

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ З УРАХУВАННЯМ РЕКОМЕНДАЦІЙ СТАНДАРТУ ДСТУ EN 1563:2019

Пашинський В. В., д.т.н., доцент, професор ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: v.v.pashinskiy@mipolytech.education, ORCID: 0000-0003-0118-4748;

Пашинська О. Г., д.т.н., старший науковий співробітник, професор ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, провідний науковий співробітник ДОНФТІ ім. О. О. Галкіна НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: elena.pashinska@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7102-1544;

Бойко І. А., к.т.н., доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: igor.boyko@mipolytech.education, ORCID: 0000-0001-7742-4694.

У роботі розглянуті технологічні можливості підвищення межі міцності та відносного подовження високоміцних чавунів з кулястим графітом з урахуванням рекомендацій стандарту ДСТУ EN 1563:2019. В якості основного методу вибрано підвищення вмісту кремнію для отримання феритної матриці, зміцненої по твердорозчинному механізму. З метою забезпечення низької собівартості виробництва, особливу увагу було приділено обґрунтуванню допустимого вмісту фонових та шкідливих домішок з метою використання дешевого комерційного брухту. Розглянуто також питання стабільності механічних характеристик чавуну при коливаннях технологічних параметрів його виробництва. Показано, що основними джерелами варіабельності характеристик є нестабільність результатів обробки металу в ковші при використанні «sandwich»-процесу, а також коливання вмісту фонових та шкідливих домішок у зв'язку з нестабільністю якості металевого брухту. Встановлено, що в дослідженому діапазоні хімічного складу підвищення вмісту магнію та кремнію сприяє одночасному зростанню міцності та пластичності чавуну, тоді як збільшення вмісту марганцю підвищує міцність, але знижує пластичність. Показано, що для отримання відносного подовження $A5 \geq 14\%$ вміст сірки має бути: $S < 0,006$, фосфору: $P < 0,02$, хрому: $Cr < 0,04$. Вміст олова $Sn < 0,008\%$ не створює негативного впливу на механічні властивості високоміцного чавуну. Також встановлено, що при зростанні вмісту кремнію та магнію в чавунах з високим вуглецевим еквівалентом при високій температурі розливання у форми з'являється тенденція до утворення розірваного та зіркоподібного графіту, що приводить до падіння механічних характеристик чавуну. Рекомендовано запровадити додатковий металографічний контроль на наявність у структурі часток цієї морфології.

Ключові слова: високоміцний чавун; кулястий графіт; ферит; перліт; «сендвіч»-процес; відносне подовження; межа міцності; вуглецевий еквівалент.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.084-097

Вступ. Високоміцний чавун як конструкційний матеріал відомий вже більше вісімдесяти років. Перші зразки були отримані у 1943 році, а в 1949 американський інженер та винахідник Кейт Д. Мілліс (Keith Dwight Millis) із співавторами отримав патент США на сам чавун та промислову технологію його отримання [1]. З того часу цей матеріал широко використовується у машинобудуванні. Основною перевагою високоміцного чавуну є поєднання високих ливарних та службових характеристик сірого чавуну з комплексом механічних характеристик, близьких до показників низько- та середньовуглецевих сталей. Це дає можливість отримувати заготовки складної форми з високими механічними характеристиками. Розміри заготовок наближені до кінцевих розмірів виробів, що зменшує об'єм механічної обробки і собівартість виробів.

Високоміцний чавун може вироблятися в електропечах з використанням високої (до 95%) частки вторинної сировини (комерційний сталевий та чавунний брухт та власний оборотний чавунний брухт ливарного підприємства). При застосуванні технології індукційного плавлення газо- та пиловиділення знаходиться на низькому рівні. Крім того, у кінці життєвого циклу виробу з високоміцного чавуну утилізуються повністю шляхом переплаву, вони не містять дефіцитних чи шкідливих компонентів. Це робить даний матеріал

екологічно дружнім і дозволяє знижувати питомі викиди парникових газів протягом життєвого циклу продукції.

Але як конструкційний матеріал, високоміцний чавун має деякі технологічні особливості. Кінцева структура і комплекс властивостей матеріалу формується, зокрема, у процесі порційного модифікування розплаву на різних етапах. Це може бути внесення модифікаторів та нодуляризаторів на розливний жолоб печі, обробка розплаву в ковші й, додатково, у самій ливарній формі при кристалізації відливки. Кінцевий результат також залежить від температурно-часових умов заповнення форми та геометричних параметрів самої деталі. Тому, незважаючи на велику кількість досліджень у напрямку оптимізації комплексу властивостей та технології отримання відливок, для конкретних умов виробництва і параметрів виробу розробка технології виробництва вимагає проведення експериментальних робіт для визначення оптимальних параметрів процесу.

Постановка проблеми. Важливим аспектом отримання виробів з високоміцного чавуну є забезпечення необхідного комплексу властивостей при відносно низькій собівартості виробництва. Ціна відливок масового сортаменту знаходиться в межах 1–3 євро за кілограм готового виробу. Це накладає значні обмеження на пошук шляхів забезпечення комплексу характеристик, які обумовлені замовником, заходи, що пропонуються, мають не тільки не підвищувати собівартість виготовлення відливок, але й, по можливості, знижувати її. Враховуючи високу варіабельність структури та властивостей високоміцного чавуну залежно від коливань параметрів деталей та нестабільності параметрів виробництва, актуальною проблемою є пошук шляхів підвищення механічних властивостей високоміцного чавуну, а також стабільності його структури та властивостей у максимально можливому інтервалі зміни геометричних параметрів відливки. Важливо також знаходити шляхи зниження чутливості матеріалу до технологічно неминучих коливань параметрів процесу виробництва, або виявленню параметрів, які мають найбільший вплив на коливання характеристик кінцевого продукту з метою їх подальшої стабілізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз результатів досліджень вищевказаної проблеми дозволяє виділити кілька принципових підходів до вирішення проблеми підвищення характеристик високоміцного чавуну. Але перед розглядом цих підходів, необхідно наголосити, що зараз основним нормативним документом, який регламентує виробництво високоміцного чавуну з кулястим графітом, в Україні є стандарт ДСТУ EN 1563:2019 [2]. Цей документ є продовженням лінійки європейських стандартів, яка розпочалася зі стандарту EN1563:2011, в якому містилося два важливих положення, що мають вплив на шляхи вирішення проблеми, яка розглядається в даній роботі. По перше, у стандарті фактично знімаються всі обмеження на склад високоміцного чавуну і визначається, що хімічний склад матеріалу та технологія його виробництва (включаючи термічну обробку) вибираються виробником на свій розсуд з метою забезпечення необхідних механічних характеристик, які замовив споживач.

По друге, у стандарті EN1563:2011 у додаток до ферито-перлітних високоміцних чавунів з кулястим графітом (ferritic to pearlitic spheroidal graphite cast irons) було введено поняття феритних чавунів з кулястим графітом з твердорозчинним зміцненням (solid-solution strengthened ferritic spheroidal graphite cast irons). Тільки для феритних чавунів з твердорозчинним зміцненням, стандарт ДСТУ EN 1563:2019 обумовлює значення вмісту таких елементів, як Si, P, Mn, але наведені величини мають характер рекомендацій.

Таким чином, як дослідники, так і виробники високоміцного чавуну мають нормативно підтвержене право на широку експериментальну та інженерну діяльність навіть при виконанні комерційних замовлень. Крім того, виділення в окрему групу феритних висококремнієвих високоміцних чавунів сприяло значному прогресу в їх дослідженні і дозволило отримати важливі наукові та практичні результати.

Аналіз робіт показує, що для отримання чавунів з підвищеною міцністю та пластичністю одночасно використовуються різні підходи. Резервом підвищення механічних властивостей матеріалу без суттєвої зміни технології виплавки є прискорене охолодження за

рахунок використання облицьованих кокілів замість традиційних пісочно-глинистих форм при литті деталей [3]. Технологія має додатковий енерго- та ресурсозберігаючий ефект завдяки відмові від операції термічної розробки та зменшення витратного коефіцієнта металу за рахунок підвищення точності відливки. Проте впровадження такої технології утруднено на підприємствах з автоматичними формувальними лініями. Більш універсальний підхід пов'язаний з удосконаленням складу та технології обробки металу на етапі виплавки. Так, у роботі [4] одночасне підвищення міцності та пластичності перлітних сірих чавунів було досягнуто за рахунок використання високочистих шихтових матеріалів у комбінації з модифікувально-рафінувальним обробленням вихідного розплаву феросіліцій-магній кальцієвою лігатурою у поєднанні з рафінувальним легкоплавким оксидно-фторидним шлаком. Отримані результати дозволяють підвищити не тільки механічні, але і технологічні характеристики, зокрема знизити величину об'ємної усадки та виключити енергоємну операцію термічної обробки відливок. Проте залишається операція легування розплаву міддю і результати роботи не можуть бути безпосередньо перенесені на процеси отримання феритних чавунів з високою пластичністю ($A_5 \geq 15\%$). Тому в роботах [5, 6] колективом авторів було розглянуто питання впливу підвищеного вмісту кремнію на структуру і механічні властивості високоміцних феритних чавунів у поєднанні з використанням високочистої сировини та ефективних комплексних модифікаторів. Встановлено, що запропонована технологія дозволяє отримати у висококремнієвих феритних чавунах, високий комплекс характеристик міцності і пластичності, проте для досягнення максимальних значень раціонально проводити процес економічного гомогенізувально-феритизувального відпалу.

Слід відзначити, що багато дослідників розглядають високоміцні чавуни на феритній основі як перспективну систему для отримання матеріалу, який може мати межу міцності на рівні чавунів на перлітній основі при суттєво більшій пластичності. Основним механізмом зміцнення таких чавунів вважається твердорозчинне зміцнення висококремнієвого фериту [2, 5, 7].

Проте існує думка, що механізм зміцнення має більш складний характер. Наприклад, у роботах [8, 9] досліджена мікроструктура та механічні властивості при випробуванні на розтягнення при кімнатній температурі високоміцних феритних чавунів у діапазоні концентрації кремнію 2,29% до 9,12%. За даними авторів, хоча твердість фериту росте у всьому дослідженому інтервалі, але максимальна міцність досягається при концентрації кремнію 5,0–5,2% і приблизно в цьому ж діапазоні відносно подовження знижується до нульових значень. На думку авторів, це пов'язано, у тому числі, з негативним впливом високих концентрацій кремнію на процес сфероїдизації графіту і підвищення ризику формування так званого розірваного або зіркоподібного графіту.

До схожих висновків приходять автори робіт [10, 11], які також відмічають нелінійний вплив зростання вмісту кремнію на механічні властивості і пов'язують це з його впливом на морфологію графітних часток. Зокрема у [12–14], встановлено, що збільшення вмісту кремнію більше 4,3–4,6% призводить до зниження ступеня сфероїдизації графіту. Зміна морфології графітних часток приводить до того, що оцінки параметрів часток графіту по стандартах ISO 16112:2017 та ISO 945-4-2019 починають суттєво відрізнятися. Дискусійним є питання, який з параметрів форми часток – Roundness Graphite Shape Factor (RSF згідно ISO 945-4-2019) – фактор кулястості форми графіту або Sphericity Graphite Shape Factor (SSF згідно ISO 16112:2017) – фактор сферичності форми графіту, є більш інформативним. На думку авторів [14], параметр SSF більш точно дозволяє оцінити характеристики графітних часток у високоременієвому високоміцному чавуні.

У роботах [15, 16] розглядається вплив хімічного складу металевої феритної матриці чавуну на комплекс механічних властивостей. Аналізується як вплив фонових домішок (мідь, хром) так і вплив цілеспрямованого легування молібденом та ніобієм. Отримані результати свідчать, що завдяки підвищеному запасу пластичності феритної матриці, такі чавуни є перспективною основою для подальшого підвищення комплексу механічних

характеристик шляхом розробки легованих феритних чавунів. Цей підхід заслуговує на увагу, тому що на думку багатьох авторів, зокрема [11, 12–14], підвищення вмісту кремнію вище 5–5,3% не дає подальшого зростання характеристик у зв'язку з сильним падінням пластичності.

Таким чином, технологи та виробничий персонал виконуючи вимоги стандарту ДСТУ EN 1563:2019 мають у своєму розпорядженні широкий арсенал методів впливу на кінцеві властивості високоміцного чавуну і їх вибір залежить від технологічних можливостей конкретного виробництва та співвідношення собівартість/властивості, при якій виконання замовлення є економічно вигідним і ціна виробу є конкурентоспроможною.

Мета та задачі дослідження. Метою даного дослідження є розробка економічної технології виробництва високоміцного чавуну з кулястим графітом, яка забезпечить отримання межі міцності в інтервалі 450–600 МПа при відносному подовженні A_5 в інтервалі 20–10% при мінімізації сумарних виробничих витрат у технологічному ланцюгу виробництва.

Для досягнення мети дослідження необхідно було вирішити наступні задачі:

- визначити базовий склад високоміцного чавуну для його подальшого змінення залежно від вимог замовника до механічних характеристик готової продукції;
- обґрунтувати допустимий рівень вмісту фонових та шкідливих домішок, при яких досягається заданий рівень механічних характеристик;
- дослідити ступінь варіативності характеристик чавуну та технологічних параметрів його виробництва з метою виявлення основних факторів, які збільшують нестабільність характеристик матеріалу;
- дослідити особливості формування мікроструктури високоміцного чавуну при вибраних інтервалах коливання його хімічного складу та технологічних параметрів виробництва.

Матеріал та методи дослідження. Виплавку дослідних чавунів проводили в електричній середньочастотній індукційній печі ємністю 5000 кг. Шихта для виплавки формувалась зі сталевих брухту трьох категорій залежно від стабільності хімічного складу і присутності фонових та шкідливих домішок, сталевих відходів низьковуглецевої листової сталі («висічки»), передільного чавуну та також власного оборотного брухту високоміцного чавуну. Для корекції вмісту вуглецю та кремнію використовували високовуглецеву добавку Carburit, а також карбід кремнію та феросиліцій. Піч обладнана пристроєм для подачі модифікатора на жолоб печі при випуску металу в ківш. Контроль температури в печі проводили з використанням пірометра HERAEUS DIGITEMP-E, хімічний склад контролювали методом оптико-емісійного аналізу на OES-аналізаторі GNRS9 ATLANTIS, у ході ведення плавки для оперативного контролю вмісту вуглецю та кремнію використовували електрохімічний експрес-аналізатор DigLab, в якості допоміжного методу оцінки відливали клинову пробу.

Обробку розплаву в ковші для формування структури високоміцного чавуну проводили по технології «sandwich»-процесу в ковші ємністю 500 кг з використанням сфероїдизуючого реагенту «6Mg – FeSi» та модифікатора системи Fe-Si-Ba. Після закінчення обробки проводили вимір стартової температури розливання для кожного ковша погрузною термопарою AJAY SYSCON TEMPSTICK 429 S. Пробу на визначення хімічного складу відбирали в середині розливки ковша, тоді ж відливали пробу для визначення механічних характеристик згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN 1563:2019.

Оцінку мікроструктури (визначення характеристик графітної фази) проводили на оптичному металографічному мікроскопі METKON IMM 902 згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 945-1:2022. Оцінку співвідношення ферит/перліт проводили в автоматичному режимі з використанням програмного забезпечення мікроскопа.

Вимірювання механічних характеристик при випробуванні на розтягнення на універсальній випробувальній машині SHIMADZU AG-X PLUS проводили згідно з вимогами

стандарту ДСТУ EN ISO 6892-1:2022, підготовка зразків – згідно ДСТУ EN 1563:2019. Вимірювання твердості проводили методом Бринеля на твердомірі QNESS Q250CS згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 6506-4:2019.

Основні результати та їх обговорення. Основною маркою високоміцного чавуну, яка була вибрана як стартова точка для визначення нового складу був ферито-перлітний високоміцний чавун EN-GJS 500-7. На основі попереднього досвіду виробництва для отримання відливок з товщиною стінки 10–50 мм по технології, описаній вище, задовольнити вимогам стандарту ДСТУ EN 1563:2019 до цієї марки можна було при підтриманні хімічного складу чавуну після процедури обробки в ковші у межах: C = 3,4–3,6%, Si = 2,3–2,6%, Mg = 0,03–0,045%, Mn < 0,4%. Вміст S та P визначався співвідношенням у шихті брухту різних категорій та становило в середньому S = 0,11%, а P = 0,027%. Такий склад при використанні технології модифікування, яка описана раніше, дозволяло отримувати межу міцності R_m чавуну не нижче 500 МПа при відносному подовженні A₅ не нижче 7% у 95,7% плавок.

Слід вказати, що рівень 4,3% невідповідних плавок негативно відбивалися на економічних показниках виробничого процесу. Крім того, у портфелі замовлень все більшу частину стали складати відливки з марок з підвищеною пластичністю, таких як EN-GJS 400-15, EN-GJS 450-10, EN-GJS 450-18, EN-GJS 500-14, EN-GJS 600-10. Тому виникла необхідність визначення нового базового складу, який дозволив би отримувати підвищену пластичність металеві матриці. Вирішення цієї задачі дозволило б розширити спектр замовлень, які могли бути прийняті до виробництва та знизити і кількість браку при виконанні замовлень на марку EN-GJS 500-7, яка є одною з основних у портфелі замовлень. Незважаючи на те, що стандарт ДСТУ EN 1563:2019 дозволяє використовувати термічну обробку для підвищення комплексу характеристик чавуну, у такому випадку цей технологічний прийом не міг бути застосований з міркувань собівартості продукції.

В якості основного напрямку зміни хімічного складу базуючись на рекомендаціях стандарту ДСТУ EN 1563:2019 та результатах робіт [5, 6], було прийнято рішення про підвищення вмісту кремнію в чавуні при одночасному зниженні вмісту сірки та фосфору. Було проведено серію дослідних плавок. Приклади варіантів складу, які дозволили отримати позитивні результати, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад та механічні властивості експериментальних плавок

№ плавки	Вміст елементів, % ваг.							Механічні властивості	
	C	Si	Mn	Mg	P	S	C екв.	R _m , МПа	A ₅ , %
GJS 500-7	3,63	2,48	0,3	0,042	0,04	0,011	4,48	585	10
1	3,21	3,21	0,19	0,036	0,021	0,009	4,28	506	16
2	3,49	3,43	0,37	0,037	0,02	0,006	4,63	566	14
3	3,51	3,53	0,44	0,033	0,018	0,006	4,69	610	18

У першому рядку наведений приклад складу, який використовувався для отримання марки EN-GJS 500-7. Потрібно вказати, що відсутність необхідності отримувати високий рівень відносного подовження (A₅ ≥ 7%) дозволяють працювати на більш дешевій шихті, при використанні якої ми маємо підвищений вміст сірки та фосфору. Це є перевагою марки з погляду собівартості. Проте вибираючи склад матеріалу, технологи повинні враховувати цілий ряд обмежень. Зокрема, необхідність гарантованого отримання межі міцності на рівні не нижче 500 МПа вимагає підвищувати вміст марганцю для збільшення частки перліту в структурі матриці. З тих же міркувань доводиться знижувати вміст кремнію для зменшення його впливу, як феритизатора. Але у цьому випадку для підтримання значень вуглецевого еквівалента матеріалу в діапазоні 4,2–4,6% (що забезпечує максимальні ливарні властивості)

необхідно підвищувати вміст вуглецю. Все це призводить до зниження пластичності матеріалу і для забезпечення значень $A_5 \geq 7\%$ необхідно обмежувати вміст сірки та фосфору. Таким чином, у технологів залишається невеликий простір для керування складом, у випадках коли значення механічних властивостей марки EN-GJS 500-7 потрібно отримати у відливках з різними геометричними параметрами (товщиною стінки).

У подальших експериментах вивчали можливість отримання більш високої пластичності сплаву, щоб гарантовано виконувати вимоги стандарту для марки EN-GJS 500-7, а також мати можливість випускати вироби з марок із підвищеною пластичністю.

Як видно з даних табл. 1, для базової плавки 1 збільшення вмісту кремнію, зниження вмісту вуглецю та марганцю дозволили гарантовано отримати високу пластичність матеріалу, але значення межі міцності наблизилися до нижньої границі, яка задається стандартом. Тому цей варіант складу надалі був взятий за основу для розробки базового сплаву для марок EN-GJS 400-15, EN-GJS 450-10, EN-GJS 450-18. Експерименти показали, що вміст сірки та фосфору для цього варіанту складу може бути відносно високим, що дозволяє використовувати більш дешевий металевий брухт.

Також було встановлено, що для отримання базового складу, який буде придатним для отримання марок EN-GJS 500-14, EN-GJS 600-10 необхідно одночасно підвищити вміст таких елементів, як вуглець, кремній, марганець при одночасному зниженні вмісту сірки та фосфору (плавка №2). Правильність такого підходу підтверджують результати випробувань зразків плавки №3, в якій були отримані максимальні в даній серії експериментів значення межі міцності та відносного подовження одночасно. Проте в складі плавки №3 значення вуглецевого еквівалента стають близькими до верхньої межі оптимальності, що потребує проведення додаткових досліджень можливого впливу цього факту на структуру та властивості чавуну при коливаннях виробничих параметрів у ході серійного виробництва.

Таким чином у результаті проведених експериментів були запропоновані нові базові складу для подальшої оптимізації для отримання марок високоміцних та високопластичних чавунів з використанням рекомендації стандарту ДСТУ EN 1563:2019. Але, як показує виробничий досвід, для отримання гарантованих результатів необхідно провести дослідження стабільності структури та властивостей матеріалу при неминучому коливанні параметрів виробництва. Діапазон цих коливань визначається цілою низкою об'єктивних факторів, включаючи коливання складу сировини, коливання параметрів виробництва відливок (параметри пісочно-глиняних форм, коливання температури розливки, різний час перебування в модифікованому стані перших та останніх порцій металу в ковші та ін.) та суб'єктивних (кваліфікація персоналу та його психофізіологічний стан). Як правило, одночасний вплив на результат процесу великої кількості факторів, які змінюються випадковим чином незалежно один від одного, призводить до розкиду вхідних параметрів по нормальному закону розподілу випадкової величини. Тому надалі дослідження були спрямовані на накопичення та обробку даних щодо стабільності характеристик продукції та виявлення факторів, які в найбільшій мірі впливають на порушення цієї стабільності.

У таблицях 2 та 3 як приклад, приведені характеристики процесу (хімічний склад та температура початку розливання) і механічні характеристики зразків чавуну марки EN-GJS 450-10, відлитих із кожного з 8 ковшів ємністю 500 кг, на які була розлита плавка масою 4000 кг. Коефіцієнт варіації величини розраховували по формулі (1)

$$COV = \frac{Max - Min}{Average} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Таблиця 2 – Варіативність параметрів процесу розливки плавки та складу матеріалу

№ ковша	T_p , °C	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Mg [%]	Cr [%]	Cu [%]	Sn [%]
1	1429	3,449	3,424	0,209	0,009	0,029	0,0438	0,049	0,055	0,006
2	1432	3,448	3,427	0,209	0,008	0,028	0,0383	0,048	0,055	0,006
3	1439	3,508	3,433	0,193	0,008	0,028	0,0454	0,045	0,093	0,008
4	1440	3,445	3,359	0,192	0,007	0,028	0,0357	0,045	0,092	0,007
5	1428	3,528	3,413	0,196	0,009	0,029	0,0453	0,045	0,093	0,008
6	1425	3,469	3,419	0,194	0,007	0,028	0,0365	0,044	0,092	0,008
7	1430	3,525	3,349	0,199	0,007	0,028	0,0377	0,045	0,093	0,008
8	1422	3,515	3,35	0,195	0,007	0,028	0,0376	0,044	0,092	0,008
Характеристики варіативності										
Максимум <i>Max</i>	1440	3,528	3,433	0,209	0,009	0,029	0,0454	0,049	0,093	0,008
Мінімум <i>Min</i>	1422	3,445	3,349	0,192	0,007	0,028	0,0357	0,044	0,055	0,006
Середнє <i>Average</i>	1431	3,487	3,391	0,201	0,008	0,029	0,041	0,047	0,074	0,007
COV, %	1,26	2,38	2,48	8,48	25,00	3,51	23,92	10,75	51,35	28,57

Таблиця 3 – Варіативність характеристик матеріалу

№ ковша	Межа текучості $R_{0,2}$, Мпа	Межа міцності R_m , Мпа	Відносне подовження A_5 , %
1	418	582	13,1
2	418	549	10,9
3	358	584	10,0
4	388	543	12,2
5	411	591	13,3
6	439	560	10,1
7	440	573	13,4
8	389	508	11,9
Характеристики варіативності			
Максимум <i>Max</i>	440	591	13,4
Мінімум <i>Min</i>	358	508	10,0
Середнє <i>Average</i>	399	549	11,68
COV, %	20,59	15,22	28,69

Аналізуючи дані таблиці 3, можна зробити висновок, що, хоча вся плавка відповідала вимогам до марки EN-GJS 450-10, але варіативність характеристик чавуну є дуже високою. Для характеристик міцності це не є критичним, тому що їх значення відповідають вимогам стандарту з великим запасом ($R_{0,2} \geq 320$ МПа, $R_m \geq 450$ МПа) тоді як мінімальні значення відносного подовження A_5 для зразків від ковшів 2, 3, 6 знаходяться, фактично, на межі допустимого, при чому варіативність показника відносного подовження є максимальною (28, 69%) серед всіх механічних характеристик.

З аналізу даних таблиці 2 видно, що серед параметрів процесу розливки найвищий коефіцієнт варіації мають такі показники, як вміст Cu (51,35%), Sn (28,57%), S (25%), Mg (25,92%). Але проблема полягає в тому, що фізичні причини коливання таких елементів як Cu та Sn у металі однієї плавки відсутні і є наслідком загальної невизначеності процесу

аналізу хімічного складу. Коливання вмісту Mg та S, напроти, є наслідком нестабільності протікання «sandwich»-процесу в ковші внаслідок коливань температури випуску металу та параметрів потоку металу при зміні його рівня в печі. Тому було зроблено висновок про необхідність стабілізації процесу обробки металу в ковші для зменшення варіативності технологічного процесу в цілому.

Достовірний статистичний аналіз багатофакторного процесу виробництва високоміцного чавуну потребує накопичення значного масиву інформації. На наступному етапі були визначені характеристики варіативності процесу виробництва марки EN-GJS 450-10 за результатами 30 плавок протягом 10 тижнів. З даних таблиці 4 видно, що варіативність процесу у часі значно вища, ніж у межах однієї плавки (див. табл. 2 та 3). Це пов'язано, насамперед із коливаннями складу металевих шихти. Дещо збільшилася і варіативність «sandwich»-процесу, яку оцінювали по варіативності вмісту магнію. Але внаслідок правильного вибору базового складу при розрахунку шихти, мінімальні значення механічних властивостей не вийшли за межі вимог стандарту.

Проте слід зазначити, що значна частина плавок (47%) мала високі значення механічних властивостей і, фактично, відповідала вимогам стандарту до марки EN-GJS 500-14. Відповідні характеристики варіативності плавок EN-GJS 450-10 та EN-GJS 500-14 наведені у таблиці 5. Аналіз даних дозволяє зробити висновок, що показники варіативності хімічного складу двох марок чавунів практично не відрізняються. Практично однакові характеристики варіативності й у межі міцності. Фактично, різниця між марками полягає тільки у значенні відносного подовження. Слід зробити висновок, що формування такої характеристики, як пластичність високоміцного чавуну вказаного базового складу не залежить від його коливань у досліджених межах. Це підтверджується результатами парного кореляційного аналізу зв'язку значень відносного подовження та хімічних елементів, що входять до складу чавуну. Всі коефіцієнти є статистично незначимими на рівні значущості 0,95.

Таблиця 4 – Узагальнені показники варіативності процесу виробництва чавуну EN-GJS 450-10

Показник	Хімічний склад металу								Механічні властивості	
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Mg [%]	Cr [%]	Cu [%]	R _m , Mpa	A ₅ , %
Характеристики варіативності										
Максимум <i>Max</i>	3,736	3,643	0,241	0,010	0,038	0,0531	0,064	0,099	597	20,88
Мінімум <i>Min</i>	3,400	3,020	0,164	0,007	0,028	0,0332	0,036	0,027	486	10,01
Середнє <i>Average</i>	3,513	3,274	0,200	0,008	0,033	0,041	0,046	0,065	535	14,35
COV, %	9,56	19,03	38,51	36,00	30,00	48,11	61,27	111,05	20,82	75,74

Таблиця 5 – Порівняння показників варіативності процесу виробництва чавуну плавки, що відповідають марці EN-GJS 450-10 та EN-GJS 500-14

Показник	Хімічний склад металу								Механічні властивості	
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Mg [%]	Cr [%]	Cu [%]	R _m , Mpa	A ₅ , %
Характеристики варіативності EN-GJS 450-10										
Максимум <i>Max</i>	3,702	3,424	0,240	0,010	0,038	0,0531	0,061	0,092	597	13,7
Мінімум <i>Min</i>	3,408	3,020	0,167	0,007	0,028	0,0338	0,036	0,027	486	10,0

Середнє <i>Average</i>	3,519	3,230	0,208	0,008	0,032	0,041	0,048	0,064	531	12,2
COV, %	8,34	12,51	35,04	35,89	30,97	47,25	52,08	101,3	20,9	29,8
Характеристики варіативності EN-GJS 500-14										
Максимум <i>Max</i>	3,736	3,643	0,241	0,009	0,038	0,0530	0,064	0,099	577	20,9
Мінімум <i>Min</i>	3,400	3,025	0,164	0,007	0,028	0,0332	0,036	0,027	502	14,1
Середнє <i>Average</i>	3,508	3,312	0,193	0,008	0,034	0,042	0,044	0,065	538	16,2
COV, %	9,58	18,66	39,99	24,06	29,20	47,35	64,09	110,0	13,9	42,2

Проте, графіки парних залежностей вказують на наявність певних тенденцій у впливі окремих елементів на значення пластичності (рис. 1). На рис. 1а, б наведені залежності відносного подовження від вмісту елементів, які мають максимальний позитивний вплив на пластичність, на рис. 1 в, г – максимально негативний вплив. При подальшій оптимізації базового складу чавуну слід рекомендувати підвищувати вміст кремнію та магнію, тим більше, що вони мають позитивне значення коефіцієнта парної кореляції і з межею міцності. Відповідно слід знижувати вміст марганцю та хрому у тих випадках, коли необхідне підвищення відносного подовження.

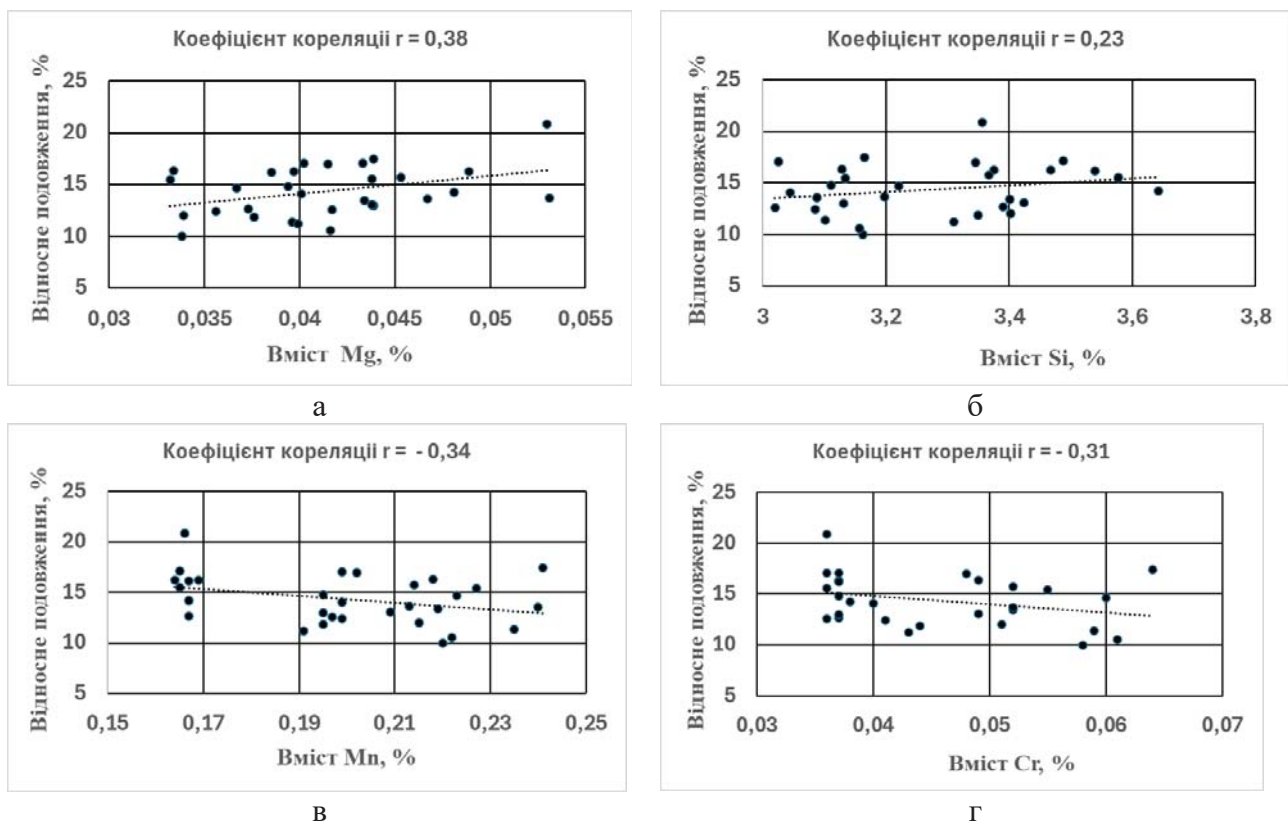


Рисунок 1 – Вплив елементів хімічного складу чавуну на значення відносного подовження
а – вплив магнію; б – вплив кремнію; в – вплив марганцю, г – вплив хрому

Отримані дані не протирічають результатам, отриманим іншими дослідниками. Зниження вмісту хрому технологічно може бути реалізовано шляхом використання лому низьковуглецевих нелегованих марок сталей. При використанні власного необхідно слідкувати за збереженням його чистоти щодо вмісту шкідливих домішок сірки, фосфору, кольорових металів (мідь, олово) та хрому при багаторазовому обертанні його в технологічному процесі.

Проведені дослідження підтвердили, що підвищення вмісту кремнію вище 3% є ефективним засобом отримання чавунів з одночасно високими значеннями межі міцності та відносного подовження. Проте, стабільне отримання високих показників пластичності високоміцного чавуну неможливо тільки шляхом регламентації та стабілізації хімічного складу чавуну. Зміна хімічного складу призводить до зміни морфології графітних часток та структури металевої матриці. Металографічні дослідження показали, що чавуни з базовими складами, які відповідають табл. 1, мають переважно феритну матрицю (рис. 2 б) з графітними частками з високим ступенем сфероїдизації (більше 80%) з переважаючою формою графітних часток типу VI по ДСТУ EN ISO 945-1:2022 (рис. 2 а). Приклади таких структур наведені на рисунку 2. Проте, у процесі роботи було виявлено, що у висококремнієвих чавунах вуглецевий еквівалент як правило, знаходиться на верхній межі оптимальних значень (4,6–4,7%) і при одночасному отриманні вмісту магнію після обробки в ковші на рівні 0,04% і вище можливе протікання небажаного явища формування розірваних та зіркоподібних часток графіту (див. рис. 3). Розірвана форма легко ідентифікується і фіксується як відхилення, тоді як зіркоподібні частки (рис. 3 б) при невеликих збільшеннях мікроскопа ($\times 100$) можуть ідентифікуватися програмою автоматичної обробки зображень як сферичні частки форми типу VI (рис. 3 а), що призводить до неправильної оцінки мікроструктури, яка фактично є небажаною. Оскільки формування графітних часток такого типу призводить, як правило до зниження і міцності і пластичності одночасно, то своєчасне виявлення відхилень і корекція технології виробництва дозволить знизити втрати від барку і буде запобігати випуску невідповідної продукції.

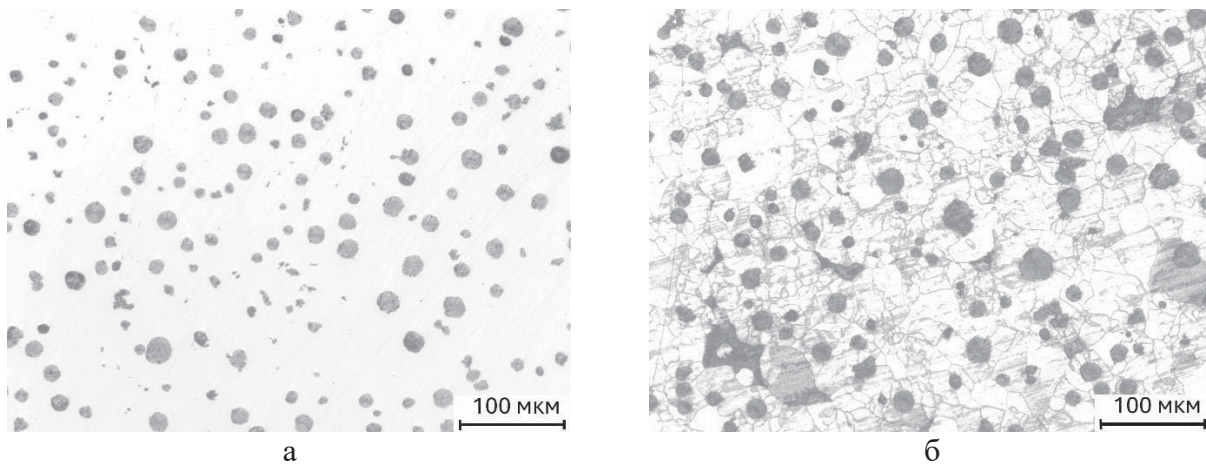


Рисунок 2 – Мікроструктура високоміцного феритного чавуну базового хімічного складу 2 (табл. 1), $\times 100$ а – форма графітних часток; б – структура матриці (травлення 4% розчином HNO_3 в етанолі)

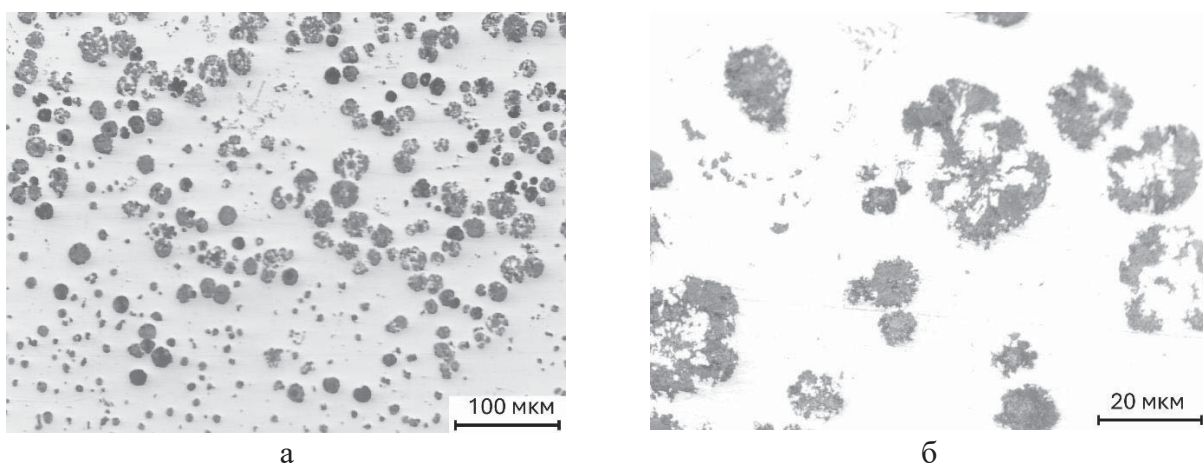


Рисунок 3 – Мікроструктура високоміцного феритного чавуну з виділеннями зіркоподібного графіту, а – форма графітних часток, $\times 100$; б – форма графітних часток, $\times 500$

Для запобігання утворення графітних часток такої морфології потрібно слідкувати за тим, щоб вуглецевий еквівалент та температура металу в ковші при початку розливання не перевищували вказані в інструкції. Персонал лабораторії металографії повинен пройти додатковий інструктаж з розпізнавання часток зіркоподібного фериту.

Таким чином, у результаті проведення роботи були визначені технологічні параметри, які дозволили гарантувати дотримання вимог стандарту щодо значень відносного подовження при виробництві високоміцного чавуну марки EN-GJS 500-7 у 99,2% плавок, тобто знизити кількість отримання браку при виробництві продукції з цієї марки на 3,5%. Економічний ефект при цьому складає 1200–1500 грн/т лиття в залежності від ціни литих деталей.

Значно більша ефективність від впровадження результатів досліджень досягається при виконанні замовлень на вироби з марок EN-GJS 450-10 та EN-GJS 500-14. Оскільки при використанні базової технології виплавки неможливо було гарантувати отримання потрібних значень відносного подовження без проведення додаткової термічної обробки литих деталей, а для її проведення не було відповідного термічного обладнання, то не було можливості приймати замовлення на таку продукцію. Впровадження рекомендацій роботи дозволяє розширити портфель замовлень підприємства та отримати додатковий економічний ефект за рахунок випуску продукції з більшою доданою вартістю.

Висновки. У результаті проведених досліджень були отримані дані, які дозволили зробити наступні висновки:

– З урахуванням рекомендації стандарту ДСТУ EN 1563:2019 і для отримання підвищеної межі міцності та відносного подовження одночасно був запропонований підхід до вибору складу чавуну з підвищеним вмістом кремнію в діапазоні 3,0–3,6% при одночасній корекції вмісту вуглецю таким чином, щоб значення вуглецевого еквівалента були в діапазоні 4,2–4,7%. Додатковим інструментом підвищення міцності може бути збільшення вмісту марганцю до 0,4%, але при збільшенні його вмісту може спостерігатися зниження значень відносного подовження.

– Допустимий рівень вмісту фонових та шкідливих домішок вибирається виходячи з вимог до пластичності матеріалу. Для отримання відносного подовження $A_5 \geq 14\%$ вміст сірки має бути: $S < 0,006$, фосфору: $P < 0,02$, хрому: $Cr < 0,04$. Вміст олова $Sn < 0,008\%$ не створює негативного впливу на механічні властивості високоміцного чавуну.

– Найбільш варіативною характеристикою чавуну вказаного складу є значення відносного подовження, для якого коефіцієнт варіації COV може досягати 42%. Найбільш варіативним параметром процесу при розливці плавки після порційної обробки металу в ковшах є вміст магнію, що може бути пов'язано з нестабільністю протікання «sandwich»-процесу при обробці в ковші. У довгостроковій перспективі основним джерелом варіативності є коливання вмісту фонових та шкідливих домішок у складі чавуну, що пов'язано з нестабільністю складу металеві шихти, зокрема комерційного брухту. Тому для отримання вузького діапазону коливання механічних характеристик потрібно удосконалення операції обробки металу в ковші «sandwich»-процесом та селекція джерел постачання брухту.

– Особливістю формування мікроструктури високоміцного чавуну при вибраних інтервалах коливання його хімічного складу та технологічних параметрів виробництва є підвищений ризик формування розірваних та зіркоподібних часток графіту при одночасному збігу таких факторів, як високий вуглецевий еквівалент, високий вміст магнію та висока температура розливання металу у форми. Формування такої морфології графіту призводить до зниження механічних характеристик. Попередження цього явища потребує більш жорсткої регламентації верхнього рівня вищевказаних параметрів.

– Впровадження результатів роботи дозволило знизити рівень випуску невідповідної продукції з чавуну марки EN-GJS 500-7 на 3,5% та отримати додатковий економічний ефект

внаслідок розширення пакета замовлень на випуск продукції з марок EN-GJS 450-10 та EN-GJS 500-14 з більшою доданою вартістю.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення раціонального верхнього рівня вмісту кремнію, як найбільш дешевого легуючого елемента в чавуні. Також перспективним є проведення досліджень у напрямку мікролегування високоміцного феритного чавуну сильними карбідоутворюючими елементами (V, Nb, Ti, Mo) з метою додаткового зміцнення феритної матриці. З погляду удосконалення технології необхідне проведення досліджень з удосконалення реалізації «sandwich»-процесом. З погляду розвитку методів контролю процесу потрібно удосконалення методики оцінки наявності в структурі небажаних форм графітних часток.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Patel, Shailesh. "A century of discoveries, inventors, and new nickel alloys". *JOM: Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 58 (9). Springer Boston: 18–20. <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0076-y>.
2. ДСТУ EN 1563:2019 Литво. Чавун з кулястим графітом (EN 1563:2018, IDT). Розробник: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). 2019 р. 47 с.
3. Бубликов В. Б., Нарівський А. В., Бачинський Ю. Д., Технологія отримання тонкостінних виливків з високоміцного чавуну в облицьованих кокілях з використанням внутрішньоформового модифікування розплаву. *Метал та лиття України.*, vol. 29, 2021. №1, с. 46–53. <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>.
4. Бубликов В. Б., Бачинський Ю. Д., Нестерук О. П. Одержання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними та механічними властивостями. *Процеси лиття*. 2024. №1 (155). с. 4–13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003>.
5. Бубликов В. Б., Нарівський А. В., Бачинський Ю. Д., Ясинський О. О. Легований кремнієм високоміцний чавун та його застосування. *Процеси лиття*. 2020. №1 (139). с. 20–29.
6. Бубликов В. Б., Нарівський А. В., Бачинський Ю. Д., Нестерук О. П. Розвиток технологій одержання високопластичних високоміцних чавунів феритного класу. *Метал та лиття України.*, vol. 30, 2022. №3, с. 72–78. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.072>.
7. Lutz Horbach, Jiali Zhang, Tobias Sedlatschek, Felix Weber and oth. The effect of silicon on critical resolved shear stress of solid solution strengthened ferritic ductile iron. *Materials&Design*. 244 (2024) 113130. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113130>.
8. Urko de la Torre Rodolfo González-Martínez Jacques Lacaze Jon Sertucha Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part I – Microstructure *Materials Science and Engineering: A* Volume 712, 17 January 2018, Pages 794–802 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.050>.
9. Rodolfo González-Martínez, Urko de la Torre, André Jacques Lacaze, Ebel Jon Sertucha. Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part II – Mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A* Volume 712, 17 January 2018, Pages 803–811 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.051>.
10. Pashynskiy V. V., Pashynskaya O. G., Boyko I. O. Structure aspects of mechanical properties of ductile iron formation/ International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 1.p. 106–109. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-32>.
11. Daniel Franzen, Bjoörn Pustal and Andreas Buhrig-Polaczek. Influence of graphite-phase parameters on the mechanical properties of high-silicon ductile iron. *International Journal of Metalcasting*. Volume 17, Issue 1, 2023. Pages 4–21 <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00761-5>.

12. Stan S. C., Chisamera M., Riposan I., Neacsu E. L. and Cojocaru A. M. Structure Characteristics of Silicon Alloyed Ductile Cast Iron. 7th International Conference on Advanced Materials and Structures – AMS 2018 IOP Publishing IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering* 416 (2018) 012077 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/416/1/012077>.

13. Riposan I., Stan S. Graphite Compactness Degree and Nodularity of High-Si Ductile Iron Produced via Permanent Mold versus Sand Mold Casting. *Materials* 2022, 15, 2712. <https://doi.org/10.3390/ma15082712>.

14. Riposan I., Anca D., Stan I., Chisamera M., Stan S. Graphite Nodularity Evaluation in High-Si Ductile Cast Irons. *Materials* 2022, 15, 7685. <https://doi.org/10.3390/ma15217685>.

15. Alhussein A., Risbet M., Bastien A., Chobaut J. P. and oth. Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron *Materials Science and Engineering: A* Volume 605, 27 May 2014, Pages 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.057>.

16. Márcio Medeiros de Magalhães, Guilherme Vieira Braga Lemos, André Froehlich, Henrique Piaggio and oth. Microstructure and mechanical properties of SiMo ductile cast irons alloys with varied Mo and Nb contents. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 30, May–June 2024, Pages 6301–6308. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.029>.

REFERENCES

1. Patel, Shailesh (September 2006). "A century of discoveries, inventors, and new nickel alloys". *JOM: Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 58 (9). Springer Boston: 18–20. <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0076-y>.

2. DSTU EN 1563:2019 (2019) Lytvo. Chavun z kulyastym graphytom (EN 1563:2018, IDT). Rozrobnik DP "Ukraynskyi naukovo-doslydnyi s navchalnyi tcentr problm standaryzatsyi, srertyfykatsyi ta yakosti (DP «UkrNDTS»)). 47 p.

3. Bublykov, V. B., Naryvskiy, A. V., Bachynskiy, Y. D. (2021). Technologiya otrymannya tonkostynnykh vylyvkyv x vysokomytsnogo chavuny v oblytsovanykh kokylyakh z vykorystanniam vnutyryshnyoformovogo madyfykyvannya rozplavu. *Metal ta lyttya Ukrainy*. vol. 29, #1, p. 46–53. <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>.

4. Bublykov, V. B., Bachynskiy, Y. D., Nesteruk, O. P. (2024). Oderzhannya vysokomytsnykh chavunyv perlitnogo klasu z pydvyschenymy technologychnymy ta mechanichnymy vlastyvostyamy. *Protsesy Lyttya* #1 (155). p. 4–13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003>.

5. Bublykov, V. B., Naryvskiy, A. V., Bachynskiy, Y. D., Yasynskiy, O. O. (2020). Legovanyi kremnyem vysokomytsnyi chavun ta yogo zastosuvannya. *Protsesy Lyttya*. #1 (139). p. 20–29.

6. Bublykov, V. B., Naryvskiy, A. V., Bachynskiy, Y. D., Nesteruk, O. P. (2022). Rozvytok technology oderzhannya vysokoplastychnykh vysokomytsnykh chavunyv ferytnogo klacu. *Metal ta lyttya Ukrainy* vol. 30, #3, p. 72–78. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.072>.

7. Lutz Horbach, Jiali Zhang, Tobias Sedlatschek, Felix Weber and oth. (2024). The effect of silicon on critical resolved shear stress of solid solution strengthened ferritic ductile iron. *Materials&Design*. 244 113130. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113130>.

8. Urko de la Torre Rodolfo González-Martínez Jacques Lacaze Jon Sertucha (2018). Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part I – Microstructure *Materials Science and Engineering: A* Volume 712, 17 January 2018, Pages 794–802 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.050>.

9. Rodolfo González-Martínez, Urko de la Torre, André Jacques Lacaze, Ebel Jon Sertucha. (2018). Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part II – Mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A* Volume 712, 17 January, Pages 803–811 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.051>.

10. Pashynskiy, V. V., Pashynskaya, O. G., Boyko, I. O. (2023). Structure aspects of mechanical properties of ductile iron formation/ International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 1.p. 106–109. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-32>.
11. Daniel Franzen, Bjoörn Pustal and Andreas Buhrig-Polaczek (2023). Influence of graphite-phase parameters on the mechanical properties of high-silicon ductile iron. *International Journal of Metalcasting*. Volume 17, Issue 1, 2023. Pages 4–21 <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00761-5>.
12. Stan, S. C., Chisamera, M., Riposan, I., Neacsu, E. L. and Cojocaru A. M. (2018). Structure Characteristics of Silicon Alloyed Ductile Cast Iron. 7th International Conference on Advanced Materials and Structures – AMS 2018 IOP Publishing IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering* 416 012077 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/416/1/012077>.
13. Riposan, I., Stan, S. (2022). Graphite Compactness Degree and Nodularity of High-Si Ductile Iron Produced via Permanent Mold versus Sand Mold Casting. *Materials* 2022, 15, 2712. <https://doi.org/10.3390/ma15082712>.
14. Riposan, I., Anca, D., Stan, I., Chisamera, M., Stan, S. (2022). Graphite Nodularity Evaluation in High-Si Ductile Cast Irons. *Materials* 2022, 15, 7685. <https://doi.org/10.3390/ma15217685>.
15. Alhussein, A., Risbet, M., Bastien, A., Chobaut, J. P. and oth. (2014). Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron *Materials Science and Engineering: A* Volume 605, 27 May 2014, Pages 222–228 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.057>.
16. Márcio Medeiros de Magalhães, Guilherme Vieira Braga Lemos, André Froehlich, Henrique Piaggio and oth. (2024). Microstructure and mechanical properties of SiMo ductile cast irons alloys with varied Mo and Nb contents. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 30, May–June 2024, Pages 6301–6308. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.029>.

Pashynskiy V. V., Pashynska O. G., Boyko S. O. RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE HIGH-STRENGTH CAST IRON MECHANICAL PROPERTIES TAKING INTO ACCOUNT THE RECOMMENDATIONS OF THE DSTU EN 1563:2019 STANDARD

The technological issues of the strength and relative elongation of high-strength cast irons (HSCI) are considered in the paper. The main method chosen is to increase the silicon content to obtain a ferrite matrix strengthened by the solid-solution mechanism. To ensure low production costs, special attention was paid to determining the permissible content of trace and harmful impurities in order to use cheap commercial scrap. The issue of the stability of the mechanical characteristics of cast iron during fluctuations in the technological parameters of its production is also considered. It is shown that main sources of variability in characteristics are the instability of the results of metal processing in the ladle when using the “sandwich” process, as well as fluctuations in the content of trace and harmful impurities due to the instability of the quality of metal scrap. It was found that in the studied range of chemical composition, an increase in the content of magnesium and silicon contributes to a simultaneous increase in the strength and ductility of cast iron, while an increase in the content of manganese increases the strength but reduces the ductility. It is shown that to obtain a relative elongation $A_5 \geq 14\%$, the content should be: $S < 0.006$, $P < 0.02$, $Cr < 0.04$. The $Sn < 0.008\%$ does not create a negative impact on the mechanical properties of HSCI. It was also found that with an increase in the content of silicon and magnesium in cast irons with a high carbon equivalent at a high pouring temperature, a tendency to form torn and star-shaped graphite appears, which leads to a decrease in the mechanical characteristics of cast iron. It is recommended to introduce additional metallographic control for the presence of particles of this morphology in the structure.

Key words: high strength cast iron; spheroidal graphite; ferrite; pearlite; “sandwich”-process; relative elongation; ultimate tensile strength; carbon equivalent.

© Пащинський В. В., Пащинська О. Г., Бойко І. О.

Статтю прийнято до редакції 04.12.2024