

ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2024.03.036>

УДК 621.74.04:669.13.017

К.А. Сіренко*, мол. наук. співроб., e-mail: thermoexp.metal@gmail.com;
ORCID 0000-0003-2613-8094

В.Л. Мазур*, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., гол. наук.
співроб.; e-mail: prof.vlm@ukr.net; ORCID 0000-0001-8970-5389

Д.О. Дереча**, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб., зав. лабор.;
e-mail: dderecha@gmail.com; ORCID 0000-0002-2442-3759

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

** Інститут магнетизму НАН України та МОН України (Київ, Україна)

ОЦІНКА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУНУ З КУЛЯСТИМ ГРАФІТОМ ДЛЯ ВИЛИВКІВ (ІМОВІРНІСНИЙ ПІДХІД)

Високоміцний чавун із кулястим графітом є матеріалом, об'єми застосування якого постійно збільшуються в машинобудуванні та інших галузях промисловості. Проаналізовано хімічний склад і механічні властивості виливків із високоміцного чавуну з кулястим графітом різних марок, який виробляють відповідно до вимог ДСТУ 3925-99. Уточнено методику розрахунків вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності чавуну з використанням імовірного підходу й методу Монте-Карло. Показано, що характер розподілу величин вмісту хімічних елементів у їх діапазонах не впливає на середні значення вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності високоміцного чавуну з кулястим графітом. На основі даних щодо рекомендованого хімічного складу високоміцного чавуну з кулястим графітом різних марок, представлених у ДСТУ 3925-99, розраховано у ймовірному підході із застосуванням методу Монте-Карло значення вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності в припущенні, що розподіли величин вмісту хімічних елементів відповідно до визначених стандартом їх діапазонів у складі чавуну підпорядковані нормальному закону Гаусса або рівномірному розподілу. Встановлено, що величини вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності хімічного складу високоміцного чавуну з кулястим графітом, рекомендованого в ДСТУ 3925-99, мало змінюються в чавунах різних марок. Вуглецевий еквівалент перебуває в межах від мінімального значення 3,2986 % до максимального 4,5756 %. Ступінь евтектичності — від 0,7480 до 1,1040. Закон розподілу величин вмісту хімічних елементів у чавуні (нормальний чи рівномірний) майже не впливає на середні значення цих показників. Середні квадратичні відхилення мають приблизно втричі більші значення в разі застосування рівномірного розподілу величин вмісту хімічних елементів в їх діапазонах у складі чавуну. Залежність міцності й твердості високоміцного чавуну з кулястим графітом від вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності, розрахованого за даними рекомендованого ДСТУ 3925-99 хімічного складу такого чавуну, не проявляється.

Ключові слова: чавун із кулястим графітом, литво, хімічний склад, вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності, механічні властивості.

Виготовлення литва з високоміцного чавуну з кулястим графітом для потреб залізничного транспорту, гірничо-видобувної, енергетичної, автомобільної, інших галузей промисловості розвинуто в усіх країнах світу [1]. В Україні об'єми виробництва такої продукції мають поширюватися одночасно з покращенням якості виливків із високоміцного чавуну [2]. Актуальним завданням для теорії й практики ливарного виробництва є поглиблення знань щодо розкриття залежностей механічних властивостей виливків із високоміцного чавуну з кулястим графітом від його хімічного складу й технології виробництва.

Важливою позитивною рисою високоміцних чавунів із кулястим графітом є їх спроможність кардинально змінювати свою структуру та фізико-механічні властивості (міцність, ударну в'язкість, відносне видовження, холодостійкість тощо) під впливом модифікування, спеціальної термічної обробки виливків тощо. У технічній літературі наведено приклади одержання високоміцних чавунів перлітного класу зі специфічними властивостями [3]. Чавун із кулястим графітом, що виготовляють за вимогами ДСТУ 3925-99 і про який йдеться далі, розглядають, в основному, як матеріал для виготовлення виливків масового призначення.

Марки чавуну з кулястим графітом для виливків визначені в Державному стандарті України ДСТУ 3925-99. Марка чавуну з кулястим графітом містить літери ВЧ (В — високоміцний, Ч — чавун). Далі йде цифрове позначення мінімального значення тимчасового опору під час розтягання (розтягування) в мегапаскалях та через дефіс — мінімальне значення відносного видовження у відсотках.

Згідно з ДСТУ 3925-99, міцність під час розтягування (випробування на розтягання), твердість і ударну в'язкість виливків чавуну з кулястим графітом визначають на зразках, вирізаних із тіла виливків. Таким способом виконують випробування та визначають механічні властивості також виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом, що їх виготовляють за ДСТУ 8833:2019, і чавунів інших марок. Усі ці випробування потребують певних витрат, які погіршують економічні показники виготовлення литва. Тому актуальним завданням у ливарному виробництві є розробка та реалізація на практиці способів неруйнівного контролю властивостей виливків із чавуну. Перший етап розв'язання цієї задачі полягає у виконанні статистичної оцінки розподілів величин вмісту хімічних елементів у складі чавунів цього типу й механічних властивостей виливків із нього. Ця стаття, як і раніше опубліковані роботи [4 та ін.], представляє результати відповідних досліджень, які виконуються у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України.

У роботах [5, с. 26–27; 6, с. 62–64], опублікованих українськими вченими майже п'ятдесят років тому, було показано, що при оцінках хімічного складу і властивостей чавунів та інших ливарних сплавів необхідно враховувати випадковий характер їх формування у процесі виготовлення виливків. Відповідно, вирішення задачі прогнозування властивостей чавуну залежно від показників його хімічного складу має відбуватися на підставі ймовірісно-статистичного підходу. При такому підході необхідно, щоб запропонована методика забезпечувала на основі фактичних даних, а саме за результатами заміру відсоткового вмісту елементів у хімічному складі чавуну, максимально можливу достовірність прогнозу його механічних властивостей (твердості, міцності тощо). Оснащення сучасних ливарних підприємств комп'ютерною технікою й розроблені моделі управління процесами виробництва литва дають реальні підстави для запровадження на практиці неруйнівних методів визначення властивостей виливків із чавуну, у тому числі й чавунів із кулястим графітом.

У нашій роботі [4] для підвищення інформативності й достовірності розрахованих показників властивостей ливарних виробів використано ймовірнісний підхід, метод Монте-Карло і статистичні параметри розподілів величин вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності чавуну, визначених за результатами заміру відсоткового вмісту хімічних елементів у його складі. Нижче розглянуто можливість застосування такого квазіемпіричного підходу для оцінки властивостей високоміцного чавуну з кулястим графітом за даними його хімічного складу.

Українські стандарти, зокрема ДСТУ 8833:2019, ДСТУ 3925-99 та ін., які визначають марки й технічні вимоги до виливків із чавунів різного типу та призначення, узагальнюють теоретичні напрацювання наукових установ і практичний досвід у цій сфері ливарних підприємств, виробників і споживачів ливарної продукції. При розробці методик прогнозування механічних властивостей виливків із чавунів різних марок доцільно спиратися на залежності механічних властивостей від хімічного складу чавунів, прямо чи опосередковано визначені у стандартах. Завдання полягає у виявленні та достовірному представленні цих залежностей.

Згідно з ДСТУ 3925-99, механічні властивості виливків характеризуються величинами тимчасового опору під час розтягання (розтягування), σ_b , в МПа, умовної границі плинності, $\sigma_{0,2}$ МПа, відносним видовженням, %, твердістю HB, ударною в'язкістю KCU, кДж/м² за температурах + 20 °С не менше 190 (одиначне — 160) і за — 40 °С не менше 140 (одиначне — 110). Тобто марки високоміцного чавуну з кулястим графітом визначені на основі його механічних властивостей. Зокрема марка чавуну визначається величиною його тимчасового опору під час розтягання (розтягування). Хімічний склад чавуну із кулястим графітом для виливків наведено в додатку Б ДСТУ 3925-99 у статусі рекомендованого. Обов'язкові величини твердості та ударної в'язкості чавуну наведені в додатку А. Хімічний склад і механічні властивості чавуну, що визначені у ДСТУ 3925-99, наведені у табл. 1.

Дані табл. 1 свідчать, що рекомендований стандартом хімічний склад високоміцних чавунів із кулястим графітом різних марок має певні особливості. Так, згідно з ДСТУ 3925-99, масова частка фосфору в чавуні всіх марок має бути не більше 0,1 %. Масова частка сірки — не більше 0,02 % у чавунах із кулястим графітом марок від ВЧ 350-22 до ВЧ 500-2 і не більше 0,01 % у таких чавунах інших марок. Варто звернути увагу, що вміст вуглецю в чавунах, міцніших за ВЧ 500-2, становить однакову величину (3,2–3,6) %. Вміст кремнію дорівнює (1,9–2,9) % в усіх чавунах, крім марок ВЧ 350-22, ВЧ 400-15 і ВЧ 1000-2. Збільшення масової частки хрому в складі чавунів від 0,05 до 0,15 %, як і збільшення вмісту марганцю, супроводжується підвищенням міцності й твердості чавуну. Відносне видовження зменшується при підвищенні міцності й твердості високоміцного чавуну з кулястим графітом.

Інформація, представлена в табл. 1, складна для однозначних висновків щодо характеру залежностей механічних властивостей чавуну з кулястим графітом від масової частки та співвідношення елементів у його хімічному складі. Змістовність інформації відносно залежності механічних властивостей, наприклад чавуну з пластинчастим графітом, від його хімічного складу посилює аналіз, виконаний із використанням імовірнісного підходу та узагальнюючих показників хімічного складу чавунів. А саме вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$, ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$, відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію C/Si, розрахованих із використанням імовірнісного підходу й методу Монте-Карло [4]. Застосування такої методики при дослідженнях високоміцного чавуну з кулястим графітом дало такі результати.

По-перше, зазначимо, що вуглецевий еквівалент $C_{\text{екв}}$ хімічного складу чавуну з кулястим графітом розраховували за формулою (1), використовуючи наведені у табл. 1 дані щодо масової частки (%) у чавуні вуглецю C, кремнію Si, фосфору P, марганцю Mn, сірки S:

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

Ступінь евтектичності чавуну розраховували за формулою (2), яка, крім вуглецю, кремнію та фосфору у чавуні враховує також вміст сірки й марганцю:

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

Таблиця 1
Хімічний склад (рекомендований) і механічні властивості чавуну з кулястим графітом для
випливів відповідно до ДСТУ 3925-99

Марка чавуну	Масова частка елементів у відсотках							Твердість HB	σ, МПа	δ, %
	C	Si	Mn	P	S	Cr				
							не більше			
ВЧ 350-22	2,7-3,8	1,9-2,6	0,2-0,6	0,1	0,02	0,05	140-170	230	22	
ВЧ 400-15*	3,3-3,8	1,9-2,6	0,2-0,6	0,1	0,02	0,05	140-202	260	15	
ВЧ 420-12	3,3-3,8	1,9-2,9	0,2-0,6	0,1	0,02	0,1	140-217	270	12	
ВЧ 450-10	3,3-3,8	1,9-2,9	0,2-0,6	0,1	0,02	0,1	140-225	320	10	
ВЧ 450-5	3,4-3,8	1,9-2,9	0,2-0,6	0,1	0,02	0,1	160-220	310	5	
ВЧ 500-7	3,2-3,4	1,9-2,9	0,2-0,7	0,1	0,02	0,1	153-245	340	7	
ВЧ 500-2	3,2-3,6	1,9-2,9	0,2-0,9	0,1	0,02	0,15	180-260	390	2	
ВЧ 600-3*	3,2-3,6	1,9-2,9	0,4-0,7	0,1	0,01	0,15	190-277	390	3	
ВЧ 700-2*	3,2-3,6	1,9-2,9	0,5-0,9	0,1	0,01	0,15	228-302	420	2	
ВЧ 800-2*	3,2-3,6	1,9-2,9	0,5-0,9	0,1	0,01	0,15	248-354	490	2	
ВЧ 900-2*	3,2-3,6	1,9-2,9	0,6-0,9	0,1	0,01	0,15	280-360	600	2	
ВЧ 1000-2*	3,2-3,6	2,3-2,8	0,6-0,9	0,1	0,01	0,15	270-360	700	2	

Примітка. Зірочками позначено чавуни марок ВЧ 400-15*, ВЧ 600-3*, ВЧ 700-2*, ВЧ 800-2*, ВЧ 900-2*, ВЧ 1000-2*, які допускається легувати нікелем, міддю або іншими елементами. Мінімальне значення тимчасового опору під час розтягання (розтягування), МПа, позначено першою цифрою марки чавуну. Другою цифрою через дефіс – мінімальне значення відносно видовження у відсотках.

Масові частки елементів у цих формулах представлені у табл. 1.

Зауважимо, що в монографії [7, с. 131] представлена також дещо інша формула (3) для розрахунку вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ чавуну. А саме:

$$C_{\text{екв}} = C + 0,3\text{Si} + 0,33\text{P} + 0,4\text{S} - 0,03\text{Mn} \cdot \tag{3}$$

Різні формули, які використовують для розрахунків вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ чавуну, дають приблизно однакові результати. За формулою (1) вплив вмісту сірки й марганцю на $C_{\text{екв}}$ дещо сильніший, ніж за формулою (3). Але різниця результатів розрахунків, виконаних за цими формулами, несуттєва.

По-друге, із методичної точки зору при виконанні зазначеного аналізу важливо з'ясувати, наскільки суттєво впливає на результати розрахунків $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ закон

розподілу величин вмісту хімічних елементів у складі чавуну з кулястим графітом у діапазонах їх розкиду. Для отримання відповіді на це питання зіставили результати розрахунків імовірнісним методом Монте-Карло середніх величин і середніх квадратичних відхилень $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ при розподілах вмісту елементів за нормальним Гаусса й рівномірним законами.

Статистичні характеристики вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ та ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ чавунів із кулястим графітом відповідно до хімічного складу за даними ДСТУ 3925-99, які розраховані у ймовірнісному аспекті з використанням формул (1)–(3), застосуванням методу Монте-Карло і припущеннями, що розподіли вмісту кожного хімічного елемента в межах передбачених діапазонів їх величин відповідають нормальному закону Гаусса та рівномірному розподілу, представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Статистичні характеристики показників вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ чавунів із кулястим графітом для виливків, розраховані у ймовірнісному аспекті за даними хімічного складу чавунів, наведеними у ДСТУ 3925-99

Марки чавуну	Середні значення і середні квадратичні відхилення показників	
	$\bar{C}_{\text{екв}}; \sigma_{C_{\text{екв}}}$	$\bar{S}_{\text{евт}}; \sigma_{S_{\text{евт}}}$
ВЧ 350-22	3,8840; 0,1246 / 3,884; 0,3239	0,9087; 0,0347 / 0,9090; 0,0902
ВЧ 400-15*	4,1841; 0,0607 / 4,1839; 0,1578	0,9926; 0,0169 / 0,9928; 0,0438
ВЧ 400-12	4,2291; 0,0652 / 4,2292; 0,1695	1,0053; 0,0184 / 1,0059; 0,0479
ВЧ 450-10	4,2290; 0,0651 / 4,2293; 0,1695	1,0053; 0,0184 / 1,0059; 0,0479
ВЧ 450-5	4,2292; 0,0652 / 4,2790; 0,1456	1,0053; 0,0184 / 1,0200; 0,0413
ВЧ 500-7	3,9726; 0,0411 / 3,9716; 0,1068	0,9341; 0,0109 / 0,9346; 0,0283
ВЧ 500-2	4,0565; 0,0568 / 4,0566; 0,1478	0,9616; 0,0155 / 0,9621; 0,0404
ВЧ 600-3*	4,0565; 0,0559 / 4,0554; 0,1451	0,9616; 0,0155 / 0,9616; 0,0403
ВЧ 700-2*	4,0342; 0,0561 / 4,0329; 0,1457	0,9604; 0,0155 / 0,9604; 0,0403
ВЧ 800-2	4,0342; 0,0561 / 4,0390; 0,1457	0,9604; 0,0155 / 0,9604; 0,0403
ВЧ 900-2	4,0266; 0,0559 / 4,0252; 0,1453	0,9600; 0,0155 / 0,9599; 0,0403
ВЧ 1000-2	4,0716; 0,0479 / 4,0716; 0,1244	0,9723; 0,0136 / 0,9724; 0,0353

Примітка. Тильдою позначено розраховані ймовірнісні середні значення показників, буквою — їх середні квадратичні відхилення. Ліворуч від скісної риски — при розподілі змінних за нормальним законом Гаусса, праворуч — при умові рівномірного розподілу змінних у її діапазонах. У розрахунках методом Монте-Карло ймовірних значень кожного показника використовували по 1000 000 випадково обраних комбінацій вмісту хімічних елементів у складі чавуну.

Відповідно до даних, наведених у табл. 2, середні величини вуглецевого еквівалента $\bar{C}_{\text{екв}}$ й ступеня евтектичності $\bar{S}_{\text{евт}}$ чавунів із кулястим графітом різних марок, розраховані з використанням імовірнісного підходу і застосуванням методу Монте-Карло відповідно до рекомендованого в ДСТУ 3925-99 хімічного складу, слабо змінюються при зростанні або зменшенні міцності чавунів. Зазначене свідчить, що рекомендований у ДСТУ 3925-99 хімічний склад чавуну з кулястим графітом для виливків не має визначального впливу на механічні властивості (міцність, твердість, відносне видовження тощо) високоміцного чавуну. Середні величини вуглецевого еквівалента $\bar{C}_{\text{екв}}$ чавунів із кулястим графітом майже всіх марок перевищують 4 %. Винятком є чавуни ВЧ 350-22 і ВЧ 500-7 (табл. 2), для яких величини $\bar{C}_{\text{екв}}$ дорівнюють 3,8840 і 3,976 %. Найбільші значення $\bar{C}_{\text{екв}}$ мають чавуни марок ВЧ 400-15, ВЧ 420-

12, ВЧ 450-10 і ВЧ 450-5. Отримані результати розрахунків не збігаються повною мірою з висновками, наведеними в монографії [7, с. 167], що високоміцні чавуни «відзначаються високим ступенем евтектичності та великим вуглецевим еквівалентом $C_{\text{екв}} = 5,4 \text{ } 6,0$ % ». Тобто суттєво не збігаються величини вуглецевого еквівалента.

Згідно з даними табл. 2, середні значення ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ чавунів із кулястим графітом усіх марок, розраховані за їх хімічним складом, рекомендованим у ДСТУ 3925-99, переважно близькі до 1. Мінімальне значення $S_{\text{евт}}$ отримано для чавуну ВЧ 350-22. Максимальні — для чавунів ВЧ 400-12, ВЧ 450-10, ВЧ 450-5.

Дані, наведені у табл. 1 і 2, не свідчать про суттєвий вплив величини вуглецевого еквівалента хімічного складу високоміцного чавуну з кулястим графітом на його механічні властивості, зокрема на міцність і твердість. Такі залежності характерні для чавуну з пластинчастим графітом [8–9]. Міцність і твердість виливків із високоміцного чавуну з кулястим графітом не залежать і від вмісту вуглецю в його хімічному складі, визначеному в ДСТУ 3925-99.

Результати виконаного аналізу засвідчили, що тип прийнятого в розрахунках за викладеною методикою вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності розподілу величин вмісту хімічних елементів у межах їх діапазонів, зазначених у складі високоміцного чавуну з кулястим графітом різних марок згідно із ДСТУ 3925-99, майже не впливає на отримані середні значення $\bar{C}_{\text{екв}}$ і $\bar{S}_{\text{евт}}$. При тому, що середньо квадратичні відхилення $\sigma_{S_{\text{евт}}}$ і $\sigma_{C_{\text{ект}}}$ залежать від прийнятого закону розподілу величин вмісту елементів у діапазонах їх значення середньоквадратичних відхилень $\sigma_{C_{\text{ект}}}$ і $\sigma_{S_{\text{евт}}}$ майже в три рази менші, якщо розподіл величин вмісту хімічних елементів у діапазонах, визначених у складі чавуну згідно з ДСТУ 3925-99, відповідає нормальному закону Гаусса. Вважається, що цей закон достовірно відображає ймовірнісний характер технологічних процесів у ливарному виробництві. Представлені на рис. 1 і 2 гістограми ілюструють результати розрахунків для чавуну ВЧ 350-22 у вигляді прикладу.

Результати виконаних досліджень дають підстави погодитися з авторами монографії [1, с. 153–160], що вміст вуглецю у складі чавуну з кулястим графітом

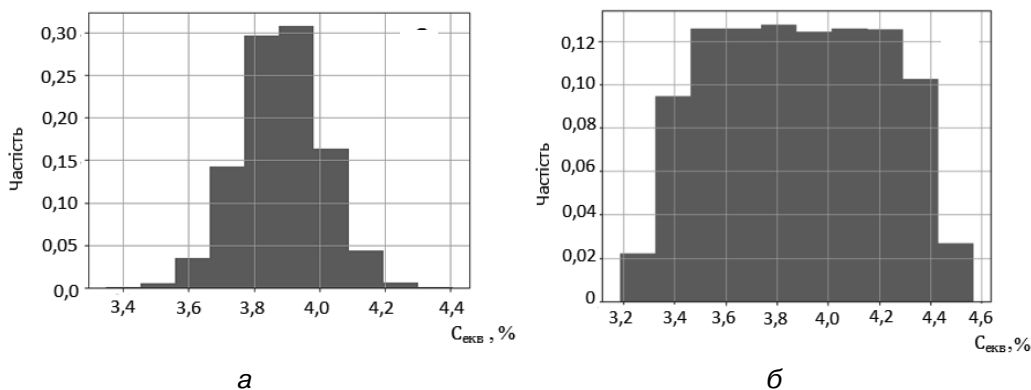


Рис. 1. Гістограми розподілу величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$, %, чавуну ВЧ 350-22, хімічний склад якого представлено в табл. 1: а — при розподілі вмісту, %, хімічних елементів у визначених діапазонах відповідно до нормального закону Гаусса; б — відповідно до рівномірного розподілу

відносно слабо впливає на його механічні властивості, на відміну від впливу на властивості чавуну з пластинчастим графітом. Саме тому в ДСТУ 3925-99 для високоміцних чавунів марок від ВЧ 500-2 до ВЧ 1000-2* вміст вуглецю перебуває на однаковому рівні (3,2...3,6) %. Згідно з формулами (1)–(3), вміст вуглецю впливає вирішальним чином на величини вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності

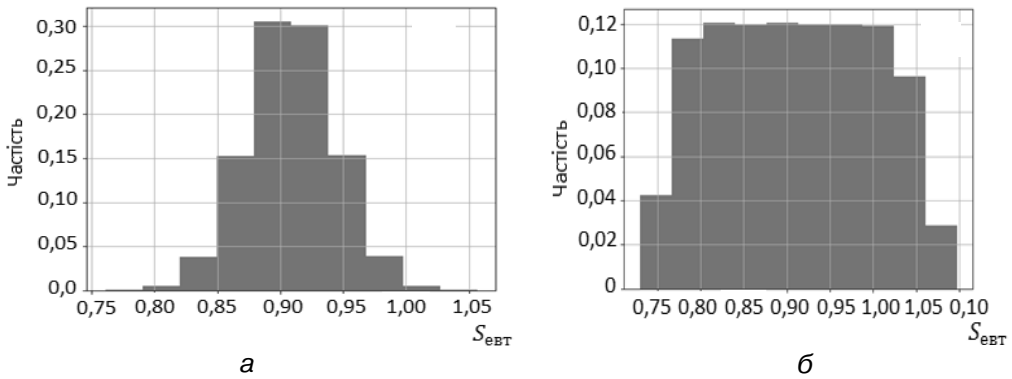


Рис. 2. Гістограми розподілу величини ступеня евтектичності $S_{евт}$, чавуну ВЧ 350-22, хімічний склад якого представлено в табл. 1: а – при розподілі вмісту, %, хімічних елементів у визначених діапазонах відповідно до нормального закону Гаусса; б – відповідно до рівномірного розподілу

металу. Тому механічні властивості високоміцного чавуну з кулястим графітом значно слабше реагують на величини його $C_{екв}$ і $S_{евт}$. У хімічному складі чавунів, рекомендованому в ДСТУ 3925-99, вміст вуглецю перебуває у відносно вузькому діапазоні величин (табл. 1). Максимальний діапазон вмісту вуглецю у чавуні марки ВЧ 350-22 дорівнює $C = (2,7...3,8) \%$. Згідно з даними монографії [1, с. 157], вміст вуглецю у чавуні з кулястим графітом будь-яких марок складає $C = (3,2...3,6) \%$.

Аналіз літературних джерел, присвячених розглянутій темі, свідчать, що структура та механічні властивості високоміцного чавуну з кулястим графітом залежать від вмісту кремнію в його хімічному складі. Вміст кремнію відчутно впливає і на величини вуглецевого еквівалента $C_{екв}$ та ступеня евтектичності $S_{евт}$ чавуну. Змінюючи концентрацію кремнію в хімічному складі чавуну з кулястим графітом, можна отримувати різну структуру його металевої основи і, відповідно, різну пластичність чавунних виливків [1, с. 157]. Масова частка кремнію в рекомендованому в ДСТУ 3925-99 хімічному складі високоміцного чавуну з кулястим графітом перебуває на приблизно однаковому рівні для всіх чавунів (табл. 1). Діапазони можливих величин вмісту кремнію порівняно широкі і складають 1 % для чавунів усіх марок, крім ВЧ 350-22 і ВЧ 1000-2*. За інформацією, наведеною в монографії [1, с. 157–158], найвищі значення відносного видовження та ударної в'язкості спостерігали при масовій частці кремнію в чавуні на рівні $(2,6...2,8) \%$. Для отримання високоміцних чавунів із відносно високою пластичністю рекомендовано обмежувати вміст кремнію діапазоном $(2,0...2,4) \%$. При цьому слід мати на увазі, що графітизація чавуну та його міцність залежать також від співвідношення вмісту кремнію і вмісту вуглецю при однакових величинах ступеня евтектичності чавуну [10, с. 148].

Аналізуючи інформацію щодо впливу хімічних елементів у складі чавуну з кулястим графітом для виливків згідно з ДСТУ 3925-99, наведену в літературних джерелах [1–3, 7 та ін.], додатково зазначимо таке. Збільшення вмісту марганцю у складі високоміцного чавуну з кулястим графітом для виливків сприяє підвищенню долі перліту і, відповідно, зменшенню фериту в металічній основі чавуну. Це посилює його міцність і погіршує пластичність. Для чавунів із феритною матрицею вміст марганцю у їх складі не повинен перевищувати 0,3 %. У чавунах зі перлітно-феритною та перлітною основою вміст марганцю має складати $(0,4...0,8) \%$. За даними щодо вмісту марганцю, рекомендованого в ДСТУ 3925-99 і наведеного в табл. 1, можна зробити висновок, що йдеться про чавуни з феритною і ферито-перлітною структурами. Для отримання чавуну з найкращими показниками ударної в'язкості та відносного видовження бажано, щоб частка фосфору в хімічному складі

чавуну була менше 0,05 %. Концентрація фосфору у високоміцному чавуні зазвичай перебуває в межах (0,05...0,15) %. У виливках значної товщини вміст фосфору не повинен перевищувати 0,1 % [1, с. 157–158]. Саме така величина вмісту фосфору (не більше) регламентована у ДСТУ 3925-99. Таким чином, передбачені в ДСТУ 3925-99 показники хімічного складу та механічних властивостей високоміцного чавуну з кулястим графітом різних марок адекватно відображають результати науково-технічних напрацювань і виробничий досвід у темі, яка розглядається. Представлені у табл. 1 дані відповідають висновкам і поглядам, що хімічний склад високоміцного чавуну з кулястим графітом впливає на його мікроструктуру, фізико-механічні властивості та експлуатаційні характеристики. При тому що структура і властивості такого чавуну залежать від режимів термічної обробки виливків.

Стосовно розширення сфери використання ливарних виробів із чавуну з кулястим графітом необхідно зауважити, що нині в Україні створені сприятливі умови для освоєння технології виготовлення з такого матеріалу гальмівних колодок залізничного рухомого складу, крім іншої ливарної продукції відповідного призначення [2–3 та ін.]. Наприклад, результати досліджень гальмівних колодок залізничного транспорту з високоміцного чавуну з кулястим графітом, виконаних Фізико-технологічним інститутом металів та сплавів НАН України, засвідчили [11, с. 35–37] перспективність цього напрямку застосування зазначеного матеріалу. Особливо у зв'язку з появою в Україні ливарних підприємств, оснащених індукційними плавильними печами та іншим сучасним обладнанням, необхідним для виплавлення в промислових масштабах високоміцного чавуну вказаного призначення.

Висновки

- Вимоги до твердості HB, ударної в'язкості, тимчасового опору під час розтягання σ_B , умовної границі плинності $\sigma_{0,2}$, відносного видовження % високоміцного чавуну з кулястим графітом для виливків марок від ВЧ 350-22 до ВЧ 1000-2, що передбачені в ДСТУ 3925-99, забезпечуються при середніх величинах вуглецевого еквівалента $\bar{C}_{екв}$ в межах (3,884...4,229) % і середньому квадратичному відхиленні (0,0411...0,1246) %, середніх величинах ступеня евтектичності $\bar{s}_{евт}$ в межах 0,9087...1,005 та його середньому квадратичному відхиленні 0,011...0,035, розрахованих із застосуванням імовірнісного підходу й методу Монте-Карло відповідно до рекомендованого в зазначеному стандарті вмісту хімічних елементів у складі чавуну.

- Тип розподілу (рівномірний чи нормальний за законом Гаусса) величин вмісту хімічних елементів у діапазонах, визначених у складі високоміцного чавуну з кулястим графітом згідно з ДСТУ 3925-99, не впливає на середні значення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності, розрахованих із застосуванням імовірнісного підходу та методу Монте-Карло. Значення середньоквадратичних відхилень цих показників приблизно втричі менші в разі прийняття типу розподілу відповідно до закону Гаусса.

- Обмеження щодо масових часток елементів у хімічному складі високоміцних чавунів із кулястим графітом, наведених у ДСТУ 3925-99, стосуються, %: фосфору не більше 0,1; сірки не більше 0,02 для чавунів від ВЧ 350-22 до ВЧ 500-2 і не більше 0,01 в інших високоміцних чавунах. Вміст хрому має зростати від 0,05 до 0,15 % для підвищення міцності чавуну, але не переходити зазначені межі. Рекомендовані в зазначеному стандарті величини вмісту хімічних елементів у складі такого чавуну загалом узгоджуються з висновками, наведеними в технічній літературі.

- Залежність механічних властивостей високоміцного чавуну з кулястим графітом із зазначеним у ДСТУ 3925-99 хімічним складом від величин вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності не виявлено. Саме тому хімічний склад високоміцного чавуну з кулястим графітом, визначений у цьому стандарті, слід розглядати як орієнтовний, рекомендований.

Список літератури

- 1 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.
- 2 Бубликов В.Б., Бачинский Ю.Д. Высокопрочный чугун: прогресс технологий, повышение свойств. *Металл и литье Украины*. 2018. № 7–8. С. 7–12.
- 3 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>
- 4 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Прогнозування механічних властивостей сірого чавуну (ймовірнісний підхід). *Металознавство та обробка металів*. 2023. №3. С. 19–30. <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.019>
- 5 Семесенко М.П., Пелых С.Г. ЭВМ в управлении литейными процессами. Донецк, «Донбасс». 1975. 95 с.
- 6 Пелых С.Г., Семесенко М.П. Оптимизация литейных процессов. Киев, «Вища школа». 1977. 192 с.
- 7 Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. М.: Машиностроение. 1984. 432 с.
- 8 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>
- 9 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*. Т. 31. 2023. № 2 (333). С. 42–50. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.042>
- 10 Шумихин В.С., Лузан П.П., Жельнис М.В. Синтетический чугун. К.: Наукова думка. 1971. 159 с.
- 11 Неижко И.Г., Найдек В.Л., Гаврилюк В.П. Тормозные колодки железнодорожного транспорта: монография. Киев: ФТИМС НАН Украины, 2009. 121 с.

Надійшла 20.08.2024

References

- 1 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. M.: Mashinostroenie. 222 p. [in Russian].
- 2 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. 7–12. [in Russian].
- 3 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].
- 4 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2023). Prediction of mechanical properties of grey cast iron (probabilistic approach). *Metal Science and Treatment of Metals*, no 3, pp. 19–30. <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.019> [in Ukrainian].
- 5 Semesenko, M.P., Pelykh, S.G. (1975). Computer in foundry processes control. Donetsk, «Donbass». 95 p. [in Russian].
- 6 Pelykh, S.G., Semesenko, M.P. (1977). Optimisation of foundry processes. Kiev, «Vishcha Shkola». 192 p. [in Russian].
- 7 Vozdvizhenskiy, V.M., Grachev, V.A., Spasskiy, V.V. (1984). Foundry alloys and technology of their melting in mechanical engineering. M.: Mashinostroenie. 432 p. [in Russian].

- 8 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2024). Assessment of thermal conductivity of grey cast iron castings with lamellar graphite. Casting processes, no. 2 (156), 56–64. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.056> [in Ukrainian].
- 9 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 (333), 42–50. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.042> [in Ukrainian].
- 10 Shumikhin, V.S., Luzan, P.P., Zhelnis, M.V. (1971). Synthetic cast iron. K.: Naukova Dumka. 159 c. [in Russian].
- 11 Neizhko, I.G., Naidek, V.L., Havrilyuk, V.P. (2009). Brake pads of railway transport. Monograph. Kyiv: PTIMA NAS of Ukraine, 121 p. [in Russian].

Received 20.08.2024

K.A. Sirenko*, Junior Researcher; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com;
ORCID 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; ORCID 0000-0001-8970-5389

D.O. Derecha**, PhD (Phys. & Math), Senior Research Scientist, Head of the Lab.²
e-mail: dderecha@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2442-3759>

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

**Institute of Magnetism NAS of Ukraine and MES of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

ASSESSMENT OF CHEMICAL COMPOSITION AND PROPERTIES OF CAST IRON WITH NODULAR GRAPHITE FOR CASTINGS (PROBABILISTIC APPROACH)

High-strength cast iron with nodular graphite is a material whose application is constantly increasing in mechanical engineering and other industries. The chemical composition and mechanical properties of castings made of high-strength nodular cast iron of different grades, which are produced in accordance with the requirements of DSTU 3925-99, are analysed. The methodology for calculating the carbon equivalent and the degree of eutecticity of cast iron using the probabilistic approach and the Monte Carlo method has been refined. It is shown that the nature of the distribution of chemical element content values in their ranges does not affect the average values of carbon equivalent and eutecticity of high-strength cast iron with nodular graphite. Based on the data on the recommended chemical composition of high-strength cast iron with nodular graphite of various grades, presented in DSTU 3925-99, the values of carbon equivalent and degree of eutecticity were calculated using the Monte Carlo method, assuming that the distributions of the values of the content of chemical elements in accordance with their ranges defined by the standard in the composition of cast iron are subject to a normal Gaussian law or uniform distribution. It has been established that the values of carbon equivalent and degree of eutecticity of the chemical composition of high-strength cast iron with nodular graphite recommended in DSTU 3925-99 vary little in cast irons of different grades. The carbon equivalent ranges from a minimum value of 3.2986% to a maximum of 4.5756%. The degree of eutecticity ranges from 0.7480 to 1.1040. The distribution law of the chemical element content in cast iron (normal or uniform) has almost no effect on the average values of these indicators. The mean square deviations are approximately three times smaller in the case of using a uniform distribution of chemical element content values in their ranges in the cast iron composition. The dependence of strength and hardness of high-strength cast iron with nodular graphite on the carbon equivalent and the degree of eutecticity, calculated according to the chemical composition of such cast iron recommended by DSTU 3925-99, does not appear.

Keywords: nodular cast iron, casting, chemical composition, carbon equivalent, degree of eutecticity, mechanical properties.