
ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2025.02.048>

УДК 621.74.04:669.131.7

К.А. Сіренко*, канд. тех. наук; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

В.Л. Мазур*, чл.-кор. НАН України, докт. техн. наук, проф., гол. наук.
співроб.; e-mail: prof.vlm@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-8970-5389>

Д.О. Дереча**, канд. ф.-м. наук, ст. наук. співроб., зав. лаб.;
e-mail: dderecha@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2442-3759>

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

** Інститут магнетизму ім. В.Г. Бар'яхтара НАН України (Київ, Україна)

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ КОВКОГО ЧАВУНУ

Показано, що актуальним завданням у ливарному виробництві є наукове забезпечення технічних рішень щодо впровадження у промислову практику неруйнівних методів визначення механічних властивостей виливків із чавуну за результатами аналізу їх хімічного складу. Хімічний склад і властивості литва із ковкого чавуну різного класу і марок проаналізовано за методикою оцінки його вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності із застосуванням імовірнісного підходу і методу Монте-Карло. Визначено параметри масивів імовірних величин вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення відсоткового вмісту кремнію до вмісту вуглецю, ковкого чавуну. Представлено гістограми розподілів величин цих показників у чавуні. Встановлено ймовірні діапазони розкиду величин вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення вмісту кремнію до вмісту вуглецю. Величини вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, інших показників хімічного складу та властивостей ковкого чавуну порівняно з аналогічними характеристиками чавунів з пластинчастим, вермикулярним та кулястим графітом. Показано, що врахування обмежень сумарного вмісту вуглецю і кремнію у хімічному складі ковкого чавуну суттєво не впливає на чисельні величини його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності. Залежність твердості, інших механічних властивостей виливків із ковкого чавуну від величин його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності не виявлено. Розглянуто вплив термічної обробки на властивості ковкого чавуну. Розкрито можливості підвищення якості виливків із ковкого чавуну шляхом їх термічної обробки. Узагальнено рекомендації щодо вибору режимів термічної обробки чавунних ливарних виробів різного призначення для підвищення рівня їх експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: чавун, хімічний склад, механічні властивості, виливки, термічна обробка, вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності.

Ця стаття продовжує цикл публікацій [1–4], присвячених узагальненню показників хімічного складу і властивостей виливків із чавунів з різною формою графіту, представлених у технічних умовах і стандартах, які пройшли випробування виробничою

Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

практикою. Викладені результати базуються значною мірою на матеріалах теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних протягом десятиліть вченими Фізико-технологічного інституту металів та сплавів (ФТІМС) НАН України [5–12]. Основна увага приділена виливкам із ковкого чавуну, технологія виробництва яких передбачає на першому етапі виготовлення їх із білого чавуну і термічну обробку для підвищення міцності та покращення експлуатаційних характеристик виробів, на другому етапі. Термічна обробка забезпечує отримання необхідних механічних властивостей і мікроструктури ковкого чавуну із фериту чи перліту в різних співвідношеннях та вуглецю відпалу.

У роботах [5, 8, 12] розглянуто технічні характеристики гальмівних колодок для залізничного рухомого складу, як показовий приклад ефективного використання термічної обробки для покращення властивостей чавунного литва. Цей напрям покращення якості чавунних виливків потребує поширення у виробничій практиці ливарних підприємств.

У статтях [1–4] порівняно хімічний склад і властивості ливарних виробів із чавунів з пластинчастим, вермикулярним та кулястим графітом. Для встановлення зв'язку «хімічний склад» — властивості виливків із чавунів різного типу застосовували величини вуглецевого еквівалента та ступеню евтектичності, визначені у ймовірнісному аспекті. Такий підхід у поєднанні з методом Монте-Карло дозволяє на сучасному рівні розглядати залежність механічних властивостей чавуну від узагальнюючих показників його хімічного складу та оцінювати якість продукції, що виготовляють, при управлінні технологічними процесами у ливарному виробництві [1–4, 13–15]. Враховуючи, що показники вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, графітизованості, легування чавунів нерідко використовують, як основу їх класифікації [5, 16].

Механічні властивості і мікроструктура чавунів з пластинчастим графітом залежать, насамперед, від хімічного складу і швидкості кристалізації їх розплаву. Виливків із чавунів з кулястим графітом – більшою мірою від кількості й форми графітових включень у їх структурі. Механічна основа високоміцних чавунів у литому стані також залежить від їх хімічного складу та швидкості кристалізації. Зазначене певною мірою стосується і виливків із чавуну з вермикулярним графітом. Загальні технічні вимоги до виливків із названих чавунів, що викладені у стандартах, проаналізовані у названих роботах [1–4] з використанням ймовірнісного підходу та застосування методу Монте-Карло.

Виливки із ковкого чавуну виготовляють, як відмічено вище [16 та ін.], шляхом термічної обробки білого чавуну для отримання необхідних механічних властивостей та мікроструктури з фериту і перліту у різних співвідношеннях та вуглецю відпалу відповідно до ДСТУ EN 1562:2017. Литво. Чавун ковкий. Технічні умови EN 1562:2012, IDT. Загальні технічні вимоги детально викладені у ГОСТ 1215-79, який зараз в Україні не діє, але наведена в ньому інформація представляє науковий інтерес, оскільки узагальнює досвід ливарних заводів щодо виробництва литва із ковкого чавуну. У монографії [5], наприклад, підкреслюється, що ковкі чавуни (КЧ) на відміну від не-пластичних, крихких сірих чавунів (СЧ) є пластичними та піддаються деформації. Виливки із ковкого чавуну завжди мають кінцеву форму деталей. Їх не кують. Назва «ковкий» має виключно умовний сенс і не свідчить про призначення та спосіб обробки виливків із такого чавуну.

Згідно із зазначеними стандартами ковкий чавун залежно від мікроструктури металевої основи поділяють на феритний (Ф) та перлітний (П) класи. До феритного класу відносять виливки із ковкого чавуну наступних марок: КЧ 30-6; КЧ 33-8; КЧ 35-10; КЧ 37-12, які характеризуються феритною або феритно-перлітною мікроструктурою металевої основи. Ковкий чавун перлітного класу має в основному перлітну мікроструктуру металевої основи. Його марки: КЧ 45-7; КЧ 50-5; КЧ 55-4; КЧ 60-3; КЧ 70-2; КЧ 80-1,5. Хімічний склад і механічні властивості виливків із ковкого чавуну феритного і перлітного класів згідно з ГОСТ 1215-79 наведені у табл. 1.

У позначеннях ковкого чавуну (КЧ) перша цифра показує мінімальне значення

Таблиця 1
Хімічний склад і механічні властивості ковкого чавуну (КЧ)

Клас, марка чавуну		Масова частка елементів у відсотках							Твер- дість HB	σ, МПа	δ, %
		C	Si	C + Si	Mn	P	S	Cr			
							не більше				
Феритний										не менше	
КЧ 30-6		2,6–2,9	1,0–1,6	3,7–4,2	0,4–0,6	0,18	0,20	0,08	100–163	294	6
КЧ 33-8									100–163	323	8
КЧ 35-10		2,5–2,8	1,1–1,3	3,6–4,0	0,3–0,6	0,12	0,20	0,06	100–163	333	10
КЧ 37-12		2,4–2,7	1,2–1,4	3,6–4,0	0,2–0,4	0,12	0,06	0,06	110–163	362	12
Перлітний											
КЧ 45-7		2,5–2,8	1,1–1,3	3,6–3,9	0,3–1,0	0,10	0,20	0,08 170–230 192–241 200–269	150–207	441	7*
КЧ 50-5									490	5*	—
КЧ 55-4									539	4*	—
КЧ 60-3									588	3	—
КЧ 65-3		2,4–2,7	1,2–1,4	3,6–3,9	0,3–1,0	0,10	0,06	0,08 241–285 270–320	212–269	637	3
КЧ 70-2									686	2	—
КЧ 80-1,5									784	1,5	—

тимчасового опору під час розтягання (розтягування), кгс/мм². Друга цифра через дефіс — мінімальне значення відносного видовження у відсотках. Зірочками у таблиці 1 позначено допустимість зниження відносного видовження на 1 % в разі домовленості виробника виливків зі споживачем. За способом виробництва чавуни поділяються на: КЧ 30-6, КЧ 33-8 вагранка; КЧ 35-10, КЧ 45-7, КЧ 50-5, КЧ 55-4, КЧ 60-3 — вагранка-електропіч. КЧ 37-12, КЧ 65-3, КЧ 70-2, КЧ 80-1,5 — електропіч-електропіч.

Відносно висока пластичність і в'язкість ковких чавунів феритного класу зумовлена низьким вмістом кремнію у його хімічному складі, який зазвичай легує ферит та підвищує його твердість і крихкість [5, 12]. Саме тому ковкий чавун застосовують в основному для виготовлення тонкостінного литва. Для послаблення здатності до графітизації ковкого чавуну при кристалізації необхідно зменшувати сумарний вміст кремнію і вуглецю у його хімічному складі (табл. 1). Високотемпературний графітизуючий відпал виливків із білого чавуну є обов'язковою технологічною операцією при виробництві ковкого чавуну. При цьому для отримання заданої феритної або перлітної структури металевої основи ковкого чавуну в процесі його

Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

його виготовлення застосовують різні технології термічної обробки залежно від конкретних виробничих умов і вимог до готової продукції. Ця тема детально розглянута у роботах [5–8, 11–12].

Наведений у табл. 1 хімічний склад ковкого чавуну має певні особливості порівняно із хімічним складом чавунів з пластинчастим, вермикулярним, кулястим графітом [2–4]. Зокрема, хімічний склад ковкого чавуну регламентовано залежно від способу його виплавки: у вагранках чи електричній печі. Вміст вуглецю і кремнію мало змінюється у ковкому чавуні різних класів і марок. При тому, що механічні властивості КЧ змінюються за класами суттєво. Важливо підкреслити, що стандартами регламентується не тільки вміст C і Si окремо, а й їх сумарний вміст. У цілому інформація, яка наведена у табл. 1, свідчить про визначний вплив термічної обробки виливків із ковкого чавуну на їх механічні властивості.

Для оцінки наявності чи відсутності чітко вираженої залежності механічних властивостей виливків із ковкого чавуну від його хімічного складу розглянемо цей аспект з позиції імовірнісного підходу і застосування методу Монте-Карло. Згідно з методикою, викладеною у роботі [3], вуглецевий еквівалент $C_{\text{екв}}$ і ступінь евтектичності $S_{\text{евт}}$ ковкого чавуну розраховували за формулами (1) і (2), використовуючи наведені у табл. 1 дані щодо масової частки у чавуні вуглецю C, кремнію Si, фосфору P, марганцю Mn, сірки S:

$$C_{\text{екв}} = C + 0,3 \text{ Si} + 0,33 \text{ P} - 0,15 \text{ Mn} + 0,26 \text{ S}; \quad (1)$$

$$S_{\text{евт}} = C / [4,26 + 0,3 \text{ Si} - 0,33 \text{ P} - 0,45 + 0,03 \text{ Mn}] \quad (2)$$

При цьому показники $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ розраховували методом Монте-Карло, вважаючи, що вміст кожного із зазначених елементів у складі чавуну є випадковою величиною у межах її можливого діапазону (табл. 1). Розрахунки виконували у двох варіантах: без застосування передбаченого у табл. 1 обмеження на сумарний вміст $(C + \text{Si})\%$ вуглецю і кремнію у хімічному складі чавуну і при застосуванні цього обмеження. Таким способом розраховували і відношення Si/C вмісту кремнію до вмісту чавуну.

Статистичні параметри масивів величин вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ та ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$, розрахованих за імовірнісним підходом із застосуванням методу Монте-Карло, відповідно до даних хімічного складу і механічних властивостей виливків із ковкого чавуну, наведених у табл. 1, представлені у табл. 2. У хімічному складі чавуну діапазони можливих масових часток фосфору, сірки, хрому не визначені. В табл. 1 вказані лише граничні (не більше) величини вмісту P, S, Cr. Тому, як й в роботі [4], при розрахунках вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності ковкого чавуну за формулами (1) і (2) із застосуванням імовірнісного підходу приймали наступні мінімальні масові долі та діапазони вмісту названих елементів, %: $P = 0,13...0,18$ для феритних чавунів марок КЧ 30-6 і КЧ 33-8; $0,07...0,12$ – для КЧ 35-10, КЧ 37-12; $0,05...0,10$ – для усіх перлітних чавунів. Вміст сірки приймали, %: $S = 0,10...0,20$ – для КЧ 30-6, КЧ 33-8, КЧ 35-10; $S = 0,02...0,06$ – для чавунів інших марок. Величина вмісту хрому у ковкому чавуні в розрахунках $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ за формулами (1) і (2) не задіяна.

Згідно з даними табл. 1 величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ при переході від чавуну КЧ 30-6 до чавунів КЧ 54-3, КЧ 70-2, КЧ 80-1,5, які мають однаковий хімічний склад, зменшуються. Для порівняння на рис. 1 представленні гістограми $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ для цих чавунів. Залежність показників механічних властивостей, а саме твердості HB, σ_B і δ (табл. 1) з вуглецевим еквівалентом і ступенем евтектичності ковких чавунів (табл. 2) не простежується.

Результати визначення методом Монте-Карло $\overline{C_{\text{екв}}}$, $\overline{S_{\text{евт}}}$ і відношення $\text{Si}/\overline{\text{Si}/C}$ у масивах цих показників засвідчили, що ймовірнісний підхід навіть за великої кількості повторювань призводить до незначних розбіжностей у розрахунках цих величин для чавунів з однаковим хімічним складом. Наприклад, такий ефект вбачається в результатах розрахунків для чавунів КЧ 30-6 і КЧ 33-8 (табл. 2). Обмеження сумарного

Таблиця 2

Статистичні характеристики величин вуглецевого еквівалента $C_{екв}$, ступеня евтектичності $S_{евт}$ і відношення Si/C ковкого чавуну, розраховані у ймовірнісному аспекті за даними хімічного аналізу, наведеного у таблиці 1

Клас, марка чавуну	Середні значення і середньоквадратичні відхилення величин		
	$\bar{C}_{екв}; \sigma_{C_{екв}}, \%$	$\bar{S}_{евт}; \sigma_{S_{евт}}$	$\bar{Si}/C$
КЧ 30-6	3,119; 0,059	0,720; 0,014	0,473
КЧ 33-8	3,124; 0,057	0,721; 0,015	0,473
КЧ 35-10	2,990; 0,052	0,687; 0,013	0,453
КЧ 37-12	2,924; 0,052	0,662; 0,013	0,470
КЧ 45-7	–	–	–
КЧ 50-5	2,955; 0,055	0,686; 0,013	0,453
КЧ 55-4	–	–	–
КЧ 60-3	–	–	–
КЧ 65-3	–	–	–
КЧ 70-2	2,869; 0,053	0,660; 0,013	0,510
КЧ 80-1,5	–	–	–

Примітка. Тильдою над $C_{екв}$, $S_{евт}$, відношенням Si/C позначено розраховані середні значення показників, буквою σ – їх середньоквадратичні відхилення. У розрахунках методом Монте-Карло ймовірних значень кожного показника використовували по 1000000 випадково обраних комбінацій вмісту хімічних елементів у складі чавуну.

вмісту вуглецю і кремнію ($C + Si$)% у чавуні (табл. 1) суттєво не впливає на статистичні параметри масивів. Наприклад середні величини відношення $\bar{Si}/C$, розраховані без врахування обмежень суми ($C + Si$)% і з обмеженнями, різнилися несуттєво. В межах похибки розрахунків (рис. 1). Для чавуну марки КЧ 30-6 вони дорівнювали 0,4734 і 0,4684. З цієї причини при розрахунках $\bar{C}_{екв}$ і $\bar{S}_{евт}$, наведених у табл. 2, обмеження щодо величини сумарного вмісту вуглецю і кремнію (C і Si)% не застосовували. Водночас слід мати на увазі, що зменшення сумарного вмісту вуглецю і кремнію ($C + Si$)% у хімічному складі ковкого чавуну негативно впливає на його ливарні властивості, а саме на рідкоплинність. За даними роботи [16, с. 162–163] зменшення вмісту ($C + Si$) у чавуні погіршує його рідкоплинність внаслідок зниження ступеня евтектичності. Оскільки ковкий чавун використовують для виготовлення тонкостінного литва складної конфігурації, то рідкоплинність є важливим фактором в технології виробництва відповідної ливарної продукції. Саме тому у табл. 1, виходячи із практичного досвіду ливарних підприємств, регламентовано сумарний вміст ($C + Si$) у складі ковкого чавуну. Для зниження небезпеки виникнення дефектів литва у вигляді тріщин рекомендується також зменшувати до можливого мінімуму вміст сірки і фосфору у ковкому чавуні.

Стосовно параметрів масивів розподілу величин відношення Si/C , визначених методом Монте-Карло у ковкому чавуні різних марок, зазначимо, що середня величина відношення $\bar{Si}/C$ при переході від чавуну марки КЧ 30-6 до чавуну КЧ 80-1,5 збільшується з 0,4734 до 0,5101, тобто на $\sim 7\%$. Діапазони варіювання величини Si/C зменшуються несуттєво. Зазначене проявляється на гістограмах (рис.2). При переході від чавуну марки КЧ 30-6 до чавуну КЧ 80-1,5 твердість HB і тимчасовий опір σ_B ковкого чавуну підвищуються (табл. 1). Але за результатами виконаних розрахунків

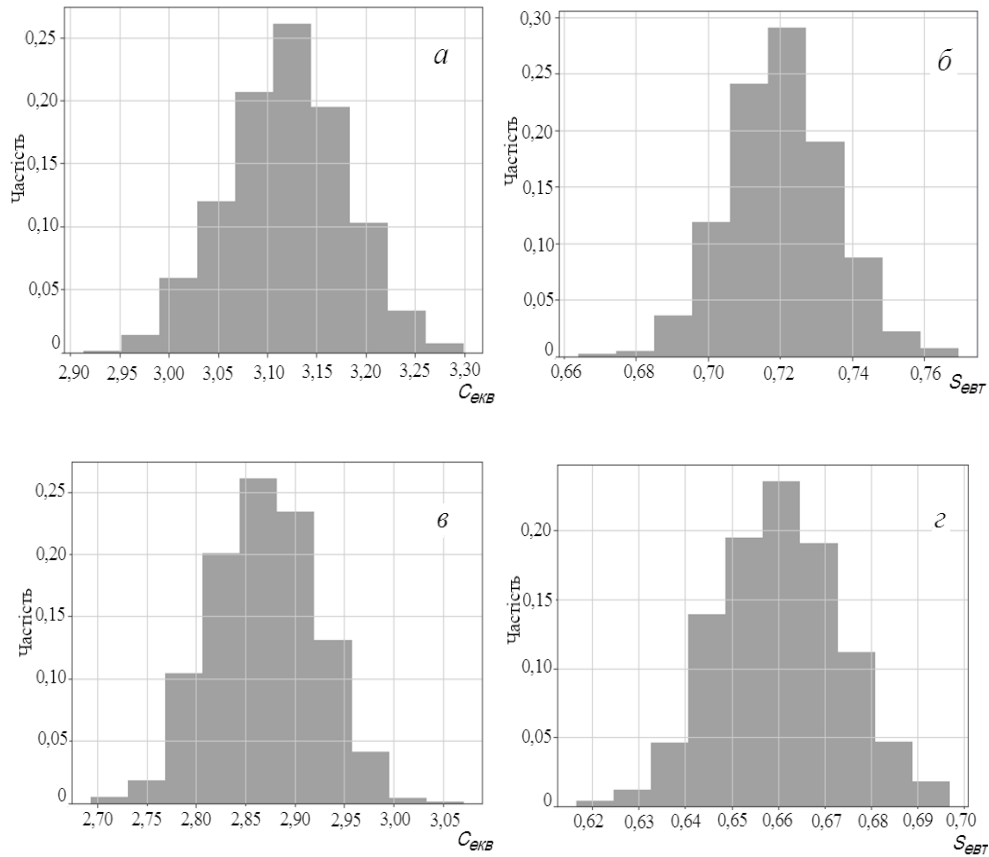


Рис. 1. Гістограми розподілу величин вуглецевого еквівалента $C_{екв}$, %, і ступеня евтектичності $S_{евт}$ чавунів КЧ 30-6 (рис. 1, а і 1, б) і КЧ 65-3 (рис. 1, в і 1, г), розраховані із застосуванням імовірнісного підходу та методу Монте-Карло до вибору випадкових величин вмісту хімічних елементів у складі чавуну (табл. 1), без врахування обмежень на величину $(C + Si)\%$

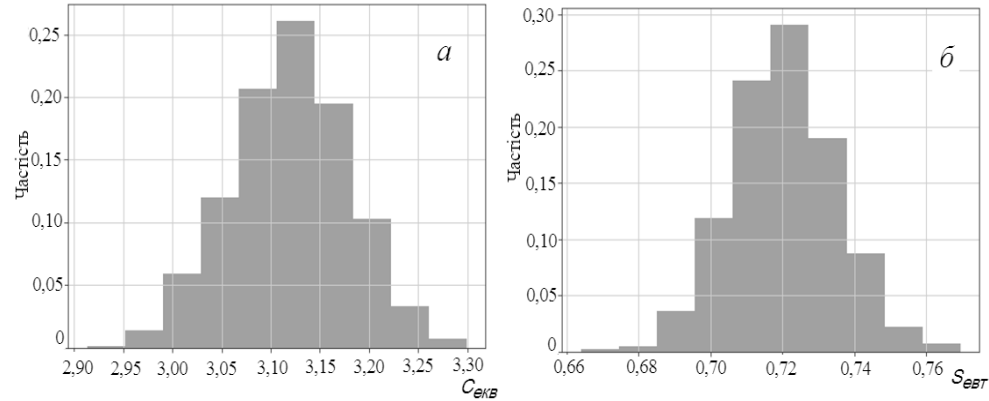


Рис. 2. Гістограми розподілу величини відношення Si/C у чавуні КЧ 30-6, розраховані із застосуванням імовірнісного підходу та методу Монте-Карло до вибору випадкових величин вмісту C і Si : а) розраховані без врахування обмежень на величину $(C + Si)\%$ згідно з табл. 1; б) розраховані з врахуванням такого обмеження

Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

підстав вважати, що зазначена закономірність обумовлена виключно зростанням відношення Si/C у хімічному складі чавунів недостатньо.

За формою включень графіту ковкий чавун (КЧ) класифікують як чавун з пластівчастим графітом. За типом структури металевої основи (матриці) — як феритний або перлітний. Ковкий чавун може мати змішану феритно-перлітну структуру.

Представлена вище оцінка впливу хімічного складу ковкого чавуну на його властивості, що виконана за результатами аналізу із застосуванням ймовірного підходу і методу Монте-Карло, опосередковано засвідчила – головним фактором у формуванні міцності, пластичності, інших механічних характеристик ливарних виробів з такого чавуну є термічна обробка. У монографіях [5–8, 12, 16] підкреслено, що термічна обробка, графітизувальний відпал є обов'язковою технологічною операцією процесу виробництва виливок із ковкого чавуну. Завдання її полягає у забезпеченні повної чи часткової графітизації чавуну. При повній графітизації усього цементиту в структурі чавуну отримують феритну матрицю. При частковій – графітуються тільки первісний і ледебуритний цементит. У цьому випадку структура чавуну отримує перлітну чи перлітно-феритну матрицю.

Технологія графітуючого відпалу зазвичай передбачає нагрів чавунних виливків до температури $\sim 930\text{--}1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, витримку при цій температурі протягом ~ 10 годин і повільне охолодження зі швидкістю не більше 5°C за годину до температур $\sim 760\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$, а далі прискорене охолодження [16]. Загальна тривалість графітуючого відпалу складає зазвичай від 30 до 60 годин. З метою скорочення тривалості цієї технологічної операції і отримання бажаної мікроструктури та властивостей ковкого чавуну виробничники підбирають режими відпалу (температури витримок, швидкості нагріву та охолодження тощо) з урахуванням місцевих умов і продукції, яку виготовляють. Застосування спеціального термічного обладнання, печей для реалізації зазначеної технології, тривалого процесу відпалу, додаткові витрати енергії здорожчають вартість виробництва продукції із ковкого чавуну. Але зазначені вище достоїнства ковкого чавуну забезпечують його використання при виготовленні тонкостінного литва складної конфігурації і продукції відповідального призначення.

На завершення аналізу результатів досліджень особливостей хімічного складу і властивостей виливків із ковкого чавуну, виконаних із застосуванням ймовірного підходу і методу Монте-Карло у порівнянні з аналогічними показниками чавунів з пластинчастим, вермикулярним, кулевидним графітом [1–4], визначених традиційними методами і використанням виробничого досвіду ливарних підприємств [16 та ін.], підкреслимо, що викладений матеріал стосується переважно синтетичного чавуну, який виплавляють із сталевого металобрухту в індукційних печах.

Висновки

З позицій ймовірного підходу із застосуванням методу Монте-Карло встановлено можливі діапазони розкиду величин вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення вмісту кремнію до вмісту вуглецю ковкого чавуну. Показано, що твердість і механічні властивості ковкого чавуну феритного і перлітного класів майже не корелюють навіть з узагальнюючими показниками його хімічного складу (вуглецевим еквівалентом і ступенем евтектичності). Визначальну роль у формуванні мікроструктури і властивостей ковкого чавуну грають режими його термічної обробки (графітуючого відпалу).

Список літератури

- 1 Сіренко К.А., Мазур В.Л., Дереча Д.О. Залежність твердості та інших властивостей сірого чавуну від його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності. *Метал та лиття України*. 2023. Т. 31. № 2. С. 42–50. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.042>
- 2 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка теплопровідності виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом. *Процеси лиття*. 2024. № 2 (156). С. 56–64. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.056>
- 3 Сіренко К.А., Мазур В.Л., Дереча Д.О. Оцінка хімічного складу і властивостей чавуну з кулястим графітом для виливків (імовірнісний підхід). *Процеси лиття*. 2024. № 3 (157). С. 36–45. <https://doi.org/10.15407/plit2024.03.036>
- 4 Сіренко К.А., Мазур В.Л., Дереча Д.О. Узагальнені показники хімічного складу і властивостей чавуну з вермикулярним графітом. *Процеси лиття*. 2024. № 4 (158). С. 36–43. <https://doi.org/10.15407/plit2024.04.036>
- 5 Неижко И.Г. Термическая обработка чугуна. Киев: Наукова думка. 1992. 208 с.
- 6 Захарченко Э.В. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В. Захарченко, Ю.Н. Левченко, В.Г. Горенко, П.А. Вареник. Киев: Наук. думка. 1986. 248 с.
- 7 Шумихин В.С. Высококачественные чугуны для отливок / В.С. Шумихин, В.П. Кутузов, А.И. Хромченков, И.А. Дибров, Н.Н. Александров, Ю.Г. Бобро, О.В. Пузырьков-Уваров, Н.К. Бложко. М.: Машиностроение. 1982. 222 с.
- 8 Неижко И.Г., Найдек В.Л., Гаврилюк В.П. Тормозные колодки железнодорожного транспорта. Киев: НАН Украины, Физ.-технол. ин-т металлов и сплавов. 2009. 121 с.
- 9 Бубликов В.Б., Бачинский Ю.Д. Высокопрочный чугун: прогресс технологий, повышение свойств. *Металл и литье Украины*. 2018. № 7–8. С. 7–12.
- 10 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. 3–13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003>
- 11 Шумихин В.С., Лузан П.П., Жельнис М.В. Синтетический чугун. К.: Наукова думка. 1971. 159 с.
- 12 Неижко И.Г. Графитизация и свойства чугуна. Киев. Наукова думка. 1989. 208 с.
- 13 Семесенко М.П., Пелых С.Г. ЭВМ в управлении литейными процессами. Донецк, «Донбасс». 1975. 95 с.
- 14 Пелых С.Г., Семесенко М.П. Оптимизация литейных процессов. Киев, «Вища школа». 1977. 192 с.
- 15 Пелых С.Г., Пономаренко О.И. Кибернетические модели в управлении качеством отливок. Оборудование и инструмент для профессионалов. *Металлообработка*. 2006. № 1. С. 36–39.
- 16 Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В., Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. М.: Машиностроение. 1984. 432 с.

Надійшла 30.03.2025

References

- 1 Sirenko, K.A., Mazur, V.L., Derecha, D.O. (2023). Dependence of hardness and other properties of gray iron on its carbon equivalent and degree of eutecticity. *Metal and casting of Ukraine*. vol. 31, no. 2, pp. 42–50 [in Ukrainian].
- 2 Sirenko, K.A., Mazur (2024). Assessment of thermal conductivity of grey cast iron castings with lamellar graphite. *Casting processes*, no. 2 (156), pp. 56–64 [in Ukrainian].
- 3 Sirenko, K.A., Mazur, V.L., Derecha, D.O. (2024). Assessment of chemical composition and properties of cast iron with nodular graphite for castings (probabilistic approach). *Casting processes*, no. 3 (157), pp. 36–45 [in Ukrainian].

- 4 Sirenko, K.A., Mazur, V.L., Derecha, D.O. (2024). Generalized indicators of chemical composition and properties of cast iron with vermicular graphite. *Casting processes*, no. 4 (158), pp. 36–43 [in Ukrainian].
- 5 Neizhko, I.G. (1992). Heat treatment of cast iron. *Kiev: Naukova dumka*. 208 p. [in Russian].
- 6 Zakharchenko, E.V. (1986). Castings from cast iron with spherical and vermicular graphite / E.V. Zakharchenko, Yu.N. Levchenko, V.G. Gorenko, P.A. Varenyk. *Kiev: Naukova dumka*. 248 p. [in Russian].
- 7 Shumikhin, V.S. (1982). High-quality cast irons for castings / V.S. Shumikhin, V.P. Kutuzov, A.I. Khromchenkov, I.A. Dibrov, N.N. Aleksandrov, Y.G. Bobro, O.V. Puzyrkov-Uvarov, N.K. Blazhko. *Moskva: Mashinostroenie*. 222 p. [in Russian].
- 8 Neizhko, I.G., Naydek, V.L., Gavrilyuk, V.P. (2009). Railway brake pads. Kyiv: NAS of Ukraine, PTIMA NAS of Ukraine, 121 p. [in Russian].
- 9 Bublikov V.B., Bachinsky Y.D. (2018). High-strength cast iron: progress of technologies, increase of properties. *Metal and casting of Ukraine*, no. 7–8, pp. 7–10.
- 10 Bublikov, V.B., Bachynskyi, Yu.D., Nesteruk, O.P. (2024). Obtaining of pearlite grade ductile cast iron with improved technological and mechanical properties. *Casting processes*, no. 1 (155), pp. 3–13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003> [in Ukrainian].
- 11 Shumikhin, V.S., Luzan, P.P., Zhelnis, M.V. (1971). Synthetic cast iron. K.: *Naukova Dumka*. 159 c. [in Russian].
- 12 Neizhko, I.G. (1989). Graphitisation and properties of cast iron. *Kiev. Naukova Dumka*. 208 p. [in Russian].
- 13 Semesenko, M.P., Pelykh, S.G. (1975). Computer in foundry processes control. Donetsk, «Donbass». 95 p. [in Russian].
- 14 Pelykh, S.G., Semesenko, M.P. (1977). Optimisation of foundry processes. Kiev, «Vishcha Shkola». 192 p. [in Russian].
- 15 Pelykh, S.G., Ponomarenko, O.I. (2006). Cybernetic models in casting quality management. Equipment and tools for professionals. *Metalloobrabotka*, no. 1, pp. 36–39 [in Russian].
- 16 Vozdvizhenskiy V.M., Grachev V.A., Spasskiy V.V., Foundry alloys and technology of their melting in mechanical engineering. M.: Mashinostroenie. 1984. 432 c.

Received 30.03.2025

K.A. Sirenko*, PhD in Engineering; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

V.L. Mazur*, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Chief Researcher; e-mail: prof.vlm@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-8970-5389>

D.O. Derecha**, PhD (Phys. & Math), Senior Research Scientist, Head of the Lab. e-mail: dderecha@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2442-3759>

* Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

** Baryakhtar Institute of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

STATISTICAL ANALYSIS OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND PROPERTIES OF DUCTILE IRON

It is shown that the current task in foundry production is the scientific support of technical solutions for the introduction into industrial practice of non-destructive methods for determining the mechanical properties of cast iron castings based on the results of the analysis of their chemical composition.

Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

The chemical composition and properties of cast iron castings of various classes and grades were analyzed using the method of assessing its carbon equivalent and degree of eutecticity using the probabilistic approach and the Monte Carlo method. The parameters of the arrays of probable values of the carbon equivalent, degree of eutecticity, and the ratio of the percentage content of silicon to the carbon content of malleable iron were determined. Histograms of the distributions of the values of these indicators in cast iron were presented. The probable ranges of the dispersion of the values of the carbon equivalent, degree of eutecticity, and the ratio of the content of silicon to the carbon content were established. The values of carbon equivalent, degree of eutecticity, other indicators of chemical composition and properties of malleable iron compared with similar characteristics of cast irons with lamellar, vermicular and spheroidal graphite. It is shown that taking into account the limitations of the total content of carbon and silicon in the chemical composition of malleable iron does not significantly affect the numerical values of its carbon equivalent and degree of eutecticity. The dependence of hardness, other mechanical properties of malleable iron castings on the values of its carbon equivalent and degree of eutecticity was not revealed. The influence of heat treatment on the properties of malleable iron is considered. The possibilities of improving the quality of malleable iron castings by their heat treatment are revealed. Recommendations are summarized for the selection of heat treatment modes for cast iron castings for various purposes to increase the level of their operational characteristics.

Keywords: cast iron, chemical composition, mechanical properties, castings, heat treatment, carbon equivalent, degree of eutecticity.

До уваги авторів

У зв'язку з переходом журналу «Процеси лиття» на новітню платформу Open Journal Systems та відповідним оновленням сайту журналу подача статей можлива через сайт <https://plit-periodical.org.ua/>

Після реєстрації в системі вам буде запропоновано покрокову процедуру завантаження статті за стандартами міжнародних журналів.

Спілкування з редакцією та подання статей здійснюється через пошту **plit.periodical@gmail.com**

Редакція журналу «Процеси лиття»