL63(M) modifiers. This made it possible to create a gradient structure that differs from the traditional homogeneous structure.
 2. The use of 10, 20 and 30 mm thick cast iron chillers made it possible to control the size and shape of the graphite inclusions. For the second blow moulds, an optimum structure with lamellar graphite was achieved, which provides the high thermal conductivity required at high temperatures.
 3. The formation of spheroidal graphite in the surface layers of the first blow moulds was achieved, which increased the resistance to mechanical stress and the durability of the moulds. The degree of spheroidization of spheroidal graphite reached 70-80%.
 4. Studies have shown a smooth transition from lamellar to spheroidal graphite, which improves thermal conductivity and wear resistance of moulding sets.
 5. Metallographic studies have confirmed the presence of a stable ferrite metal matrix that is resistant to cyclic loads, which avoids additional heat treatment and reduces production costs.
- Thus, the introduction of a gradient structure in cast iron billets for glass moulds has significantly improved their performance properties and opens up new opportunities for optimizing production processes.

Keywords: ecology, cast iron, modifier, chiller, structure, graphite, ferrite, solidification character,