

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ТВЕРДІННЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 31, 2023, № 2 (333), 42-50

<https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.042>

УДК 621.74.669.13.017

К.А. Сіренко¹, мол. наук. співр., e-mail: thermoexp.metal@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

В.Л. Мазур¹, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., гол. наук. співр., e-mail: prof.vlm@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8970-5389>

Д.О. Дереча^{1,2}, канд. ф.-м. наук, ст. наук. співр.¹, зав. лаб.², e-mail: dderecha@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2442-3759>

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

²Інститут магнетизму НАН України та МОН України (Київ, Україна)

Залежність твердості та інших властивостей сірого чавуну від його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності

Проаналізовано хімічний склад, вуглецевий еквівалент та властивості виливків з нелегованих та низьколегованих сірих чавунів з пластинчастим графітом різних марок від СЧ100 до СЧА400 згідно з ДСТУ 8833:2019. На такий чавун є посилання в технічних умовах на гальмові колодки з композиційних матеріалів (гумосуміші), зокрема для виготовлення чавунних вставок. З чавуну СЧ350 виготовляють також інші вироби для залізничного транспорту, наприклад фрикційний «клин Ханіна». Показано, що в промислових партіях «клину Ханіна», виплавленого з чавуну СЧ350, твердість не корелювала ні з вмістом елементів у хімічному складі чавуну, ні з вуглецевим еквівалентом внаслідок вузького діапазону його величин навіть в межах чавуну однієї марки. Відповідно до ДСТУ 8833:2019 при підвищенні вуглецевого еквівалента в можливому регламентованому діапазоні величин (%) від 3,03 до 4,54 твердість за Брінеллем НВ монотонно зменшується приблизно в 1,54... 1,57, а коефіцієнт теплопровідності збільшується майже в півтора рази. Зменшення вмісту сірки в хімічному складі від 0,20 до 0,05 % чавуну марки СЧ350 суттєво скорочує діапазон розкиду вуглецевого еквівалента. Шляхом статистичних випробувань за методом Монте-Карло визначено параметри (середні значення, середні квадратичні відхилення і коефіцієнти варіації) вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності хімічного складу чавунів з пластинчастим графітом за марками від СЧ100 до СЧА400. Показано наявність значного розкиду величин вуглецевого еквівалента хімічного складу, твердості, коефіцієнта теплопровідності, міцності, густини, модуля пружності, лінійної усадки, теплоємності, коефіцієнта лінійного розширення чавунів з пластинчастим графітом за марками від СЧ100 до СЧА400. Рекомендовано із вказаного переліку марок чавуну згідно з ДСТУ 8833:2019 визначити і регламентувати в технічних умовах на гальмові композиційні колодки конкретну марку чавуну, призначеного для виготовлення вставок у таких колодках.

Ключові слова: чавун, хімічний склад, вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності, властивості, литво, гальмові колодки.

В металургії, машинобудуванні, ливарному виробництві, інших галузях промисловості поширено використання вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності чавуну для характеристики його хімічного складу і властивостей ливарних виробів. Аналізу залежності механічних властивостей і експлуатаційних характеристик деталей, виготовлених литтям, присвячено багато досліджень, результати яких опубліковано в монографіях, статтях, тезах доповідей, патентах тощо [1-15 та ін.]. Проте враховуючи певні досягнення у розв'язанні наукових і технологічних проблем в цій темі, слід зазначити, що не всі задачі

ще глибоко вивчені і, головне, багато прогресивних рішень не доведено до виробничої практики. Тому дослідження у напрямі розширення використання вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну і навіть сталі, особливо легованого металу, залишаються вельми актуальними. Як зазначено в наших роботах [8, 15], незважаючи на широке розповсюдження вуглецевого еквівалента в якості узагальненого показника хімічного складу чавуну, а також властивостей чавунних виробів, дефініція вуглецевого еквівалента, особливості та межі його використання в дослідженнях і промисловій практиці потребують подальшого

детального наукового обґрунтування. Підкреслимо, що дослідження в цій темі мають бути націлені, в першу чергу, на реалізації наукових результатів у промисловості для покращення якості металопродукції.

В останні роки, у зв'язку з корінною модернізацією ливарного виробництва на багатьох підприємствах і поширенням виплавки чавуну в електричних індукційних печах замість використання вагранок [16-17], посилилися можливості тонкого регулювання його хімічного складу. Відповідно активізувався інтерес науковців і виробників до використання вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну для характеристики якості ливарних виробів. Показовим прикладом у цьому може бути практика регламентації в стандартах, технічних умовах, іншій нормативно-технологічній документації хімічного складу матеріалів для виготовлення ливарних виробів відповідального призначення, зокрема чавунних гальмових колодок для залізничного транспорту. В стандартах на цю продукцію детально регламентується не тільки вміст хімічних елементів у складі чавуну, а й мікроструктура чавунних гальмових колодок. Тобто в стандартах на чавунні гальмові колодки відповідно до законодавства України вимога щодо обов'язкової регламентації хімічного складу матеріалу колодок прискіпливо виконується.

Згідно з ГОСТ 2.114-95 хімічний склад будь-яких виробів має бути детально визначений в технічних умовах на виробі. Підкреслимо, що вимоги до матеріалу виробів, а саме до його хімічного складу, можуть бути встановлені в інших, ніж технічні умови, конструкторських документах, зокрема в кресленнях деталей, а в технічних умовах (ТУ) дано посилення на ці конструкторські документи.

Невизначеність в технічних умовах хімічного складу матеріалу виробів, в тому числі й матеріалу композиційних гальмових колодок, є грубим порушенням законодавства і ставить такі ТУ до розгляду нелегітимних з усіма негативними наслідками. Але такі приклади у сфері, що розглядається, зустрічаються. Так в Технічних умовах на композиційні гальмові колодки з чавунними вставками ТУ У 23.9-35046274-053:2015 «Колодка гальмова композиційна з чавунними вставками для залізничного транспорту» і ТУ У 302-35046274-059:2016 «Колодка гальмова композиційна з чавунними вставками для моторвагонного рухомого складу» не регламентовано хімічний склад композиту та навіть не регламентовано хімічний склад чавуну, з якого мають виготовлятися чавунні вставки для колодок. В зазначених ТУ надано лише посилення на міждержавний стандарт ГОСТ 1412-85 «Чугун з пластинчастим графітом для отливок», відповідно до вимог якого повинні виготовлятися ці чавунні вставки.

Зразу ж зауважимо, що нині в Україні діє Національний стандарт України ДСТУ 8833:2019 «Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом (загальні технічні умови)», який включає марки чавуну з ГОСТ 1412-85 та додатково вводить ще одну марку чавуну СЧА400. В зазначених стандартах у марці чавуну перші букви СЧ означають сірий чавун. Цифрова позначка вказує на величину мінімальної міцності під

час розтягування σ_B , Н/мм² згідно з ДСТУ 8833:2019, і кгс/мм² відповідно до ГОСТ 1412-85. Марка чавуну СЧА означає його мікролегуювання азотом.

Підкреслимо, що у вищезазначених Технічних умовах на композиційні колодки з чавунними вставками не вказано конкретно з чавуну якої марки мають виготовлятися ці вставки. Притому, що в ГОСТ 1412-85 представлено дев'ять марок чавуну від СЧ10 (СЧ100) до СЧ35 (СЧ350). В ДСТУ 8833:2019 — сім марок чавуну від СЧ100 до СЧА400. І чавун кожної марки має свій конкретний хімічний склад, свої особливі мікроструктуру, механічні та інші властивості. На превеликий жаль, нікому невідомо, який хімічний склад і мікроструктуру повинен мати чавун цих вставок відповідно до ТУ на композиційні колодки з чавунними вставками. Невідомо також, яким чином і ким контролюються показники властивостей чавунних вставок. Все зазначене призводить до різних коефіцієнтів тертя і зносостійкості чавунних вставок в композиційних колодках і загалом до неконтрольованої якості композиційних з чавунними вставками колодок. Нестабільності механічних властивостей, коефіцієнта тертя, зносостійкості композиційних гальмових колодок є недоліком, позбавитися якого можна і необхідно шляхом регламентації відсоткового вмісту компонентів композиційного матеріалу, їх хімічного складу в технічних умовах на колодки, а також хімічного складу та властивостей чавунних вставок. Розглянемо це питання на прикладі аналізу загальних технічних вимог до виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом.

Хімічний склад чавуну з пластинчастим графітом, рекомендований в ДСТУ 8833:2019, представлено в табл. 1.

Як бачимо, марки чавуну, що наведені в табл. 1, найбільшою мірою відрізняються вмістом вуглецю і кремнію. Водночас з переходом від СЧ100 до СЧА400 масові частки С і Si у складі чавуну зменшуються, частка Mn (%) збільшується від 0,5...0,8 у чавунах СЧ100, СЧ150, СЧА400 до 0,7...1,0 у СЧ200, СЧ300 і до 0,7...1,1 у чавуні СЧ350. Границі (не більше ніж) вмісту фосфору майже не змінюються. Допустиме значення (не більше ніж) сірки зменшується при підвищенні мінімальної границі міцності чавуну в литому стані. Зазначена інформація є обмеженою і недостатньою для ширших висновків щодо зв'язку твердості та інших показників властивостей чавуну з масовими частками елементів у його складі. Тому для посилення інформативності даних табл. 1 проаналізуємо зв'язки фізичних і механічних властивостей чавуну з вуглецевим еквівалентом і ступенем евтектичності його хімічного складу.

Вуглецевий еквівалент $C_{\text{екв}}$ хімічного складу чавуну розраховували за формулою:

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

використовуючи наведені в табл. 1 дані щодо масової частки (%) елементів у чавуні. При визначенні максимальної величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв max}}$ вміст Mn приймали мінімальним, оскільки його вплив на величину $C_{\text{екв}}$ згідно з формулою (1) негативний.

Таблиця 1

Рекомендований хімічний склад чавуну з пластинчастим графітом відповідно до ДСТУ 8833:2019

Марка чавуну	Масова частка елемента, %				
	C	Si	Mn	P	S
				не більше ніж	
СЧ100	3,5...3,7	2,2...2,6	0,5...0,8	0,3	0,15
СЧ150	3,5...3,7	2,0...2,4	0,5...0,8	0,2	0,15
СЧ200	3,3...3,5	1,4...2,4	0,7...1,0	0,2	0,15
СЧ250	3,2...3,4	1,4...2,2	0,7...1,0	0,2	0,15
СЧ300	3,0...3,2	1,3...1,9	0,7...1,0	0,2	0,12
СЧ350	2,9...3,0	1,2...1,5	0,7...1,1	0,2	0,12
СЧА400	2,7...2,9	1,3...1,6	0,5...0,8	0,1	0,10

При визначенні мінімальної величини $C_{\text{екв max}}$ вміст Mn приймали максимальним. Формула (1) була застосована як така, що часто використовується в подібних дослідженнях. В наших роботах [5, 8, 15] показано, що усі відомі формули для розрахунку $C_{\text{екв}}$ чавунів дають близькі результати.

Ступінь евтектичності чавуну, яка значною мірою визначає ливарні характеристики чавуну і механічні властивості чавунних виробів [1, 3, 13, 18] та ін., розраховували за формулою (2):

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

де C, Si, P — відсотковий вміст вуглецю, кремнію, фосфору в чавуні.

В нашій роботі [15] розглянуті різні формули для розрахунку $S_{\text{евт}}$ чавуну. Показано, що коефіцієнти перед значеннями вмісту хімічних елементів у складі чавуну в усіх відомих формулах приблизно однакові.

Результати розрахунків величини вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну з пластинчастим графітом різних марок представлені в табл. 2 разом із показниками їх твердості і коефіцієнта теплопровідності. Твердість є одним із індикаторів фрикційних характеристик чавуну [18-19] та ін., зокрема чавунних гальмових колодок залізничного транспорту. Значення коефіцієнта теплопровідності чавунів в табл. 2 вказують на те, що чавунні вставки застосовують для покращення відводу тепла в гальмових колодках з композиційного матеріалу. Залеж-

Таблиця 2

Показники вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$, ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$, твердості НВ, коефіцієнта теплопровідності чавунів з пластинчастим графітом згідно з ДСТУ 8833:2019

Марка чавуну	СЧА400	СЧ350	СЧ300	СЧ250	СЧ200	СЧ150	СЧ100
$C_{\text{екв min}}, \%$	3,03	3,19	3,34	3,58	3,68	4,09	4,18
$C_{\text{екв max}}, \%$	3,36	3,44	3,76	4,06	4,22	4,45	4,54
Твердість НВ, не більш 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
$\bar{C}_{\text{екв}}, \%$	3,20	3,22	3,33	3,90	3,94	4,14	4,25
$\sigma_{C_{\text{екв}}}, \%$	0,098	0,052	0,099	0,103	0,099	0,103	0,105
$Va_{C_{\text{екв}}}, \%$	0,031	0,016	0,030	0,026	0,025	0,029	0,025
$\bar{S}_{\text{евт}}$	0,741	0,759	0,813	0,897	0,929	0,975	0,976
$\sigma_{S_{\text{евт}}}$	0,026	0,013	0,026	0,027	0,027	0,027	0,026
$Va_{S_{\text{евт}}}$	0,035	0,017	0,032	0,030	0,029	0,028	0,027

Примітка. Позначено: $\bar{C}_{\text{екв}}$, $\bar{S}_{\text{евт}}$ — середні величини вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавунів, розрахованих ймовірнісним методом Монте-Карло; $\sigma_{C_{\text{екв}}}$, $\sigma_{S_{\text{евт}}}$ — середні квадратичні відхилення; $Va_{C_{\text{екв}}}$, $Va_{S_{\text{евт}}}$ — коефіцієнти варіації цих показників, $Va_{C_{\text{екв}}} = \sigma_{C_{\text{екв}}} / \bar{C}_{\text{екв}}$, $Va_{S_{\text{евт}}} = \sigma_{S_{\text{евт}}} / \bar{S}_{\text{евт}}$. Кількість варіантів розрахунків методом Монте-Карло кожного показника складала 1000. В чисельнику — твердість НВ чавуну при товщині виливка не більше 50 мм; в знаменнику — при товщині не більше 30 мм.

ність коефіцієнта теплопровідності чавуну від його хімічного складу має вельми суттєве значення при виборі марки чавуну для колодок.

В наших роботах [8, 15] на підставі матеріалів досліджень хімічного складу і властивостей чавуну, з якого виготовляють гальмові колодки, рекомендовано для посилення інформативності показників якості зазначених та інших ливарних виробів використовувати ймовірнісний підхід, метод Монте-Карло і статистичні параметри розподілів величин вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності. В табл. 2 наведено дані щодо середніх значень, середніх квадратичних відхилень і коефіцієнтів варіації величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавунів, хімічний склад яких наведено в табл. 1. Розрахунки виконали з використанням методу Монте-Карло і припущенням, що розподіл вмісту кожного елемента в межах допустимого діапазону його величин відповідає нормальному закону Гаусса.

Результати, наведені в табл. 2, свідчать, що максимальні величини і мінімальні величини вуглецевого еквівалента, розрахованого за формулою (1), для чавунів різних марок суттєво різняться. Наприклад, для чавуну СЧ100 маємо $C_{\text{екв max}} = 4,543$, для СЧ350 — $C_{\text{екв max}} = 3,4422$ і $C_{\text{екв min}} = 3,1922$ відсотків. Отримані величини свідчать, що діапазон можливих значень вуглецевого еквівалента чавунів, передбачених у ДСТУ 8833:2019 і ГОСТ 1412-85, згідно з їх хімічним складом неприпустимо широкий (від 3,1922 до 4,543). За такої умови твердість НВ чавуну СЧ100 при товщині 50 мм в стінках виливків має складати не більше 156, чавуну СЧ350 — не більше 229. Тобто діапазон можливих і допустимих технічними умовами величин твердості НВ чавунних вставок в гальмових колодках з композиційного матеріалу (гумосуміші) дуже широкий. Водночас для чавуну СЧ350 коефіцієнт теплопровідності λ дорівнює 42 Вт/(м·К), для СЧ100 — 60 Вт/(м·К) (табл. 2).

Таким чином, в Технічних умовах на гальмові колодки композиційні з чавунними вставками апріорі передбачена можливість і допустимість високої нестабільності фізичних і механічних властивостей та експлуатаційних характеристик (твердості, коефіцієнта тертя, зносостійкості) чавунних вставок і, відповідно, й зазначених колодок в цілому. Акцентуємо увагу, що твердість і коефіцієнти теплопровідності, зокрема чавунів СЧ100 і СЧ350, різняться приблизно у півтора рази (табл. 2). При цьому нагадаємо, що чавунні вставки у матеріалі композиційних гальмових колодок передбачені для покращення відводу тепла від колодок з метою підвищення зносостійкості й стабільності коефіцієнтів тертя колодок по робочій поверхні коліс під час гальмування рухомих засобів.

Аналіз даних, наведених у табл. 2, призводить ще до ряду додаткових висновків і коментарів. Так, у виробничій практиці ливарні вироби з чавуну, в тому числі чавунні гальмові колодки чи чавунні вставки до гальмових колодок з композиційного матеріалу (гумосуміші), мають конкретний, однозначний вміст кожного елемента у хімічному складі. Тому вуглецевий еквівалент хімічного складу чавуну, з якого виготов-

лено конкретні вироби, деталі, визначається однією конкретною величиною. Аналогічний висновок відноситься й до ступеня евтектичності чавуну. Визначені методами статистики діапазони розкиду вмісту хімічних елементів у складі чавуну, його хімічного еквівалента чи ступеня евтектичності характеризують стабільність цих показників в межах партії (партій) однакових ливарних виробів [4-5, 14]. Стандарти, зокрема ГОСТ 1412-85 та ДСТУ 8833:2019, (табл. 1), і технічні умови, в яких регламентовано допустимі діапазони, максимальні і мінімальні величини вмісту хімічних елементів у чавуні, фактично визначають і діапазони та мінімальні, максимальні значення вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності чавуну (табл. 2). Але реально в практичній діяльності ливарних підприємств вміст кожного хімічного елемента у складі чавуну є величиною випадковою і незалежно від величини вмісту інших елементів в межах діапазонів, окреслених в стандартах [5]. Саме тому реальні статистичні показники і діапазони розкиду величин $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ дають результати їх розрахунку при ймовірнісному підході до вибору величини вмісту кожного елемента з визначених стандартом діапазонів (табл. 2). Прийняття в першому наближенні гіпотези, що розподіл вмісту елементів підпорядковується закону Гаусса, слід вважати правомірним, оскільки ніяких застережень з цього приводу в стандартах на продукцію, що розглядається, не наведено.

Згідно з даними табл. 2 середні значення $\bar{C}_{\text{екв}}$, вуглецевого еквівалента, розраховані методом Монте-Карло, суворо кажучи, не співпадають з серединою діапазонів від $C_{\text{екв min}}$ до $C_{\text{екв max}}$. Але ця різниця незначна. Якщо вважати, що можливий діапазон розкиду $C_{\text{екв}}$ дорівнює шести величинам середнього квадратичного відхилення $6\sigma_{C_{\text{екв}}}$, то цей діапазон $C_{\text{екв}}$ дещо ширший, ніж різниця між $C_{\text{екв max}}$ і $C_{\text{екв min}}$. Найменший коефіцієнт варіації $Va_{C_{\text{екв}}}$ має чавун СЧ350. До речі, чавун марки СЧ350 згідно із ДСТУ 8833:2019 передбачає менший діапазон твердості НВ (від 229 до 270), ніж чавуни марок СЧ300, СЧ250, СЧ200. Гістограми розподілу величин вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну марок СЧ100 і СЧ350, розрахованих з використанням методу Монте-Карло для умов випадкових значень вмісту C, Si, Mn, P, S в межах діапазонів цих елементів у складі чавуну, представлені на рис. 1. Гістограми на цьому рисунку наочно ілюструють результати розрахунків, наведених у табл. 2.

На рис. 2 представлено залежності твердості НВ і коефіцієнтів теплопровідності λ , за 20 °С, Вт/(м · К) чавунів марок СЧ100...СЧ400 від їх вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$, розрахованого за даними хімічного складу пластинчастого чавуну згідно з ДСТУ 8833:2019 (табл. 1 і 2). Як бачимо, при збільшенні величини $C_{\text{екв}}$ твердість НВ чавуну монотонно зменшується. В той же час важливо зазначити, що однакову твердість можуть мати виливки з однією товщиною стінки, але при суттєвій різниці між мінімальною $C_{\text{екв min}}$ і максимальною $C_{\text{екв max}}$ величинами вуглецевого еквівалента. Інакше кажучи, твердість НВ чавунів може суттєво різнитися при однаковому вуглецевому еквіваленті їх хімічного складу. Ці дані корелюють з висновками

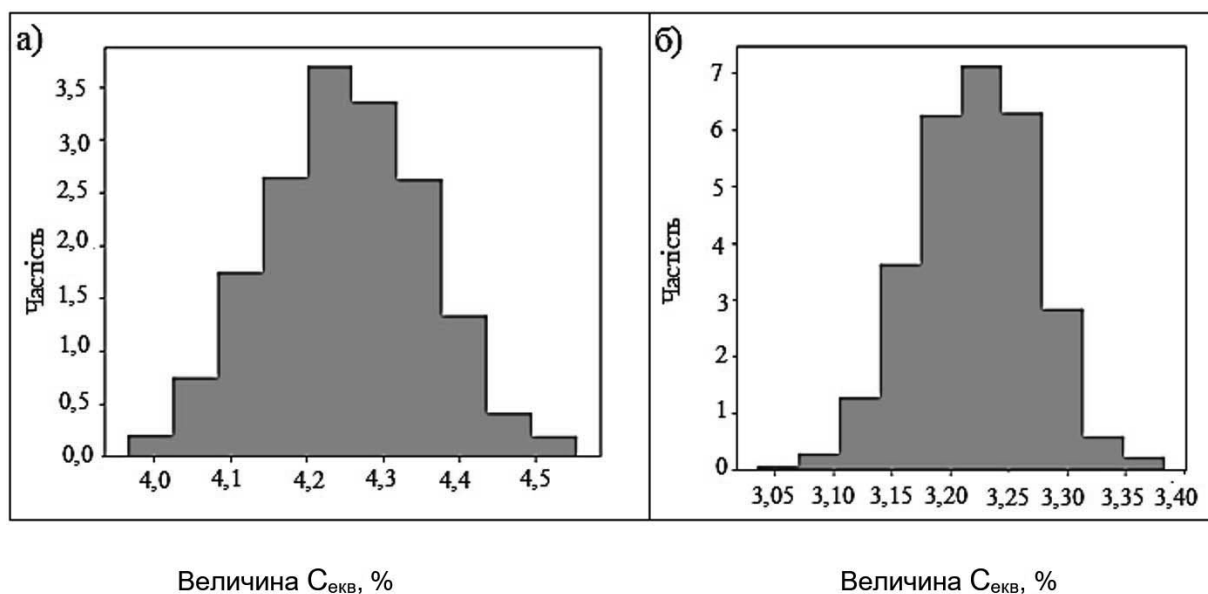


Рис. 1. Гістограми розподілу величин вуглецевого еквівалента у чавунах марок СЧ100 і СЧ350, розраховані методом Монте-Карло для вмісту хімічних елементів у чавунах, передбачених у ГОСТ 1412-85 та ДСТУ 8833:2019 (табл. 1). Кількість варіантів хімічного складу кожного чавуну при розрахунках параметрів їх розподілів дорівнювало 1000. Позначено: а — СЧ100; б — СЧ350

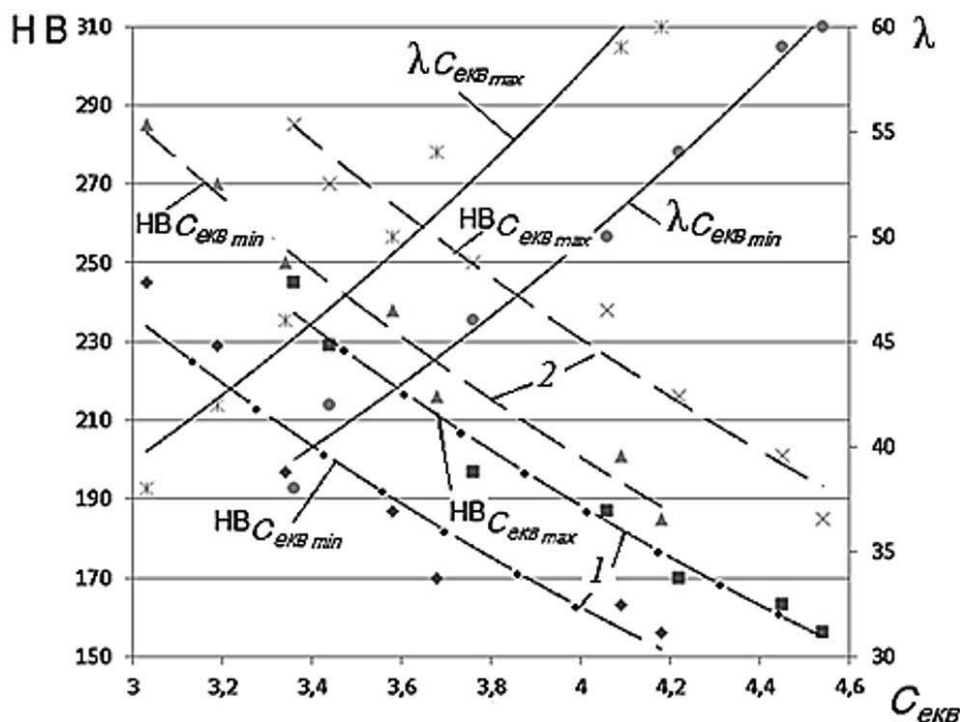


Рис. 2. Залежність твердості HB і коефіцієнтів теплопровідності λ , за 20 °С, Вт/(м · К) чавунів СЧ100...СЧА400 від їх вуглецевого еквівалента C_{eq} . Позначено: $C_{eq\ max}$ — при максимальному значенні вуглецевого еквівалента; $C_{eq\ min}$ — при мінімальному; цифрою 1 — величини твердості HB при товщині стінки виливка не більше 50 мм; цифрою 2 — при товщині не більше 30 мм; $\blacklozenge$ і $\blacktriangle$ — твердість HB відносно $C_{eq\ min}$; $\blacksquare$ і $\times$ — відносно $C_{eq\ max}$; $\times$ і $\bullet$ — λ відносно $C_{eq\ max}$ і $C_{eq\ min}$

досліджень, наведених в наших статтях [5, 8, 15 та ін.] та проаналізованих публікаціях інших авторів, в яких стверджується, що у вузькому діапазоні розкиду величин C_{eq} залежність твердості HB від C_{eq} , як правило, не проявляється. Але відповідно до ДСТУ 8833:2019 тенденція зменшення твердості HB чавуну при збільшенні вуглецевого еквівалента його хімічного складу (рис. 2) може мати місце (див. рис. 3 у статті [8] з посиланням на автора дисертації [20]).

На рис. 2 показано, що коефіцієнт теплопровідності λ збільшується при підвищенні величини вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну. Вище було зазначено, що за рахунок оснащення чавунними вставками гальмових композиційних колодок їх виробники намагаються знизити температуру в зоні контакту гальмових колодок з колесами транспортних засобів. Криві $\lambda(C_{eq})$ на рис. 2 показують, що теплопровідність чавуну з пластинчастим графітом сильно залежить від його вуглецевого еквівалента.

В статтях [17, 12] запропонована теза, що умовно названий «сумарним» коефіцієнт тертя і відповідно «сумарна» сила тертя визначаються за формулами:

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_k S_k + \varphi_{\text{ч}} S_{\text{ч}}, T_{\Sigma} = \varphi_{\Sigma} \cdot P = (\varphi_k S_k + \varphi_{\text{ч}} S_{\text{ч}}) \cdot P, \quad (3)$$

де φ_k , $\varphi_{\text{ч}}$, φ_{Σ} — коефіцієнти тертя; S_k і $S_{\text{ч}}$ — відносні частки площі композиційного матеріалу і площі чавуну в композиційній колодці з чавунними вставками, S_{Σ} — сумарна площа тертя гальмової колодки по поверхні колеса, $S_{\Sigma} = S_k + S_{\text{ч}} = 1$; T_{Σ} — сумарна сила тертя колодки по колесу; P — сила тиску колодки на колесо.

Очевидно, що в граничних випадках, коли $S_{\text{ч}} = 1$ і $S_k = 0$ має місце повністю чавунна колодка, при $S_{\text{ч}} = 0$ і $S_k = 1$ колодка повністю з композиційного матеріалу. Таким чином, повністю чавунна і повністю композиційна колодки є граничними випадками стану композиційних колодок з чавунними вставками. Така трактовка концепту «композиційні колодки з чавунними вставками» призводить до висновку, що хімічний склад, мікроструктура і властивості чавунних вставок в зазначених колодках мають бути ідентичними цим показникам повністю чавунних колодок типу «М», «С», «Ф» відповідно до ГОСТ 30249-97 чи іншого подібного. Для покращання експлуатаційних характеристик композиційних колодок з чавунними вставками можна рекомендувати виготовляти вставки, як й повністю чавунні колодки, з високоміцного чавуну з кулеподібним (кулястим) графітом в його мікроструктурі.

В технічній літературі публікацій щодо результатів досліджень ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ чавунів на їх властивості значно менше, ніж статей, присвячених вуглецевому еквіваленту чавунів. По відношенню до чавунів з пластинчастим графітом і чавунів, призна-

чених для виготовлення ливарних виробів, поширена точка зору, що ступінь евтектичності чавунів визначає їх механічні властивості [1, 18]. Результати статистичних досліджень ступеня евтектичності чавунів з пластинчастим графітом марок СЧ100...СЧА400 згідно з ДСТУ 8833:2019, виконаних із застосуванням ймовірнісного підходу, представлені в табл. 2. Показано, що при хімічному складі чавунів зазначених марок (табл. 1) середні значення ступеня їх евтектичності знаходяться в діапазоні 0,741...0,976, середнє квадратичне відхилення дорівнює 0,026...0,027 для чавунів усіх марок, окрім СЧ350. Коефіцієнт варіації — на тому ж рівні, як й коефіцієнт варіації вуглецевого еквівалента. При цьому середні значення ступеня евтектичності, як й величини вуглецевого еквівалента, зменшуються при переході від СЧ100 до СЧА400.

Гістограму розподілу величини ступеня евтектичності чавуну марки СЧ350 представлено на рис. 3. Зазначена гістограма в цілому подібна наведеним на рис. 1 гістограмам розподілу величин вуглецевого еквівалента. На рис. 4 показано залежності середніх значень величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавунів СЧ100...СЧА400 від границі їх міцності при розтягуванні.

Точки, наведені на рис. 4, засвідчили, що границя чавунів з пластинчастим графітом збільшується при зменшенні величин їх вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності. Наведені в таблицях і на рисунках дані щодо розподілу величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності хімічного складу чавунів з пластинчастим графітом надають інформацію, необхідну для вибору марки чавуну при виготовленні ливарної продукції відповідального призначення.

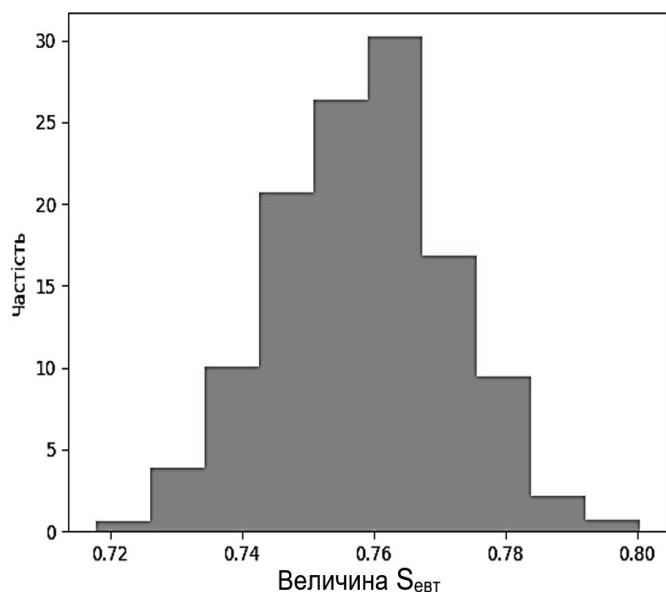


Рис. 3. Гістограма розподілу величини ступеня евтектичності чавуну марки СЧ350 згідно з ДСТУ 8833:2019, хімічний склад якого представлено у табл. 1. Кількість варіантів $S_{\text{евт}}$ при розрахунках ймовірнісним методом Монте-Карло дорівнювало 1000

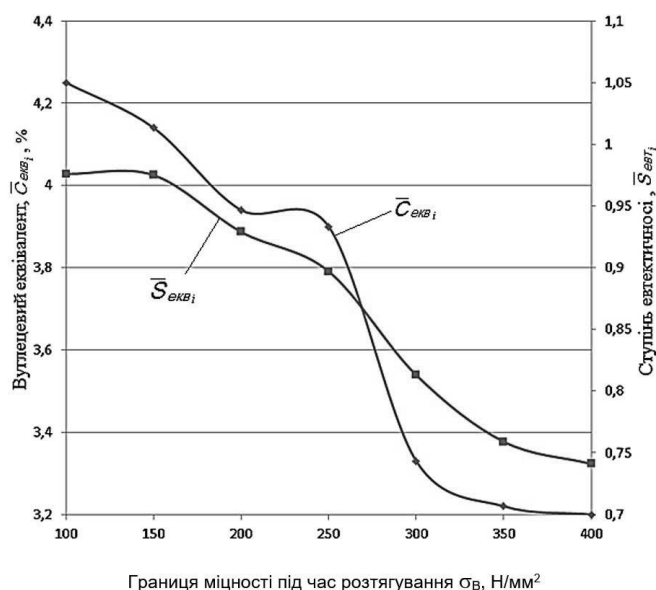


Рис. 4. Залежності середніх значень величин вуглецевого еквівалента $\bar{C}_{\text{екв}_i}$ і ступеня евтектичності $\bar{S}_{\text{евт}_i}$ чавунів з пластинчастим графітом (відповідно до ДСТУ 8833:2019) від границі їх міцності при розтягуванні

Висновки

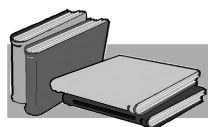
1. Вуглецевий еквівалент є наочним узагальнюючим показником хімічного складу і властивостей чавунів в умовах варіації в них вмісту хімічних елементів у порівняно широких діапазонах. Запропоновано методологію визначення величини цього показника. Рекомендовано розраховувати вуглецевий еквівалент хімічного складу чавунів за однією з поширених формул — методом Монте-Карло, використовуючи ймовірнісний підхід при врахуванні вмісту кожного елемента у сплаві.

2. Показано, що діапазони вмісту хімічних елементів у складі чавуну з пластинчастим графітом марки СЧ350 згідно з вимогами ДСТУ 8833:2019 забезпечують мінімальні варіації вуглецевого еквівалента серед чавунів інших марок. Зазначене повною мірою забезпечує підвищену стабільність властивостей виробів з чавуну марки СЧ350.

3. Принциповим недоліком технічних умов на гальмові композиційні колодки з чавунними вставками для залізничного транспорту, який зводить технічні умови на рівень нелегітимності, є відсутність регламентації вимог до відсоткового вмісту компонентів композиційної гумосуміші та їх хімічного складу, а та-

кож відсутність визначення і регламентації марки чавуну для виготовлення зазначених вставок. Показано, що посилення в технічних умовах на вимоги ГОСТ 1412-85 не забезпечує однозначності вибору чавуну конкретної марки для виготовлення чавунних колодок, при тому, що зазначені в ГОСТ 1412-85 і відповідно в ДСТУ 8833:2019 чавуни з переліку марок від СЧ100 до СЧ350 мають суттєво різні властивості. При удосконаленні технічних умов на ці гальмові колодки необхідно усунути зазначені вище недоліки.

4. Для забезпечення легітимності технічних умов на композиційні гальмові колодки з чавунними вставками для залізничного транспорту, а саме ТУ У 23.9-3504674-053:2015, ТУ У 30.2-35046274-059:2016 та інших подібних, необхідно регламентувати в них відсотковий вміст компонентів композиційного матеріалу (гумосуміші) та їх хімічний склад, а також хімічний склад, мікроструктуру, властивості чавунних вставок шляхом регламентації конкретної марки чавуну з переліку, наведеному в ДСТУ 8833:2019 (в ГОСТ 1412-85). Для покращення експлуатаційних характеристик гальмових композиційних колодок з чавунними вставками рекомендується вставки виготовляти з високоміцного чавуну з кулеподібним (кулястим) графітом в його мікроструктурі.

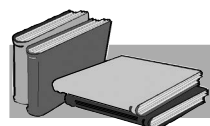


ЛІТЕРАТУРА

1. Справочник по чугуному литью. Под ред. Н.Г. Гиршовича. Л.: Машиностроение, 1978. 758 с.
2. Справочник по машиностроительным материалам. Под ред. Г.И. Погодина-Алексеева. Москва: Машиностроение. 1959. Том 3. 360 с.
3. Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. Москва: Машиностроение, 1984. 432 с.
4. Сиренко Е.А. Особенности литейного чугуна для тормозных колодок железнодорожного транспорта. *Литье и металлургия*. 2022. № 1. С. 43-48. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-43-48>
5. Сиренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових партій синтетичного чавуну. *Процеси лиття*. 2021. № 4 (146). С. 66-75.
6. 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.
7. Мазур В.Л., Найдек В.Л., Попов Е.С. Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці. *Метал та лиття України*. 2021. Том 29. № 2 (325). С. 80-89. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.080>
8. Сиренко К.А. Характеристика твердості чавунних гальмових колодок залізничного транспорту. *Метал та лиття України*. 2022. Том 30. № 3 (330). С. 96-101. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.096>
9. Демин Д.А. Исследование прочности чугуна с пластинчатым графитом в факторном пространстве «углерод (С) — углеродный эквивалент ($C_{\text{экв}}$)» в диапазонах $C = (3,425-3,563) \%$ и $C_{\text{экв}} = (4,214-4,372) \%$. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2017. Т. 1. №1 (33). С. 24-32. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.93178>
10. Тэн Э.Б., Коль О.А. Зависимость отбела чугуна от его углеродного эквивалента. *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2020. Т. 63. № 1. С. 57-62. DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-1-57-62>
11. Баженов В.Е., Пикунов М.В. Определение углеродного эквивалента чугунов с помощью программы thermo-calc. *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2011. № 11. С. 20-23.
12. Сиренко К.А. Коефіцієнти тертя між колесами залізничного транспорту і гальмовими колодками з чавуну та композиційного матеріалу: порівняльний аналіз. *Метал та лиття України*. 2022. Том 30. № 1 (328). С. 91-101. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.091>
13. Смирнов А.Н., Лейрих И.В. Производство отливок из чугуна. Монография. Донецк: Норд-Пресс, 2005. 245 с.
14. 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.

15. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Визначення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну в ливарному виробництві. *Процеси лиття*. 2023. № 1 (151). С. 20-34. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.020>
16. 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.
17. Мазур В.Л., Шинський О.Й., Клименко С.И., Сіренко 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.
18. 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 Иркутского гос. технич. университета*. 2017. Т. 21. № 11. С. 179-190. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-179-190>
19. Неижко И.Г., Найдек В.Л., Гаврилюк В.П. Тормозные колодки железнодорожного транспорта: монография. Киев: ФТИМС НАН Украины, 2009. 121 с.
20. Ольшевский А.А. Исследование тормозных колодок железнодорожных вагонов с целью повышения их эксплуатационных качеств. Автореферат дис. канд. наук. Днепропетровск, 1959. 11 с.

Надійшла 11.05.2023



REFERENCES

1. Girshovich, N.G. (Ed.) (1978). Handbook of iron casting. L.: Mashinostroenie, 758 p. [in Russian].
2. Pogodin-Alekseev, G.I. (Ed.) (1959). Handbook of engineering materials. Moscow: Mashinostroenie, vol. 3, 360 p. [in Russian].
3. Vozdvizhensky, V.M., Grachev, V.A., Spassky, V.V. (1984). Casting alloys and the technology of their melting in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie, 432 p. [in Russian].
4. Sirenko, E.A. (2022). Features of cast iron for railway brake pads. *Foundry production and metallurgy*, no. 1, pp. 43-48, doi: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-43-48> [in Russian]
5. 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].
6. Popov, E.S., Shinsky, O.I. (2021). Analysis of quality indicators of brake and composite pads for railway rolling stock. *Foundry production and metallurgy*, no. 1, pp. 27-37 [in Russian].
7. 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. 80-89, doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.080> [in Ukrainian].
8. Sirenko, K.A. (2022). Characteristics of hardness of cast-iron brake pads of railway transport. *Metal and Casting of Ukraine*, vol. 30, no. 3 (330), pp. 96-101, doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.096> [in Ukrainian].
9. Demin, D.A. (2017). Strength analysis of lamellar graphite cast iron in the "carbon (C) – carbon equivalent (C_{eq})" factor space in the range of $C = (3.425-3.563) \%$ and $C_{eq} = (4.214-4.372) \%$. *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 1, no. 1 (33), pp. 24-32, doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.93178> [in Russian].
10. 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].
11. 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].
12. Sirenko, K.A. (2022). Coefficients of friction between railway wheels and brake pads made of cast iron and composite material: a comparative analysis. *Metal and Casting of Ukraine*, vol. 30, no. 1 (328), pp. 91-101, doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.091> [in Ukrainian].
13. Smirnov, A.N., Leirikh, I.V. (2005). Production of cast iron castings. Monograph. Donetsk: Nord-Press, 245 p. [in Russian].
14. 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].
15. Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2023). Definition of carbon equivalent and degree of eutecticity of cast iron in foundry production. *Casting processes*, no. 1 (151), pp. 20-34, doi: <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.020> [in Ukrainian].
16. 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].
17. Mazur, V.L., Shinsky, O.I., Klimenko, S.I., Sirenko, E.A., Popov, E.S. (2021). Development of synthetic cast iron production for railway rolling parts. Proceedings of the 29th International Scientific and Technical Conference "Foundry production and Metallurgy-2021. Belarus". Minsk, 17-19 November, pp. 17-20 [in Russian].

18. Klimov, A.A., Struchkov, A.V., Bondarik, V.B., Ilyinsky, V.P., Domnin, S.V., Kirpichenko, V.P. (2017). Effect of railway brake pad composition and microstructure on tribological properties. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, vol. 21, no. 11, pp. 179-190, doi: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-179-190> [in Russian].
19. Neizhko, I.G., Naidek, V.L., Havrilyuk, V.P. (2009). Brake pads of railway transport. Monograph. Kyiv: PTIMA NAS of Ukraine, 121 p. [in Russian].
20. Olshevsky, A.A. (1959). Investigation of brake pads of railway cars in order to improve their performance. Extended abstract of candidate thesis. Dnepropetrovsk, 11 p. [in Russian].

Received 11.05.2023

Summary

K.A. Sirenko¹, Junior Researcher, e-mail: thermoexp.metal@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

V.L. Mazur¹, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.),
 Professor, Chief Researcher, e-mail: prof.vlm@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0001-8970-5389>

D.O. Derecha^{1,2}, PhD (Phys. & Math), Senior Research Scientist¹, Head of
 the Laboratory², e-mail: dderecha@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-2442-3759>

¹*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine
 (Kyiv, Ukraine)*

²*Institute of Magnetism NAS of Ukraine and MES of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

Dependence of hardness and other properties of gray iron on its carbon equivalent and degree of eutecticity

The chemical composition, carbon equivalent and properties of castings from unalloyed and low-alloyed gray irons with lamellar graphite of various grades from C4100 to C4A400 were analyzed in accordance with DSTU 8833:2019. There is a reference to such cast iron in the technical conditions for brake pads made of composite materials (rubber mixtures), in particular, for the production of cast iron inserts. Other products for railway transport are also made from cast iron C4350, for example, the friction "Khanin wedge". It is shown that in industrial batches of the "Khanin wedge", cast from cast iron C4350, the hardness did not correlate either with the content of elements in the chemical composition of the cast iron, or with the carbon equivalent due to the narrow range of its values even within the cast iron of the same grade. According to DSTU 8833:2019, with an increase in the carbon equivalent in the possible regulated range of values (%) from 3.03 to 4.54, the Brinell hardness of HB monotonically decreases by approximately 1.54...1.57, and the coefficient of thermal conductivity increases by almost one and a half times. Reducing the sulfur content in the chemical composition from 0.20 to 0.05 % of CH350 cast iron significantly reduces the range of dispersion of the carbon equivalent. The parameters (mean values, mean square deviations and coefficients of variation) of the carbon equivalent and the degree of eutecticity of the chemical composition of cast irons with lamellar graphite of brands from C4100 to C4A400 were determined by means of statistical tests using the Monte Carlo method. It is shown that due to the significant dispersion of the values of the carbon equivalent of the chemical composition, hardness, coefficient of thermal conductivity, strength, density, modulus of elasticity, linear shrinkage, heat capacity, coefficient of linear expansion of cast iron with lamellar graphite of grades from C4100 to C4A400 according to DSTU 8833:2019, it is necessary from the specified list grades of cast iron to determine and regulate in the technical conditions for composite brake pads a specific grade of cast iron intended for the manufacture of inserts in such pads.

Keywords

Cast iron, chemical composition, carbon equivalent, eutectic degree, properties, casting, brake pads.