

В.Б. Бубликов, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: otchel.vch@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0003-4465-9256>

Ю.Д. Бачинський, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: 909_bach@ukr.net,

<https://orcid.org/0000-0002-5745-1369>

О.П. Нестерук, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: pavlena81@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0001-6342-3551>

О.О. Ясинська, канд. техн. наук, наук. співр., e-mail: yasinskaalena@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-2187-6701>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

Вдосконалення технологічних параметрів отримання тонкостінного лиття з високоміцного чавуну із підвищеними механічними властивостями

При отриманні виробів із високоміцного чавуну особливе значення мають чистота шихтових матеріалів, яка визначається масовою часткою так званих «шкідливих» елементів, що перешкоджають утворенню кулястого графіту та сприяють вибілюванню чавуну, та методи модифікування розплаву, які у тонкостінних виливках не завжди запобігають утворенню структурно-вільних карбідів та забезпечують формування феритної структури. У роботі досліджено вплив різних видів шихтових матеріалів (чушкових чавунів, сталі та сталевих відходів) і технологій модифікування на структуроутворення та зміну механічних властивостей високоміцного чавуну. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розроблення економічно ефективних технологій одержання високоміцного чавуну з підвищеним рівнем міцності та пластичності при використанні вторинної шихти та зниженні собівартості виробництва. Дослідження включали виплавляння металу, відливання дослідних виливків та їх термічне оброблення, проведення механічних випробувань та металографічного аналізу. Встановлено визначальний вплив якості шихтових матеріалів на процеси графітизування, феритизування та формування металевої основи високоміцного чавуну. Показано, що застосування технології модифікування у ливарній формі забезпечує інтенсифікування процесів графітоутворення та дозволяє отримувати тонкостінні виливки з товщиною стінок 4–6 мм без структурно-вільних карбідів із переважно феритною металевою основою (80–95 %). При цьому досягається підвищення механічних властивостей і відпадає потреба проводити енергоємне термічне оброблення. Розроблена технологія внутрішньоформового модифікування чавунного розплаву із високоякісних шихтових матеріалів дозволяє знизити витрату вартісних магнієвмісних модифікаторів у 1,5–2 рази і забезпечує отримання сприятливішого поєднання міцності та у 2–3 рази вищого відносного видовження високоміцного чавуну, порівняно з мінімальними вимогами стандартів, що сприяє підвищенню експлуатаційних характеристик виробів й покращенню техніко-економічних показників виробництва.

Ключові слова: високоміцний чавун, шихта, модифікування, структура, механічні властивості.

Вступ. Високоміцний чавун (скорочено ВЧ) — це унікальний залізовуглецевий ливарний сплав, у процесі кристалізування якого формується композитний матеріал, що складається з металевої матриці та неметалевої графітної фази у вигляді вкраплень кулястої форми мікроскопічного розміру, рівномірно розподілених в структурі металу. Завдяки оптимальному поєднанню фізико-хімічних, ливарних властивостей з високими механічними та експлуатаційними характеристиками, економічності виробництва, в даний час високоміцний чавун широко застосовується в сучасних машинах, обладнанні та іншій продукції практично у всіх галузях промисловості.

Світові лідери в галузі технологій високоміцного чавуну (швейцарська фірма «Georg Fischer», англійська фірма «Meehanite» та ін.) створили і успішно використовують нові марки високоміцного чавуну з комбінацією, передбаченого стандартами, тимчасового опору під час розтягування σ_B з підвищеним в 2—4 рази відносним видовженням δ (ВЧ500-14; ВЧ600-10; ВЧ700-10; ВЧ800-10; ВЧ850-5) [1—7]. Подібні результати досліджень представлені в [8—10]. Розроблено одержувані ізотермічним загартуванням конструкційні аусферитні високоміцні чавуни з унікально високими показниками міцності та пластичності, які добре обробляються різанням [11—12].

Стабільні структура та властивості високоміцного чавуну для виготовлення виробів, що працюють в умовах ударно-циклічних і динамічних навантажень (особливо за низьких температур), досягаються при виплавці розплаву в електропечах з використанням чистих від шкідливих домішок шихтових матеріалів. При цьому разом з чушковими чавунами, що мають низькі масові частки сірки, фосфору та марганцю, широко застосовуються рафіновані від домішок та газів чавуни. Наприклад, Норвегія тривалий час виробляє спеціальний рафінований чавун, який містить (%мас.) 3,85 C; 0,06 Si; 0,06 Mn; 0,009 P при сумарній масовій частці Cr, Mo, Cu, Ti, V, Al, As не більше 0,02 %. Отриманий з такої шихти феритний високоміцний чавун у литому стані має тимчасовий опір під час розривання $\sigma_B = 400—550$ МПа, відносне видовження $\delta \geq 20$ %, твердість до 185 HB [13]. У разі шихти з 60 % такого чавуну та 40 % сталі кількість перліту в пробах збільшується відповідно до 10 та 15 %, при цьому міцність зростає до 470—550 МПа, твердість HB — до 1640—1850 МПа, а відносне подовження перевищує 20 %. Аналогічний рівень властивостей досягається при застосуванні чушкового чавуну марки Sorelmetal з масовою часткою C = 3,9—4,7 %, Si $\leq 0,4$ %, Mn $\leq 0,035$ %, P $\leq 0,03$ %, S $\leq 0,015$ % [14, 15].

Обґрунтування проблеми дослідження. Наявні технології виготовлення високоміцних чавунів характеризуються високими затратами в виробництві і не задовольняють постійно зростаючі вимоги до створюваної нової техніки і обладнання. Діючи в Україні технології виготовлення високоміцних чавунів з підвищеною пластичністю застаріли, а існуючі нові

процеси потребують використання в шихті дорогих рафінованих від сірки і фосфору чушкових переробних чавунів, що значно збільшує витрати на виробництво. Традиційні процеси модифікування не завжди забезпечують вирішення проблеми формування вибіленої мікроструктури при одержанні високоміцного чавуну з заданим оптимальним співвідношенням міцності та пластичності для сучасної техніки. Наявність відбілу (структурно-вільного цементиту) вимагає обов'язкового проведення такого виду термічного оброблення як енергоємний високотемпературний відпал для його розкладання. Вказані недоліки існуючих технологій зумовлюють актуальність досліджень, спрямованих на створення нових економічних процесів одержання високоміцних чавунів з підвищеними показниками міцності і пластичності при зниженні собівартості виробництва.

Мета і методика досліджень. Метою роботи було дослідження впливу шихтових матеріалів і модифікування на структуру і механічні властивості високоміцного чавуну для розроблення високо-ефективних технологій одержання з нього виробів з підвищеними механічними і функціональними властивостями.

Для отримання експериментальних даних про особливості структуроутворення та механічні властивості високоміцного чавуну, виплавленого на високоякісній від домішок шихті, було проведено спеціальну плавку в графітовому тиглі індукційної електропечі місткістю 30 кг. Шихта складалася з 15 кг прутків армко-заліза (А3) і такої ж маси обрізи електротехнічної сталі марки 1212. Навуглецювання металу проводили графітовою стружкою в процесі розплавлення шихти. Модифікували у ковші за двома варіантами: 1,5 % комплексного модифікатора ФСМг7К4 або 0,5 % нікель-магнієвої лігатури NiMg15 спільно з 0,8 % феросиліцію ФС75 (від маси розплаву, що модифікується). У піщаних формах відливали клиноподібні проби з товщиною основи 10 мм та 25 мм.

Отримані результати та обговорення. Стабільність результатів модифікування, механічні властивості і в цілому якість виливків з високоміцного чавуну визначаються хімічним складом і природою шихтових матеріалів і модифікаторів, що застосовуються, бо саме від них розплав успадковує структурно-хімічну інформацію, пов'язану із рудно-сировинною базою і особливостями металургійних технологій заводів-виробників. Постійність металургійної якості розплаву від плавки до плавки та умов проведення модифікувального оброблення є основними факторами отримання високоякісних виливків із високоміцного чавуну.

Існує думка, що наявність у складі шихти сталі позитивно впливає на властивості високоміцного чавуну, оскільки присутні до її складу домішки елементів-демофікаторів у процесі виплавки окислюються і їх шкідлива дія на структуроутворення високоміцного чавуну нейтралізується. Зменшення масової частки окремих мікродомішок має місце лише за окисних

умов плавки, характерних для виплавки сталі [16, 17]. Проблема ефективного позапічного десульфування і дефосфорування розплаву чавуну в ливарних цехах на сьогоднішній день не має прийнятного техніко-економічного рішення. Тому одним із визначальних факторів якості високоміцного чавуну є застосування шихтових матеріалів з якомога нижчою масовою часткою сірки (0,001—0,015 %) [18, 19].

Дуже негативний вплив на рівень пластичності та в'язкості високоміцного чавуну має фосфор, який ініціює утворення крихких евтектик на межах зерен.

Максимальна пластичність високоміцного чавуну досягається при масовій частці фосфору 0,01—0,025 % [20]. При використанні в шихті чистого за фосфором чавуну можна досягти тимчасового опору при розтягуванні 650—750 МПа при відносному видовженні більше 10 %. Для досягнення таких властивостей (на пробах) чавун легують кремнієм, нікелем, міддю [8, 10, 21].

Хімічний склад та мікроструктура дослідних високоміцних чавунів, отриманих за двома варіантами модифікування, представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад та мікроструктура високоміцного чавуну, виплавленого методом науглецювання шихти з армо-заліза (50 %) та сталі марки 1212 (50 %)

Модифікатор	Масова частка елемента, %							Мікроструктура 25 мм клину			
	C	Si	Mn	Ni	Mg	S	P	ССГ, %	d, мкм	N, мм ²	Ферит, %
ФСМг7К4	3,52	2,86	0,22	0,12	0,052	0,022	0,01	95	43	167	85
HiMr15 + ФС75	3,60	2,88	0,22	0,34	0,056	0,023	0,01	95	54	143	75

Застосування якісної шихти дозволяє отримувати досить високий рівень механічних властивостей високоміцного чавуну (табл. 2), відносно видовження якого у кілька разів перевищує вимоги стандартів для сплавів з аналогічною міцністю. У литому стані більш висока міцність відповідає меншій товщині клиноподібного вилівка та варіанту модифікування нікель-магнієвою лігатурою. Після додаткового проведення відпалу на ферит, вплив товщини стінки та варіанту модифікування проявляється менш контрастно, ніж у литому стані.

Отримані експериментальні дані свідчать про найважливішу роль якості шихтових матеріалів

у технології виробництва високоміцного чавуну. Так, у литому стані при модифікуванні ФСМг7К4 $\sigma_B = 580\text{—}630$ МПа, а $\delta = 15\text{—}18$ %, при другому варіанті модифікування виходить низьколегований нікелем високоміцний чавун з $\sigma_B = 700\text{—}750$ МПа та $\delta = 12\text{—}14$ %. У відпаленому стані при феритній металевій основі досягається дуже високе для високоміцного чавуну відносне видовження — 23—27 %, а зміцнювальна дія 0,2 % нікелю, введенного з нікель-магнієвої лігатури, забезпечує підвищення тимчасового опору розриванню σ_B на 30—40 МПа.

З метою одержання порівняльних результатів за рівнем механічних характеристик високоміцного

Таблиця 2

Механічні властивості високоміцного чавуну, виплавленого з 50 % армо-заліза та 50 % сталі марки 1212

Модифікатор	Механічні властивості							
	Клин 10 мм				Клин 25 мм			
	литий стан		після відпалу		литий стан		після відпалу	
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %
ФСМг7К4	630	15	470	26	580	18	470	27
HiMr15 + ФС75	750	12	500	25	700	14	510	23

чавуну, виплавленого з використанням у шихті ряду якісних матеріалів, виконано аналіз результатів дослідних плавок, проведених в індукційних печах ІСТ-016. В якості шихтових матеріалів використовували відходи електротехнічної сталі 1212, ливарний рафінований чавун ЛР6, чавун переробний

ПВКЗ (табл. 3). Модифікування проводили у ковшах магнієвмісними модифікаторами, що широко використовуються у виробництві ВЧ. Температура випуску рідкого металу з печі — 1480—1490 °С, витрати модифікаторів ФСМг7К4 (з масовою часткою Mg = 7—8 % та Ca = 4—5 %) або ФСМг7 — 1,5 % від

Таблиця 3

Хімічний склад шихтових матеріалів дослідних плавів

Матеріал	Масова частка елемента, %						
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr
Електротехнічна сталь 1212	0,10	0,84	0,33	0,008	0,012	0,16	0,14
Чушковий чавун ЛР6	3,92	1,25	0,37	0,010	0,071	0,04	0,05
Чушковий чавун ПВК3	3,92	0,48	0,35	0,012	0,035	0,09	0,13
Графітова стружка	96,2	—	—	0,035	—	—	—

маси металу, що обробляється. Масові частки вуглецю та кремнію в чавуні після модифікування становили, відповідно, 3,4—3,6 % та 2,6—2,9 %.

У високоміцному чавуні всіх аналізованих плавів ступінь сфероїдизування графіту ССГ становив 90—95 %. При високих показниках ССГ вплив форми графіту на механічні властивості ВЧ незначний і становить середньостатистичну похибку. Аналізом результатів (табл. 4, рисунок) встановлено, що використання високоякісних шихтових матеріалів без

застосування термічного оброблення (тобто вже у литому стані) дозволяє досягти сприятливішого поєднання міцності та відносного видовження, порівняно з вимогами ДСТУ 3925-99.

У всіх випадках у металі дослідних плавів показник відносного видовження був у 2—3 рази більший, ніж передбачений стандартом для відповідних за міцністю марок високоміцного чавуну.

Ливарні рафіновані чавуни (ДСТУ 3132-95) — спеціальний шихтовий матеріал для отримання ВЧ,

Таблиця 4

Вплив шихтових матеріалів на механічні властивості ВЧ

Шихта	Мас. частка у шихті, %	Марка модифікатора			
		ФСМг7		ФСМг7К4	
		Механічні властивості			
		σ _В , МПа	δ, %	σ _В , МПа	δ, %
Чушковий чавун ЛР6	100	510	19,2	535	16,6
Чушковий чавун ПВК3	100	580	16,8	610	14,9
Електротехнічна сталь 1212 + графітова стружка	95,5 4,5	650	16,6	690	14,3

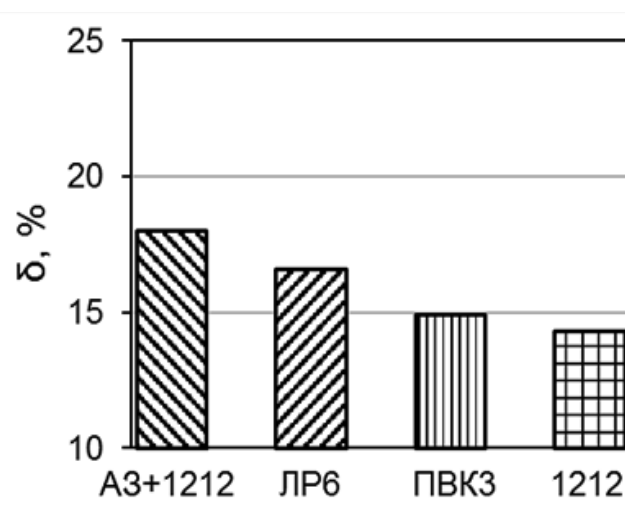
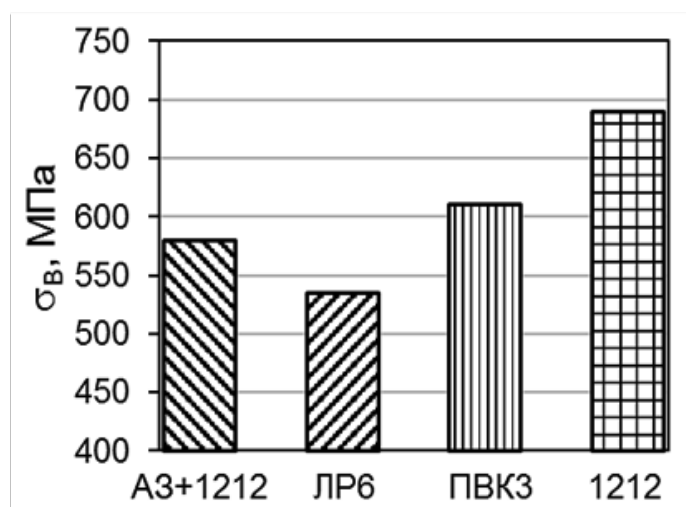


Рис.

Вплив шихтових матеріалів на механічні властивості високоміцного чавуну після модифікування лігатурою ФСМг7К4

який відрізняється від інших регламентованою масовою часткою шкідливих домішок (демофікувальних та карбідотворювальних) та наявністю у складі 0,005—0,019 %мас. залишкового магнію. Багаторічний досвід застосування рафінованих магнієм чавунів марок ЛР свідчить, що, у порівнянні з марками чавунів звичайної якості, вони посилюють ефект модифікувального впливу на структуроутворення та властивості ВЧ, сприяють підвищенню ССГ, зниженню схильності тонкостінних виливків до відбілу у структурі, поліпшенню оброблюваності різанням.

Переробні чавуни (ПВКЗ, ПЛ1, ПЛ2, тощо) згідно з ДСТУ 3133-95 можуть випускатись з низькою масовою часткою фосфору та гарантованою масовою часткою сірки на рівні, близькому до рафінованого магнієм чавуну ЛР. ВЧ, одержаний з використанням у шихті переробного чавуну, має на 10—14 % вищі показники міцності та на 10—15 % менші по-

казники пластичності, ніж ВЧ на шихті з чавуну ЛР. Сприятливе поєднання високих показників міцності і відносного видовження має високоміцний чавун з мінімальною масовою часткою фосфору (0,012 %), тобто одержаний з використанням у шихті відходів електротехнічної сталі.

Наведені результати свідчать про важливу роль якості шихтових матеріалів у забезпеченні стабільності технології та високого рівня фізико-механічних властивостей виливків із ВЧ.

На основі результатів досліджень розроблено технологію отримання виливків з високоміцного чавуну із застосуванням внутрішньоформового модифікування. Дослідну плавку проводили в умовах промислового виробництва в індукційній печі ІЧТ-10 на шихті лише із переробного чавуну ПВКЗ. Хімічний склад чавуну в печі в процесі витримки та розливання змінювався незначно (табл. 5).

Таблиця 5

Хімічний склад і температура чавуну в печі ІЧТ-10 в процесі розливання дослідної плавки

Час від початку розливання, год	Температура металу в печі, °С	Масова частка елемента у чавуні, %						
		C	P	S	Si	Mn	Cr	Ni
0	1520	3,57	0,017	0,009	2,00	0,45	0,07	0,03
0,5	1510	3,55	0,022	0,011	2,26	0,42	0,07	0,03
1,0	1535	3,49	0,018	0,009	2,10	0,40	0,12	0,03
1,5	1510	3,58	0,026	0,009	2,25	0,43	0,08	0,03
2,5	1520	3,52	0,024	0,009	2,10	0,43	0,13	0,03
3,5	1530	3,46	0,028	0,009	2,14	0,54	0,10	0,03

Відповідно до технологічного процесу, для модифікування розплаву використовували 1 % (від металоємності форми) феросиліцій-магнієвої лігатури марки ФСМг7, яку засипали в порожнину реакційної камери ливарних форм в процесі їх збирання. При заливці форм не спостерігалось кипіння металу в заливальній воронці та прориву газів з форми в стояк, що свідчить про ефективність конструкції ливникової системи, розробленої для внутрішньоформового модифікування.

В процесі розливання плавки були відібрані про-

би металу для отримання виливків з товщиною стінки 10 мм. Хімічний склад металу таких проб (дані представлені у табл. 6) змінювався в вузькому діапазоні, що свідчить, з одного боку, про незначну зміну хімічного складу вихідного чавуну впродовж тривалої витримки розплаву в печі, а, з іншого боку, — про стабільне засвоєння кремнію та магнію чавуном в процесі розчинення модифікатора в реакційних камерах ливарних форм.

Аналіз структури та механічних властивостей металу відповідних виливків представлено у табл. 7.

Таблиця 6

Хімічний склад виливків дослідної плавки

Номер вилівка	Час від початку розливання плавки, год	Температура заливання, °С	Масова частка елемента в металі, %						
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg
1	1,0	1385	3,46	2,80	0,42	0,032	0,009	0,15	0,07
2	1,1	1440	3,43	2,72	0,42	0,028	0,009	0,07	0,05
3	3,5	1430	3,35	3,00	0,40	0,012	0,009	0,07	0,05

Мікроструктура та механічні властивості металу виливків

Номер виливка	Мікроструктура					Механічні властивості	
	Форма графіту	ССГ*, %	Діаметр вкраплень графіту, мкм	Кількість вкраплень графіту, шт/мм ²	Кількість фериту, %	σ_B , МПа	δ , %
1	ШГф5, ШГф4	95	25	576	90	533	21,2
2	ШГф5, ШГф4	90	25	546	95	547	22,5
3	ШГф5, ШГф4	90	26	434	84	546	20,7

Примітка: *ступінь сфероїдизування графіту.

Встановлено, що отримані з використанням внутрішньоформового модифікування виливки характеризуються стабільними структурою та твердістю (170—229 НВ), високими показниками тимчасового опору розриванню ($\sigma_B = 533—547$ МПа) та відносного видовження ($\delta = 20,7—22,5$ %), яке, зокрема, у ~3 рази перевищує мінімальне значення згідно з вимогами державних стандартів до марки ВЧ500-7.

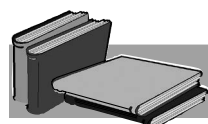
Технологія модифікування у ливарній формі створює найбільш сприятливі умови інтенсифікування процесів графітизування і феритизування металевої основи — забезпечує отримання із високоміцного чавуну тонкостінних виливків з мінімальною товщиною стінок 4—6 мм без структурно-вільних карбідів з феритною (80—95 %) металевою основою і підвищеним рівнем механічних властивостей. При цьому не потрібно використовувати енергоємне термічне оброблення. Витрата вартісних і дефіцитних модифікаторів зменшується у 1,5—2,0 рази.

Висновки

Встановлено, що використання високоякісних шихтових матеріалів, зокрема електротехнічної сталі 1212, в умовах ковшового сфероїдизувального

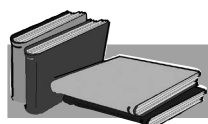
модифікування дозволяє досягти сприятливішого, порівняно з вимогами ДСТУ 3925-99, поєднання міцності та відносного видовження ($\sigma_B = 600—700$ МПа при $\delta > 10$ %) без застосування термічного оброблення.

Отримані результати є особливо актуальними для виготовлення із високоміцного чавуну тонкостінних виливків з мінімальною товщиною стінок 4—6 мм із застосуванням модифікування у ливарній формі. Порівняно із модифікуванням у ковші, така технологія гарантовано забезпечує одержання виливків без структурно-вільних карбідів з переважно феритною (понад 80 %) металевою основою і заданим високим рівнем механічних властивостей ($\sigma_B = 500—550$ МПа, $\delta > 20$ %) без необхідності використання енергоємного термічного оброблення. За рахунок зменшення у 1,5—2,0 рази витрати вартісних і дефіцитних модифікаторів, економії енергоресурсів (до 200 кВт•год електроенергії при виробництві 1 т виливків) та застосування високоміцного чавуну замість сірого та ковкого чавунів і деяких марок сталей досягається значний економічний ефект (не менше 7000 грн на тонні литва) при отриманні на українських підприємствах відповідальних деталей оборонного призначення, транспорту, залізниці, сільськогосподарської техніки, двигунів, приводів, компресорів, насосів, трубопроводів.



ЛІТЕРАТУРА

1. Zanardi F., Bonollo F., Angella G., Bonora N., Iannitti G., Ruggiero A. A Contribution to New Material Standards for Ductile Irons and Austempered Ductile Irons. *International Journal of Metalcasting*. 2017. Vol. 11. Iss. 1. P. 136—147. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0095-6>
2. Masaggia S. The development of ADI and IDI in Italy. *Procedia Engineering*. 2010. Vol. 2. Iss. 1. P. 1459—1476. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.158>
3. Meehanite Specification Handbook 2013. URL: <https://meehanitemetal.com/technical-lit> (дата звернення: 19.05.2026).
4. Menk W. A New High Strength High Ductile Nodular Iron. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 925. P. 224—230. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.925.224>
5. Menk W. Ein neues hochfestes, hoch duktiles Gusseisen mit Kugelgraphit. *GIESSEREI*. 2018. Vol. 105. No. 8. P. 36—40.
6. Weber F., Broeckmann C., Züch V. et al. Multi-domain optimization of cast iron components in wind turbines. *Forsch Ingenieurwes*. 2023. Vol. 87. P. 39—50. <https://doi.org/10.1007/s10010-023-00616-3>
7. Santos J., Gouveia R.M., Silva F.J.G. Designing a new sustainable approach to the change for lightweight materials in structural components used in truck industry. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 164. P. 115—123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.174>
8. 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. <https://doi.org/10.15407/plit2020.01.020>
9. Бубликов В.Б., Нарівський А.В., Бачинський Ю.Д., Нестерук О.П. Розвиток технологій одержання високопластичних високоміцних чавунів феритного класу. *Метал та лиття України*. 2022. Т. 30. № 3(330). С. 72—80. URL: <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/30> (дата звернення: 19.05.2026).
10. Бубликов В.Б., Бачинський Ю.Д., Нестерук О.П. Одержання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними і механічними властивостями. *Процеси лиття*. 2024. № 1(155). С. 3—13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003>
11. Olawale J.O., Oluwasegun K.M. Austempered Ductile Iron (ADI): A Review. *Materials Performance and Characterization*. 2016. Vol. 5. Iss. 1. P. 289—311. <https://doi.org/10.1520/MPC20160053>
12. Górny M., Gondek Ł., Angella G., Tyrała E., Kawalec M., Bitka A. Structural stability of thin-walled austempered ductile iron castings. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 23. Iss. 2. Art. no. 79. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00597-0>
13. Harrison G.R. The production on Bremenger oxygen blown (OB) pig iron and use in SG Iron. *Brit. Foundryman*. 1981. № 7. P. 17—22.
14. Cabanne P.-M., Gagne M. Inoculation of ductile iron: why and when? *Sorelmetal Technical Services*. 2010.
15. Sorelmetal® Products Brochure. URL: <https://www.riotinto.com/en/products/ferrous-metallics> (дата звернення: 19.05.2026).
16. Futas P., Pribulova A., Petrik J., Blasko P., Junakova A., Sabik V. Metallurgical Quality of Cast Iron Made from Steel Scrap and Possibilities of Its Improvement. *Metals*. 2023. Vol. 13. Iss. 1. article 27. <https://doi.org/10.3390/met13010027>
17. Glavas Z. The Influence of metallic charge on metallurgical quality and properties of ductile iron. *Kovove Materialy — Metallic Materials*. 2012. Vol. 50. Iss. 2. P. 75—82. https://doi.org/10.4149/km_2012_2_75
18. Hartung C., White D., Copi K., Liptak M., Logan R. The Continuing Evolution of MgFeSi Treatments for Ductile and CG Irons. *International Journal of Metalcasting*. 2014. Vol. 8. Iss. 2. P. 7—15. <https://doi.org/10.1007/BF03355577>
19. Schrama F.N.H., Beunder E.M., Van den Berg B., Yang Y., Boom R. Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*. 2017. Vol. 44. Iss. 5. P. 333—343. <https://doi.org/10.1080/103019233.2017.1303914>
20. Литовка В.И. Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. Киев: Наук. думка, 1987. 208 с.
21. Бубликов В.Б., Нарівський А.В., Бачинський Ю.Д., Ясинський О.О. Високоміцний чавун зі зміцненим кремнієм та нікелем α -твердим розчином. *Метал та лиття України*. 2020. Т. 28. № 3(322). С. 63—68. URL: <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/121> (дата звернення: 19.05.2026).



REFERENCES

1. Zanardi, F., Bonollo, F., Angella, G., Bonora, N., Iannitti, G., & Ruggiero, A. (2017). A Contribution to New Material Standards for Ductile Irons and Austempered Ductile Irons. *International Journal of Metalcasting*, 11(1), 136-147. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0095-6>
2. Masaggia, S. (2010). The development of ADI and IDI in Italy. *Procedia Engineering*, 2(1), 1459-1476. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.158>
3. Meehanite Specification Handbook 2013. <https://meehanitemetal.com/technical-lit>
4. Menk, W. (2018). A New High Strength High Ductile Nodular Iron. *Materials Science Forum*, 925, 224-230. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.925.224>
5. Menk, W. (2018). Ein neues hochfestes, hoch duktiles Gusseisen mit Kugelgraphit [A new high-strength, high-ductility spheroidal graphite cast iron]. *GIESSEREI*, 105(8), 36-40 [in German].
6. Weber, F., Broeckmann, C., Züch, V. et al. (2023). Multi-domain optimization of cast iron components in wind turbines. *Forsch Ingenieurwes*, 87, 39-50. <https://doi.org/10.1007/s10010-023-00616-3>
7. Santos, J., Gouveia, R. M., & Silva, F. J. G. (2017). Designing a new sustainable approach to the change for lightweight materials in structural components used in truck industry. *Journal of Cleaner Production*, 164, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.174>
8. Bublikov, V. B., Narivskiy, A. V., Bachynskiy, Yu. D., & Yasynskiy, O. O. (2020). Silicon alloyed ductile cast iron and its application. *Casting processes*, 1(139), 20-29. <https://doi.org/10.15407/plit2020.01.020> [in Ukrainian].
9. Bublikov, V. B., Narivskiy, A. V., Bachynskiy, Yu. D., & Nesteruk, O. P. (2022). Development of technologies of high-plastic ductile cast irons of ferritic class obtaining. *Metal and Casting of Ukraine*, 30(3(330)), 72-80. <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/30> [in Ukrainian].
10. Bublikov, V. B., Bachynskiy, Yu. D., & Nesteruk, O. P. (2024). Obtaining of pearlite grade ductile cast iron with improved technological and mechanical properties. *Casting processes*, 1(155), 3-13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003> [in Ukrainian].
11. Olawale, J. O., & Oluwasegun, K. M. (2016). Austempered Ductile Iron (ADI): A Review. *Materials Performance and Characterization*, 5(1), 289-311. <https://doi.org/10.1520/MPC20160053>
12. Górny, M., Gondek, Ł., Angella, G., Tyrała, E., Kawalec, M., & Bitka, A. (2023). Structural stability of thin-walled austempered ductile iron castings. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(2), art. no. 79. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00597-0>
13. Harrison, G. R. (1981). The production on Bremenger oxygen blown (OB) pig iron and use in SG Iron. *Brit. Foundryman*, (7), 17-22.
14. Cabanne, P.-M., & Gagne, M. (2010). Inoculation of ductile iron: why and when? *Sorelmetal Technical Services*.
15. Sorelmetal® Products Brochure. <https://www.riotinto.com/en/products/ferrous-metallics>
16. Futas, P., Pribulova, A., Petrik, J., Blasko, P., Junakova, A., & Sabik, V. (2023). Metallurgical Quality of Cast Iron Made from Steel Scrap and Possibilities of Its Improvement. *Metals*, 13(1), article 27. <https://doi.org/10.3390/met13010027>
17. Glavas, Z. (2012). The Influence of metallic charge on metallurgical quality and properties of ductile iron. *Kovove Materialy – Metallic Materials*, 50(2), 75-82. https://doi.org/10.4149/km_2012_2_75
18. Hartung, C., White, D., Copi, K., Liptak, M., & Logan, R. (2014). The Continuing Evolution of MgFeSi Treatments for Ductile and CG Irons. *International Journal of Metalcasting*, 8(2), 7-15. <https://doi.org/10.1007/BF03355577>
19. Schrama, F. N. H., Beunder, E. M., Van den Berg, B., Yang, Y., & Boom, R. (2017). Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, 44(5), 333-343. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1303914>
20. Litovka, V. I. (1987). Povyshenie kachestva vysokoprochnogo chuguna v otlivkah [Improving of high-strength cast iron quality in castings]. *Naukova dumka* [in Russian].
21. Bublikov, V. B., Narivskiy, A. V., Bachynskiy, Yu. D., & Yasynskiy, O. O. (2020). Ductile cast iron with silicon and nickel strengthened α -solid solution. *Metal and Casting of Ukraine*, 28(3(322)), 63-68. <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/121> [in Ukrainian].

Надійшла/Received 21.05.2026

Прийнята/Accepted 21.08.2026

Опублікована/Published 28.09.2026

Summary

V.B. Bublykov, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Department Chair, e-mail: otdel.vch@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4465-9256>

Yu.D. Bachynskyi, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: 909_bach@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5745-1369>

O.P. Nesteruk, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: pavlena81@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6342-3551>

O.O. Yasynska, PhD (Engin.), Researcher, e-mail: yasynskaalena@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2187-6701>

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Technological Parameters Improvement for Production of Thin-Walled Castings Made of Ductile Cast Iron with Enhanced Mechanical Properties

When producing ductile cast iron products, the charge materials purity (is determined by the content of the so-called "harmful" elements that prevent the spheroidal graphite formation and contribute to cast iron chilling) and melt modifying methods, which in thin-walled castings do not always prevent the carbides formation and ensure the ferrite structure formation, are of particular importance. The work investigates the influence of different charge materials (pig iron, steel and steel waste) and modifying technologies on ductile cast iron structure formation and its mechanical properties change. The relevance of the study is due to the need to develop cost-effective technologies for production of ductile cast iron with increased strength and ductility via secondary charge using and production costs reducing. The studies include metal smelting, casting of experimental castings and their heat treatment, mechanical testing and metallographic analysis. The determining influence of charge materials quality on the processes of ductile cast iron graphitizing, ferritization and metal base formation has been established. It has been shown that the use of in-mold modifying technology ensures the graphitizing processes intensification and allows to obtain thin-walled castings (with a wall thickness of 4-6 mm) without structurally free carbides with a predominantly ferritic metal base (above 80 % of ferrite). This results in an increase in mechanical properties and eliminates usage of energy-intensive heat treatment. The developed technology of in-mold modifying of cast iron melt from high-quality charge materials allows to reduce the consumption of expensive magnesium-containing modifiers by 1.5-2 times and ensures obtaining a more favorable combination of ductile cast iron strength and 2-3 times higher relative elongation, compared to the standards minimum requirements, which contributes to products operational characteristics increasing and improves the technical and economic indicators of production.

Keywords

Ductile cast iron, charge, modifying, structure, mechanical properties.