
ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407//plit2024.04.036>

УДК 621.74.04:669.131.7

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

В.Л. Мазур*, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., гол. наук. спів-
роб.; e-mail: prof.vlm@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-8970-538>

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

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

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

УЗАГАЛЬНЕНІ ПОКАЗНИКИ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУНУ З ВЕРМИКУЛЯРНИМ ГРАФІТОМ

Розглянуто сучасний стан теорії і технології виробництва виливків із чавуну з вермикулярним графітом. Виконано порівняльний аналіз хімічного складу і властивостей чавунів різного типу й призначення. Узагальнено результати досліджень у сфері технології виготовлення чавунів із вермикулярним графітом. Із використанням імовірнісного підходу та застосуванням методу Монте-Карло розраховано величини вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності чавуну з вермикулярним графітом різних марок. Показано закономірності зміни міцності, твердості, відносного видовження, теплопровідності виливків із чавуну з вермикулярним графітом від його вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності. Міцність і твердість чавуну з вермикулярним графітом збільшуються при зниженні його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності. Відносне видовження і теплопровідність зменшуються. З підвищенням твердості HB і тимчасового опору під час розтягання чавуну з вермикулярним графітом його теплопровідність зменшується. Підвищення температури чавуну з вермикулярним графітом від 20 °С до 500 °С знижує коефіцієнт його теплопровідності на ~ 20 %. Встановлено регресійні залежності і коефіцієнти кореляції цих властивостей чавуну з вермикулярним графітом від величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності. Коефіцієнт кореляції між ступенем евтектичності і вуглецевим еквівалентом близький до одиниці. Між твердістю HB, тимчасовим опором під час розтягання і ступенем евтектичності та вуглецевим еквівалентом дорівнює 0,91–0,95. За даними опублікованих результатів досліджень об'єм усадкових раковин у виливках із чавуну з вермикулярним графітом в ~ 2 рази менший, ніж у виливках із чавуну з кулястим графітом. Запропоновано пояснення виявленим закономірностям, а також рекомендації щодо сфер застосування виливків із чавуну з вермикулярним графітом. Виливки із чавуну з вермикулярним графітом мають перспективи розширення використання при виготовленні виробів для експлуатації в умовах високих навантажень і постійних суттєвих тепловмінах.

Ключові слова: чавун, хімічний склад, вермикулярний графіт, вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності, механічні властивості, виливки.

За даними досліджень, виконаних у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України, інших наукових установах, за результатами виробничої практики ливарних заводів, машинобудівних і металургійних підприємств, на підставі узагальнення й аналізу закордонного досвіду слід зазначити, що виробництво виливків із чавуну з вермикулярним графітом (ЧВГ), як і високоміцного чавуну з кулястим графітом має значні перспективи розвитку [1–4 та ін.]. У монографії [1] наведено інформацію щодо переваг чавуну з вермикулярним графітом у деяких сферах застосування порівняно з високоміцним чавуном із кулястим графітом. Підкреслимо, що чавун цього типу дешевше ковкого й чавуну з кулястим графітом на ~ 20–25 %.

Застосуванням у назві чавуну терміна «вермикулярний» підкреслено, що графіт у площині шліфа має червоподібну форму. Вважається, що вермикулярна форма графіту є проміжною, перехідною формою графіту між пластинчастою згідно з ДСТУ 8833:2019 і кулястою згідно з ДСТУ 3925-99 формами. Марки чавуну для виливків, який має в структурі графіт вермикулярної форми (ВГ) з кількістю кулястого графіту не більше 40 %, представлені, зокрема, у ГОСТі 28394-89 і визначаються на основі його механічних властивостей. Цей стандарт доволі опрацьований із технічної точки зору. При аналізі властивостей чавуну з вермикулярним графітом як додаткове джерело розглянемо інформацію, наведену в цьому стандарті. Дію ДСТУ 3926-99 «Чавун з вермикулярним графітом для виливків. Марки» скасовано 01.01.2024.

Відповідно до загальноприйнятої практики, марки чавуну з вермикулярним графітом будемо визначати так: буква Ч — чавун; букви ВГ — форма графіту (вермикулярний графіт); далі цифрами позначено мінімальне значення тимчасового опору в МПа під час розтягання (розтягування). Для виготовлення виливків використовують чавуни марок: ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40, ЧВГ45.

У цій статті, як і в попередніх публікаціях [4–5 та ін.], представлені результати порівняльної оцінки розподілів величин вмісту хімічних елементів у складі чавунів із графітом різного типу (пластинчастого, кулястого, вермикулярного) та механічних властивостей виливків із них, виконаної у ймовірнісному підході із застосуванням методу Монте-Карло. При визначенні розподілів величин вмісту хімічних елементів у складі чавунів вважали, що розподіли елементів у діапазонах, регламентованих у стандартах, підпорядковані нормальному закону Гаусса. Для посилення змістовності інформації щодо теми, яка досліджується, проаналізовано в імовірнісному підході також узагальнені показники хімічного складу чавунів із вермикулярним графітом, а саме величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$.

Величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ розраховували за формулами (1) і (2), наведеними в монографіях [6–7]:

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

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

Масові частки елементів у хімічному складі чавунів із вермикулярним графітом, які є аргументами в цих формулах, представлені у табл. 1. Зазначимо, що формули (1) і (2) не враховують впливу наявності в чавунах із вермикулярним графітом хрому, міді, магнію, рідкоземельних елементів (РЗМ), а також можливого легування чавуну марки ЧВГ45 (0,8...1,2) % нікелю і (0,2...0,4) % молібдену.

У нашій статті [8] зазначено, що для розрахунку вуглецевого еквівалента в ГОСТ 27772-88 «Прокат для строительных конструкций» представлена формула (3), яка включає 8 хімічних елементів, але не враховує вплив на величину $C_{\text{екв}}$ вмісту сірки у складі сталей для будівництва:

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{V}}{14} + \frac{\text{P}}{2} \quad (3)$$

де С, Мп, Si, Cr, Ni, Cu, V, Р — масові частки вуглецю, марганцю, кремнію, хрому, нікелю, міді, ванадію і фосфору, %.

Формула (3), порівняно з формулою (1), враховує вплив на вуглецевий еквівалент $C_{\text{екв}}$ хрому, нікелю, сірки, що для оцінки властивостей сталі важливо.

При оцінці зварюваності легованих сталей вуглецевий еквівалент розраховують за формулою (4):

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{10}.$$
 (4)

Формула (4) враховує вплив на $C_{\text{екв}}$ вмісту хрому, міді, молібдену, ванадію та нікелю в чавуні, але не враховує впливу вмісту фосфору, сірки й кремнію на $C_{\text{екв}}$. Водночас відомо, що кремній, фосфор і сірка у складі чавуну є найвпливовішими елементами, які визначають його властивості. Згідно з формулами (3) і (4), усі легуючі метал елементи

в його хімічному складі збільшують величину вуглецевого еквівалента. Оскільки кожна відома формула для розрахунку $C_{\text{екв}}$ розроблена відносно оцінки певних властивостей конкретної металопродукції, то, відповідно, при оцінці чавунів будемо користуватися формулами (1) і (2), призначеними для розрахунків $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ саме чавунних виливків [1–3, 6–7 та ін.].

У табл. 1 вказані тільки граничні (не більше) величини вмісту Р, S, Cr у складі чавуну. Можливі діапазони масових часток фосфору, сірки, хрому не визначені. Тому при розрахунках вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності чавуну за формулами (1)–(2) із застосуванням ймовірнісного підходу й методу Монте-Карло [9] приймали орієнтовно такі мінімальні частки і діапазони вмісту названих елементів, %: Р = 0,05...0,08 для чавунів марок ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40 і Р = 0,03...0,05 у ЧВГ45; мінімально можливий вміст Cr у його діапазонах дорівнював Cr = 0,05; діапазон вмісту сірки S = 0,005...0,025.

У технічній літературі, присвяченій теорії й технології процесів виробництва виливків із чавунів, у тому числі з кулястим графітом і вермикулярним графітом [2, с. 157 та ін.], підкреслено, що хімічний склад чавуну з кулястим графітом є одним з основних факторів, який визначає його фізико-механічні та експлуатаційні властивості. Зазна-

Таблиця 1
Хімічний склад і механічні властивості чавуну з вермикулярним графітом для виливків відповідно до ГОСТ 28394-89

Марка чавуну	Масова частка елементів, %								σ _в , МПа	δ, %	Твердість HB
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu				
								не більше			
ЧВГ30	3,5–3,8	2,2–3,0	0,2–0,6	0,08	0,025	0,15	–	300	3,0	130–180	
ЧВГ35	3,5–3,8	2,2–3,0	0,2–0,6	0,08	0,025	0,15	–	350	2,0	140–190	
ЧВГ40	3,1–3,5	2,0–2,5	0,4–1,0	0,08	0,025	0,20	0,4–0,6	400	1,5	170–220	
ЧВГ45	3,1–3,5	2,0–2,5	0,8–1,2	0,05	0,025	0,30	0,8–1,0	450	0,8	190–250	

Примітка: Відносне видовження і твердість за Брінеллем НВ визначають при наявності спеціальних вимог у нормативно-технічній документації. За вимогою споживача продукції допускається встановлювати інші значення твердості. Хімічний склад чавуну з вермикулярним графітом передбачає $\frac{Mn}{\Sigma P3M}$ наявність у таких масових частках, %: для ЧВГ30 $\frac{0,015-0,028}{0,10-0,20}$; для чавунів інших марок $\frac{0,02-0,028}{0,10-0,20}$. Цифри в чисельнику відповідають вмісту залишкового магнію в чавуні, у знаменнику — залишковому вмісту суми рідкоземельних елементів (РЗМ).

чене повною мірою стосується й виливків із чавуну з вермикулярним графітом. Якщо залежності механічних властивостей чавуну з кулястим графітом і хімічним складом згідно з ДСТУ 3925-99 від вуглецевого еквівалента $C_{\text{ЕКВ}}$ й ступеня евтектичності $S_{\text{ЕВТ}}$ чітко не виявлено застосованим у роботі [9] ймовірнісним методом розрахунку, то, як показано далі, залежності тимчасового опору під час розтягання (розтягування) σ_B , твердості HB, відносного видовження δ виливків із чавуну з вермикулярним графітом простежуються.

Огляд даних табл. 1 показує, що вміст вуглецю і кремнію зменшується у чавунах ЧВГ40 і ЧВГ45, порівняно з ЧВГ30 і ЧВГ35. При цьому міцність σ_B і твердість HB чавуну збільшується, а відносне видовження δ , % зменшується. Для підвищення міцності чавуну з вермикулярним графітом збільшують вміст хрому й марганцю. У хімічному складі чавунів ЧВГ40 і ЧВГ45 передбачена наявність міді. У табл. 1 зафіксована можливість отримання графіту вермикулярної форми при масовій частці сірки у складі чавуну не більше 0,025 %, що збігається з позицією авторів монографії [2, с. 191], але при цьому зростають витрати РЗМ на виробництво чавуну. У цілому можна вважати, що зазначений у табл. 1 хімічний склад чавуну з вермикулярним графітом при оптимальній технології виробництва забезпечує необхідні фізико-механічні властивості виливків.

Результати розрахунків, наведені у табл. 2, засвідчили таке. Мінімальні, максимальні та середні величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{ЕКВ}}$ й ступеня евтектичності $S_{\text{ЕВТ}}$ зменшуються при переході від ЧВГ30 до ЧВГ45. Величини $C_{\text{ЕКВ}}$ і $S_{\text{ЕВТ}}$ між собою тісно пов'язані. Коефіцієнт кореляції близький до одиниці. Привертає увагу той факт, що чавуни зазначених марок нібито попарно споріднені: ЧВГ30 з ЧВГ35, а ЧВГ40 з ЧВГ45. Чавуни першої пари мають більш високі величини $C_{\text{ЕКВ}}$ і $S_{\text{ЕВТ}}$ (рис. 1). Відзначимо, що діапазони можливих величин ступеня евтектичності чавунів ЧВГ30 і ЧВГ35 перевищують одиницю, а ЧВГ40 і ЧВГ45 мають значення $S_{\text{ЕВТ}}$ менші за одиницю. Твердість HB і тимчасовий опір під час розтягання чавунів із вермикулярним графітом із підвищенням вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності зменшуються (рис. 1).

Таблиця 2

Величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{ЕКВ}}$, % і ступеня евтектичності $S_{\text{ЕВТ}}$ чавунів із вермикулярним графітом для виливків, розраховані у ймовірнісному аспекті за даними хімічного складу чавунів, наведеними у табл. 1

Марки чавуну	Мінімальні, максимальні, середні значення і середньоквадратичні відхилення показників	
	$C_{\text{ЕКВ}}$, %	$S_{\text{ЕВТ}}$
ЧВГ30	4,218; 4,591; 4,012; 0,0432	1,004; 1,113; 1,056; 0,0126
ЧВГ35	4,207; 4,575; 4,371; 0,0395	1,002; 1,106; 1,047; 0,0113
ЧВГ40	3,675; 4,105; 3,901; 0,0487	0,869; 0,979; 0,925; 0,0132
ЧВГ45	3,655; 4,095; 3,856; 0,0479	0,868; 0,988; 0,922; 0,0132

Примітка. У розрахунках методом Монте-Карло ймовірних значень кожного показника чавунів усіх марок використовували по 1000 000 випадково вибраних комбінацій вмісту хімічних елементів у складі чавунів.

Далі необхідно відзначити, що саме чавунів із вермикулярним графітом указаних марок стосується наведений вище висновок із монографії [2, с. 157] про те, що хімічний склад чавуну визначає його властивості (тимчасовий опір під час розтягання σ_B , твердість HB, відносне видовження δ тощо). До такого висновку доречно додати, що показники $C_{\text{ЕКВ}}$ і $S_{\text{ЕВТ}}$ хімічного складу чавуну з вермикулярним графітом повніше характеризують його властивості, ніж вміст окремих хімічних елементів.

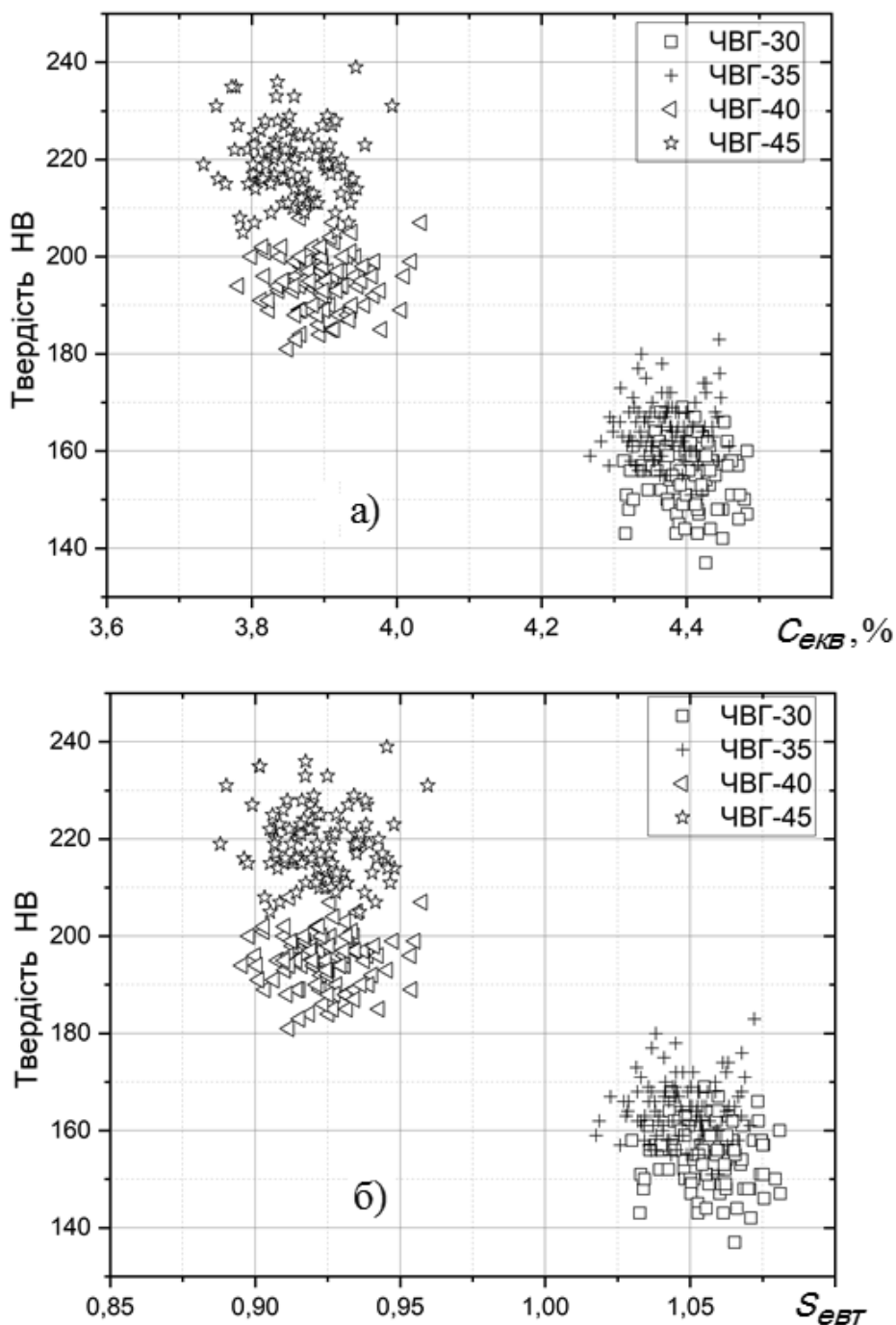


Рис. 1. Залежності твердості НВ чавунів із вермикулярним графітом від його вуглецевого еквівалента $C_{екв}$, % (а) і ступеня евтектичності $S_{евт}$, % (б). Наведені на рисунку позначки відображають ймовірні величини $C_{екв}$, $S_{евт}$ і твердості, розраховані методом Монте-Карло за даними табл. 1

Також підкреслимо, що величини $C_{екв}$ і $S_{евт}$ окремих марок чавунів із вермикулярним графітом близькі до величин цих показників чавунів із кулястим графітом [9].

Вплив вуглецевого еквівалента на формування металевої основи чавуну з вермикулярним графітом розглянуто в працях [10–12 та ін.]. Показано, що у чавуну з

вермикулярним графітом евтектичного та заевтектичного складу $C_{\text{ЕКВ}} = (4,3...4,6) \%$ формується переважно феритна основа (70 % і більше фериту). Таку структуру мають чавуни феритного класу ЧВГ30 і ЧВГ35. Розраховані за даними хімічного складу, наведеними у табл. 1, величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{ЕКВ}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{ЕВТ}}$ чавунів марок ЧВГ40 і ЧВГ45 перебувають у діапазонах: $C_{\text{ЕКВ}} (3,70...4,05)\%$; $S_{\text{ЕВТ}} 0,89...0,96$. Доевтектичні чавуни, вуглецевий еквівалент хімічного складу яких дорівнює $C_{\text{ЕКВ}} = (3,75...3,90) \%$, мають зазвичай неоднорідну структуру з феритом, перлітом і цементитом. За інформацією публікацій, зниження вмісту кремнію у складі чавуну чи легування міддю сприяють отриманню перліту в матриці його структури в обсязі до 80 %. Зазначимо також, що вермикулярний графіт утворюється і в чавуні з кулястим графітом при виготовленні великих виливків при величині вуглецевого еквівалента понад 4 % [2, с. 167].

Коефіцієнт теплопровідності чавуну з вермикулярним графітом збільшується при підвищенні вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності. Коефіцієнти кореляції цих залежностей близькі до одиниці. З підвищенням твердості HB і тимчасового опору під час розтягання чавуну з вермикулярним графітом коефіцієнт його теплопровідності зменшується від $10^2 \cdot \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$: (0,49...0,5) для ЧВГ30 до (0,37...0,41) для ЧВГ45. Як доповнення до зазначеного вище, а також до матеріалів, представлених у наших статтях [4–5, 8–9], підкреслимо, що навіть при однакових величинах вуглецевого еквівалента чавунів різного типу, а саме, %, $C_{\text{ЕКВ}} = 4,53$ чавуну з пластинчастим графітом ЧПГ; $C_{\text{ЕКВ}} = 4,51$ чавуну з вермикулярним графітом ЧВГ; $C_{\text{ЕКВ}} = 4,51$ чавуну з кулястим графітом ЧШГ; їхні фізичні властивості, зокрема електро- і теплопровідність, суттєво відрізняються. Так, за даними, наведеними у табл. 4.33 монографії [2, с. 189], коефіцієнти теплопровідності чавунів становлять: $\lambda \cdot 10^2 \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$: 0,56 ЧПГ; 0,48 ЧВГ; 0,30 ЧШГ.

Підвищення температури знижує теплопровідність чавунів із різною формою графіту (пластинчастою, вермикулярною, кулястою). Зокрема підвищення температури чавуну з вермикулярним графітом від 20 °С до 500 °С знижує коефіцієнт його теплопровідності $\delta \cdot 10^2 \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ від 0,46 до 0,37. Для чавуну з кулястим графітом коефіцієнт теплопровідності, $\lambda \cdot 10^2 \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, у таких умовах зменшується приблизно від 0,33 до 0,25 [2, с. 203]. Тобто теплопровідність чавуну з кулястим графітом знижується до величини, яка нерідко стає неприйнятною для виготовлення виробів, що експлуатуються у жорстких температурних режимах. Певна різниця у наведених у літературі й довідниках величинах коефіцієнта теплопровідності пов'язана з можливою нестабільністю досліджених виливків із чавуну. Акцентується, що теплопровідність, $\lambda \cdot 10^2 \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, ЧВГ близька до її показника ЧПГ ($\lambda = (0,53...0,65)$). Тобто форми графіту в структурі чавунів суттєво впливає на його теплопровідність.

У роботі [2, с. 202–203] зазначено також, що об'єм усадкової раковини у виливках із чавуну з вермикулярним графітом майже у 2 рази менше, ніж у виливках із чавуну з кулястим графітом. При цьому в разі підвищення вуглецевого еквівалента чавуну в діапазоні величин $C_{\text{ЕКВ}} = (3,95...4,40) \%$ об'єм усадкової раковини зменшується від (2...4) % до (1...2,5) %. На підставі сказаного потрібно погодитися з авторами цієї монографії, що поєднання високих механічних властивостей і теплопровідності чавуну з вермикулярним графітом свідчить про перспективність виробництва з нього литва відповідального призначення. В умовах високих циклічних температур експлуатації ливарних виробів застосування для їх виготовлення чавуну з вермикулярним графітом може мати переваги навіть порівняно з високоміцним чавуном із кулястим графітом.

Висновки

Із застосуванням імовірнісного підходу й методу Монте-Карло розраховано величини вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності чавунів із вермикулярним графітом. Показано залежність властивостей таких чавунів від зазначених узагальнених показників їх хімічного складу. Результати розрахунків і наведений аналіз засвідчили, що чавун із вермикулярним графітом має перспективи розширення застосування при виготовленні литвом виробів, призначених для експлуатації в умовах високих навантажень, та постійних теплосмінах.

Список літератури

- 1 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.
- 2 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. Москва: Машиностроение. 1982. 222 с.
- 3 Неижко И.Г. Термическая обработка чугуна. Киев: Наук. думка. 1992. 208 с.
- 4 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 (333). С. 42–50. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.042>
- 5 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>
- 6 Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. Москва: Машиностроение. 1984. 432 с.
- 7 Гиршович Н.Г. Справочник по чугунному литью. Ленинград: Машиностроение. 1978. 758 с.
- 8 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Визначення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну в ливарному виробництві. *Процеси лиття*. 2023. № 1 (151). С. 20–34. <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.020>.
- 9 Сіренко К.А., Мазур В.Л., Дереча Д.О. Оцінка хімічного складу і властивостей чавуну з кулястим графітом для виливків (ймовірнісний підхід). *Процеси лиття*. 2024. № 3 (157). С. 36–45.
- 10 Андреев В.В. Чугун с вермикулярным графитом и перспективы его применения. Труды ЦНИИТМАШ. М., 1977. № 139. С. 159–165.
- 11 Александров Н.Н., Андреев В.В., Ильичева Л.В., Мильман Б.С. Чугун с вермикулярным графитом. *Справочник по чугунному литью*. Л: Машиностроение. 1978. С. 79–81.
- 12 Андреев В.В. Высокопрочный чугун с вермикулярным графитом. *Машиностроение. Энциклопедия. Том. II-2. Стали и чугуны*. Гл. 3.4. М: Машиностроение. 2001. С. 583–601.

Надійшла 02.10.2024

References

- 1 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: Nauk. dumka. 248 p. [in Russian].
- 2 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].
- 3 Neizhko, I.G. (1992). Heat treatment of cast iron. Kiev: Naukova dumka. 208 p. [in Russian].
- 4 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].
- 5 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].

- 6 Vozdvizhenskiy, V.M., Grachev, V.A., Spasskiy, V.V. (1984). Foundry alloys and technology of their melting in mechanical engineering. Moskva: Mashinostroenie. 432 p. [in Russian].
- 7 Girshovich, N.G. Reference book on cast iron casting. Leningrad: Mashinostroenie. 1978. 758 p. [in Russian].
- 8 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2023). Definition of carbon equivalent and degree of eutecticity of cast iron in foundry production. *Casting processes*, no. 1 (151), pp. 20–34. <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.020> [in Ukrainian].
- 9 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. <https://doi.org/10.15407/plit2024.03.036> [in Ukrainian].
- 10 Andreev V.V. Cast iron with vermicular graphite and prospects of its application. *Works of TSNITMASH*. M., 1977, no. 139, pp. 159–165 [in Russian].
- 11 Aleksandrov N.N., Andreev V.V., Ilyicheva L.V., Milman B.S. Cast Iron with Vermicular Graphite. *Reference book on cast iron*. Leningrad: Mashinostroenie. 1978, pp. 79–81 [in Russian].
- 12 Andreev V.V. High-strength cast iron with vermicular graphite. *Mechanical engineering. Encyclopaedia. Vol. II-2. Steels and cast irons. Chap. 3.4*. Moskva: Mashinostroenie. 2001, pp. 583–601 [in Russian].

Received 02.10.2024

K.A. Sirenko*, Junior Researcher; 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 NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

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

GENERALIZED INDICATORS OF CHEMICAL COMPOSITION AND PROPERTIES OF CAST IRON WITH VERMICULAR GRAPHITE

The current state of the theory and technology of production of castings from cast iron with vermicular graphite is considered. A comparative analysis of the chemical composition and properties of cast irons of various types and purposes is carried out. The results of research in the field of technology of manufacturing cast iron with vermicular graphite are summarised. Using the probabilistic approach and the Monte Carlo method, the values of the carbon equivalent and the degree of eutecticity of cast iron with vermicular graphite of various grades were calculated. The regularities of changes in strength, hardness, relative elongation, and thermal conductivity of castings made of vermicular graphite iron with its carbon equivalent and degree of eutecticity are shown. The strength and hardness of cast iron with vermicular graphite increase with a decrease in its carbon equivalent and degree of eutecticity. Relative elongation and thermal conductivity decrease. Regression dependences and correlation coefficients of these properties of cast iron with vermicular graphite on the values of carbon equivalent and degree of eutecticity were established. The correlation coefficient between the degree of eutecticity and carbon equivalent is close to one. The correlation between the hardness of the HB, the temporary tensile strength and the degree of eutecticity and carbon equivalent is 0.91–0.95. An explanation of the revealed regularities is given, as well as recommendations for the areas of application of cast iron castings with vermicular graphite.

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