

<https://doi.org/10.15407/plit2024.02.056>

УДК 621.74.669.13.017

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. співроб.;
e-mail: prof.vlm@ukr.net; ORCID 0000-0001-8970-5389

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

ОЦІНКА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВИЛИВКІВ ІЗ СІРОГО ЧАВУНУ З ПЛАСТИНЧАСТИМ ГРАФІТОМ

Показано, що одним із актуальних завдань у теорії й технології ливарного виробництва є наукове обґрунтування й реалізація в промисловій практиці неруйнівних способів контролю механічних і фізичних властивостей виливків із чавуну та сплавів. Проаналізовано публікації, у яких виявлено залежності теплопровідності ливарних виробів із чавуну з пластинчастим графітом від вмісту хімічних елементів у його хімічному складі від його вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності. Показано, що відомі емпіричні формули, які відображають залежності міцності й твердості виливків із чавуну з пластинчастим графітом від вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності не враховують імовірного характеру хімічного складу промислових плавок-партий ливарної продукції. Коефіцієнт теплопровідності прямо пропорційно залежить від цих показників хімічного складу чавуну та обернено пропорційно — від твердості виливків із чавуну. У технічній літературі не представлені формули, які відображають залежність теплопровідності чавуну від показників його хімічного складу. Показано, що навіть у межах марок чавунів із пластинчастим графітом згідно з ДСТУ 8833:2019 коефіцієнт їх теплопровідності може різнитися в ~ 1,5 рази. На основі інформації щодо хімічного складу й коефіцієнта теплопровідності чавуну з пластинчастим графітом, представленої в ДСТУ 8833:2019, визначено у ймовірному підході із застосуванням методу Монте-Карло розроблені формули, які відображають залежність коефіцієнта теплопровідності від вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності такого чавуну. Формули призначені для неруйнівного контролю та прогнозування теплопровідності виливків із сірого чавуну за даними ступеня евтектичності та вуглецевого еквівалента його хімічного складу й твердості.

Ключові слова: чавун, литво, хімічний склад, механічні властивості, теплопровідність, вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності.

Одним із найпоширеніших ливарних сплавів у чавунному литті є сірий чавун із пластинчастим графітом, який в обсязі цієї продукції складає ~ 80 % [1, с. 151]. ДСТУ 8833:2019 на виливки з нелегованих та низьколегованих сірих чавунів із пластинчастим графітом, уведених на заміну ГОСТ 1412-79, встановлює їх марки, які визначаються на основі міцності чавуну під час розтягування. ДСТУ 8833:2019 передбачає сім марок сірого чавуну — від СЧ100 до СЧА400. У марці

чавуну перші букви означають сірий чавун. Цифрова позначка вказує на величину мінімальної границі міцності під час розтягування в Н/мм². Марка чавуну СЧА означає його мікролегуювання азотом.

Згідно з ДСТУ 8833:2019, міцність під час розтягування й твердість виливків визначають на пробах, вирізаних із тіла виливків. Виготовлення проб, зразків для заміру твердості та механічних властивостей виливків, проведення випробувань зразків потребують певних витрат, зумовлених витратами металу на зразки, залученням персоналу та часу на виготовлення. Саме тому вчені й технологи ливарних підприємств, споживачі ливарної продукції спрямовують свої зусилля на пошуки й поширення у виробництві способів неруйнівного контролю властивостей виливків [2–6 та ін.]. Запропонована стаття продовжує висвітлення результатів досліджень у зазначеному напрямі, які виконують у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України.

Ливарні й механічні властивості (твердість, міцність тощо) виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом залежать у першу чергу від хімічного складу, який значною мірою характеризується його вуглецевим еквівалентом $C_{\text{ЕКВ}}$ і ступенем евтектичності $S_{\text{ЕВТ}}$. Зазвичай у промисловій практиці при оцінці якості литва орієнтуються на твердість за Брінеллем H_B і міцність σ_B під час розтягування чавуну [1, с. 151–158]. До того ж залежності H_B і σ_B від хімічного складу чавуну, який характеризується показниками $C_{\text{ЕКВ}}$ і $S_{\text{ЕВТ}}$, намагаються представити у вигляді емпіричних формул [1–2, 7 та ін.]. У наших статтях [3–6] проаналізовано формули, подані в науково-технічній літературі для розрахунку твердості H_B й міцності σ_B виливків із чавуну від величин $C_{\text{ЕКВ}}$ і $S_{\text{ЕВТ}}$. Було показано, що труднощі з використанням відомих формул полягають у невизначеності методики розрахунку $C_{\text{ЕКВ}}$ і $S_{\text{ЕВТ}}$ за даними відсоткового вмісту хімічних елементів у складі чавуну. З метою виключення зазначених недоліків відомих формул та посилення достовірності розрахунків H_B і виливків із чавуну за даними $C_{\text{ЕКВ}}$ і $S_{\text{ЕВТ}}$ його хімічного складу було запропоновано [3–6] при розробці таких формул величини $C_{\text{ЕКВ}}$ і $S_{\text{ЕВТ}}$ визначати за ймовірнісним підходом та із застосуванням методу Монте-Карло з припущенням, що розподіли вмісту хімічних елементів у складі чавуну відповідають нормальному закону Гаусса.

Експлуатаційні характеристики ливарних виробів із сірого чавуну суттєво залежать не тільки від механічних властивостей, зокрема H_B і σ_B , а й від його фізичних властивостей: температурного коефіцієнта лінійного розширення, теплоємності, теплопровідності тощо. Автори монографії [1, с. 155–157], наприклад, підкреслюють, що важливим показником якості чавуну є його теплопровідність, яка зумовлює, зокрема, експлуатаційні характеристики ливарних виробів в умовах тертя і знакозмінних теплових навантажень.

Теплопровідність залежить від кількості, форми й розмірів включень графіту в структурі чавуну. Саме тому в деяких сферах застосування ливарних виробів із чавуну їх теплопровідність потребує певної оптимізації, як і показники механічних властивостей. Автор монографії [8, с. 121–130] звертає увагу, що в процесі тертя гальмівних колодок по колесах транспортних засобів структура поверхневого шару чавуну колодок змінюється внаслідок циклічних нагрівань і суттєвого підвищення температури. У результаті структура поверхневого шару колодок відрізняється від структури в глибинних шарах з усіма негативними наслідками цього. Таке твердження повною мірою стосується чавунних гальмівних (гальмових) колодок залізничного транспорту та чавунних вставок у композиційному матеріалі гальмівних композиційних колодок із чавунними вставками.

У роботах [8–11 та ін.] представлено результати порівняльних досліджень якості гальмівних колодок залізничного транспорту, виготовлених із чавуну й композиційного матеріалу (азбестової та безазбестової гумосуміші). Доведено [8, с. 122], що використання т. зв. композиційних колодок, виготовлених із токсичної гумосуміші з низькою теплопровідністю, порівняно з досить високою теплопровідністю чавунних колодок призводить до посиленого розігріву бандажів та ослаблення їх кріплення

на колесах під час гальмування локомотивів внаслідок поганого відводу тепла, яке виділяється при терті гальмівної колодки по робочій поверхні колеса. Температура в зоні контакту гальмівної колодки з поверхнею колеса під час гальмування може досягати 900 °С [8, с. 125], при тому що температура самозаймання композиційної гумосуміші гальмівних колодок, регламентована в технічних умовах, становить (300...550) °С [12–13 та ін.]. З цієї причини «на локомотивах використовують тільки чавунні гальмівні колодки, як і на пасажирському залізничному транспорті з частими зупинками, на моторних вагонах електричок і т. ін.» [8, с. 122]. Намагання виробників композиційних гальмівних колодок покращити їх теплопровідність за рахунок обладнання фрикційного матеріалу колодок чавунними вставками (ТУ У 23.9-35046274-053:2015, ТУ У 30.2-35046274-059:2016 та ін.) не рятує ситуації і не позбавляє колодки з композиту від недоліків, зумовлених низькою теплопровідністю гумосуміші [12]. Але спроби створення колодок гальмівних композиційних для локомотивів продовжуються.

Показовим прикладом безуспішних зусиль виробників композиційних колодок у цьому напрямі є, на нашу думку, колодка гальмівна гребнева композиційна з чавунним каркасом 2TR-172 для локомотивів, яку виготовляють методом гарячого формування безазбестового композиційного матеріалу (гумосуміші) разом із чавунним каркасом згідно з вимогами ТУ У 30.2-35046274-060:2021. Враховуючи підвищені вимоги до безпеки гальмівних колодок для локомотивів, забезпечення яких суттєво залежить і від теплопровідності матеріалу колодок, розглянемо цю проблему детально на матеріалі результатів порівняльного дослідження повністю чавунних колодок марки (типу) «М», що виготовляють відповідно до вимог ГОСТ 30249-97, і чавунного каркаса гальмівної гребневої композиційної колодки 2TR-172. При цьому насамперед розглянемо залежності теплопровідності чавунів різних марок за даними ДСТУ 8833:2019 від величин вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ його хімічного складу, розрахованих у наших роботах [4–6].

У табл. 1 представлено величини коефіцієнта теплопровідності λ за 20 °С, Вт/(м·К), твердості HB, вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ і ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ чавунів із пластинчастим графітом різних марок згідно з даними ДСТУ 8833:2019. Імовірні значення $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$, наведені у табл. 1, розраховувано із застосуванням методу Монте-Карло й формул (1) [7]:

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

де C, Si, P — відсотковий вміст вуглецю, кремнію, фосфору в хімічному складі чавуну. Вважали, що розподіли величин відсоткового вмісту хімічних елементів у чавуні,

Таблиця 1
Залежність коефіцієнта теплопровідності λ при 20 °С, Вт/(м·К) чавунів СЧ100...СЧ400 з пластинчастим графітом згідно з ДСТУ 8833:2019 від їх твердості HB, ступеня евтектичності $C_{\text{ект}}$, % і вуглецевого еквівалента $S_{\text{евт}}$, %

HB50	245	229	197	187	170	163	156
HB30	285	270	250	238	216	201	185
λ	38	42	46	50	54	59	60
$C_{\text{екв}}$, %	0,741	0,759	0,813	0,897	0,929	0,975	0,976
$S_{\text{евт}}$, %	3,20	3,22	3,33	3,90	3,94	4,14	4,25

Позначено: HB50 — твердість при товщині стінки виливка не більше 50 мм; HB30 — при товщині не більше 30 мм. У таблиці величини $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ становлять їх середні значення.

регламентованих у ДСТУ, відповідають нормальному закону Гаусса. У цілому методика досліджень була та сама, що й у наших роботах [2, 4–6].

Кореляційні зв'язки між показниками $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ хімічного складу, твердості НВ, коефіцієнтом теплопровідності λ виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом представлені у табл. 2. У цій таблиці використано ті самі позначення, що й у табл. 1. Залежності коефіцієнта теплопровідності λ від твердості НВ чавунних виливків та величин $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ хімічного складу чавуну засвідчили (табл. 1 і 2, рис. 1 і 2), що з підвищенням твердості чавуну його теплопровідність погіршується. При збільшенні величин $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ теплопровідність чавуну з пластинчастим графітом збільшується.

Висока кореляція між змінними (табл. 2) свідчить, що теплопровідність виливків жорстко залежить від хімічного складу й твердості чавуну. Цю закономірність треба обов'язково враховувати при виборі матеріалу як чавунних гальмівних колодок, так і чавунних вставок у фрикційному матеріалі колодок із композиційної гумосуміші.

Таблиця 2
Матриця кореляційних зв'язків між твердістю НВ, показниками $C_{\text{екв}}$, %, і $S_{\text{евт}}$, %, хімічного складу чавуну з пластинчастим графітом % і коефіцієнтом його теплопровідності λ ,

	НВ 50	НВ30	λ	$S_{\text{евт}}$	$C_{\text{екв}}$
НВ50	1	–	–	–	–
НВ30	0,975	1	–	–	–
λ	– 0,978	– 0,994	1	–	–
$S_{\text{евт}}$	– 0,974	– 0,975	0,978	1	–
$C_{\text{екв}}$	– 0,934	– 0,94	0,964	0,987	1

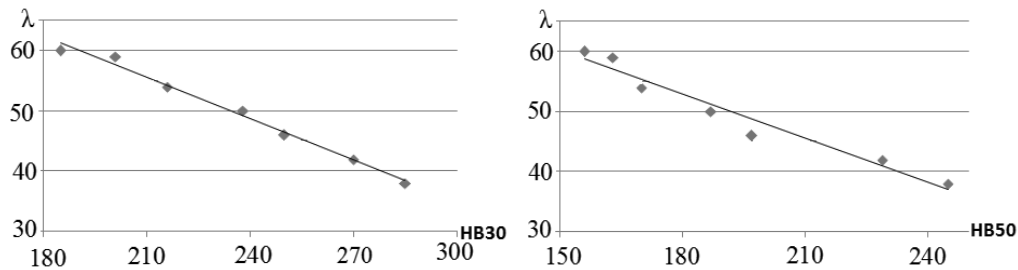


Рис. 1. Залежності коефіцієнта теплопровідності λ , Вт/(м · К) сірого чавуну з пластинчастим графітом від твердості НВ виливків. Позначено: НВ50 — твердість виливка при товщині стінки не більше 50 мм; НВ30 — при товщині не більше 30 мм

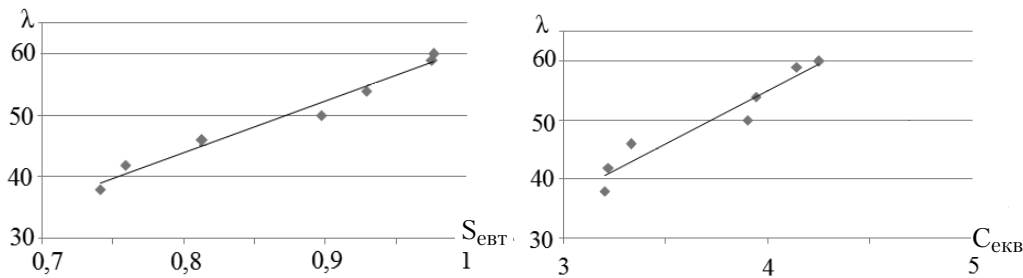


Рис. 2. Залежності коефіцієнта теплопровідності λ , Вт/(м · К) сірого чавуну з пластинчастим графітом від ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ і вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$, % хімічного складу чавуну

¹ Автори статті висловлюють подяку професору Д.М. Тогобицькій за допомогу у виконанні статистичної обробки й аналізу результатів дослідження.

Формули (2)–(5) відображають залежності коефіцієнта теплопровідності λ при 20 °С, Вт/(м · К) чавуну з пластинчастим графітом згідно з ДСТУ 8833:2019 від твердості НВ виливків із нього та ступеня евтектичності $S_{\text{евт}}$ та вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$ % хімічного складу чавуну:

$$\lambda = -0,228 \text{ НВ}30 + 103,5, \quad R^2 = 0,989; \quad (2)$$

$$\lambda = -0,242 \text{ НВ}50 + 96,52, \quad R^2 = 0,956; \quad (3)$$

$$\lambda = 83,58 S_{\text{евт}} - 22,86; \quad R^2 = 0,974; \quad (4)$$

$$\lambda = 17,97 C_{\text{екв}} - 16,85; \quad R^2 = 0,929. \quad (5)$$

У формулах (2)–(5) позначено твердість НВ30 і НВ50 (не більше ніж) при товщині виливків 30 і 50 мм. R — коефіцієнт кореляції. Ступінь евтектичності $S_{\text{евт}}$ і вуглецевий еквівалент $C_{\text{екв}}$ хімічного складу чавуну розраховано за формулами (1). Значення $S_{\text{евт}}$ і $C_{\text{екв}}$ у формулах є середніми величинами цих показників, розрахованими за ймовірнісним підходом [2] із застосуванням методу Монте-Карло та діапазонів відсоткового вмісту хімічних елементів у складі чавуну, наведених у ДСТУ 8833:2019.

Високі значення коефіцієнтів кореляції між змінними у рівняннях (2)–(5), як і в аналогічних рівняннях (1)–(6) у нашій роботі [6], підкреслюють їх придатність до використання при оцінках і прогнозуванні теплопровідності ливарних виробів із чавуну з пластинчастим графітом за показниками $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ його хімічного складу. Зазначені формули можна застосовувати і як інструмент неруйнівної оцінки якості виливків із чавуну.

За результатами порівняння теплопровідності гальмівних колодок для локомотивів, а саме повністю чавунних колодок марки «М» (ГОСТ 30249-97) і колодок гальмівних гребневих композиційних із чавунним каркасом (ТУ У 30.2-35046274-060:2021), підкреслимо таке.

Масова частка хімічних елементів у чавуні колодки «М» складає, мас., %: C = 2,7...3,4; Si = 0,7...1,0; Mn = 0,4...0,9; P = 0,4...0,9; S ≤ 0,20. Хімічний склад чавунного каркаса композиційної колодки дорівнює мас., %: C = 2,9...3,8; Si = 1,2...3,0; Mn = 0,15...0,9; P ≤ 1,0; S ≤ 0,18; Cr ≤ 0,5; Cu ≤ 1,0; Ni = 0,5; Mg = 0,2. Зіставлення цих даних дозволяє припустити, що хімічний склад чавуну каркаса композиційної колодки являє собою спрощений, загрублений варіант хімічного складу чавуну колодок «М». Так, у хімічному складі чавуну каркаса розширені на 0,2 мас., % і зміщені в бік більших величин діапазони відсоткового вмісту вуглецю, вмісту кремнію — на 1,5 мас., %, вмісту марганцю — на 0,25 мас.,%. Знято обмеження щодо нижньої границі фосфору. Зазначеними вище технічними умовами дозволяється наявність домішкових елементів (Cr, Cu, Ni, Mg) у чавуні каркаса композиційних гальмівних колодок, що небажано, неприпустимо в чавуні, який виплавляють за вимогами ГОСТ 30249-97 та ДСТУ 8833:2019.

Розрахунки засвідчили [3], що величини вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності хімічного складу чавуну каркаса колодок композиційних для локомотивів відповідно до ТУ У 30.2-35046274-060:2021 значно більші, ніж величини цих показників чавуну колодок «М» із хімічним складом згідно з ГОСТ 30249-97. Зокрема, можливі діапазони розкиду $C_{\text{екв}}$, %, чавуну колодок «М», розраховані за різними формулами [3], становили (2,910...3,989) % при середньому значенні $C_{\text{еквср}} = 3,448$ % і (2,996...4,042) % при $C_{\text{еквср}} = 3,519$ %. Можливий діапазон розкиду $C_{\text{екв}}$ чавуну з хімічним складом каркаса композиційної колодки дорівнює (3,664...4,765) % при середній величині 3,8657 %.

Розрахунки також засвідчили, що й діапазони розкиду $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$ чавуну, виплавленого з хімічним складом згідно з ТУ У 30.2-35046274-060:2021, значно ширші, ніж чавуну з хімічним складом відповідно до ГОСТ 30249-97. Особливо зазначене стосується діапазону розкиду величин ступеня евтектичності чавунів. Так,

діапазони розкиду величин ступеня евтектичності чавуну колодок «М» становлять (0,68...0,916), чавуну корпусу композиційних колодок (0,797...1,226) [3]. Менший діапазон розкиду величин $S_{\text{евт}}$ чавуну, із якого виготовлені гальмівні колодки типу «М», забезпечує відповідно кращу стабільність теплопровідності колодок і теплового режиму в зоні їх тертя з колесами залізничного транспортного засобу.

Орієнтуючись на ці розрахунки, чавун, що виплавляють згідно з ГОСТ 30249-97, відповідно до класичних уявлень [7 та ін.], слід віднести до доевтектичного класу, оскільки його вуглецевий еквівалент $C_{\text{екв}} < 4,26 \%$, а ступінь евтектичності $S_{\text{евт}} < 1$. Чавун різних партій, хімічний склад якого відповідає вимогам ТУ У 30.2-35046274-060:2021, може бути доевтектичним, евтектичним і заевтектичним залежно від величин $C_{\text{екв}}$ і $S_{\text{евт}}$. Не виключено, що розміри й форма графітових включень у чавуні, його міцність, твердість, теплопровідність не будуть однаковими [1, с. 152–156] і не завжди графітові включення будуть мати пластинчасту форму.

Більш високі величини вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності чавуну, із якого виготовляють каркас композиційних колодок, нібито мають сприяти відводу тепла із зони контакту колодки з колесом транспортного засобу. Але більшу частку у фрикційному елементі колодки 2ТР-172 займає композиційна гумосуміш, наявність якої зводить нанівещь позитивний ефект від очікуваного підвищення теплопровідності колодки завдяки покращеній теплопровідності чавуну каркаса колодки 2ТР-172 для локомотивів. Фактично конструкція колодки гальмівної композиційної є спробою ввести вставки з композиту (гумосуміші) у фрикційний елемент чавунної колодки марки «М» того самого призначення. Без втрати суті цього рішення таку гальмівну колодку для локомотивів можна називати гребневою чавунною із вставками з гумосуміші. Питання стосується лише розміру часток чавуну й композиту в обсязі фрикційного елемента колодки, який безпосередньо контактує з робочою поверхнею колеса локомотива. Однозначно, що вставки з композиційної гумосуміші суттєво погіршують тепловідвід із зони тертя колодки та колеса локомотива, що знижує безпеку руху залізничного транспорту. У статті [14] засвідчено, що при випробуваннях на залізничному транспорті гальмівних композиційних колодок для локомотивів відбувалося сповзання бандажа з коліс транспортних засобів.

На завершення зазначимо, що викладені вище результати досліджень є суб'єктивними судженнями авторів статті та загальним баченням науково-технічної проблеми без прив'язки до продукції будь-якого конкретного виробника.

Висновки

- Теплопровідність сірого чавуну з пластинчастим графітом суттєво залежить від його хімічного складу й механічних властивостей. Із підвищенням ступеня евтектичності та вуглецевого еквівалента теплопровідність чавуну збільшується. Коефіцієнт теплопровідності прямо пропорційно залежить від цих показників хімічного складу чавуну і є обернено пропорційним твердості виливків із чавуну.

- На основі ймовірного підходу розроблено емпіричні формули, які відображають залежності коефіцієнта теплопровідності виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом від його ступеня евтектичності, вуглецевого еквівалента й твердості виливків. Формули призначені для неруйнівного контролю та прогнозування теплопровідності виливків із сірого чавуну за даними ступеня евтектичності та вуглецевого еквівалента його хімічного складу і твердості.

- Твердість HB і теплопровідність сірого чавуну з пластинчастим графітом дуже чутливо реагують на ступінь евтектичності та вуглецевий еквівалент його хімічного складу. Наприклад, величини твердості HB і коефіцієнта теплопровідності λ чавунів СЧ100 і СЧ350 згідно з ДСТУ 8833:2019 різняться приблизно в півтора рази. Чавунні вставки до фрикційного елемента гальмівних колодок із композиційної гумосуміші, призначені для покращення відводу тепла із зони їх тертя з колесами залізничного транспорту, мають виготовлятися з чавуну, хімічний склад якого забезпечує максимально можливі величини вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності при мінімально допустимій (оптимальній) твердості.

• Для забезпечення необхідної високої якості гальмівних колодок локомотивів, виготовлених як із чавуну згідно з вимогами ГОСТ 30249-97, так і з композиційного матеріалу та чавунним каркасом згідно з вимогами ТУ У 30.2-35046274-060:2021, діапазони вмісту хімічних елементів у складі чавуну мають бути мінімально можливими. Таке рішення забезпечує мінімальні варіації величин ступеня евтектичності та вуглецевого еквівалента чавуну і в результаті стабільність його теплопровідності, експлуатаційних характеристик і надійність гальмівних колодок. Нині діапазони варіювання величин вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності чавунів, виплавлених із хімічним складом відповідно до зазначеного ГОСТ, суттєво вужчі, ніж виплавлених за вимогами цих ТУ.

• Відсутність детальної регламентації відсоткового вмісту компонентів гумосуміші та їх хімічного складу в технічних умовах на композиційні гальмівні колодки, у тому числі й на колодки з чавунними вставками у фрикційному матеріалі чи з чавунним каркасом, що вимагає законодавство України, відповідно до ГОСТ 2.114-95, призводить такі технічні умови і виготовлену за ними продукцію до нелегітимності. Для забезпечення легітимності технічних умов на композиційні гальмівні колодки з чавунними вставками та з чавунним каркасом необхідно регламентувати в них не тільки відсотковий вміст та хімічний склад усіх компонентів композиційної гумосуміші, а й хімічний склад, мікроструктуру, механічні властивості чавунних вставок, чавунного каркаса колодок на тому самому рівні, що й у стандартах і технічних умовах на гальмівні колодки з чавуну.

Список літератури

- 1 Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. Москва: Машиностроение. 1984. 432 с.
- 2 Сіренко К.А., Мазур В.Л., Дереча Д.О. Залежність твердості та інших властивостей сірого чавуну від його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності. *Метал та лиття України*. 2023. Т. 31. № 2 (333). С. 42–50. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.042>
- 3 Мазур В.Л., Сіренко К.А. Проблемні питання стандартизації ливарної продукції (на прикладі стандартизації гальмових колодок залізничного транспорту). *Метал та лиття України*. 2023. Т. 31. № 3 (334). С. 1–10. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.039>
- 4 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка підходів до прогнозування властивостей синтетичного чавуну у ливарному виробництві. *Металознавство та обробка металів*. 2023. № 2. С. 24–35. <https://doi.org/10.15407/mom2023.02.024>
- 5 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Прогнозування механічних властивостей сірого чавуну (ймовірнісний підхід). *Металознавство та обробка металів*. 2023. № 3. С. 19–30. <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.019>
- 6 Сіренко К.А. Напрями розвитку методології регулювання хімічного складу і властивостей чавуну в ливарному виробництві на базі ймовірнісного підходу. *Металознавство та обробка металів*. 2023. № 4. С. 23–33. <https://doi.org/10.15407/mom2023.04.023>
- 7 Гиршович Н.Г. Справочник по чугуному литью. Ленинград: Машиностроение. 1978. 758 с.
- 8 Неижко И.Г. Термическая обработка чугуна. Киев: Наукова думка. 1992. 208 с.
- 9 Неижко И.Г., Найдик В.Л., Гаврилюк В.П. Тормозные колодки железнодорожного транспорта. Киев: НАН Украины, Физ.-технол. ин-т металлов и сплавов. 2009. 121 с.
- 10 Попов Е.С., Мазур В.Л., Шинський О.И. Удосконалення ливарного виробництва в Україні. «Литво. Металургія, 2021». Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво-2021». Запоріжжя, 2021. С. 160–164.
- 11 Мазур В.Л., Найдик В.Л., Попов Е.С. Характеристика чавунних і композиційних колодок для рухомого складу залізниці в Україні. «Литво. Металургія, 2021» Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво-2021». Запоріжжя, 2021. С. 118–122.

- 12 Мазур В.Л., Найдек В.Л., Попов Є.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. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.080>
- 13 Мазур В.Л., Сіренко К.А. Аналіз тенденцій розвитку виробництва литва з синтетичного чавуну (на прикладі порівняння гальмових колодок для рухомого складу залізниці, виготовлених з різних матеріалів). *Теорія і практика металургії*. 2022. № 3 (134). С. 5–14.
- 14 Дубравін Ю.Ф., Пилипенко А.Є. Застосування композиційних колодок з чавунними вставками для колісних пар з бандажем. *Вісник Східноукраїнського університету імені Володимира Даля*. 2017. № 4 (234). С. 182–184.

Надійшла 05.03.2024

References

- 1 Vozdvizhensky, V.M., Grachev, V.A., Spassky, V.V. (1984). Casting alloys and the technology of their melting in mechanical engineering. Moskva: Mashinostroenie. 432 p. [in Russian].
- 2 Sirenko, K.A., Mazur, V.L., Derecha, D.O. (2023). Dependence of hardness and other properties of grey iron on its carbon equivalent and degree of eutecticity. *Met. lit'e Ukr.* № 2 (333), pp. 42–50 <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.042> [in Ukrainian].
- 3 Mazur, V.L., Sirenko, K.A. (2023). Problematic issues of standardisation of foundry products (on the example of standardisation of railway brake pads). *Met. lit'e Ukr.*, vol. 31, no. 3 (334), pp. 1–10 <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.039> [in Ukrainian].
- 4 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2023). Evaluation of approaches to predicting the properties of synthetic cast iron in foundry. *Metal Science and Treatment of Metals*, no. 2, pp. 24–35 <https://doi.org/10.15407/mom2023.02.024> [in Ukrainian].
- 5 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2023). Prediction of mechanical properties of grey cast iron (probabilistic approach). *Metal Science and Treatment of Metals*, no 3, pp. 19–30. <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.019> [in Ukrainian].
- 6 Sirenko, K.A. (2023). Directions for the development of a methodology for regulating the chemical composition and properties of cast iron in foundries based on a probabilistic approach. *Metal Science and Treatment of Metals*, no. 4, pp. 23–33. <https://doi.org/10.15407/mom2023.04.023> [in Ukrainian].
- 7 Girshovich, N.G. (1978). Reference book on cast iron casting. Leningrad: Mashinostroenie, 758 p. [in Russian].
- 8 Neizhko, I.G. (1992). Heat treatment of cast iron. Kiev: Naukova dumka. 208 p. [in Russian].
- 9 Neizhko, I.G., Naydek, V.L., Gavrilyuk, V.P. (2009). Railway brake pads. Kyiv: NAS of Ukraine, PTIMA NAS of Ukraine, 121 p. [in Russian].
- 10 Popov, E.S., Mazur, V.L., Shinsky, O.I. (2021). Improving foundry production in Ukraine. «Casting. Metallurgy, 2021». *Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference «Casting-2021»*. Zaporizhzhia, pp. 160–164 [in Ukrainian].
- 11 Mazur, V.L., Naidek, V.L., Popov, Ye.S. (2021). Characteristics of cast iron composite pads for railway rolling stock in Ukraine. «Casting. Metallurgy, 2021». *Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference «Casting-2021»*. Zaporizhzhia, pp. 118–122 [in Ukrainian].
- 12 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, <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.080> [in Ukrainian].
- 13 Mazur, V.L., Sirenko, K.A. (2022). Analysis of trends in the development of synthetic cast iron casting production (on the example of comparing brake pads for railway rolling stock made of different materials). *Theory and practice of metallurgy*, no. 3 (134), pp. 5–14 [in Ukrainian].
- 14 Dubravin, Y., Pylypenko, A. (2017). Application of composite brake blocks with cast iron insert for bogies of bandage *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, no. 4 (234), pp. 182–184. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2017_4_37 [in Ukrainian].

Received 05.03.2024

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.ne; ORCID 0000-0001-8970-5389

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

ASSESSMENT OF THERMAL CONDUCTIVITY OF GREY CAST IRON CASTINGS WITH LAMELLAR GRAPHITE

It is shown that one of the urgent tasks in the theory and technology of foundry production is the scientific substantiation and implementation in industrial practice of non-destructive methods of controlling the mechanical and physical properties of cast iron and alloy castings. Literary sources on the dependence of thermal conductivity of castings made of cast iron with lamellar graphite on the content of chemical elements in its chemical composition, on its carbon equivalent and the degree of eutecticity are analysed. It is shown that the known empirical formulas reflecting the dependence of strength and hardness of castings from lamellar graphite iron on the carbon equivalent and the degree of eutecticity do not take into account the probabilistic nature of the chemical composition of industrial melts – batches of foundry products. The thermal conductivity coefficient is directly proportional to these indicators of the chemical composition of cast iron and inversely proportional to the hardness of cast iron castings. There are no formulas in the technical literature that reflect the dependence of the thermal conductivity of cast iron on its chemical composition. It is shown that even within the grades of cast irons with lamellar graphite according to DSTU 8833:2019, their thermal conductivity coefficient can vary by a factor of ~ 1.5. Based on the information on the chemical composition and thermal conductivity of lamellar graphite cast iron provided in DSTU 8833:2019, formulas were developed using a probabilistic approach with the Monte Carlo method to reflect the dependence of the thermal conductivity on the carbon equivalent and the degree of eutecticity of such cast iron. The formulas are intended for non-destructive testing and prediction of thermal conductivity of grey cast iron castings based on the eutecticity and carbon equivalent of its chemical composition and hardness.

Keywords: cast iron, casting, chemical composition, mechanical properties, thermal conductivity, carbon equivalent, degree of eutecticity.

<https://doi.org/10.15407/plit2024.02.064>

УДК 621.74/338.4

В.А. Гнатуш, канд. техн. наук, незалежний аналітик;

e-mail: vgnatush@gmail.com; ORCID: 0000-0003-0772-686x (Київ, Україна)

РИНОК МЕТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ 2020–2022: СВІТ, ЄВРОПА, УКРАЇНА

Представлено аналіз світового ринку металевих виливків у 2020–2022 рр. Узв'язку з тим, що на початок березня 2024 р. оприлюднення світової статистики виробництва металевих виливків не було, тут здійснено оціночний аналіз виробництва виливків у 2022 р. Через війну РФ проти України в глобальній економіці виникли проблеми в таких сегментах, як енергетика, логістика, фінанси тощо. У результаті за 2022 р. світовий ВВП збільшився тільки на 3,1 %, а виробництво виливків оціночно склало 111,8 млн т (-37,8 % проти 2021 р.). Аналітики компанії Vision Research Reports (Канада / Індія) оцінюють глобальний ринок металевих виливків у 2022 р. в обсязі 136,8 млрд дол. США. Прогнозується, що за період із 2023 по 2032 рр. ринок буде зростати із середньорічним темпом (CAGR) 5,6 % та досягне показника в 234,7 млрд дол. США. В аналітичному звіті відзначається, що в 2022 р. найбільшим споживачем металевих виливків була автомобільна промисловість із часткою 60 %, за нею слідувало машинобудування (23 %)