
ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2026.01.043>

УДК 669.131.6:620.17:519.876

К.А. Сіренко, канд. техн. наук, заст. зав. відділу;

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>

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

ШЛЯХИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРЯМОЇ І ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧ «ХІМІЧНИЙ СКЛАД–ВЛАСТИВОСТІ» ЧАВУННОГО ЛИТВА

Показано актуальність і техніко-економічну ефективність впровадження у ливарному виробництві практики прогнозування механічних властивостей чавуну за даними його хімічного складу, визначеного в процесі виплавлення. Проаналізовано відомі підходи до розв'язання класичної в теорії ливарного виробництва задачі «хімічний склад–властивості» чавуну. Продемонстровано особливості розв'язання прямої задачі, а саме в постановці, коли механічні властивості чавуну (границя міцності, твердість та ін.) розглядаються залежно від відсоткового вмісту хімічних елементів у його складі. Та оберненої задачі, коли в протилежному підході, варіанти предметом пошуку є хімічний склад чавуну залежно від наперед заданих його механічних або фізичних властивостей чи експлуатаційних характеристик. Проаналізовано представлені в науковій літературі рівняння та емпіричні формули, які відображають зв'язок міцності, твердості сірого чавуну зі ступенем евтектичності та вуглецевим еквівалентом його хімічного складу. Ці показники значною мірою узагальнюють і характеризують хімічний склад чавуну. Недоліки відомих формул полягають у невизначеності методик, які були використані при розрахунках величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну під час розроблення формул. Показано, що надійність і достовірність мають методики, які передбачають визначення величин вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності у ймовірнісному підході із застосуванням методу Монте-Карло. Розв'язання оберненої задачі, а саме розрахунку необхідного вмісту хімічних елементів у складі чавуну для забезпечення його заданих властивостей, становить більші труднощі, порівняно з розв'язанням прямої задачі «хімічний склад–властивості» чавуну. На прикладі сірого чавуну з пластинчастим графітом показано можливі шляхи розв'язання прямої і оберненої задач.

Ключові слова: ливарне виробництво, чавун, хімічний склад, вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності, механічні властивості.

Актуальним напрямом розвитку теорії і технології ливарного виробництва є розробка та застосування у промисловій практиці прогнозування фізико-механічних властивостей синтетичного чавуну за результатами контролю його хімічного складу безпосередньо в процесі виплавлення. Зазначений напрям у технології виго-

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

товлення чавунного литва нині перебуває в стадії активного опрацювання з боку науковців і фахівців ливарних підприємств. Доведення цих розробок до реалізації в промислових масштабах обіцяє отримання вагомого техніко-економічного ефекту.

У монографіях, довідниках, підручниках, статтях [1–9 та ін.] значну увагу приділено питанням залежності міцності, твердості, інших властивостей чавунного литва від хімічного складу чавуну. Приклади рівнянь, запропонованих для розв'язання зазначеної задачі, наведено в довіднику Н.Г. Гіршовича [3], монографіях [4–6] тощо. Головна риса відомих підходів у цій темі полягає в застосуванні у рівняннях «хімічний склад–властивості» чавуну узагальнених показників його хімічного складу, а саме вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ та ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$. Особливість відомих емпіричних формул, призначених для розрахунку міцності і твердості чавуну [3, 9 та ін.] полягає в тому, що параметри властивостей представлені в них у вигляді функцій відсоткового вмісту хімічних елементів у складі чавуну та узагальнених показників його хімічного складу, а саме вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$. Саме такий підхід застосовано при розв'язанні прямої задачі «хімічний склад–властивості» чавуну [7–10].

Позитивно оцінюючи в цілому відомі формули, які запропоновані для розрахунків залежності механічних властивостей чавуну від вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності його хімічного складу, зауважимо, що в них, на жаль, не враховано ймовірнісний характер формування $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$. У відомих рішеннях не регламентовано також методику застосування їх, як аргументів у формулах для прогнозування імовірних величин міцності σ_B , твердості H_B , коефіцієнта теплопровідності λ тощо чавуну [7–8]. При тому що цей аспект розглядуваної прямої задачі має вирішальне значення для забезпечення достовірності її розв'язання.

Не менш важливою і актуальною темою для машинобудівників, металургів, ливарників є розв'язання оберненої задачі у цій науково-технічній сфері. Її актуальність була очевидною й для вчених попередніх поколінь. Так, у знаній монографії В.С. Шуміхіна підкреслено [1, с. 149], що кількісні залежності міцності модифікованого чавуну від ступеня евтектичності та величини відношення вмісту кремнію до вмісту вуглецю можна застосовувати і для розрахунку потрібного хімічного складу чавуну відповідно до заданої його міцності. Тобто для розв'язання названої оберненої задачі.

У наших статтях [7–10 та ін.] використано ймовірнісний підхід і метод Монте-Карло при розв'язанні прямої задачі «хімічний склад–властивості», а саме при прогнозуванні міцності, твердості, теплопровідності виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом залежно від ступеня евтектичності та вуглецевого еквівалента його хімічного складу, а також відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію. Окремо підкреслимо, що в статтях [9–10] результати дослідження із застосуванням ймовірнісного підходу залежності властивостей чавуну від $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ викладені, схоже, вперше. Нинішня робота продовжує дослідження, які виконуються в цьому напрямі у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України (раніше — Інститут проблем лиття АН УССР), розвивають тематику, започатковану ще у працях В.С. Шуміхіна та колег [1 та ін.].

Наведені нижче результати розв'язання оберненої задачі щодо чавуну з пластинчастим графітом виконані із застосуванням ймовірнісного підходу, методу Монте-Карло, вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення вмісту кремнію до вмісту вуглецю в хімічному складі чавуну тощо за методологією, викладеною у статтях [7–10 та ін.]. У табл. 1 показники хімічного складу, механічних властивостей, коефіцієнта теплопровідності чавунів із пластинчастим графітом представлені згідно з ДСТУ 8833:2019. Імовірні значення $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ з табл. 1. розраховані у ймовірнісному аспекті за формулами [3, с. 47]:

$$C_{\text{екв}} = C + 0,3 (Si + P); S_{\text{евт}} = C/[4,26 - 0,3 (Si + P)],$$

де C, Si, P — величини відсоткового вмісту вуглецю, кремнію, фосфору в хімічному складі чавуну.

Таблиця 1

Величини відсоткового вмісту елементів у хімічному складі, вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$, ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$, твердості НВ, коефіцієнта теплопровідності λ литва із чавунів з пластинчастим графітом відповідно до ДСТУ 8833:2019

Марка чавуну		СЧА400	СЧ350	СЧ300	СЧ250	СЧ200	СЧ150	СЧ100
Вміст елементів, %	C	$\frac{2,7...2,9}{2,8}$	$\frac{2,9...3,0}{2,95}$	$\frac{3,0...3,2}{3,1}$	$\frac{3,2...3,4}{3,3}$	$\frac{3,3...3,5}{3,4}$	$\frac{3,5...3,7}{3,6}$	$\frac{3,5...3,7}{3,6}$
	Si	$\frac{1,3...1,6}{1,45}$	$\frac{1,2...1,5}{1,35}$	$\frac{1,3...1,9}{1,6}$	$\frac{1,4...2,2}{1,8}$	$\frac{1,4...2,4}{1,9}$	$\frac{2,0...2,4}{2,2}$	$\frac{2,2...2,6}{2,4}$
	Mn	0,5...0,8	0,7...1,1	0,7...1,0			0,5...0,8	
Si/C		0,518	0,458	0,516	0,545	0,559	0,611	0,667
Твердість НВ, не більше ніж		$\frac{245}{285}$	$\frac{229}{270}$	$\frac{197}{250}$	$\frac{187}{238}$	$\frac{170}{216}$	$\frac{163}{201}$	$\frac{156}{185}$
Коефіцієнт теплопровідності, λ , за 20 °С, Вт/(м · К)		38	42	46	50	54	59	60
$\overline{C}_{\text{екв}}$, %		3,20	3,22	3,33	3,90	3,94	4,14	4,25
$\overline{S}_{\text{евт}}$, %		0,741	0,759	0,813	0,897	0,929	0,975	0,976

Примітка. Вміст фосфору складає (не більше, мас., %): 0,1 у СЧА400; 0,2 у СЧ150... СЧ350; 0,3 у СЧ100. Вміст сірки складає (не більше, мас., %): 0,1 у СЧА400; 0,12 у СЧ300 і СЧ350; 0,15 у СЧ100...СЧ250. У знаменнику показано середні значення діапазонів величин вмісту вуглецю і кремнію.

Позначено: $\overline{C}_{\text{екв}}$ і $\overline{S}_{\text{евт}}$ — середні величини вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавунів, розрахованих методом Монте-Карло. Кількість варіантів розрахунку кожного показника — 1000. У чисельнику — твердість НВ чавуну при товщині виливка не більше 50 мм, в знаменнику — не більше 30 мм.

Розраховані і представлені у табл. 1 величини $\overline{C}_{\text{екв}}$ і $\overline{S}_{\text{евт}}$ збігаються з результатами, наведеними у табл. 2 в статті [10], оскільки дослідження виконувалися з використанням одного матеріалу (чавуну з пластинчастим графітом і хімічним складом за ДСТУ 8833:2019), а також із застосуванням однакової методики визначення середніх величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну (ймовірнісного підходу). Акцентуємо увагу також, що при розрахунках $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ вважали, що розподіл вмісту кожного хімічного елемента в їх діапазонах відповідно до ДСТУ 8833:2019 підпорядковується закону Гаусса. Цифрова позначка у марці чавуну (табл. 1) вказує на величину мінімальної міцності σ_B , Н/мм² під час розтягування.

Навіть орієнтовний аналіз табл. 1 дозволяє зробити такі висновки. Міцність σ_B , Н/мм², при розтягуванні і твердість НВ чавунних виливків суттєво зменшуються при збільшенні вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Коефіцієнт теплопровідності λ чавуну прямо пропорційно залежить від $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$. Збільшення відсоткового вмісту вуглецю та кремнію в хімічному складі сірого чавуну з пластинчастим графітом відповідно до ДСТУ 8833:2019 супроводжується зменшенням його твердості й міцності. Зазначені висновки проілюстровано у статтях [7–9] графіками і формулами типу $\sigma_B = \varphi_1(S_{\text{евт}})$

$\sigma_B = \varphi_2(C_{\text{екв}})$; $HB = \varphi_3(S_{\text{евт}})$; $HB = \varphi_4(C_{\text{екв}})$ та залежностями σ_B , HB , $C_{\text{екв}}$, $S_{\text{евт}}$ чавуну від відношення C/Si в хімічному складі чавуну.

Емпіричні формули й графіки, які відображають залежності коефіцієнта теплопровідності виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом від його ступеня евтектичності, вуглецевого еквівалента й твердості, наведено у статті [8]. Усі залежності, формули, зазначені у статтях [7–10], можна розглядати як елементи розв’язання прямої задачі, вони призначені для використання у методиках неруйнівного контролю та прогнозування вказаних властивостей сірого чавуну з пластинчастим графітом і хімічним складом, рекомендованим у ДСТУ 8833:2019.

В авторитетних наукових виданнях [1–6 та ін.] підкреслено, що особливої уваги при розв’язанні задачі «хімічний склад–властивості» потребує залежність властивостей чавуну від співвідношення вмісту кремнію та вмісту вуглецю в його хімічному складі. Так, у довіднику Н.Г. Гиршовича вказано [3, с. 133], що на властивості синтетичного чавуну суттєво впливають вміст вуглецю і сірки, а також відношення вмісту C/Si. Зазначене підкреслюють рівняння:

$$\sigma_B = 96,5 - 70S_{\text{евт}} - 2,1C/\text{Si}, \text{ кгс/мм}^2.$$

Зауважимо, що залежності σ_B синтетичного чавуну з пластинчастим графітом від ступеня його евтектичності, представлені на рис. 1.79, с. 135 довідника [3], добре узгоджуються з даними у табл. 1, де величини $S_{\text{евт}}$ розраховані із застосуванням ймовірнісного підходу і методу Монте-Карло.

У монографії [1, с. 148–149] також акцентовано увагу, що при прогнозуванні механічних властивостей синтетичного чавуну, як параметра у розрахунках границі його міцності під час розтягування, зазвичай приймають ступінь евтектичності. Водночас підкреслено, що міцність не є функцією тільки ступеня евтектичності чавуну, а залежить також від співвідношення вмісту кремнію та вмісту вуглецю у його хімічному складі. Тому при розв’язанні прямої задачі «хімічний склад–властивості» чавуну, на думку авторів праці [1, с. 148], доцільно враховувати й співвідношення кремнію та вуглецю в межах одного ступеня евтектичності чавуну. За даними цих учених, при збільшенні відношення кремнію до вуглецю в межах одного ступеня евтектичності чавуну зростає ефективність його модифікування. Зауважимо, що в довіднику [3] і наших статтях [7–10] аргументом у рівняннях для розрахунку міцності, твердості, коефіцієнта теплопровідності чавуну зазначене вище співвідношення приймали у вигляді C/Si. У табл. 1 та подальших розрахунках це співвідношення представлене у вигляді Si/C, як у монографії [1].

Результати розрахунків, представлені в табл. 1, дозволяють додатково відзначити ось такі ефекти. По-перше, збільшення в середньому вмісту вуглецю від 2,8 до 3,6 мас. %, і вмісту кремнію в середньому від 1,45 до 2,4 мас. %, у чавуні з пластинчастим графітом призводить до збільшення вуглецевого еквівалента з 3,20 до 4,25 %, ступеня евтектичності — від 0,741 до 0,976, відношення Si/C — від 0,518 до 0,667. Водночас границя міцності σ_B чавуну зменшується з 400 до 100 Н/мм², твердість також суттєво зменшується, коефіцієнт теплопровідності збільшується у ~ 1,5 рази (рис. 1–3).

На рис. 1–3 показано залежності узагальнених показників хімічного складу чавуну з пластинчастим графітом, а саме $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$, Si/C, а також коефіцієнта теплопровідності λ чавуну від його механічних властивостей (міцності σ_B і твердості HB виливків). Зазначена на рисунках інформація — це, по суті, елементи розв’язання оберненої задачі «властивості–хімічний склад» чавуну, оскільки величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ та ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ чавуну опосередковано свідчать про вміст у чавуні вуглецю, кремнію, фосфору відповідно до наведених вище формул. Величина Si/C підкреслює рівень співвідношення вмісту кремнію і вуглецю для заданих в оберненій задачі величинах міцності й твердості чавуну.

Наведені та проілюстровані графіками на рис. 1–3 результати розв'язання оберненої задачі стосовно визначення показників хімічного складу чавуну, необхідного для отримання заданих властивостей виливків, представлені такими рівняннями:

$$\text{Si/C} = -0,0006 \sigma_B + 0,6956; \quad R^2 = 0,8059; \quad (1)$$

$$\text{Si/C} = -0,0017 \text{ HB}_{30} + 0,9494; \quad R^2 = 0,8066; \quad (2)$$

$$\text{Si/C} = -0,0017 \text{ HB}_{50} + 0,8747; \quad R^2 = 0,68; \quad (3)$$

$$C_{\text{екв}} = -0,004 \sigma_B + 4,7114; \quad R^2 = 0,9256; \quad (4)$$

$$S_{\text{евт}} = -0,0009 \sigma_B + 1,0938; \quad R^2 = 0,9555; \quad (5)$$

$$\lambda = 0,0771 \sigma_B + 69,143; \quad R^2 = 0,9898; \quad (6)$$

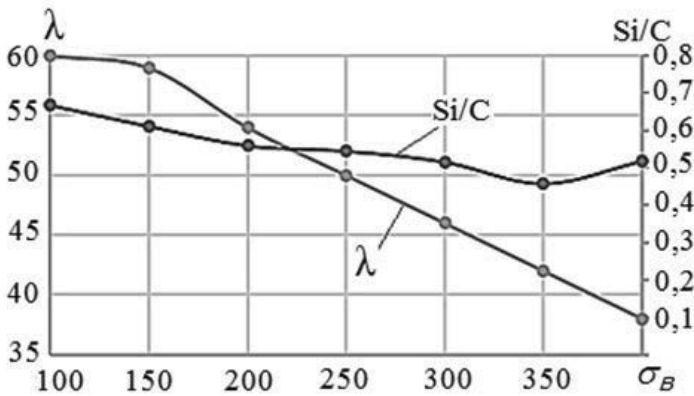


Рис. 1. Залежності коефіцієнта теплопровідності λ , за 20 °С, Вт/(м · К) та відношення Si/C вмісту кремнію до вмісту вуглецю в хімічному складі сірого чавуну з пластинчастим графітом від його границі міцності (не менше ніж) σ_B , Н/мм²

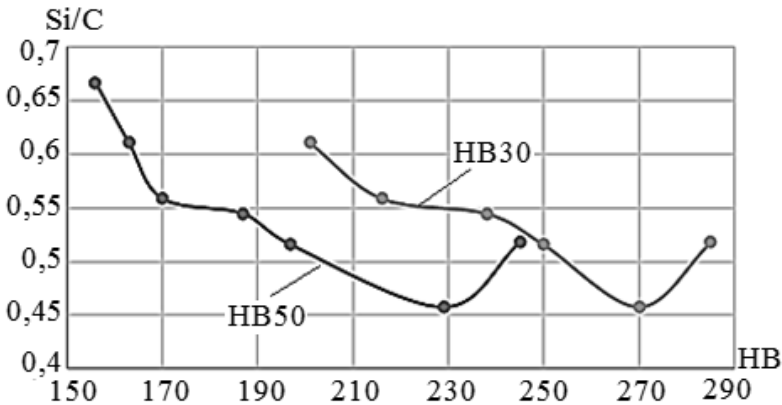


Рис. 2. Залежності відношення Si/C у хімічному складі чавуну з пластинчастим графітом від твердості HB (не більше ніж) виливків. Позначено HB30 при товщині виливків не більше 30 мм; HB50 — не більше 50 мм

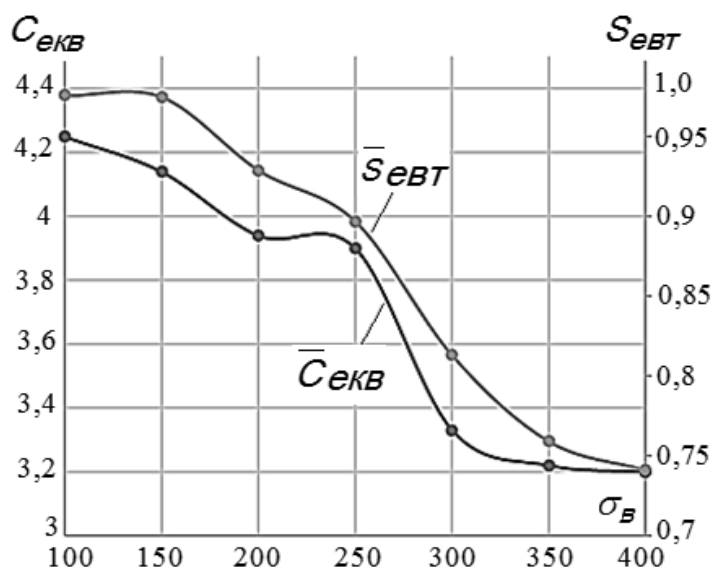


Рис. 3. Залежності вуглецевого еквівалента $\bar{C}_{екв}$, % і ступеня евтектичності $\bar{S}_{евт}$ хімічного складу сірого чавуну з пластинчастим графітом від його граничної міцності σ_B , (не менше ніж), Н/мм²

Зауважимо, що в наведених рівняннях і на рис. 1–3 величина граничної міцності чавуну σ_B при розтягуванні визначена в розмірності Н/мм². Твердість HB позначено HB50 при товщині стінки виливків 50 мм, HB30 — при товщині 30 мм. R — коефіцієнт кореляції. Величина вуглецевого еквівалента $C_{екв}$ чавуну представлена у відсотках; ступеня евтектичності $S_{евт}$ — безрозмірна. Величини $C_{екв}$ і $S_{евт}$, Si/C розраховані з використанням ймовірнісного підходу і методу Монте-Карло для чавуну з пластинчастим графітом і хімічним складом, рекомендованим ДСТУ 8833:2019 [7–10]. Наведена вище методологія (підхід, методика розрахунків, приклади тощо) розв’язання прямої та оберненої задач «хімічний склад–властивості» призначень не тільки для сірого чавуну з пластинчастим графітом, визначеного у ДСТУ 8833:2019, а також чавунів інших класів, марок. Можливо, і деяких марок сталі за умови наявності потрібних для розрахунків баз даних щодо узагальнених показників їх хімічного складу та властивостей.

Висновки

Встановлено основні залежності узагальнених показників хімічного складу (вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, співвідношення вмісту кремнію та вмісту вуглецю) сірого чавуну з пластинчастим графітом у функціях його міцності та твердості, які дозволяють підійти до розв’язання оберненої задачі «властивості–хімічний склад чавуну». При тому що розрахунки узагальнених показників хімічного складу чавуну визначені із застосуванням ймовірнісного підходу, методу Монте-Карло і бази даних щодо хімічного складу та властивостей виливків із чавунів, наявної у стандартах, зокрема в ДСТУ 8833:2019.

Список літератури

- 1 Шумихин В.С., Лузан П.П., Жельнис М.В. Синтетический чугу́н. Киев. Наукова думка. 1971. 159 с.
- 2 Коган Л.Б., Новик Ф.С., Виноградов Ю.Г. Свойства и способы получения синтетических чугунов. В сб. «Изучение свойств синтетических чугунов с использованием методов математической статистики» НИИМАШ. Москва, 1971. С. 3–40.
- 3 Справочник по чугунному литью. Под. ред. Н.Г. Гиршовича. Ленинград: Машиностроение. 1978. 758 с.
- 4 Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технологии их плавки в машиностроении. Москва: Машиностроение. 1984. 432 с.
- 5 Семесенко М.П., Пелых С.Г. ЭВМ в управлении литейными процессами. Донецк: Донбасс. 1975. 96 с.
- 6 Пелых С.Г., Семесенко М.П. Оптимизация литейных процессов. Киев: Вища школа. 1977. 192 с.
- 7 Сіренко К.А., Мазур В.Л., Дереча Д.О. Залежності 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>
- 8 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка теплопровідності виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом. *Процеси лиття*. 2024. № 21 (156). С. 3–11. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.056>
- 9 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка підходів до прогнозування властивостей синтетичного чавуну у ливарному виробництві. Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». 2023. № 2. С. 24–35. <https://doi.org/10.15407/mom2023.02.024>
- 10 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Прогнозування механічних властивостей сірого чавуну (ймовірнісний підхід). Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». 2023. № 3. С. 19–30. <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.019>

References

- 1 Shumikhin, V.S., Luzan, P.P., Zhelnis, M.V. (1971). Synthetic cast iron. Kiev. Naukova Dumka, 159 p. [in Russian].
- 2 Kogan, L.B., Novik, F.S., Vinogradov, Yu.G. (1971). Properties and methods of obtaining synthetic cast irons. In the collection «Study of the properties of synthetic cast irons using methods of mathematical statistics» NIIMASH. M., 3–40 [in Russian].
- 3 Reference book on cast iron casting. (1978). Edited by N.G. Girshovich. L.: Mashinostroenie, 758 p. [in Russian].
- 4 Vozdvizhensky, V.M., Grachev, V.A., Spassky, V.V. (1984). Casting alloys and the technology of their melting in mechanical engineering. M.: Mashinostroenie, 432 p. [in Russian].
- 5 Semesenko, M.P., Pelykh, S.G. (1975). Computer in foundry processes control. Donetsk: Donbass, 96 p. [in Russian].
- 6 Pelykh, S.G., Semesenko, M.P. (1977). Optimisation of foundry processes, Kyiv: Vishcha Shkola, 192 p. [in Russian].
- 7 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*, 31(2)(333), 42–50 <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.042> [in Ukrainian].
- 8 Sirenko, K.A., Mazur V.L. (2024). Assessment of thermal conductivity of grey cast iron castings with lamellar graphite. *Casting processes*, 21(156), 3–11. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.056> [in Ukrainian].

- 9 Sirenko, K.A., Mazur V.L. (2023). Evaluation of approaches to predicting the properties of synthetic cast iron in foundry production. *Metal Science and Treatment of Metals*, 2, 24–35 <https://doi.org/10.15407/mom2023.02.024> [in Ukrainian].
- 10 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2023). Evaluation of approaches to predicting the properties of synthetic cast iron in foundry. *Metal Science and Treatment of Metals*, 2, 24–35 <https://doi.org/10.15407/mom2023.02.024> [in Ukrainian].

Одержано / Received 03.02.2026

Прийнято / Accepted 17.02.2026

Опубліковано / Publined 17.03.2026

K.A. Sirenko, PhD (Engin.), Deputy Head of Department;

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>

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

WAYS TO SOLVE THE DIRECT AND INVERSE PROBLEM «CHEMICAL COMPOSITION–PROPERTIES» OF CAST IRON

The relevance and technical and economic efficiency of introducing the practice of predicting the mechanical properties of cast iron based on its chemical composition determined during smelting into foundry production is demonstrated. Well-known approaches to solving the classic problem of «chemical composition–properties» of cast iron in foundry production theory are analysed. The features of solving the direct problem are considered, namely in the formulation where the mechanical properties of cast iron (strength limit, hardness, etc.) are considered depending on the percentage content of chemical elements in its composition. The inverse problem is also considered, where, in the opposite approach, the subject of the search is the chemical composition of cast iron depending on its predetermined mechanical or physical properties or operational characteristics. The equations and empirical formulas presented in the scientific literature, which reflect the relationship between the strength and hardness of grey cast iron and the degree of eutecticity and carbon equivalent of its chemical composition, have been analysed. These indicators largely generalise and characterise the chemical composition of cast iron. The shortcomings of the known formulas lie in the uncertainty of the methods used to calculate the carbon equivalent and eutecticity of cast iron when developing the formulas. It has been shown that the methods that involve determining the carbon equivalent and eutecticity in a probabilistic approach using the Monte Carlo method are reliable and accurate. Solving the inverse problem, namely calculating the required content of chemical elements in the composition of cast iron to ensure its specified properties, is more difficult than solving the direct problem of the «chemical composition–properties» of cast iron. Possible ways of solving direct and inverse problems are considered using the example of grey cast iron with lamellar graphite.

Keywords: foundry production, cast iron, chemical composition, carbon equivalent, eutecticity, mechanical properties.