

Оцінка підходів до прогнозування властивостей синтетичного чавуну у ливарному виробництві

Сіренко К. А., молодший науковий співробітник, thermoexp.metal@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

Мазур В. Л., член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник, prof.vlm@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8970-5389>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Розглянуто підходи щодо оцінки залежності механічних властивостей виробів з синтетичного чавуну, виплавленого в індукційних тигельних печах, від вмісту вуглецю і кремнію, а також від вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, співвідношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію. Проаналізовано статистичні параметри розподілів відсоткового вмісту зазначених елементів у хімічному складі чавунів з пластинчастим графітом, що виробляють відповідно до вимог ДСТУ 8833-2019. Величини вуглецевого еквівалента складу цих чавунів і величини їх ступеня евтектичності були розраховані за формулами для визначення цих показників із застосуванням методу Монте-Карло і використовуючи ймовірнісний підхід при врахуванні вмісту кожного елемента у хімічному складі чавуну. Акцентовано увагу, що з ймовірнісної точки зору величини вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності можуть не співпадати в різних партіях чавуну навіть при однакових величинах вмісту хімічних елементів у його складі. Показано, що при збільшенні вуглецевого еквіваленту і ступеня евтектичності зменшуються міцність і твердість чавуну, виготовленого згідно з ДСТУ 8833-2019. З підвищення вмісту вуглецю і вуглецевого еквівалента величина відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію зменшується. В промислових партіях чавунних гальмових колодок і «клину Ханіна», виготовлених згідно з ГОСТ 30249-97 і ГОСТ 34503-2018, твердість цих виробів не залежить від вуглецевого еквівалента у зв'язку з невеликим діапазоном розмаху величин вуглецевого еквівалента.

Ключові слова: ливарні вироби, чавун, хімічний склад, вуглецевий еквівалент, відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію, ступінь евтектичності, твердість, міцність.

В фундаментальних монографіях українських і закордонних вчених викладені теоретичні основи металографії чавуну, принципи побудови його структури і властивостей [1-9]. У численних публікаціях наведено результати досліджень і аналіз практичного досвіду щодо виробництва чавунів різного призначення [10-16]. Зокрема досліджено ливарні і

механічні властивості чавунів, експлуатаційні характеристики виробів з чавунів різного типу. Надано рекомендації відносно визначення технології виплавки чавуну в різних агрегатах, яка забезпечує необхідні його хімічний склад, мікроструктуру та властивості. Накопичені знання в цій науковій сфері безцінні й складають фундамент розвитку ливарного виробництва та металургії в цілому.

В останні десятиліття у світовій практиці ливарного виробництва все більшого поширення набуває тенденція заміни вагранок на електричні індукційні печі, які дозволяють отримувати якісніший чавун завдяки збільшенню можливостей впливати на технологію виплавки, забезпечувати ефективне регулювання хімічного складу чавуну і його властивостей [7, 9, 11-14]. Під час освоєння і удосконалення технології виплавки в індукційних печах з металобрухту так званого «синтетичного чавуну» були виконані глибокі, різнопланові дослідження не тільки залежності мікроструктури, властивостей чавуну в функції відсоткового вмісту у його складі окремих елементів, а й ефектів взаємодії. Тобто, розглянуто ефекти синергії в позитивному чи негативному напрямках відносно рівня властивостей виплавленого чавуну [7, 9].

На жаль, результати експериментальних досліджень, виконаних у різних умовах, не завжди відповідають традиційним уявленням щодо процесів виробництва ливарного чавуну. Нерідко висновки різних вчених не співпадають внаслідок багатьох неврахованих в дослідях факторів. Тому неоднозначні результати, висновки і рекомендації потребують детального опрацювання у промислових умовах, уточнення на практиці.

Загальноновизнано, що основними елементами у хімічному складі синтетичного чавуну є вуглець і кремній. Вміст цих елементів у складі чавуну в основному визначають величини його вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ та ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ [2]:

$$C_{\text{екв}} = C + 0,3(Si+P); S_{\text{евт}} = C/[4,26 - 0,3(Si+P)], \quad (1)$$

де C , Si , P – вміст вуглецю, кремнію, фосфору (%) у складі чавуну.

У книзі [12] представлена інша формула для розрахунку ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ чавуну:

$$S_{\text{евт}} = (C + 0,15 \cdot Si - 2,1) / (2,2 - 0,15 \cdot Si) \quad (2)$$

Вважається [2, с. 47], що в разі визначення $S_{\text{евт}}$ за формулою (1) маємо при $C_{\text{екв}} < 4,26$ і $S_{\text{евт}} < 1$ чавун доевтектичний. При $C_{\text{екв}} = 4,26$ і $S_{\text{евт}} = 1$ – евтектичний. При $C_{\text{екв}} > 4,26$ і $S_{\text{евт}} > 1$ – заевтектичний. Інші елементи у складі чавуну також впливають на його структуру і властивості. Але при відносно малих концентраціях їх вплив на ці параметри незрівнянно слабший.

Зазначимо, що формулу (2) слід використовувати при розрахунках $S_{\text{евт}}$ чавунів, у хімічному складі яких вміст фосфору не грає суттєвої ролі.

Чавун

Для евтектичних чавунів, наприклад, коли $C_{\text{екв}} = 4,26$ і $S_{\text{евт}} = 1$, використання цієї величини $S_{\text{евт}}$ у формулі (1) призводить до рівняння $C = 4,26 - 0,3 (Si + P)$, у формулі (2) – до $C = 4,3 - 0,3 Si$. Тобто в першому наближенні ці рівняння практично однакові.

Зазначимо, що окрім величин $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ механічні і ливарні властивості чавуну залежать від співвідношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію (C/Si). Так, залежність від C/Si величини міцності σ_B для модифікованого синтетичного чавуну у його складі має вигляд [2, с. 133]:

$$\sigma_B = 96,5 - 70 S_{\text{евт}} - 2,1 C/Si, \text{ кгс/мм}^2. \quad (3)$$

Наскільки величина σ_B сірого чавуну промислових партій відповідає рівнянню (3) потребує уточнення для умов конкретного ливарного підприємства, марки чавуну, сортаменту виготовленої продукції.

В наших статтях [17-20] представлені результати досліджень щодо C/Si у чавуні промислових партій залізничного транспорту, вироблених на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ» (табл. 1). Показано, що величини $C_{\text{екв}}$ чавуну, розраховані за різними формулами, приблизно однакові. Незважаючи на те, що запропоновані в літературних джерелах [2, 12] формули (1) і (2) для розрахунку ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ дещо відрізняються, але однаково відображають вплив вмісту вуглецю і кремнію у складі чавуну на показники його властивостей. Величини $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$, розраховані за різними формулами, можуть бути однаковими при різних співвідношення вмісту C, Si, Mn, P, S у складі чавуну навіть у межах регламентованих стандартами діапазонів

Таблиця 1

Статистичні характеристики розподілів величин вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$, ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ і відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію C/Si у масивах даних промислових партій чавунних гальмових колодок і «клину Ханіна» [20]

Table 1

Statistical characteristics of the distributions of the values of the carbon equivalent $C_{\text{екв}}$, the degree of eutectic $S_{\text{евт}}$ and the ratio of the carbon content to the silicon content C/Si in the arrays of data of industrial batches of cast iron brake pads and the «Khanin wedge» [20]

Показники	Гальмові колодки типу «М», ГОСТ 30249-97	Фрикційний «клин Ханіна»
Вуглецевий еквівалент $C_{\text{екв}}$	<u>3,32...3,63</u> 3,46	<u>3,08...3,51</u> 3,34
Ступінь евтектичності $S_{\text{евт}}$	<u>0,41...0,55</u> 0,48	<u>0,40...0,60</u> 0,52
Відношення C/Si	<u>2,34...2,80</u> 2,47	<u>1,88...2,55</u> 2,23
Примітка: над ризикою – діапазон мінімальних – максимальних значень показників, під ризикою – середні значення.		

вмісту хімічних елементів у його складі. Можливості варіації відношення C/Si дещо обмежені діапазонами розкиду вмісту у складі чавуну тільки двох елементів – вуглецю і кремнію. Тому при побудові рівнянь регресії, які визначають (прогнозують) залежності структури і властивостей чавунів, доцільно і бажано орієнтуватися одночасно на величини трьох показників – $C_{екв}$, $S_{евт}$ і C/Si . При цьому треба враховувати чи є кореляція між цими показниками хімічного складу чавуну, який розглядається. В разі, якщо кореляція має місце, то використовувати у рівняннях регресії корельовані показники в ролі незалежних аргументів неправомірно.

В технічній літературі значно менше інформації щодо впливу відношення C/Si на властивості різних чавунів, ніж впливу $C_{екв}$ і $S_{евт}$. Тому це питання потребує більш прискіпливого аналізу.

На рис. 1 представлено гістограму розподілу величини ступеня евтектичності $S_{евт}$ у масивах даних промислових партій чавуну СЧ350, з якого виготовлені вироби «клин Ханіна» згідно з вимогами ГОСТ 33695-2015. Характеристики розподілу величини $S_{евт}$ представлені в табл. 1 та більш детально у наших статтях [17-20]. При побудові гістограми (рис. 1) використано масив даних щодо 107 плавок чавуну. Для наочності інформації сумнівні величини з масиву даних, використаних в гістограмі, не видаляли. Очищення масивів цих даних від схоже помилкових величин не впливало на середні значення, середні квадратичні відхилення, інші параметри розподілів [18]. Після видалення сумнівних щодо достовірності величин в масиві, який розглядається, залишилося 85 партій – плавок чавуну. Результати статистичних досліджень¹ цього масиву даних засвідчили, що коефіцієнт кореляції величини ступеня евтектичності $S_{евт}$, розрахованого за формулою (2), з вмістом вуглецю в чавуні, що дорівнював 0,89, з вмістом кремнію –

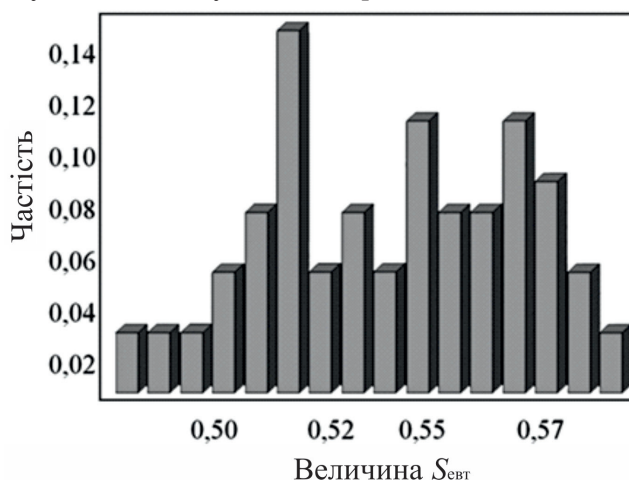


Рис. 1. Розподіл ступеня евтектичності $S_{евт}$ у промислових партіях чавуну.

Fig. 1. Distribution of the degree of $S_{евт}$ eutecticity in industrial batches of cast iron.

¹ Автори статті висловлюють подяку професору Тогобицькій Д.М. за допомогу у виконанні статистичної обробки і аналізу експериментальних даних.

0,47, з величиною вуглецевого еквівалента – більше 0,9. До речі, коефіцієнт кореляції відношення C/Si з вмістом кремнію складає мінус 0,98 і свідчить, що це відношення жорстко залежить від вмісту Si й вкрай слабо (майже не залежать) від вмісту C .

В той же час відношення C/Si майже не корелює з вуглецевим еквівалентом $C_{екв}$, (коефіцієнт кореляції дорівнює $\sim 0,4$) і з величиною ступеня евтектичності $S_{евт}$, розрахованого за формулою (2). Коефіцієнт кореляції $\sim 0,3$.

Аналогічні результати отримані при аналізі статистичних параметрів показників $C_{екв}$, $S_{евт}$, C/Si чавуну в масивах промислових партій чавунних колодок типу «М» для залізничного транспорту, виготовлених відповідно до вимог ГОСТ 30249-97. Так, високий рівень кореляції спостерігається між вуглецевим еквівалентом $C_{екв}$ і ступенем евтектичності $S_{евт}$ (коефіцієнт кореляції більше 0,95). Відношення C/Si не корелює з $C_{екв}$ і $S_{евт}$. Коефіцієнт кореляції між C/Si і вмістом вуглецю в чавуні дорівнює 0,45, з вмістом кремнію у чавуні – 0,87. Гістограма розподілу відношення C/Si наведена на рис. 4 в нашій статті [20]. Приведені вище результати слід враховувати при побудові рівнянь регресії між показниками $C_{екв}$, $S_{евт}$, C/Si сірого синтетичного чавуну, хімічний склад якого відповідає зазначеним вище стандартам.

В ДСТУ 8833-2019 «Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальні технічні умови» значною мірою узагальнено практичний досвід ливарних підприємств відносно залежності властивостей чавунів з пластинчастим графітом від їх хімічного складу. В табл. 2 представлені середні величини вмісту вуглецю C , кремнію Si , відношення C/Si вмісту

Таблиця 2

Середні величини вмісту вуглецю C та кремнію Si , відношення C/Si , вуглецевого еквіваленту $C_{екв}$ і ступеня евтектичності $S_{евт}$ чавунів різних марок, представлених у ДСТУ 8833-2019

Table 2

The average values of the content of carbon C and silicon Si , the C/Si ratio, the carbon equivalent of $C_{екв}$ and, the degree of eutecticity of $S_{евт}$ and cast irons of various grades presented in DSTU 8833-2019

Середні показники	Марка чавуну						
	СЧ100	СЧ150	СЧ200	СЧ250	СЧ300	СЧ350	СЧА400
C , %	3,6	3,6	3,4	3,3	3,1	2,95	2,8
Si , %	2,4	2,2	1,9	1,8	1,6	1,35	1,45
C/Si	1,5	1,64	1,79	1,83	1,94	2,19	1,93
$C_{екв}$, %	4,25	4,14	3,94	3,9	3,33	3,22	3,2
$S_{евт}$	0,98	0,98	0,93	0,9	0,81	0,76	0,74
Примітка: Розрахунки виконано за участю Д. А. Деречі. Середні величини вуглецю і кремнію розраховували за даними максимальної і мінімальної величин відсоткового вмісту цих елементів у складі чавуну: $C = 0,5 (C_{max} + C_{min})$; $Si = 0,5 (Si_{max} + Si_{min})$. Кількість варіантів розрахунків методом Монте-Карло ймовірнісних середніх величин $C_{екв}$ і $S_{евт}$ дорівнювала 1000.							

цих елементів, а також розраховані із застосуванням методу Монте-Карло ймовірнісні середні значення вуглецевого еквіваленту $C_{екв\ i}$ і ступеня евтектичності $S_{евт\ i}$ хімічного складу чавунів різних марок згідно з ДСТУ 8833-2019. Для розрахунків цих величин використовували формули (1).

Наведені в табл. 2 дані однозначно свідчать, що границя міцності під час розтягування σ_b (Н/мм²) чавунів відповідно до ДСТУ 8833-2019 (на величину мінімальної міцності вказує цифрова позначка у марці чавуну) збільшується при зменшенні вмісту вуглецю і вмісту кремнію у їх хімічному складі. Величина відношення C/Si зростає при переході від чавуну СЧ100 до СЧА400. Міцність сірого чавуну з пластинчастим графітом збільшується при збільшенні відношення C/Si і зменшенні величин вуглецевого еквівалента $C_{екв\ i}$ та ступеня евтектичності $S_{евт\ i}$. Між собою величини $C_{екв\ i}$ і $S_{евт\ i}$ пов'язані прямою залежністю (рис. 2). При підвищенні $C_{екв}$ підвищується й $S_{евт}$. Вважається [21], що вміст вуглецю нижче 2,7 % у хімічному складі чавуну, з якого виготовляють гальмові локомотивні колодки типу «М» згідно з ГОСТ 30249-97, призводить до погіршення ливарних властивостей чавуну, виникнення раковин, пор, відбілу, зниження його фрикційних властивостей. Згідно з ДСТУ 8833 твердість чавунів з пластинчастим графітом підвищується при зменшенні вмісту вуглецю, величини вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності хімічного складу такого чавуну (рис. 3, рис. 4). Такий ефект обумовлений відповідним впливом цих факторів на мікроструктуру чавунів.

На рис. 3 показано залежності середньої величини вмісту кремнію Si і відношення C/Si від середньої величини вмісту вуглецю у хімічному складі чавуну з пластинчастим графітом відповідно до технічних умов ДСТУ 8833-19.

Водночас слід підкреслити, що відмічені залежності справедливі при зміні величин вуглецевого еквівалента хімічного складу і ступеня

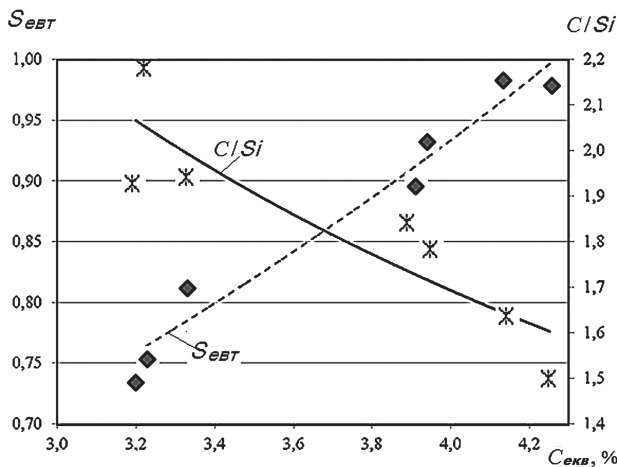


Рис. 2. Залежність середніх величин ступеня евтектичності $S_{евт\ i}$ і відношення C/Si від середньої величини вуглецевого еквівалента $C_{екв\ i}$ хімічного складу чавуну з пластинчастим графітом (відповідно до ДСТУ 8833-2019).

Fig. 2. Dependence of the average values of the degree of eutectic $S_{евт\ i}$ and of the ratio C/Si on the average value of the carbon equivalent $C_{екв\ i}$ from the chemical composition of cast iron with lamellar graphite (according to DSTU 8833-2019).

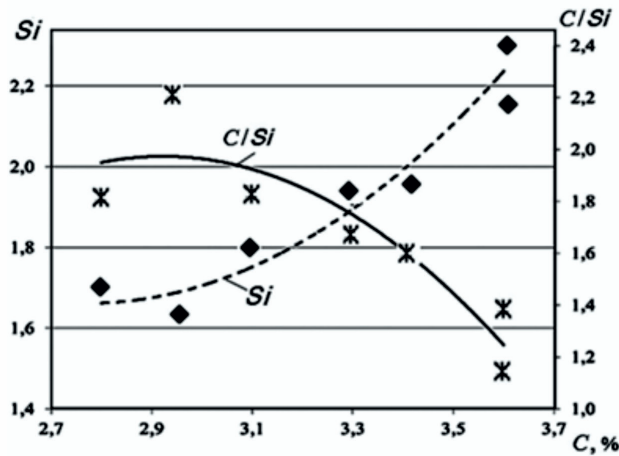


Рис. 3. Залежності середньої величини вмісту кремнію і відношення C/Si від середньої величини вуглецю C у чавуні з пластинчастим графітом (відповідно до ДСТУ 8833-2019).

Fig. 3. Dependencies of the average amount of silicon content and the C/Si ratio on the average amount of carbon C in cast iron with lamellar graphite (according to DSTU 8833-2019).

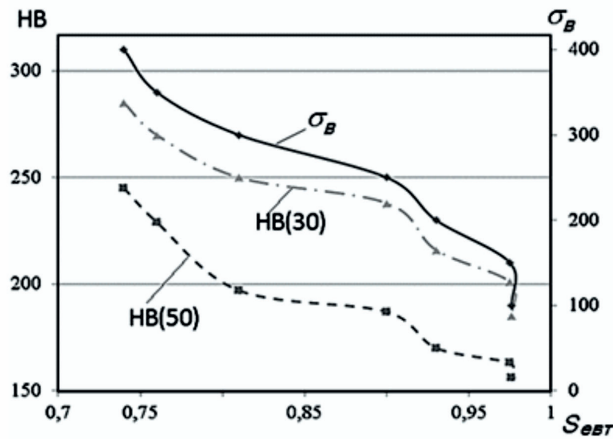


Рис. 4. Залежності твердості HB і границі міцності під час розтягування σ_B , N/mm^2 , від середньої величини ступеня евтектичності $S_{евт}$ чавунів з пластинчастим графітом (відповідно до ДСТУ 8833-2019). Позначено: $HB(30)$ – твердість при товщині виливка 30 мм, $HB(50)$ – при товщині 50 мм.

Fig. 4. Dependencies of the hardness of HB and the limit of strength during stretching σ_B , N/mm^2 on the average value of the degree of eutecticity of $S_{евт}$ cast irons with lamellar graphite (according to DSTU 8833-2019). Marked: $HB(30)$ – hardness at a casting thickness of 30 mm, $HB(50)$ – at a thickness of 50 mm.

евтектичності чавуну в достатньо широких діапазонах (рис. 2, рис. 4). В промисловій практиці, коли при виготовленні конкретних чавунних виробів, наприклад гальмових колодок чи «клину Ханіна» для залізничного транспорту, величини вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності розташовуються у відносно вузьких межах, залежність твердості і міцності чавуну від $C_{екв}$ і $S_{евт}$ не проявляється (рис. 5) [17-18, 22].

Наведені вище дані свідчать, що характер впливу ступеня евтектичності $S_{евт}$ чавуну з пластинчастим графітом на його міцність співпадає

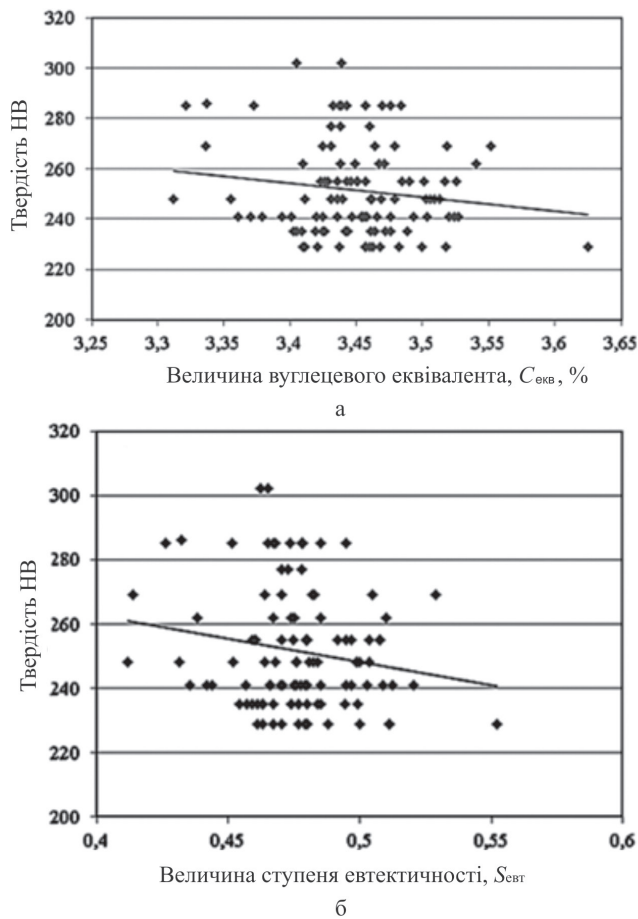


Рис. 5. Величини твердості НВ, величини вуглецевого еквівалента (а) і ступеня евтектичності (б) чавуну у гальмових колодках типу «М» для залізничного транспорту промислових партій. Величини $C_{екв}$ розраховані за формулою (1), величини $S_{евт}$ – за формулою (2).

Fig. 5. Values of HB hardness, values of carbon equivalent (a) and degree of eutecticity (b) of cast iron in type «M» brake pads for railway transport of industrial lots. $C_{екв}$ values are calculated according to formula (1), $S_{евт}$ values are calculated according to formula (2).

з визначеним у рівнянні (3). А саме, що з підвищенням $S_{евт}$ міцність σ_{ϵ} чавуну зменшується. Але вплив відношення C/Si на σ_{ϵ} має протилежний знак, ніж у рівнянні (3). Виявити причину зазначеного немає можливості, оскільки в довіднику [2, с. 133] рівняння (3), по-перше, не прив'язано до конкретного хімічного складу чавуну і технології його виплавки. По-друге, йдеться про модифікований чавун, в якому його міцність зменшується при збільшенні вмісту вуглецю і одночасному зменшенні вмісту кремнію на відміну від того, як це має місце у пластинчастому чавуні, виробленому відповідно до вимог ДСТУ 8833.

В роботі [10] також проаналізовано вплив вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності синтетичного чавуну на його механічні властивості, а саме на межу міцності σ_{ϵ} і твердості НВ. Розглянуто рівняння, які в прийнятих змінних мають вигляд:

$$\sigma_{\sigma \text{ теор}} = 100 - 80 S_{\text{евт}}, HB_{\text{теор}} = 530 - 344 S_{\text{евт}}, \quad (4)$$

де $\sigma_{\sigma \text{ теор}} = 100 - 80 S_{\text{евт}}$ – розрахована (теоретична) межа міцності при розтягуванні; $HB_{\text{теор}}$ – розрахована (теоретична) міцність; $S_{\text{евт}}$ – ступінь евтектичності, розрахована за формулою (1).

Слід вважати, що у рівняннях (4) і (3) розмірність σ_{σ} є кгс/мм². Відповідно до рівняння (4), як й рівняння (3), з підвищенням $S_{\text{евт}}$ міцність чавуну зменшується, що кореспондується з вищенаведеними результатами, зокрема на рис. 4.

Зазначене свідчить що властивості синтетичного чавуну дуже чутливо реагують на технологію його виплавки, модифікування тощо, а запропоновані в літературі рівняння регресії відображають зв'язок міцності та інших властивостей чавуну лише конкретного типу.

Висновки

Показано, що з точки зору ймовірності, величини вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності сірого чавуну з пластинчастим графітом можуть не співпадати у його різних партіях навіть при однакових діапазонах розкиду величин відсоткового вмісту хімічних елементів у складі чавуну. При збільшенні вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності сірого чавуну з пластинчастим графітом, виготовленого у відповідності з вимогами ДСТУ 8833-2019, його твердість і границя міцності під час розтягування σ_{σ} (Н/мм²) зменшуються. Але при відносно вузьких діапазонах розмаху величин вуглецевого еквівалента у промислових партіях чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок і «клину Ханіна» згідно з вимогами ГОСТ 30249-97 і ГОСТ 34503-2018, залежність твердості від вуглецевого еквівалента не проявляється. З підвищенням вмісту вуглецю і вуглецевого еквівалента у складі сірого чавуну з пластинчастим графітом величина відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію зменшується.

Література

1. Бунин К.П., Малиночка Я.Н. Введение в металлографию. – М.:Металлургиздат. – 1954. – С. 192.
2. Гиршович Н.Г. Справочник по чугуному литью. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
3. Бунин К.П., Малиночка Я.Н. Таран Ю.Н. Основы металлографии чугуна. – М.: Металлургия, 1969. – 416 с.
4. Бунин К.П., Баранов А.А. Металлография. – М.: Металлургия, 1970. – 256 с.
5. Чалмерс Б. Физическое металловедение. – М.: Металлургиздат, 1963. – 455 с.
6. Горшков А.А. Справочник по изготовлению отливок из высокопрочного чугуна. – М., – К.: Машгиз, 1961. – 300 с.

7. Шумихин В.С., Лузан П.П., Жельнис М.В. Синтетический чугу́н. – К.: Наукова думка, 1971. – 159 с.
8. Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Семенова Ю.С., Иванча Н.Г., Белькова А.И., Шумельчик Е.И., Степаненко Д.А. Создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой: новые подходы, – К : Наукова думка, 2019. – 272 с.
9. Шумихин В.С., Кутузов В.П., Храменков А.И., Дибров И.А., Александров Н.Н., Бобро Ю.Г., Пузырьков-Уваров О.В., Блошко Н.К. Высококачественные чугуны для отливок, – М.: Машиностроение, 1982. – 222 с.
10. Коган Л.Б., Новик Ф.С., Виноградов Ю.Г. Изучение свойств синтетических чугунов с использованием методов математической статистики. – М.: НИИМАШ, 197. – 76 с.
11. Неижко И.Г., Найдек В.Л., Гаврилюк В.П. Тормозные колодки железнодорожного транспорта. К., 2009 – 121 с.
12. Смирнов А.Н., Лейрих И.В. Производство отливок из чугуна. –Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 245 с.
13. Шерман А.Д., Жуков А.А. Чугун. Справочное издание. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
14. Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.
15. Бубликов В.Б. Розробка наукових основ оптимальних технологічних процесів одержання корпусних виливків з високоміцного чавуну // Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Київ. ФТІМС НАН України. 1998. – 326 с.
16. Захарченко Э.В., Левченко Ю.Н., Горенко В.Г., Вареник П.А. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом, Киев: Наукова думка, 1986. – 248 с.
17. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Визначення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну в ливарному виробництві // Процеси лиття. – 2023. – № 1. – С. 20-34. <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.020>
18. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових партій синтетичного чавуну // Процеси лиття. – 2021. – № 4 (146). – С. 66-75. <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.066>
19. Мазур В.Л., Сіренко К.А. Аналіз тенденцій розвитку виробництва литва з синтетичного чавуну (на прикладі порівняння гальмових колодок для рухомого складу залізниць, виготовлених з різних матеріалів) // Теория и практика металлургии». – 2022. – № 3. – С. 5-14.
20. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Ідеологія коригування хімічного складу синтетичного чавуну в процесі виготовлення литва // Метал та лиття України. – 2021. – Т. 29, № 4 (327). – С. 44-54. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.044>
21. Климов А.А., Стручков А.В., Бондарик В.Б., Ильинский В.П., Домнин С.В., Кирпиченко В.П. Влияние состава и микроструктуры тормозных локомотивных колодок на трибологические свойства // Вестник ИрГТУ. – 2017. – Том. 21, № 11 (130). – С. 179-190.
22. Сіренко К.А. Характеристика твердості чавунних гальмових колодок залізничного транспорту // Метал та лиття України. – 2022. – Т. 30, № 3 (330). – С. 98-101. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.096>

References

1. Bunin K.P., Malinochka Ya.N. *Vvedeniye v metallografiyu* (Introduction to metallography), M.: Metallurgizdat, 1954, 192 p. [in Russian].
2. *Spravochnik po chugunnomu lit'yu* (Handbook of iron casting), Ed. N.G. Girshovich. L.: Mashinostroenie, 1978, 758p. [in Russian].
3. Bunin K.P., Malinochka, Ya.N., Taran, Yu.N. *Spravochnik po chugunnomu lit'yu* (Fundamentals of cast iron metallography). M.: Metallurgiya, 1969, 416 p. [in Russian]
4. Bunin K.P., Baranov A.A. *Metallografiya* (Metallography), M.: Metallurgiya, 1970, 256 p. [in Russian].
5. Chalmers B. *Fizicheskoye metallovedeniye* (Physical metallurgy), M.: Metallurgizdat, 1963. 455 p. [in Russian].
6. *Spravochnik po izgotovleniyu otlivok iz vysokoprochnogo chuguna* (Handbook for the manufacture of castings from ductile iron), Ed. A.A. Gorshkov, M.; K.: Mashgiz, 1961. 300 p. [in Russian]
7. Shumikhin V.S., Luzan P.P., Zhelnis M.V. *Sinteticheskii chugun* (Synthetic cast iron), K.: Naukova Dumka, 1971. 159 p. [in Russian].
8. Muravieva I.G., Togobitskaya D.N., Semenova Yu.S., Ivancha N.G., Belkova A.I., Shumelchik E.I., Stepanenko D.A. *Sozdaniye intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu domennoy plavkoy: novyye podkhody* (Creation of intelligent decision support systems for the management of blast-furnace smelting: new approaches), Kyiv, Naukova Dumka, 2019, 272 p. [in Russian].
9. Shumikhin V.S., Kutuzov V.P., Khranchenkov A.I., Dibrov I.A., Aleksandrov N.N., Bobro Yu.G., Bubbles-Uvarov O.V., Bloshko N.K. *Vysokokachestvennyye chuguny dlya otlivok* (High-quality cast irons for castings), M.: Mashinostroenie, 1982, 222 p. [in Russian].
10. Kogan L.B., Novik F.S., Vinogradov Yu.G. *Izucheniye svoystv sineticheskikh chugunov s ispol'zovaniyem metodov matematicheskoy statistiki* (Study of the properties of synthetic cast irons using the methods of mathematical statistics), M., 1971, 76 p. [in Russian].
11. Neizhko I.G., Naidek V.L., Gavrilyuk V.P. *Tormoznyye kolodki zheleznodorozhnogo transporta* (Brake pads of railway transport), K., 2009, 121 p. [in Russian].
12. Smirnov A.N., Leirikh I.V. *Proizvodstvo otlivok iz chuguna* (Manufacture of cast iron castings. Monograph) Donetsk, Nord-Press, 2005, 245 p. [in Russian].
13. Sherman A.D., Zhukov A.A. *Chugun. Spravochnoye izdaniye* (Cast iron. Reference edition), M.: Metallurgy, 1991, 576 p. [in Russian].
14. Vozdvizhensky V.M., Grachev V.A., Spassky V.V. *Liteynyie splavy i tekhnologiya ikh plavki v mashinostroyenii* (Casting alloys and the technology of their melting in mechanical engineering), M.: Mashinostroenie, 1984. 432 p. [in Russian].
15. Bublykov, V.B. *Rozrobka naukovikh osnov optimal'nikh tekhnologichnikh protsesiv oderzhannya korpusnikh vilivku z visokomutnogo chavunu* (Development of the scientific basis of optimal technological processes for the production of body castings from high-strength cast iron), Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, Kyiv, FTIMS of the National Academy of Sciences of Ukraine. 1998, 326 p. [in Ukrainian].
16. Zakharchenko E.V., Levchenko Yu.N., Gorenko V.G., Dumpling P.A. *Otlivki iz chuguna s sharovidnym i vermikulyarnym grafitom* (Castings from cast iron with nodular and vermicular graphite), Kyiv: Naukova Dumka, 1986, 248p. [in Russian].

17. Sirenko K.A., Mazur V.L., *Processy lit'a*, 2023, No. 1, pp. 20-34 [in Ukrainian] <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.020>
18. Sirenko K.A., Mazur V.L., *Processy lit'a*, 2021, No. 4 (146), pp. 66-75 [in Ukrainian] <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.066>
19. Mazur V.L., Sirenko K.A., *Teoryya y praktyka metallurhyy*, 2022, No. 3, pp. 5-14 [in Ukrainian].
20. Sirenko K.A., Mazur V.L., *Metal ta lyttya Ukrayiny*, 2021, Vol. 29, No. 4 (327) pp. 44-54 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.044>
21. Klymov A.A., Struchkov A.V., Bondaryk V.B., Yl'ynskyy V.P., Domnyn S.V., Kyrpychenko V.P., *Vestnyk YrHTU*, 2017, Vol. 21, No. 11 (130), pp. 179-190 [in Ukrainian].
22. Sirenko K.A., *Metal ta lyttya Ukrayiny*, 2022, Vol. 30, No. 3 (330), pp. 98-101 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.096>

Одержано 24.05.23

K. A. Sirenko, V. L. Mazur

Evaluation of approaches to predicting the properties of synthetic cast iron in foundry production

Summary

An overview of approaches to assessing the dependence of the mechanical properties of products made of synthetic iron smelted in induction crucible furnaces on the content of carbon and the content of silicon in its chemical composition, as well as on the carbon equivalent, the degree of eutecticity, and the ratio of the carbon content to the silicon content is given. The statistical parameters of the percentage distributions of the specified elements in the chemical composition of cast irons with lamellar graphite produced in accordance with the requirements of DSTU 8833-2019 were analyzed. The values of the carbon equivalent of the chemical state of these cast irons and the values of their degree of eutecticity were calculated according to common formulas for determining these indicators using the Monte Carlo method and using a probabilistic approach taking into account the content of each element in the chemical composition of cast iron. It is emphasized that, from a probabilistic point of view, the values of the carbon equivalent and the degree of eutecticity may not coincide in different batches of cast iron, even with the same values of the percentage content of chemical elements in its composition. It is shown that with an increase in the carbon equivalent and the degree of eutecticity, the strength and hardness of cast iron produced in accordance with DSTU 8833-2019 decrease. As the carbon content and carbon equivalent increase, the ratio of carbon content to silicon content decreases. In industrial batches of cast iron brake pads and «Khanin wedge» manufactured in accordance with GOST30249-97 and GOST34503-2018, the hardness of these products does not depend on the carbon equivalent due to the small range of the carbon equivalent values.

Keywords: foundry products, cast iron, chemical composition, carbon equivalent, ratio of carbon content to silicon content, degree of eutecticity, hardness, strength.