
ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2023.01.020>

УДК 62174 : 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. співр.,
e-mail: prof.vlm@ukr.net

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

ВИЗНАЧЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО ЕКВІВАЛЕНТА І СТУПЕНЯ ЕВТЕКТИЧНОСТІ ЧАВУНУ В ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Проаналізовано питання щодо сутності понять вуглецевого еквівалента, показника ступеня евтектичності та відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію для характеристики хімічного складу і властивостей сірого чавуну. Представлено результати досліджень величини вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності і відношення C/Si хімічного складу синтетичного чавуну, який використовують для виготовлення гальмових колодок і «клину Ханіна» рухомого складу залізниці. Наведено і проаналізовано приклади різних підходів і формул визначення меж і способів використання вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну для характеристики зварюваності сталей, коефіцієнта тертя, зносу, інших експлуатаційних показників чавунних гальмових колодок, оцінки якості чавунного литва в цілому. В межах регламентованих стандартами діапазонів вмісту хімічних елементів у складі чавуну значення його вуглецевого еквівалента в окремих плавках-партіях виробів можуть суттєво (на 30 %) різнитися. При певних співвідношеннях основних елементів у хімічному складі чавуну величини вуглецевого еквівалента можуть бути однаковими, але механізми кристалізації чавуну і його властивості не співпадати. Проаналізовано параметри розподілів вмісту вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору, сірки, вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності у чавуні СЧ350, з якого виготовляють фрикційний «клин Ханіна» для рухомого складу залізниці. Очищення заводських масивів показників хімічного складу, твердості, вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності чавунів, призначених для виготовлення гальмових колодок і фрикційного «клину Ханіна», від грубих помилкових значень практично не впливало на загальні характеристики статистичного аналізу, що свідчить про достовірність результатів. Показано, що при виплавленні в індукційних тигельних печах сірого синтетичного чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок і «клину Ханіна», діапазони варіювання вмісту C, Si, Mn, P, S значно вужчі, ніж регламентовані стандартами на цю ливарну продукцію. Відмічена принципова можливість внесення відповідних уточнень до вимог стандартів відносно вмісту хімічних елементів у синтетичному сірому чавуні, призначеному для виготовлення гальмових колодок типу «М» і фрикційного «клину Ханіна» для рухомого складу залізниці, зокрема зменшення вмісту сірки до 0,05 % для підвищення стабільності його якості.

Ключові слова: чавун, хімічний склад, вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності, властивості, ливарні вироби, гальмові колодки, експлуатаційні характеристики.

Для характеристики хімічного складу і властивостей чавуну широке розповсюдження в металургії, машинобудуванні, в тому числі ливарному виробництві, отримали показники його вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеню евтектичності $S_{\text{евт}}$. В роботі [1], наприклад, зазначено, що «вуглецевий еквівалент являє собою показник еквівалентного (умовного) вмісту вуглецю, який враховує внесок компонентів чавуну на його положення щодо евтектичного складу на псевдоподвійній (бінарній) діаграмі стану залізо–вуглець».

Формула вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ має вигляд [2]:

$$C_{\text{екв}} = C_c + \sum_{i=1}^n G_c^i C_i, \quad (1)$$

де C_c , C_i – вміст (%) вуглецю та іншого i -того хімічного елемента у складі чавуну; G_c^i – вуглецевий еквівалент i -того хімічного елемента (коефіцієнт перед величиною вмісту елемента).

Зазвичай в технічній літературі формулу $C_{\text{екв}}$ виражають простіше:

$$C_{\text{екв}} = C + G_c^{\text{Si}} \text{ Si} + G_c^{\text{P}} \text{ P} + G_c^{\text{Mn}} \text{ Mn} + G_c^{\text{S}} \text{ S} + \dots \quad (2)$$

При цьому, коефіцієнти G_c^i можуть мати знаки «плюс» чи «мінус» залежно від напряму впливу конкретного елемента на $C_{\text{екв}}$. Вуглецевий еквівалент визначають, зазвичай, експериментально, іноді термодинамічними розрахунками. В статті [2] надано посилання на літературні джерела з прикладами на цю тему. У технічній літературі запропоновано різні формули для розрахунків $C_{\text{екв}}$, які дещо різняться між собою. Причина полягає в тому, що кожна з відомих формул була розроблена при вирішенні конкретних наукових або практичних задач для різних за хімічним складом чавунів чи сталей. Відповідно формули мають різний набір хімічних елементів, а також різні величини коефіцієнтів G_c^i . Наприклад, в статті [2] запропонована наступна формула для розрахунку вуглецевого еквіваленту, яка отримана методом регресійного аналізу:

$$C_{\text{екв}} = C_c + 0,3 \text{ Si} + 0,33 \text{ P} - 0,015 \text{ Mn} + 0,26 \text{ S}. \quad (3)$$

У ГОСТ 27772-88 «Прокат для строительных стальных конструкций» застосовано формулу $C_{\text{екв}}$, яка включає 8 хімічних елементів, але не враховує вплив сірки на значення вуглецевого еквівалента сталей, що розглядається у цьому стандарті. Тобто, як правило, формули для розрахунку $C_{\text{екв}}$ сталей або чавунів розробляють для контролю властивостей конкретної металопродукції.

При виробництві металовиробів відповідального призначення нерідко в нормативній технічній документації регламентують не тільки формулу для розрахунку вуглецевого еквівалента, а й його критичні значення. Наприклад, відповідно до інформації, наведеної в енциклопедичних джерелах, вуглецевий еквівалент штабової сталі 09Г2СФ, призначеної для виробництва багатошарових труб, розрахований за формулою $C_{\text{екв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{V}}{5}$, не повинен перевищувати 0,43 %. В іншому прикладі, а саме при оцінці зварюваності легованих сталей, вуглецевий еквівалент розраховують за дещо іншою формулою $C_{\text{екв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{10}$.

При цьому $C_{\text{екв}}$ має бути не більше 0,45 %. Для відносно тонкого металу 0,55 %. Зрозуміло, ці контрольні величини мають уточнюватися щодо конкретних сталей та виробів. Звертаємо увагу, що формули $C_{\text{екв}}$, які використовують для оцінки

зварюваності сталей, не враховують вміст кремнію. Але при формуванні структури і властивостей ливарних виробів з чавуну кремній є одним з найвпливовіших елементів. Формула (2) та інші [2–4] цей аспект відображають.

В наших статтях [3–5] на прикладі дослідження промислових партій чавунних гальмових колодок типу «М» та фрикційного «клину Ханіна» для залізниці проаналізовано реальний хімічний склад сірого синтетичного чавуну, його властивості, вуглецевий еквівалент та інші узагальнені показники чавуну, виплавленого в індукційній тигельній печі сучасного ливарного підприємства.

Зразу ж зазначимо наступне. При статистичному аналізі показників вмісту хімічних елементів, твердості, вуглецевого еквівалента, ступеню евтектичності чавуну промислових партій було встановлено, що очищення заводських масивів даних від грубих помилкових значень практично не впливало на загальні характеристики. Наприклад, після видалення випадкових похибок з масивів заводських даних щодо показників чавуну фрикційного «клину Ханіна» середня величина вмісту вуглецю змінилася (%) з 2,948 до 2,955. Тобто з точністю до третього знака після коми залишилася однаковою. Такий самий результат отримали і відносно вмісту інших хімічних елементів та показників якості чавуну. Це дозволяє зробити висновок про достовірність заводських даних щодо контролю в промислових умовах якості чавуну.

Результати досліджень хімічного складу, вуглецевого еквівалента, твердості, міцності, ступеня евтектичності чавуну, який виплавляють на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ»¹ для виготовлення литвом фрикційного «клину Ханіна», засвідчили, що його вуглецевий еквівалент $C_{\text{екв}}$ залежить головним чином від вмісту вуглецю (коефіцієнт кореляції 0,887), у меншій мірі – від вмісту кремнію (коефіцієнт кореляції $\sim 0,6$). Підкреслимо, що кореляції між $C_{\text{екв}}$ і вмістом кремнію у чавуні гальмових колодок не виявлено. Марганець на $C_{\text{екв}}$ майже не впливає (коефіцієнт кореляції менше 0,4). Величини вмісту хімічних елементів у складі дослідженого чавуну СЧ350 не корелювали ні між собою, ні з вуглецевим еквівалентом. Аналогічні результати були отримані при дослідженнях чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок [6]. Ця особливість позитивно характеризує технологію виплавлення чавуну на заводі ТОВ «М-ЛИТ» з точки зору можливості без зайвих складнощів корегувати хімічний склад рідкого металу безпосередньо у процесі плавки. Оскільки кореляції між величинами вмісту хімічних елементів у чавуні розглянутих партій ливарних виробів не виявлено, то ці величини слід вважати випадковими в межах діапазонів їх розкиду, полів розподілу. Відповідно до такого підходу систему регулювання хімічного складу рідкого чавуну в процесі плавки слід будувати, виходячи з ймовірнісних позицій.

Стосовно властивостей фрикційного «клину Ханіна» відмітимо, що твердість чавуну не залежала від $C_{\text{екв}}$ в діапазоні його розподілу. Сильна кореляція проглядається між вмістом вуглецю у хімічному складі дослідженого чавуну і вуглецевим еквівалентом (коефіцієнт кореляції 0,887) та зі ступенем евтектичності $S_{\text{евт}}$. Коефіцієнт кореляції між C і $S_{\text{евт}}$ дорівнював 0,929. Але між відношенням C/Si й вмістом C у чавуні «клину Ханіна» кореляція зовсім не відмічена, в той час як коефіцієнт кореляції між C і C/Si у чавуні гальмових колодок складав 0,448. Між C/Si і вмістом кремнію у чавуні гальмових колодок коефіцієнт кореляції дорівнював мінус 0,871 [6–9]. В чавуні «клину Ханіна» коефіцієнт кореляції між C/Si і вмістом кремнію був ще більший – мінус 0,974. Необхідно також звернути увагу на те, що коефіцієнт кореляції між величинами твердості, заміреною у двох точках HB1 і HB2 гальмових колодок, дорівнював 0,894. У виробах «клин Ханіна» коефіцієнт кореляції був меншим, а саме 0,664. Це зумовлено різними розташуваннями точок заміру твердості в цих виробах.

В технічній літературі за темою, що розглядається, відомі формули для розрахунку вуглецевого еквіваленту чавуну з використанням даних щодо величини евтектичної точки на діаграмі залізо–вуглець. Наприклад, у статті [2] запропоновано наступну формулу:

¹ Автори висловлюють вдячність директору ливарного заводу ТОВ «М-ЛИТ» Є. С. Попову за допомогу в проведенні досліджень і надані консультації.

$$C_{\text{екв}} = 4,34 + C - C_{\text{евт}}, \quad (4)$$

де 4,34 – значення точки евтектики у бінарній Fe–C системі; C – вміст вуглецю у складі чавуну; $C_{\text{екв}}$ – значення точки евтектики на полі термічний переріз системи Fe–C–Si–P–Mn–S при вмісті Si, P, Mn, S у чавунах CЧ10, CЧ20, CЧ30.

Автори статті [2] звертають увагу, що, по-перше, згідно з формулою (4) при $C_{\text{евт}} = 4,34$ отримуємо $C_{\text{екв}} = c$, %. По-друге, результати розрахунків $C_{\text{екв}}$ за формулами (4) і (3) дуже близькі $C_{\text{евт}}$.

Більш детально питання щодо показників ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$, яке може суттєво впливати на властивості чавуну [10], проаналізуємо далі. Відносно експлуатаційних характеристик ливарних виробів, зокрема коефіцієнта тертя гальмових колодок, то зазначимо, що залежність цього коефіцієнта від вуглецевого еквівалента в діапазоні величин, розглянутому в роботі [5], чітко не проявлялося.

Вміст хімічних елементів у складі чавуну, з якого виготовляють гальмові колодки типу «М», відповідно до вимог ГОСТ 30249-97 повинен бути у межах наступних діапазонів, %: $C = 2,7 \dots 3,4$; $Si = 0,7 \dots 1,0$; $Mn = 0,4 \dots 0,9$; $P = 0,4 \dots 0,9$; S – не більше 0,20. Допускається відхилення, %, вмісту елементів: $C \pm 0,1$; $Si \pm 0,2$; $Mn \pm 0,1$; $P - 0,1$; $S + 0,02$. Присутність у складі чавуну Ba і Ca не є обов'язковим. Згідно з вимогами ДСТУ 8833:2019 «Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом» чавун CЧ350 має складатися з наступних хімічних елементів, %: $C = 2,9 \dots 3,0$; $Si = 1,2 \dots 1,5$; $Mn = 0,7 \dots 1,1$; $P \leq 0,2$; $S \leq 0,12$. Це рекомендований хімічний склад чавуну. Звертаємо увагу, що вміст сірки у чавуні CЧ350, з якого виготовляють «клин Ханіна», обмежено більш жорстко ($S \leq 0,12$), ніж у чавуні, призначеному для виготовлення гальмових колодок ($S < 0,20$ і допуск $S + 0,2$). При цьому у промислових партіях синтетичного сірого чавуну, з якого виготовляють гальмові колодки і фрикційний «клин Ханіна» на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ», вміст сірки суттєво менший, ніж регламентовано у названих стандартах. Про це свідчать дані, наведені у таблиці, та гістограми на рис. 1 і 2.

Для наочності подальшого аналізу скористаємося результатами статистичної оцінки розподілів вмісту хімічних елементів, вуглецевого еквіваленту, $S_{\text{евт}}$, відношення C/Si у промислових партіях синтетичного сірого чавуну (таблиця), який виплавляють на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ»² для виготовлення гальмових колодок типу «М» і

Статистичні параметри розподілів вмісту (%) хімічних елементів, вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$, ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$, відношення C/Si у чавунах промислових партій, що виплавляють на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ» для виробництва гальмових колодок типу «М» і фрикційного «клина Ханіна» [3–4, 6]

Параметри розподілу	C	Si	Mn	P	S	$C_{\text{екв}}$	$S_{\text{евт}}$	C/Si
Середні значення	<u>2,89</u> 2,95	<u>1,17</u> 1,33	<u>0,87</u> 0,84	<u>0,7</u> 0,03	<u>0,03</u> 0,03	<u>0,04</u> 0,04	<u>0,48</u> 0,52	<u>2,47</u> 2,22
Мінімальні	<u>2,76</u> 2,75	<u>1,04</u> 1,08	<u>0,68</u> 0,69	<u>0,61</u> 0,02	<u>0,02</u> 0,02	<u>3,33</u> 3,08	<u>0,41</u> 0,40	<u>2,33</u> 1,88
Максимальні	<u>3,04</u> 3,06	<u>1,20</u> 1,55	<u>0,96</u> 1,01	<u>0,83</u> 0,06	<u>0,04</u> 0,04	<u>3,64</u> 3,52	<u>0,55</u> 0,60	<u>2,80</u> 2,54

Примітки: 1. В чисельнику наведені дані щодо гальмової колодки типу «М» для рухомого складу залізничі; в знаменнику – «клина Ханіна». 2. Значення $C_{\text{екв}}$ розраховані за формулою (3).

² Автори висловлюють вдячність доктору технічних наук, професору Д. М. Тогобіцькій за допомогу в проведенні статистичної обробки і аналізу масивів експериментальних даних.

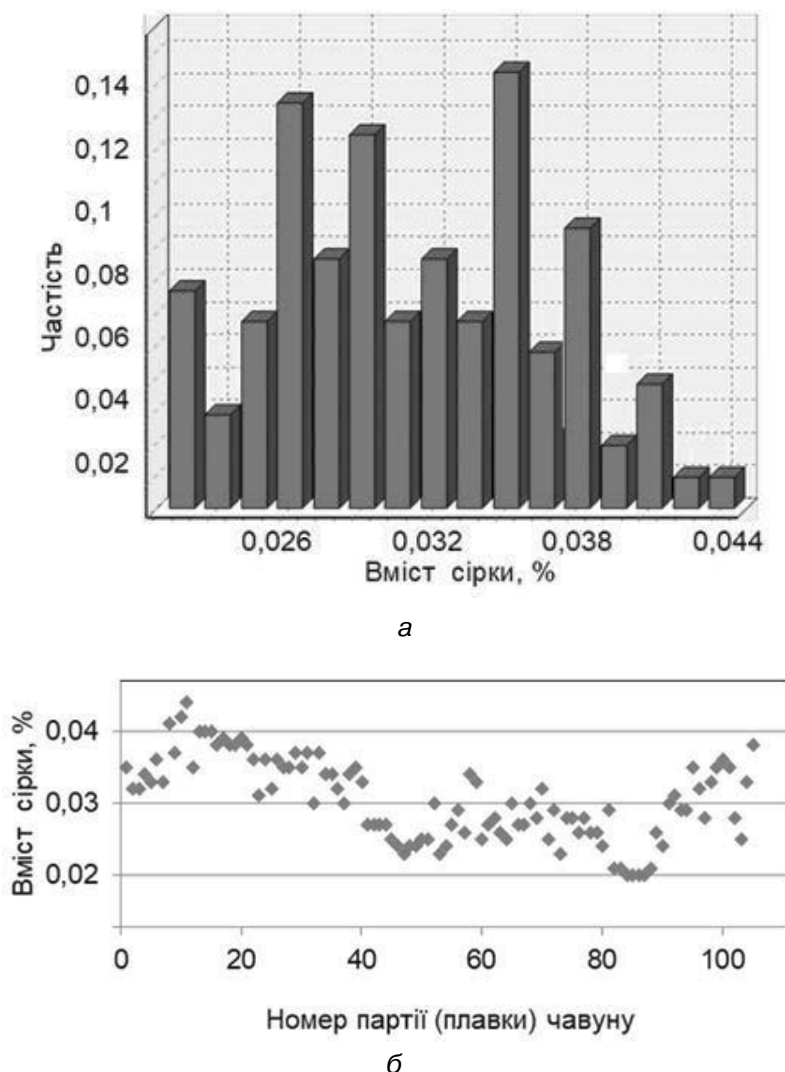


Рис. 1. Гістограма (а) розподілу вмісту сірки та її величини (б) в партіях чавуну, з якого виготовлені гальмові колодки типу «М»

клину фрикційного («клину Ханіна»). Ступінь евтектичності чавуну розраховували за формулою $S_{\text{евт}} = \frac{C + 0,15 \text{ Si} - 2,1}{2,2 - 0,15 \text{ Si}}$ [10], де вміст C та Si представлено у відсотках. Величини вмісту Si відповідають вимогам стандарту, оскільки допуск на вміст сірки складає $\pm 0,2 \%$. Обсяг вибірки плавок чавуну для гальмових колодок 105, «клину Ханіна» 107.

В доповнення до інформації відносно $S_{\text{евт}} = \frac{C + 0,15 \text{ Si} - 2,1}{2,2 - 0,15 \text{ Si}}$ середніх, мінімальних

і максимальних величин вмісту хімічних елементів у складі чавуну та значень $C_{\text{екв}}$, $S_{\text{евт}}$, C/Si , наведеної в таблиці, зазначимо, що величини коефіцієнтів варіації для хімічних елементів C , Si , Mn , P , S та складають: для чавуну СЧ350 «клину Ханіна» – 0,017; 0,070; 0,079; 0,210; 0,160; 0,018; для чавуну гальмових колодок – 0,016; 0,027; 0,058; 0,059; 0,185; 0,014. Коефіцієнти варіації усіх змінних мають однаковий порядок значень.

Наведені в таблиці дані надають можливість оцінити наскільки у промисловій практиці заводу ТОВ «М-ЛИТ» при виробництві зазначеної продукції використовують

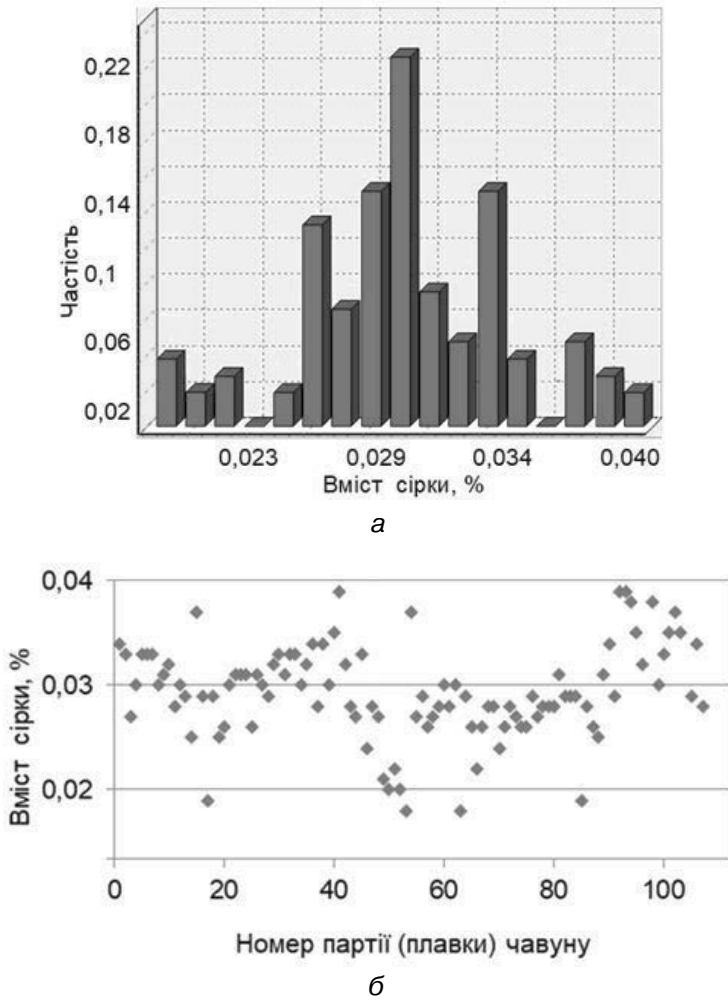


Рис. 2. Гістограма (а) розподілу вмісту сірки та її величини (б) в партіях чавуну, з якого виготовлені деталі «клин Ханіна»

діапазони розкиду вмісту хімічних елементів у складі чавуну порівняно з їх діапазонами, регламентованими стандартами. Тобто зіставити діапазони вмісту хімічних елементів та діапазони вуглецевого еквівалента від мінімальних до максимальних.

В наших роботах [3, 6] показано, що діапазони варіювання хімічних елементів у складі чавуну гальмових колодок значно менші, ніж аналогічні діапазони, регламентовані у відповідному стандарті. При подальшому зіставленні діапазонів вуглецевого еквівалента чавуну для виготовлення «клина Ханіна» розрахунки виконано за формулою (3). При цьому в розрахунках максимально можливих значень $C_{\text{екв, max}}$ вміст Mn прийнято мінімальним, оскільки згідно з формулою (3) його вплив на негативний, а вміст сірки у чавуні гальмових колодок прийнято $S = 0,20$ %. В розрахунках вміст $S = 0,05$ %. В розрахунках $C_{\text{ект}}$ «клина Ханіна» вважали, що $P = 0,2$ %, $S = 0,12$ %. Такий самий підхід було застосовано нами і в роботі [11], але при використанні іншої формули для розрахунку вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну.

Розрахунки за формулою (3) мінімальних і максимальних величин вуглецевого еквівалента чавуну гальмових колодок типу «М» призвели до наступних результатів. При використанні даних таблиці щодо вмісту хімічних елементів у складі чавуну отримали, %: $C_{\text{екв, min}} = 3,27$ і $C_{\text{екв, max}} = 3,67$. Ці величини майже співпадають із значеннями в таблиці: $C_{\text{екв, min}} = 3,33$ і $C_{\text{екв, max}} = 3,64$. В разі використання в розрахунках за формулою (3) величини вмісту хімічних елементів, регламентованих у ГОСТ 30249-97, отримали, %: $C_{\text{екв, min}} = 3,04$ і $C_{\text{екв, max}} = 4,04$. Таким чином підтверджено висновок, висловлений у наших статтях [3, 6–7, 11 та ін.], що діапазони розкиду величин вмісту

хімічних елементів і вуглецевого еквівалента чавуну, з якого виготовляють гальмові колодки залізничного транспорту на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ», значно вужчі, ніж діапазони вмісту C, Si, Mn, P, S, регламентовані названим стандартом. Підкреслимо, що зазначене свідчить про стабільність технології виплавлення чавуну вказаного сортаменту в 3-хтонній тигельній індукційній печі цього заводу.

Особливо відзначимо, що в умовах промислового виробництва стабільність технології виготовлення і властивостей ливарних виробів характеризують не тільки і не стільки середні величини вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну, ступеня його евтектичності, відношення C/Si, а й більшою мірою дисперсії, коефіцієнти варіації, діапазони розкиду цих величин (таблиця). Термін «стабільність» стосовно технології виробництва і якості синтетичного чавуну використовується в даній роботі та нашій статті [6] з позицій енциклопедичного трактування цього поняття. А саме, як здатність технології виплавлення чавуну і виготовлення з нього литва функціонувати, не змінюючи свій стан, зберігати і проявляти свої властивості, перебувати у рівновазі, підтримуючи сталість у часі.

Діапазони коливань вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ синтетичного сірого чавуну, виплавленого на заводі ТОВ «М-ЛИТ» для виготовлення литвом гальмових колодок і фрикційного «клин Ханіна», показані в таблиці. Наведені дані проілюстровано гістограмами на рис. 3 і 4, які побудовані на базі первинного масиву даних. Згідно з розрахунками за формулою (3) при використанні величин вмісту C, Si, Mn, P, S у чавуні, наведених у цій таблиці, отримали: $C_{\text{екв min}} = 3,07$ і $C_{\text{екв max}} = 3,54$. Значення співпадають з тими, що в таблиці. При розрахунках із застосуванням вмісту хімічних елементів у складі чавуну відповідно до рекомендованого в ДСТУ 8833:2019 маємо, %: $C_{\text{екв min}} = 3,34$ і $C_{\text{екв max}} = 3,54$. Зіставлення цих величин з попередньо визначеними показує різницю між величинами $C_{\text{екв min}}$. Обумовлено таке тим, що в промислових партіях чавуну вміст вуглецю ($C = 2,75$ %) менший, ніж рекомендований в ДСТУ 8833:2019. Схоже, що в промислових умовах ливарного заводу складно дотримуватися діапазону $C = 2,9...3,0$ %, який рекомендовано у цьому ДСТУ. Зауважимо, що хімічний склад чавуну, регламентований цим стандартом, є рекомендованим.

В статті [12], присвяченій впливу кремнію і марганцю у складі сірого чавуну, акцентовано увагу на тому, що навіть в межах регламентованого стандартом вмісту хімічних елементів можливі різні їх співвідношення, відповідно різні властивості й службові характеристики чавунних виробів. До цієї тези доречно додати, що різні співвідношення вмісту основних хімічних елементів у складі чавуну можливі й при незмінному вуглецевому еквіваленті. Аналіз формули (3), наприклад, свідчить, що

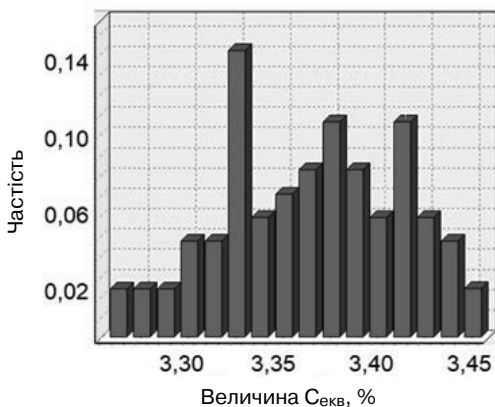


Рис. 3. Гістограма розподілу величин вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$, розрахованого за формулою (3), в партіях чавуну СЧ350, з якого виготовлені деталі «клин Ханіна»

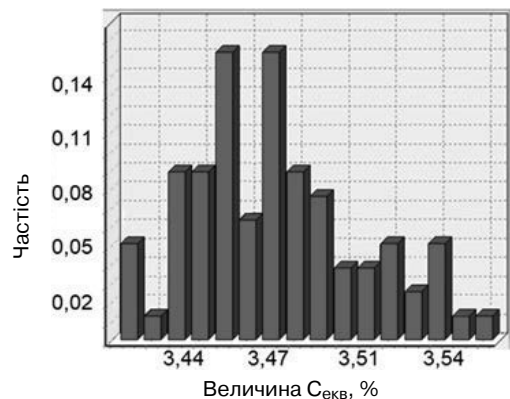


Рис. 4. Гістограма розподілу величин вуглецевого еквівалента, розрахованого за формулою $C_{\text{екв}} = C + 0,3 (Si + P)$, в партіях чавуну, з якого виготовлені гальмові колодки типу «М»

для підтримання на одному рівні величини $C_{\text{екв}}$ простіше за все при зменшенні вмісту будь-якого елемента у складі чавуну, окрім марганцю, збільшувати вміст вуглецю. Судячи з величини коефіцієнтів при змінних у рівнянні (3), де $G_C^{Si} = 0,3$; $G_C^P = 0,33$; $G_C^{Mn} = 0,15$; $G_C^S = 0,26$, найбільш впливовими на $C_{\text{екв}}$, окрім сірки, є фосфор і кремній. Але можливості регулювання вуглецевого еквівалента чавуну, наприклад гальмових колодок «М», зміною вмісту кремнію і фосфору у складі чавуну обмежено, оскільки вміст цих елементів у складі чавуну регламентовано вузькими діапазонами у стандарті, %: $Si = 0,7 \dots 1,0$; $P = 0,4 \dots 0,9$. Зокрема збільшення вмісту Si від мінімального значення $Si = 0,7$ % до максимального $Si = 1,0$ %, тобто на $0,3$ %, змінює $C_{\text{екв}}$ чавуну на $0,09$ %. Для збереження $C_{\text{екв}}$ незмінним в цьому випадку треба вміст вуглецю у складі чавуну зменшити на ці $0,09$ %. Для регламентованого стандартом вмісту вуглецю це не критично. Але за такої корекції хімічного складу чавуну зміниться й дуже суттєво відношення C/Si , на що треба реагувати. Таким чином можна вважати, що саме з цієї причини відношення C/Si використовують в практиці ливарного виробництва як додатковий до $C_{\text{екв}}$ вельми чутливий індикатор характеру кристалізації чавуну і формування структури та властивостей ливарних виробів. У статті [13] зазначено, що оптимальне відношення C/Si знижує вірогідність виникнення відбілу у чавуні, стимулюючи його кристалізацію за стабільною схемою, а не метастабільною, при якій в структурі формується цементит.

Відносно низьке значення коефіцієнта $G_C^{Mn} = 0,015$ і знак мінус перед Mn в рівнянні (3) свідчать, що з підвищенням вмісту марганцю вуглецевий еквівалент чавуну зменшується, але залежність ця слабка. В той же час відомо, що регулюванням відношення Mn/Si можна впливати на формування структури сірого чавуну і його властивості. В статті [12] показано, що «відношення Mn/Si в межах $0,75 \dots 1,0$ забезпечує сприятливу структуру чавуну з пластинчастим графітом і підвищену стійкість під час експлуатації в умовах високих температур товстостінних ливарних виробів, зокрема слябінгових виливниць». При виробництві гальмових колодок з чавуну, в якому вміст марганцю і вміст кремнію складають (%) $Mn = 0,4 \dots 0,9$, а кремній $Si = 0,7 \dots 1,0$, маємо відношення $G_C^{Mn} = 0,015$, $Mn_{\text{max}}/Si_{\text{max}} = 0,9$; $Mn_{\text{min}}/Si_{\text{max}} = 0,4$; $Mn_{\text{max}}/Si_{\text{min}} = 1,29$. Тобто можливий діапазон розкиду значень відношення Mn/Si значно ширший, ніж $0,75 \dots 1,0$, який рекомендовано в роботі [12].

Зменшення вмісту сірки у чавуні, що, як відомо, позитивно впливає на якість ливарної продукції, зменшує $C_{\text{екв}}$. При зміні вмісту сірки у чавуні з $0,20$ до $0,05$ відсотків вуглецевий еквівалент при розрахунках його за формулою (3) зменшується на $C_{\text{екв}} = 0,26 (0,20 - 0,05) \approx 0,039$ %.

В класичній літературі, а саме в довіднику [14] зазначено, що «вуглець і кремній є найважливішими елементами, які визначають структуру і властивості сірого чавуну». Гістограми розподілу вмісту кремнію і фосфору в промислових партіях чавуну, з якого на заводі ТОВ «М-ЛИТ» вироблено литвом «клин Ханіна» для рухомого складу залізниці, представлені на рис. 5 і 6. Аналогічні гістограми щодо розподілу вмісту фосфору в синтетичному чавуні промислових партій гальмових колодок наведено на рис. 1 і 2 у нашій статті [6]. В цій роботі співставленням гістограм показано, що видалення помилкових значень з масиву заводських даних розподілу щодо вмісту фосфору в промислових партіях чавуну суттєво наближає гістограму до класичного «нормального» розподілу Гаусса. Ці елементи визначають також положення вуглецевого еквівалента чавуну по відношенню до евтектики [14].

Фосфор впливає на $C_{\text{екв}}$ аналогічно кремнію. Такі твердження відображено у формулах для розрахунку вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$, %:

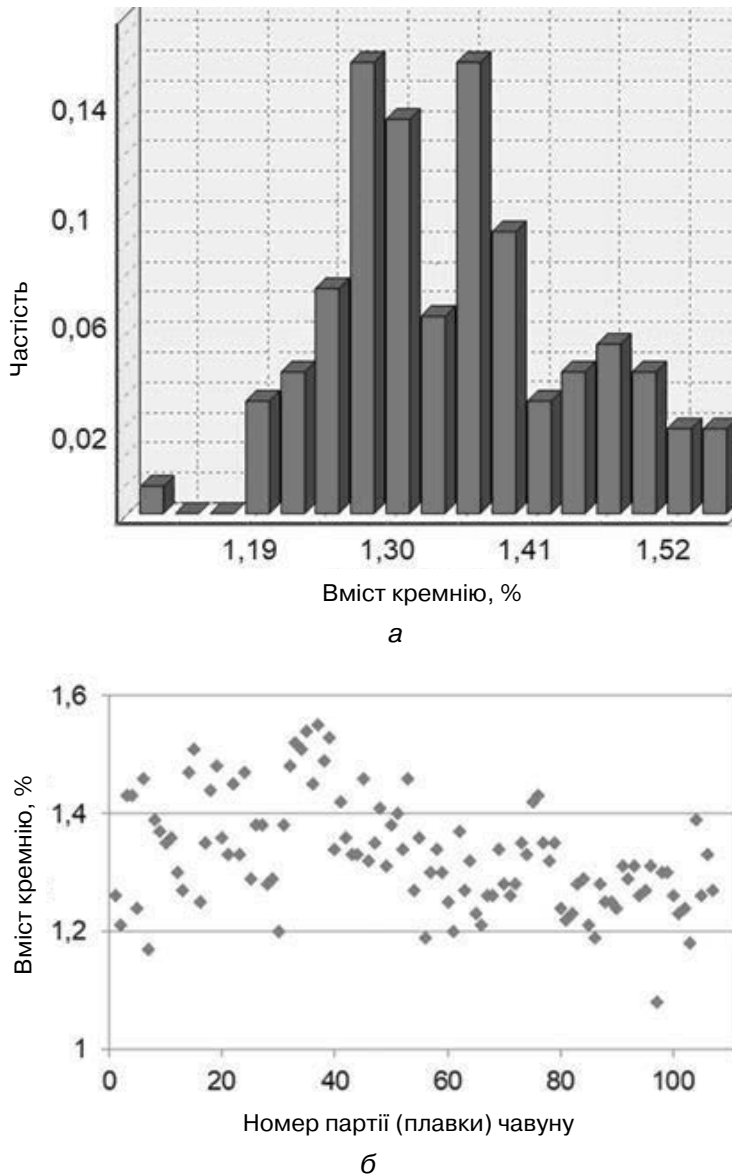


Рис. 5. Гістограма (а) розподілу вмісту кремнію та його величин (б) в партіях чавуну СЧ350, з якого виготовлені деталі «клин Ханіна»

$$C_{\text{екв}} = C + 0,3 (\text{Si} + \text{P}); \quad (5)$$

$$S_{\text{евт}} = C / [4,26 - 0,3(\text{Si} + \text{P})]. \quad (6)$$

Вочевидь, що формула (5) являє собою спрощений варіант формули (3), а формула (6) зовнішньо відрізняється від формули (7), наведеної в книзі [10]:

$$S_{\text{евт}} = \frac{C + 0,15 \text{Si} - 2,1}{2,2 - 0,15 \text{Si}} \quad (7)$$

У формулі (7), як і в інших, позначення Si та C представляють вміст цих елементів у відсотках в хімічному складі чавуну. Відповідно до середніх значень величин

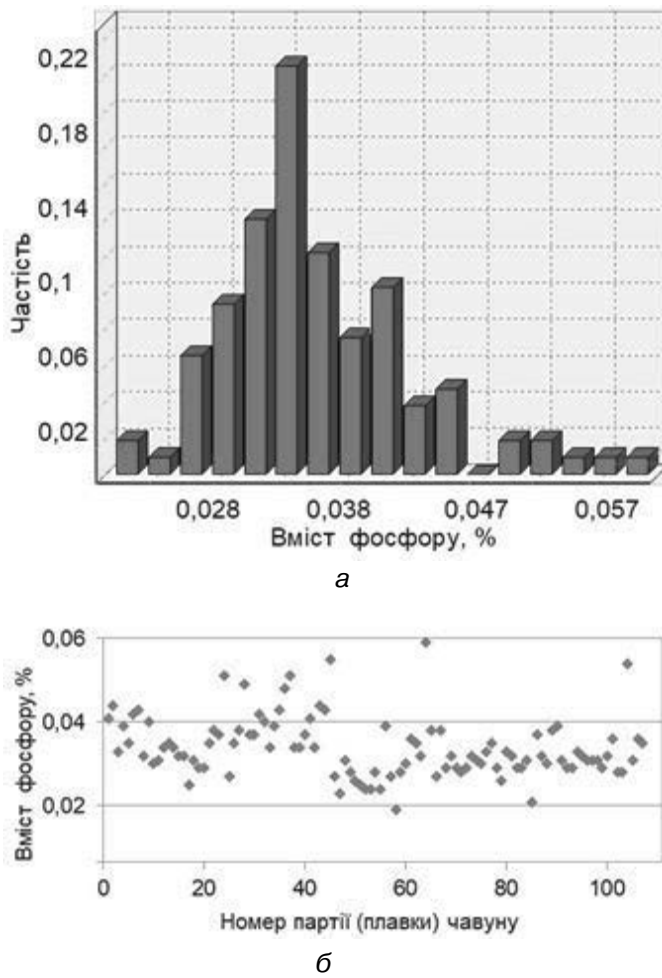


Рис. 6. Гістограма (а) розподілу вмісту фосфору та його величин (б) в партіях чавуну СЧ350, з якого виготовлені деталі «клин Ханіна»

вмісту Si , C , P у чавуні гальмових колодок, що наведені у таблиці, маємо при розрахунках за формулою (6) $S_{\text{евт}} = 0,78$, за формулою (7) – $S_{\text{евт}} = 0,48$. Відповідно до загальноприйнятих суджень, чавун гальмових колодок, результати досліджень якого представлені у таблиці, відноситься до доєвтектичного типу. В довіднику [14, с. 17] зазначено, що при розрахунках $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ за формулами (5) і (6) чавун характеризується як доєвтектичний при $C_{\text{екв}} < 4,26$ і $S_{\text{евт}} < 1$. Це «у багатьох випадках визначає важливі властивості чавуну і ще раз підтверджує значення вмісту C і Si у його складі. Саме тому структурні діаграми будуються найчастіше за цими елементами».

Доречно відмітити, що в дослідженнях властивостей і експлуатаційних характеристик чавуну формули (5) і (6) використовують найчастіше. Нерідко коефіцієнти в цих формулах дещо змінюють, що принципово не впливає на результати. Часто з формули (6) виключають вміст фосфору і представляють [15, с. 31] її у вигляді $S_{\text{евт}} = C/(4,25 - 0,312 Si)$. Оскільки ступінь евтектичності має вагоме значення для оцінки ливарних характеристик і механічних властивостей чавуну для підвищення точності розрахунку цього показника шляхом врахування концентрації інших хімічних елементів у чавуні і коефіцієнтів їх впливу, в книзі [16] наведено розгорнуту, порівняно з (6), формулу для $S_{\text{евт}}$, а саме:

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

При цьому формула, запропонована для розрахунку вуглецевого еквівалента, має вигляд:

$$C_{\text{ввт}} = C + 0,3 Si + 0,33 P + 0,45 - 0,03 Mn.$$

Підкреслимо, що в цих рівняннях та інших формулах для визначення $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{ввт}}$ коефіцієнти еквівалентності перед значеннями концентрації хімічних елементів у складі чавуну приблизно однакові.

В книзі [16] та інших літературних джерелах зазначається, що ступінь евтектичності $S_{\text{ввт}}$ чавуну розраховується відповідно з подвійною діаграмою стану Fe–C. Але при детальному вивченні структуроутворення чавуну бажано використовувати діаграму стану Fe–C–Si [15, с. 31].

Перелік наведених вище залежностей вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ чавуну від вмісту хімічних елементів у його складі не є вичерпним. Відомі формули, запропоновані для врахування, наприклад, азоту в чавуні, формули для визначення вуглецевого еквівалента алюмінієвих чавунів [14, с. 23, с. 94] тощо.

В темі, що розглядається, необхідно торкнутися питання експрес-контролю хімічного складу і вуглецевого еквівалента чавуну в промислових умовах. В довіднику [14, с. 229] зазначено, що визначення вуглецевого еквівалента термографічним методом виконується за кривою охолодження чавуну, на якій фіксуються температури ліквідусу і солідусу чи інтервалу між цими температурами. Універсальних формул, які відображають залежності $C_{\text{екв}}$ від цих температур, немає, оскільки вони суттєво залежать від технології виплавлення чавунів, їх хімічного складу, інших факторів плавки та лиття. Результати досліджень і удосконалення термографічного аналізу залізовуглецевих сплавів за кривими охолодження зразків, тобто за температурами ліквідус і солідус, виконаних у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів (ФТІМС) представлено у статті [17]. Запропоновані у цій роботі методи і засоби експрес-контролю температури і хімічного складу чавунів по ходу плавки зменшують тривалість та вартість контролю та підвищують його експресність в 1,5...4,0 рази.

На завершення зазначимо, що наведений вище аналіз виконано в основному під кутом зору розширення використання наукових напрацювань в промисловому виробництві литва відповідального призначення [13, 18]. Автори даної роботи вважають, що перспективним заходом у напрямі покращення якості гальмових колодок та «клину Ханіна» для залізничного транспорту, які виробляють з синтетичного сірого чавуну, є прискорення реалізації на практиці термічного деривативного аналізу, що дозволяє експресно і всебічно оцінювати показники його хімічного складу і властивостей [19, 20].

Висновки

1. Для розрахунків вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{ввт}}$ чавунів і сталей розроблені різні формули з метою оцінки властивостей, зварюваності, експлуатаційних та інших характеристик виробів з цих металів, залежно від їх призначення. Результати досліджень ливарних виробів промислових партій, а саме гальмових колодок типу «М» і «клину Ханіна» для залізничного транспорту, засвідчили, що величини вуглецевого еквівалента чавунів, розраховані за різними формулами, приблизно однакові.

2. Запропоновані в літературних джерелах формули для розрахунку ступеня евтектичності $C_{\text{ввт}}$ також дещо різняться, але, як і формули для розрахунку $C_{\text{екв}}$, однаково відображають вплив вмісту вуглецю, кремнію, фосфору, інших хімічних елементів у складі чавуну на ці показники.

3. Величини $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{ввт}}$, розраховані за різними формулами, можуть бути однаковими за різних співвідношеннях вмісту C, Si, Mn, P, S тощо у складі чавуну навіть в межах, регламентованих стандартами діапазонів вмісту хімічних елементів у його складі.

4. За оцінки залежності властивостей і експлуатаційних характеристик металовиробів з чавунного литва першочергове місце належить безпосередньо

саме вмісту регламентованих стандартами хімічних елементів. Величини $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{екв}}$, відношення C/Si , як специфічні показники, що узагальнюють особливі риси і розкривають можливості хімічного складу чавуну та технології його виробництва, доцільно використовувати в ролі допоміжних аргументів та інформації, корисних стосовно до вирішення конкретних задач.

5. Результати досліджень засвідчили, що в промислових партіях синтетичного сірого чавуну, який виплавляють в індукційних печах для виготовлення гальмових колодок типу «М» і «клину Ханіна» рухомого складу залізничного транспорту, вміст сірки і фосфору забезпечується на рівні не більше 0,05 і 0,06 відсотків. Ці результати надають підстави для постановки питання щодо посилення вимог до вмісту S і P у складі чавуну відповідального призначення в стандартах та іншій нормативній документації.

6. Діапазон розкиду вмісту вуглецю, марганцю, сірки, фосфору у чавуні промислових партій гальмових колодок типу «М» і «клину Ханіна», виплавленого в індукційних тигельних печах, суттєво менші, ніж регламентовані стандартами на цю продукцію. Зазначене є одним із вагомих факторів, який свідчить про «стабільність» технології виробництва і якості синтетичного сірого чавуну в аспекті визначення цього поняття, наданого в нашій роботі [6].

7. Вміст хімічних елементів у чавуні та розраховані на їх базі вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності, відношення C/Si , інші показники, що прямо чи опосередковано характеризують формування структури, технологічні (ливарні), механічні, експлуатаційні властивості виробів з чавуну доцільно розглядати як випадкові величини у вірогіднісному аспекті. Відповідно регулювання хімічного складу чавуну в процесі плавки слід здійснювати з огляду на такий підхід.

Список літератури

- 1 Тэн Э.Б., Коль О.А. Зависимость отбела чугуна от его углеродного эквивалента // Изв. вуз. Черная металлургия. 2020. № 1. С. 57–62.
- 2 Баженов В.Е., Пикунов М.В. Определение углеродного эквивалента чугунов с помощью программы thermo-calc // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 11. С. 20–23.
- 3 Сиренко Е.А. Характеристика химического состава и свойств синтетического чугуна для тормозных колодок локомотивов // Труды 29-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия-2021. Беларусь». Минск. 17–19 ноября 2021. С. 140–143.
- 4 Мазур В. Л., Шинский О. И., Клименко С. И., Сиренко Е. А., Попов Е. С. Развитие производства синтетического чугуна для деталей железнодорожного подвижного состава. Труды 29-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия-2021. Беларусь». Минск. 17–19 ноября 2021. С. 17–20.
- 5 Сіренко К. А. Коефіцієнти тертя між колесами залізничного транспорту і гальмовими колодками з чавуну та композиційного матеріалу: порівняльний аналіз. Метал та лиття України (Met. lit'e Ukr.). 2022. Vol. 30. № 1 (328). С. 91–100. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.091>
- 6 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.
- 7 Попов Е. С., Шинский О. Н. Анализ показателей качества колодок тормозных чугунных и композиционных для железнодорожного подвижного состава. Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 27–37.

- 8 Мазур В. Л., Найдек В. Л., Попов Є. С. Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці // *Met. lit'e Ukr.* 2021. Vol. 29. № 2 (325). С. 30–39.
- 9 Попов Є. С., Мазур В. Л., Шинський О. Й. Удосконалення ливарного виробництва в Україні. Литво. Металургія. 2021. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво-2021». Запоріжжя. 2021. С. 160–164.
- 10 Смирнов А. Н., Лейрих И. В. Производство отливок из чугуна. Монография. Донецк. Норд-Пресс. 2005. 245 с.
- 11 Сиренко К. А. Характеристика твердості чавунних гальмових колодок залізничного транспорту / *Met. lit'e Ukr.* 2022. Vol. 30. № 3 (330). С. 98–101.
- 12 Лоза А. В., Чигарев В. В., Шишкин В. В., Рассохин Д. А. О влиянии кремния и марганца на свойства серого чугуна и стойкость крупных слябинговых изложниц с бандажами. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2011. 2 (23). С. 238–244.
- 13 Дёмин Д. А. Исследование прочности чугуна с пластинчатым графитом в факторном пространстве «углерод (C) – углеродный эквивалент ($C_{\text{екв}}$)» в диапазонах $C_{\text{екв}} = (3,425-3,563) \%$ $C_{\text{екв}} = (4,214-4,372) \%$ // *Технологічний аудит та резерви виробництва*, 2017. № 1/1 (33).
- 14 Справочник по чугунному литью. Под ред. Н.Г. Гиршовича / Л.: Машиностроение. 1978. 758 с.
- 15 Справочник по машиностроительным материалам. Под ред. Г. И. Погодина-Алексеева // М.: Машиностроение. 1959. Том. 3, 360 с.
- 16 Воздвиженский В. М., Грачев В. А., Спасский В. В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. М.: Машиностроение. 1984. 432 с.
- 17 Жуков Л. Ф., Гончаров А. Л., Петренко Д. А., Захарченко Э. В., Сиренко Е. А. Инновационные технологии экспрессного контроля температуры и химического состава железоуглеродистых сплавов. Металл и литье Украины, 2018. № 11–12 (306–307). С. 43–53.
- 18 Сиренко Е. А. Особенности литейного чугуна для тормозных колодок железнодорожного транспорта. Литье и металлургия, 2022. № 1. С. 43–48. <http://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-43-48>.
- 19 Zakharchenko, E. New Computer Method of Derivative Thermal Express Analysis of Cast Iron for Operational Prediction of Quality of Melts and Castings / E. Zakharchenko, E. Sirenko, A. Goncharov, A. Bogdan // *Journal of Casting and Materials Engineering*, 2019. Vol. 3. No. 2, pp. 31–42. <http://dx.doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.31>.
- 20 Мазур В.Л., Сиренко К.А. Економічні та екологічні аспекти використання гальмових колодок з чавуну чи композиційного матеріалу для залізничного транспорту / *Процеси лиття*, 2022. № 3 (149). С. 45–62.

Надійшла 20.01. 2022

References

- 1 Ten, E.B., Kol', O.A. (2020). Dependence of cast iron chill from its carbon equivalent. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, vol. 63, no. 1, pp. 57–62, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-1-57-62> [in Russian].
- 2 Bazhenov, V.E., Pikunov, M.V. (2011). Determining the carbon equivalent of cast iron by the thermo-calc program. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*, no. 11, pp. 20–23 [in Russian].
- 3 Sirenko, E. A. (2021) Characteristics of the chemical composition and properties of synthetic cast iron for brake pads of locomotives // *Proceedings of the 29th International Scientific and Technical Conference «Foundry production and Metallurgy-2021. Belarus»*. Minsk, 17–19 November, pp. 140–143 [in Russian].

- 4 Mazur, V. L. (2021) Development of synthetic cast iron production for railway rolling parts / V.L. Mazur, O.I. Shinsky, E.A. Klimenko, E.A. Sirenko, E.S. Popov // Proceedings of the 29th International Scientific and Technical Conference «Foundry production and Metallurgy-2021. Belarus». Minsk, 17–19 November, pp. 17–20 [in Russian].
- 5 Sirenko, K. A. Coefficients of friction between railway wheels and brake pads made of cast iron and composite material: a comparative analysis // Met. lit'e Ukr. 2022. Vol. 30, no 1 (328), pp. 91–100. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.091> [in Ukrainian].
- 6 Sirenko, K. A., Mazur, V. L. (2021) Assessment of stability of chemical composition and mechanical properties of industrial lots of synthetic iron / Casting processes, no. 4 (146), pp. 66–75 [in Ukrainian].
- 7 Popov, E.S., Shinsky, O.I. (2021). Analysis of quality indicators of brake and composite pads for railway rolling stock. Casting and metallurgy, no. 1, pp. 27–37 [in Russian].
- 8 Mazur, V. L., Naidek, V. L., Popov, Ye.S. (2021). Comparison of cast-iron and composite brake pads with cast-iron inserts for rolling stock of railways. Metal and Casting of Ukraine, vol. 29, no. 2 (325), pp. 30–39 [in Ukrainian].
- 9 Popov, E. S., Mazur, V. L., Shinskyi, O. Y. (2021) Improvement of foundry production in Ukraine. Litvo. Metallurgy. 2021. Materials of the XVII International Scientific and Practical Conference «Casting-2021». Zaporizhzhia. pp. 160–164 [in Ukrainian].
- 10 Smirnov, A. N., Leirikh, I.V. (2005) Production of cast iron castings. Monograph. Donetsk: Nord-Press, 245 p. [in Russian].
- 11 Sirenko, K. A. (2022) Characteristics of hardness of iron brake shoes of railway transport / Met. lit'e Ukr. vol. 30, no. 3 (330), pp. [in Ukrainian].
- 12 12. Loza, A. V. (2011) On the influence of silicon and manganese on the properties of gray cast iron and the durability of large slab molds with bandages. Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical sciences, vol. 2 (23), pp. 238–244 [in Russian].
- 13 Demin, D. A., Vine A. V., Chigarev V. V., Shishkin V. V., Rassokhin D. A. (2017). Strength analysis of lamellar graphite cast iron in the “carbon (C) – carbon equivalent (Ceq)” factor space in the range of C = (3.425–3.563) % and Ceq = (4.214–4.372) %. Technology audit and production reserves, vol. 1, no. 1 (33), doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.9317> [in Russian].
- 14 Handbook of iron casting. Ed. N.G. Girshovich / L.: Mashinostroenie. 1978. 758 p. [in Russian].
- 15 Handbook of engineering materials. Ed. G.I. Pogodina-Alekseeva // M.: Mashinostroyeniye 1959, vol. 3, 360 p. [in Russian].
- 16 Vozdvizhensky, V.M., Grachev V.A., Spassky V.V. Casting alloys and the technology of their melting in mechanical engineering // M.: Mashinostroenie. 1984. 432 p. [in Russian].
- 17 Zhukov, L.F. (2018) Innovative technologies of express control of ferrous-carbon alloys temperature and chemical composition / L.F. Zhukov, A.L. Goncharov, D.A. Petrenko, E.V. Zakharchenko, K.A. Sirenko // Met. lit'e Ukr, vol. 11–12 (306–307), pp. 43–53 [in Russian].
- 18 Sirenko, K.A. (2022) Features of cast iron for railway brake pads // Foundry production and metallurgy. no.1, pp. 43–48 [in Russian] <http://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-43-48>.
- 19 Zakharchenko E., Sirenko E., Goncharov A., Bogdan A. (2019) New Computer Method of Derivative Thermal Express Analysis of Cast Iron for Operational Prediction of Quality of Melts and Castings // Journal of Casting and Materials Engineering, vol. 3, no. 2, pp. 31–42. <http://dx.doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.31>.
- 20 Mazur, V. L., Sirenko, K. A. (2022) Economic and ecological aspects of using brake pads made of cast iron or composite material for railway transport. Casting processes, no. 3 (149), pp. 54–62. [in Ukrainian].

Received 20.01.2023

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

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

DEFINITION OF CARBON EQUIVALENT AND DEGREE OF EUTECTICITY OF CAST IRON IN FOUNDRY PRODUCTION

The issues related to the essence of the concepts of carbon equivalent, an indicator of the degree of eutecticity and the ratio of carbon content to silicon content for characterizing the chemical composition and properties of gray cast iron were analyzed. The results of studies of the carbon equivalent value, the degree of eutecticity and the C/Si ratio of the chemical composition of synthetic cast iron, which is used for the manufacture of brake pads and the «Khanin wedge» of railway rolling stock, are presented. Examples of different approaches and formulas for determining the limits and methods of using the carbon equivalent of the chemical composition of cast iron to characterize the weldability of steels, coefficient of friction, wear, other operational indicators of cast iron brake pads, and evaluation of the quality of cast iron as a whole are given and analyzed. Within the standards-regulated ranges of the content of chemical elements in cast iron, the value of its carbon equivalent in individual smelting batches of products can differ significantly (by 30 %). With certain ratios of the main elements in the chemical composition of cast iron, the values of the carbon equivalent can be the same, but the mechanisms of crystallization of cast iron and its properties do not coincide. The parameters of the distribution of the content of carbon, silicon, manganese, phosphorus, sulfur, carbon equivalent, and the degree of eutecticity in cast iron C4350, from which the friction «Khanin wedge» for railway rolling stock is made, were analyzed. Cleaning the factory arrays of indicators of chemical composition, hardness, carbon equivalent, degree of eutecticity of cast irons intended for the production of brake pads and the friction «Khanin wedge» from gross erroneous values practically did not affect the general characteristics of the statistical analysis, which indicates the reliability of the results. It is shown that when smelting in induction crucible furnaces gray synthetic cast iron intended for the production of brake pads and the «Khanin wedge», the ranges of variation in the content of C, Si, Mn, P, S are much narrower than those regulated by the standards for these foundry products. The fundamental possibility of introducing appropriate clarifications to the requirements of the standards regarding the content of chemical elements in synthetic gray cast iron intended for the production of brake pads of the «M» type and the friction «Khanin wedge» for railway rolling stock was noted, in particular, reducing the sulfur content to 0,05 % to increase stability of its quality.

Keywords: cast iron, chemical composition, carbon equivalent, degree of eutecticity, properties, castings, brake pads, operational characteristics.