

<https://doi.org/10.15407/plit2026.03.057>

УДК 621.74:658.52.04

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

e-mail: thermoexp.metal@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

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

ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИТВА ІЗ СІРОГО ЧАВУНУ ВІД ЙОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ

Показано актуальність, перспективність та ефективність реалізації у ливарному виробництві неруйнівного способу визначення механічних властивостей литва із залізовуглецевих сплавів за результатами контролю хімічного складу їх розплаву безпосередньо в процесі виплавлення в індукційних печах. Проаналізовано відомі з технічної літератури залежності міцності, твердості тощо сірого чавуну від вмісту вуглецю, кремнію, фосфору в його складі. Показано, що при розв'язанні класичної для ливарного виробництва задачі «хімічний склад–властивості» як узагальнювальні показники хімічного складу сірого чавуну рекомендовано використовувати величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{ЕКВ}}$, ступеня евтектичності $S_{\text{ЕВТ}}$, відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію C/Si . Позитивним моментом у спробах розв'язання вказаної задачі є врахування у відповідних формулах впливу товщини виливків на їхні механічні властивості. Запропоновано ймовірнісний підхід із використанням методу Монте-Карло для встановлення залежності механічних властивостей сірого чавуну від його хімічного складу в прямому й оберненому її варіантах. Наведено приклади застосування цього підходу на основі бази даних про механічні властивості та вміст хімічних елементів у сірому чавуні з пластинчастим графітом відповідно до ДСТУ 8833:2019. Запропоновано розрахункові формули, розроблені для розв'язання цієї задачі та наведено результати чисельних розрахунків.

Ключові слова: ливарне виробництво, сірий чавун, хімічний склад, властивості, прогнозування, неруйнівний контроль.

Розвиток ливарного виробництва, модернізація обладнання підприємств, комп'ютеризація управління ливарними процесами на основі результатів поглиблення їх теорії і технології створюють сприятливу основу для розв'язання класичної задачі «хімічний склад–властивості» виливків із сірого чавуну. Українські вчені активно працювали в цьому напрямі понад півстоліття і суттєво поглибили наукові засади ливарного виробництва, необхідні для розв'язання цієї класичної задачі. Нині в ливарній промисловості склалися умови й створено технічні можливості для її практичного розв'язання в промислових масштабах [1 та ін.]. Метою даної роботи є систематизація та вдосконалення рішень щодо підвищення ефективності виплавлення чавуну в індукційних печах, виготовлення литва з потрібним вмістом хімічних елементів і запровадження технології визначення його властивостей неруйнівним способом за результатами контролю хімічного складу.

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

На виробництві, безпосередньо в процесі плавки контролюють хімічний склад чавуну й доводять відсотковий вміст елементів до заданих значень. Бажано, щоб за результатами цього ще на стадії розплаву можна було неруйнівним способом визначати також фізико-механічні властивості майбутніх виливків, тобто прогнозувати властивості литва ще під час виплавлення чавуну.

У працях [2, с. 27, 85; 3, с. 114], довіднику [4, с. 133] та ін. наведено формули, що описують залежність механічних властивостей виливків із сірого чавуну (міцності σ_B , твердості HB тощо) від його хімічного складу і технологічних параметрів. Як чинники враховують відсотковий вміст вуглецю C, кремнію Si, марганцю Mn та ін. хімічних елементів у його складі вуглецевий еквівалент C_{EKB} , %, ступінь евтектичності S_{EBT} , відношення вмісту вуглецю та кремнію C/Si (чи Si/C, що не має принципового значення), а також товщину виливка T , мм. Широко відомі, зокрема [3, с. 114], такі формули:

$$HB = 100 + 4,3 \sigma_B, \quad (1)$$

$$\sigma_B = 80,5 - 16,1 \lg C_{EKB}, \quad (2)$$

де вуглецевий еквівалент C_{EKB} , %, дорівнює:

$$C_{EKB} = C + 0,3 (Si + P). \quad (3)$$

Розглядаючи як приклад ці відомі формули, по-перше, відзначимо, що твердість HB та міцність σ_B сірого чавуну пов'язані між собою прямо пропорційною залежністю (1): чим вища міцність чавуну, тим вища його твердість. Водночас визначення твердості HB чавунних виливків здійснюють значно простіше, ніж визначення границі міцності σ_B під час розтягування спеціально виготовлених для цього зразків чавуну в литому стані. Саме тому емпіричну залежність (1) представляють зазвичай як функцію $\sigma_B = f(HB)$. У праці [2, с. 32] зазначено, що формула (2) набула більшого поширення, оскільки при визначенні σ_B враховує не лише вуглецевий еквівалент C_{EKB} як узагальнювальний показник хімічного стану чавуну, а й товщину T стінок виливків. Цей показник суттєво впливає на мікроструктуру чавуну. При цьому підкреслено, що для розрахунку механічних властивостей, зокрема σ_B , HB виливків із сірого чавуну за його хімічним складом можна використовувати також інші їх залежності від вмісту C, Si, Mn тощо у складі чавуну. Наприклад, у публікації [2, с. 85] наведено формулу (4), яка відображає лінійну залежність твердості HB виливків із сірого чавуну від вмісту хімічних елементів у його складі і товщини T , мм, виливків:

$$HB = 528,89 - 57,4 C - 18,04 Si + 11,97 Mn - 29,61 \ln T. \quad (4)$$

Перевага наведених формул полягає в тому, що вони створені на основі опрацювання результатів дослідно-промислових плавок чавуну, отриманих в умовах промислових підприємств. Зауважимо, що на механічні властивості синтетичного чавуну найбільше впливають вміст вуглецю C та кремнію Si, їх співвідношення C/Si та, відповідно, ступінь евтектичності S_{EBT} . У довіднику Н.Г. Гиршовича [4, с. 131–137], наприклад, це твердження підкріплене рівняннями:

$$\sigma_B = 96,5 - 70 S_{EBT} - 2,1 C/Si, \quad (5)$$

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

Звертаємо особливу увагу, що в рівняннях (2) і (4), наведених в публікаціях [3, с. 114] і [2, с. 27, 85] та ін., для визначення впливу товщини виливків на показник міцності чавуну використано різні логарифми — натуральний і десятиковий. Водночас знак

мінус перед членом $2,1C/Si$ у рівнянні (5) не відповідає результатам, наведеним у табл. 1 за даними ДСТУ 8833:2019, щодо впливу відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію C/Si на σ_B сірого чавуну з пластинчастим графітом. За даними табл. 1, при збільшенні величини співвідношення C/Si зростає і σ_B чавуну. З цієї причини в рівнянні (5) перед членом $2,1C/Si$ має бути знак плюс, а не мінус. Тому перед застосуванням рівняння (5) його достовірність треба ще раз перевірити на відповідність умовам виробництва конкретної ливарної продукції з чавуну.

Таблиця 1

Величини границі міцності σ_B під час розтягування Н/мм², не менше ніж; твердості HB, не більше ніж; відношення σ_B/HB , вуглецевого еквівалента C_{EKB} , %, ступеня евтектичності S_{EBT} , відношення C/Si середніх величин вмісту вуглецю C до вмісту кремнію Si в хімічному складі виливків із чавунів різних марок, відповідно до ДСТУ 8833:2019

Марки чавуну	σ_{B15}	σ_{B30}	σ_{B50}	HB15	HB30	HB50	15	C_{EKB}	S_{EBT}	C/Si
СЧ100	100	80	75	190	185	156	0,526	4,25	0,976	1,5
СЧ150	150	110	105	210	201	163	0,714	4,14	0,975	1,64
СЧ200	200	160	140	230	216	170	0,870	3,94	0,929	1,79
СЧ250	250	210	180	245	238	187	1,020	3,9	0,897	1,83
СЧ300	300	260	220	260	250	197	1,154	3,33	0,813	1,94
СЧ350	350	310	260	275	270	229	1,273	3,22	0,759	2,19
СЧА400	400	—	—	290	285	245	1,455	3,20	0,741	1,93

Примітки. Позначено: HB15; HB30; HB50 — твердість при товщинах стінки виливків 15; 30; 50 мм. У марці чавуну букви СЧ позначають сірий чавун. Цифрова позначка в марці чавуну вказує на величину мінімальної границі міцності, Н/мм², чавуну в стінках виливків товщиною 15 мм. Відношення $\frac{\sigma_B}{HB}$ 15 стосується виливків товщиною 15 мм.

Щодо формул (1) і (5) додатково зауважимо таке. Емпіричну формулу (1) подавали праці [3 та ін.], опубліковані майже пів століття тому. Тимчасовий опір розриву при розтягуванні (границя міцності) σ_B чавуну чи сталі в цій формулі подано в кгс/мм² — одиницях вимірювання, що свого часу були поширені. У формулі (1) HB — це твердість за Брінеллем. Формулу (1), представлену у вигляді $\sigma_B(HB)$, найчастіше застосовують на практиці для оперативного контролю властивостей ливарних виробів із залізовуглецевих сплавів за результатами заміру їх твердості HB без проведення випробувань зразків металу на розрив для визначення величини σ_B . Вважається, що формула (1) ефективно працює при застосуванні для сірих чавунів із пластинчастим графітом. Згідно з даними рис. 1, табл. 1 і рівнянь (7) та (8), зв'язок між показниками міцності σ_B й твердості HB таких чавунів майже лінійний, про що зокрема свідчать високі коефіцієнти кореляції.

Аналітичний огляд методик, відповідних формул і результатів визначення залежностей механічних властивостей литва із сірого чавуну від його хімічного складу представлено в нашій статті [7]. Уточнюючи виконані розрахунки й доповнюючи наведені висновки додатковими результатами, зауважимо таке.

По-перше, позитивний ефект раніше запропонованих підходів і розроблених формул для розв'язання задачі «хімічний склад–властивості» залізовуглецевих сплавів полягає в тому, що в них застосовано узагальнювальні показники хімічного складу чавуну, а саме вуглецевий еквівалент C_{EKB} , ступінь евтектичності S_{EBT} , відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію C/Si . Ці показники комплексно характеризують вплив хімічного складу чавуну на його мікроструктуру. Через мікроструктуру вони впливають на фізико-механічні властивості ливарних виробів. Автори монографії

[5] підкреслюють, що залежність механічних властивостей виливків із сірого чавуну від його хімічного складу нерідко відображають у функції величин ступеня евтектичності $S_{\text{ЕВТ}}$ та вуглецевого еквівалента $C_{\text{ЕКВ}}$, оскільки ці показники комплексно характеризують чавун. Водночас вміст кожного хімічного елемента у складі чавуну самостійно впливає на його властивості. Наведені у табл. 1 дані про властивості сірого чавуну з пластинчастим графітом, узагальнені в ДСТУ 8833:2019 на основі досвіду ливарних підприємств, певною мірою характеризують якість цього матеріалу. Відразу відзначимо, що з підвищенням $C_{\text{ЕКВ}}$ і $S_{\text{ЕВТ}}$ механічні властивості, а саме σ_B і НВ сірого чавуну, знижуються. Така тенденція відповідає загальним уявленням щодо залежності σ_B ($S_{\text{ЕВТ}}$) виливків із синтетичного сірого чавуну з пластинчастим графітом [4, с. 135]. Представлені в табл. 1 розрахунки уточнюють цей висновок щодо чавунів із пластинчастим графітом, хімічний склад яких відповідає ДСТУ 8833:2019.

По-друге, наведені вище та інші подібні формули, що описують залежності властивостей чавуну від його хімічного складу, прості для практичного застосування в промисловості. Такі формули доцільно розробляти для будь-якої конкретної, навіть специфічної ливарної продукції із залізовуглецевих сплавів. Проблема полягає у складності їх розроблення та забезпечення надійності.

Недоліки наведених вище та інших відомих формул полягають в тому, що вони не враховують ймовірнісного характеру формування хімічного складу чавуну та відповідно його властивостей у процесі його виплавлення та лиття [5, с. 151–158]. Саме тому для прогнозування механічних властивостей чавуну за даними його хімічного складу доцільно застосовувати формули, побудовані на основі ймовірнісного підходу при визначенні вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, співвідношення вмісту вуглецю та кремнію тощо в досліджуваному залізовуглецевому сплаві [1, 7–8]. Такий підхід дає змогу розробляти залежності для розв’язання задачі «хімічний склад – властивості», які враховують більше інформації про досліджуваний сплав.

У формулах (2), (5) та под. для розрахунку механічних властивостей сірого чавуну, зокрема границі його міцності при розтягуванні σ_B , застосовують попередньо визначені величини ступеня евтектичності $S_{\text{ЕВТ}}$, вуглецевого еквівалента $C_{\text{ЕКВ}}$, співвідношення C/Si чи Si/C. У статті [7] наголошено на тому, що ці змінні є корельованими між собою, а використання корельованих змінних у регресійних рівняннях в загальних випадках небажане. Проте в розглянутому випадку це є припустимим, оскільки вуглець, кремній, фосфор та ін. елементи, вміст яких враховано в показниках $C_{\text{ЕКВ}}$, $S_{\text{ЕВТ}}$, C/Si тощо, перебувають у складі різних сполук та з’єднань. Початкові фізичні й механічні властивості цих хімічних елементів не зберігаються при виплавленні чавуну. З огляду на це, в рівняннях (2), (5) та под. змінні $C_{\text{ЕКВ}}$, $S_{\text{ЕВТ}}$ і C/Si можна у першому наближенні розглядати як незалежні один від одного показники та не пов’язані між собою аргументи. Показники ж твердості НВ й міцності σ_B сірого чавуну обидва характеризують міцність матеріалу. Тому НВ і σ_B зазвичай розглядають як взаємопов’язані показники властивостей матеріалу. Приклад цього — рівняння (1).

Найбільші труднощі виникають при побудові рівнянь, формул, які відображають вплив на міцність і твердість чавунних виливків їхньої товщини. Це пояснюється тим, що товщина стінок виливків опосередковано визначає вплив технології виготовлення ливарних виробів на їхню мікроструктуру та механічні властивості, зокрема впливає на швидкість охолодження розплаву чавуну та кінетику його кристалізації під час лиття. Зазначене є одним із ключових питань технології ливарного виробництва. Крім того, відзначимо таке.

Вміст хімічних елементів у чавуні чи іншому залізовуглецевому сплаві під час виплавлення не контролюють. Експериментально отримані величини вмісту хімічних елементів у розплаві надалі використовують для розрахунку механічних властивостей виливків. Для цього застосовують попередньо розроблені рівняння. Але швидкість охолодження і кристалізації розплаву, формування мікроструктури металу під час лиття на підприємстві прямо контролювати неможливо. Тому вплив технології

ливарного процесу на властивості виливків оцінюють опосередковано — через їх товщину. Через складність формалізації цього механізму за допомогою рівнянь вплив товщини чавунних виливків на їх властивості нерідко відображають у стандартах чи технічних умовах на цю продукцію, використовуючи для цього напрацьовану на практиці інформаційну базу. Так, наприклад, у ДСТУ 8833:2019 «Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальні технічні умови» наведено таблиці показників механічних властивостей чавуну в стінках виливків різного перерізу, зокрема величини σ_B , Н/мм², не менше ніж, і твердості HB, не більше ніж, виливків 7 товщин від 4 до 150 мм для чавунів 7 марок від СЧ100 до СЧА400. У наших статтях [1, 7–8 та ін.] як приклад наведено рівняння, що показують залежності механічних властивостей виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом відповідно до ДСТУ 8833:2019 для товщини виливків 30 і 50 мм.

Ця стаття продовжує публікувати результати циклу науково-дослідних робіт, виконаних у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України [1, 7–8 та ін.]. Методика проведення досліджень загалом залишилася незмінною. Особливий акцент зроблено на відмінностях і специфіці застосованої методики. Важливо підкреслити, що в цих наших роботах [1, 7–8 та ін.] величини вуглецевого еквівалента $C_{\text{ЕКВ}}$ та ступеня евтектичності $S_{\text{ЕВТ}}$ розраховували із застосуванням ймовірнісного підходу і методу Монте-Карло за формулами (3) і (6). Співвідношення C/Si розраховували за даними середніх величин відсоткового вмісту величин вуглецю та кремнію в хімічному складі чавуну кожної марки відповідно до ДСТУ 8833:2019. Ці величини також визначали у ймовірнісному підході. При орієнтовних розрахунках можна застосувати і простіші способи обчислення середніх значень показників у діапазонах досліджуваних величин. Але в такому разі частково втрачається інформація про вплив діапазонів розкиду показників. Розподіли величин відсоткового вмісту хімічних елементів у чавуні в межах діапазонів їх розкиду, передбачених стандартами або технічними умовами на ливарну продукцію із сірого чавуну, приймали за нормальним законом Гаусса. Таке припущення є допустимим для досліджень, орієнтованих на виробничу практику [2, 3, 7].

За об'єкт досліджень прийняли виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом, які виготовляють відповідно до загальних технічних умов, прийнятих у ДСТУ 8833:2019. За даними літературних джерел, виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом досягають 80 % загального обсягу чавунного литва, що виробляється [5, с. 151]. Орієнтовно таку саму частку в загальному обсязі литва складають вироби із сірого чавуну з пластинчастим графітом і сьогодні.

Величини механічних властивостей (границі міцності σ_B , під час розтягування, Н/мм², не менше ніж; твердості HB, не більше ніж; відношення σ_B/HB , вуглецевого еквівалента $C_{\text{ЕКВ}}$, ступеня евтектичності $S_{\text{ЕВТ}}$), розрахованих методом Монте-Карло, відношення C/Si до вмісту вуглецю C до вмісту кремнію Si у складі чавунів різних марок, згідно з ДСТУ 8833:2019, представлено в табл. 1. Відповідно до виробничого досвіду прийнято вважати, що при експлуатації крашу працездатність демонструють ливарні чавунні вироби, механічні властивості яких мають меншу твердість при однаковій міцності. Тому для орієнтовної оцінки механічних властивостей чавуну іноді практикується [5, с. 155] розглядати як за показник якості чавуну відношення його міцності до твердості σ_B/HB .

На рис. 1 як приклад показано побудовані за даними табл. 1 залежності твердості HB виливків товщиною 30 мм і 50 мм від їх міцності σ_B , Н/мм². Відповідні залежності представлені рівняннями:

$$\text{HB}_{30} = 150,71 + 0,3371 \sigma_B, \quad R^2 = 0,9976; \quad (7)$$

$$\text{HB}_{50} = 116,36 + 0,3043 \sigma_B, \quad R^2 = 0,9465. \quad (8)$$

Оскільки виконувати заміри твердості HB виливків значно простіше, то на практиці

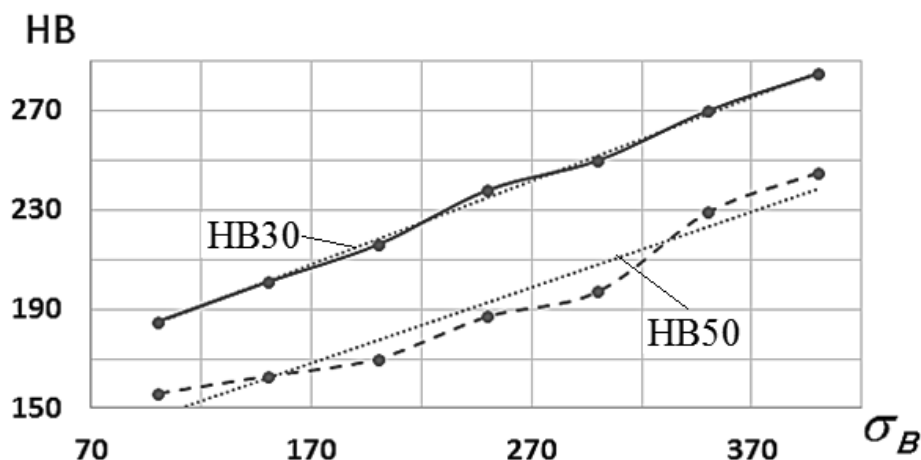


Рис. 1. Залежності твердості HB від границі міцності під час розтягування σ_B , Н/мм², сірого чавуну з пластинчастим графітом відповідно до ДСТУ 8833:2019. Позначено: HB30 — твердість при товщині виливків 30 мм; HB50 — при товщині 50 мм. Пунктирні прямі відповідають рівнянням (7) і (8) лінійної регресії

емпіричні рівняння (7) і (8) та под. часто перетворюють у залежності показника σ_B міцності чавуну від його твердості HB. У такому вигляді ці рівняння зручно застосовувати при прогнозуванні міцності σ_B виливків за даними їх твердості HB. Показники R^2 відображають величини коефіцієнтів кореляції R, зведені у квадрат.

Навіть побіжний аналіз наведеної у табл. 1 і на рис. 1 інформації з позиції можливості достовірно прогнозувати властивості сірого чавуну за даними відсоткового вмісту хімічних елементів у його складі із застосуванням формул (1)–(8) та под. дає підстави до таких міркувань. По-перше, зазначимо, що границя міцності під час розтягування σ_B , Н/мм² і твердість HB за Брінеллем, які визначають тимчасовий опір сірого чавуну руйнуванню при розтягуванні та опір локальній пластичній деформації, лінійно пов'язані між собою. Емпірична формула (1) характеризує тісний зв'язок твердості HB та міцності σ_B сірого чавуну. У кожному випадку формула (1) потребує уточнення з метою врахування особливостей технології виробництва литва на конкретному підприємстві. Рівняння (7) та (8) підтверджують висловлені вище судження і наочно свідчать, що для чавуну з пластинчастим графітом, хімічним складом, рекомендованим у ДСТУ 8833:2019, та виливків товщиною 30 та 50 мм загальновідомо емпірична залежність (1) не може бути застосована для прогнозування твердості HB чавуну за даними його міцності σ_B , Н/мм². Для отримання достовірних результатів визначення залежності HB(σ_B) сірого чавуну різних марок необхідно розробляти окремі рівняння для потрібних чавунів, подібно до того, як це передбачено у табл. 1.

Залежності твердості HB виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом від їх міцності σ_B , показані на рис. 1 та у рівняннях (7) і (8), враховують також вплив товщини стінок виливків на ці показники. Можна побачити, що збільшення товщини виливків з 30 мм до 50 мм суттєво зменшує твердість HB чавуну при усіх величинах його міцності σ_B , Н/мм². Ще більше інформації з цього питання дають представлені на рис. 2 і в табл. 2 результати розрахунків міцності σ_B чавунів із пластинчастим графітом, які розглянуто у ДСТУ 8833:2019, залежно від товщини стінок виливків у діапазоні 4–150 мм.

Передусім звернемо увагу на те, що товщина T виливків суттєво впливає на їх міцність σ_B і твердість HB у діапазоні відносно тонких (завтовшки 4–50 мм) стінок. Із потовщенням стінок виливків вплив їх товщини T , мм, на σ_B послаблюється. Крутизна й протяжність відрізків кривих на рис. 2 змінюються залежно від марки чавуну. Зазначене вельми помітно позначається й на величинах коефіцієнтів лінійної

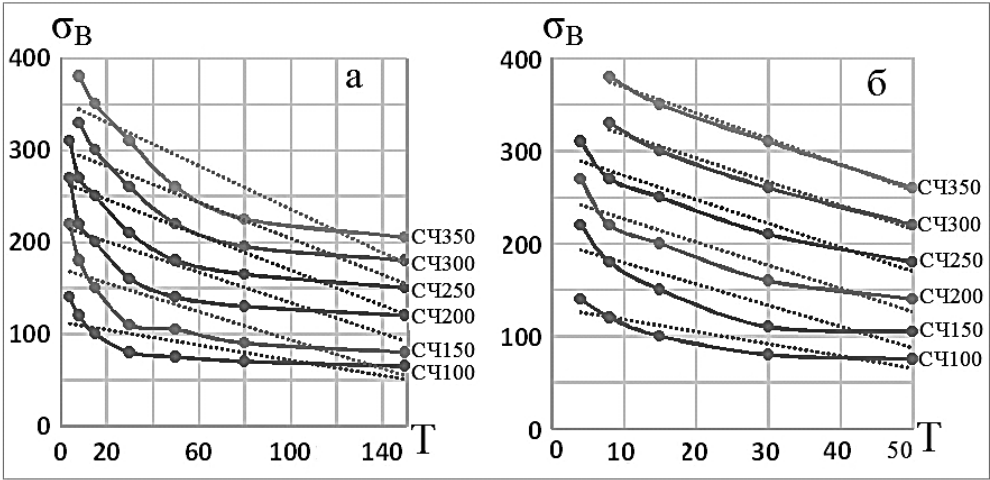


Рис. 2. Залежності величин границі міцності σ_B , Н/мм², під час розтягування (не менше ніж) від товщини стінок виливків T , мм, сірого чавуну з пластинчастим графітом різних марок відповідно до даних, наведених у ДСТУ 8833:2019: а — товщин стінок у діапазоні від 4 до 150 мм; б — товщин стінок у діапазоні 4–50 мм. Позначки: крапкові лінії відповідають лініям регресії; великі крапки на графіках відповідають значенням величин у ДСТУ 8833

кореляції та формулах, наведених у табл. 2. Для посилення достовірності результатів розрахунків залежності міцності σ_B чавунних виливків від товщини їх стінок доцільно застосовувати рівняння, які були побудовані для відносно невеликих (коротких) діапазонів товщини стінок виливків. У прикладі, який ми розглядаємо, доцільніше використовувати переважно рівняння, розроблені для діапазону товщини стінок виливків $T = 4 \dots 50$ мм, аніж формули, призначені для повного діапазону $T = 4 \dots 150$ мм. Причина полягає в тому, що при збільшенні товщини T стінок виливків понад ~ 50 мм вплив цього фактора на σ_B чавунів зазначених марок (табл. 2) послаблюється. Зауважимо також, що наведені на рис. 2 і в табл. 2 розрахунки певною мірою доповнюють представлену в класичних довідниках [4, с. 79 та ін.] інформацію про

Таблиця 2

Рівняння, що відображають лінійну апроксимацію залежності величин міцності σ_B , Н/мм², чавунних виливків від товщини їх стінок T , мм, відповідно до даних, наведених у ДСТУ 8833:2019. R^2 – квадрат коефіцієнта кореляції

Марки чавуну	Діапазони товщини T стінок виливків, мм:	
	а) $T = 4 \dots 150$	б) $T = 4 \dots 50$
СЧ350	$\sigma_B = 353,93 - 1,182T$ $R^2 = 0,8067$	$\sigma_B = 396,66 - 2,7827T$ $R^2 = 0,9911$
СЧ300	$\sigma_B = 302,1 - 0,9837T$ $R^2 = 0,7675$	$\sigma_B = 343,13 - 2,5488T$ $R^2 = 0,9797$
СЧ250	$\sigma_B = 265,57 - 0,9614T$ $R^2 = 0,7169$	$\sigma_B = 299,31 - 2,5848T$ $R^2 = 0,9162$
СЧ200	$\sigma_B = 217,28 - 0,8337T$ $R^2 = 0,6276$	$\sigma_B = 251,62 - 2,5057T$ $R^2 = 0,8478$
СЧ150	$\sigma_B = 170,88 - 0,7749T$ $R^2 = 0,6134$	$\sigma_B = 202,16 - 2,2972T$ $R^2 = 0,7962$
СЧ100	$\sigma_B = 112,76 - 0,4135T$ $R^2 = 0,5843$	$\sigma_B = 130,99 - 1,3079T$ $R^2 = 0,8124$

вплив товщини стінки виливків на міцність чавуну з пластинчастим графітом. Ці матеріали можна ефективно використати при розробленні технології прогнозування властивостей чавуну за даними його хімічного складу і товщини виливків.

На завершення статті зазначимо, що математичні моделі, призначені для прогнозування механічних властивостей чавунів, сталей та інших металевих сплавів за результатами контролю їх хімічного складу, повинні враховувати не лише параметри їх хімічного складу, а й особливості сформованої мікроструктури. Для сірих чавунів такими характеристиками є склад і стан металевої матриці, співвідношення феритної й перлітної складових, морфологія, кількість і дисперсність графітових включень, а також особливості кристалізації сплаву. Для маловуглецевих сталей, зокрема тих, які застосовують для виготовлення автомобільного листа [9], міцність, пластичність, інші показники механічних властивостей залежать насамперед від розміру й форми феритного зерна в структурі такого тонколистового сталевго листа.

Фізичною основою відповідного аналізу можуть слугувати фундаментальні закономірності фізичного матеріалознавства, зокрема співвідношення Холла–Петча, яке встановлює взаємозв'язок між міцністю σ_b полікристалічного матеріалу та середнім розміром зерен фериту в його структурі:

$$\sigma_y = \sigma_o + kd^{-1/2}, \quad (9)$$

де σ_y — межа текучості металу; σ_o — базовий опір кристалічної решітки металу переміщенню дислокацій; k — коефіцієнт зміцнення, який залежить від конкретного матеріалу; d — середній діаметр зерна в структурі металу.

Разом із тим класична форма рівняння Холла–Петча була розроблена для відносно однорідних полікристалічних матеріалів і не враховує структурну складність сірих чавунів, механічні властивості яких визначаються сукупною дією металевої матриці, графітної фази та особливостей кристалізації. У ДСТУ 8833:2019 відсутні кількісні характеристики мікроструктури виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом, необхідні для безпосереднього використання відповідних залежностей при прогнозуванні механічних властивостей чавуну. Тому в межах даної роботи класична задача «хімічний склад–механічні властивості» виливків із сірого чавуну розглянута без урахування його структурних параметрів.

З огляду на це співвідношення Холла–Петча доцільно розглядати не як готову розрахункову модель для сірого чавуну, а як фізико-металургійну основу подальшого розвитку прогнозних залежностей сталей та інших сплавів. Інтеграція параметрів їх мікроструктури дозволить не лише підвищити точність прогнозування механічних властивостей, а й надати фізичне обґрунтування коефіцієнтам прогнозних моделей, забезпечивши перехід від статистичного опису до фізично обґрунтованої системи прогнозування властивостей литих матеріалів.

Запропонований ймовірнісний підхід із використанням методу Монте-Карло при визначенні величин вуглецевого еквівалента й ступеня евтектичності чавуну для розв'язання прямої задачі «хімічний склад–властивості» і наведені приклади застосування такого підходу [1] свідчать про доцільність застосування його та відповідної методології також для оберненого варіанта задачі, який передбачає проектування хімічного складу чавуну для виплавлення його з наперед заданими властивостями. У подальшому поєднання ймовірнісних моделей із параметрами мікроструктури може стати основою для створення науково обґрунтованої системи підтримки технологічних рішень у ливарному виробництві.

Висновки

Розглянуто сучасний стан розвитку теорії і технології ливарного виробництва у сфері застосування неруйнівних способів визначення механічних властивостей виливків із сірого чавуну за результатами контролю хімічного складу його розплаву безпосередньо в процесі плавлення. Показано наявність передумов, перспектив і можливостей реалізації зазначеного технічного рішення на практиці в промислових

масштабах. Проаналізовано відомі рішення класичної для металургії в цілому та ливарного виробництва зокрема задачі «хімічний склад–властивості» литва із залізовуглецевих сплавів. Переваги розрахункових формул для визначення міцності, твердості, інших властивостей сірого чавуну за його хімічним складом полягає у представленні аргументами в запропонованих рівняннях узагальнених показників якості залізовуглецевих сплавів, а саме величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності. Недолік відомих рішень полягає в тому, що в них не враховано ймовірнісний характер цих показників. Запропоновано застосування ймовірнісного підходу і методу Монте-Карло у розв’язанні класичної задачі «хімічний склад–властивості» залізовуглецевих сплавів у прямому й оберненому її варіантах. На прикладі використання науково-технічної бази ДСТУ 8833:2019 виконано розрахунки залежностей міцності σ_B , Н/мм², і твердості HB чавунних виливків від величин вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію в хімічному складі чавуну, розрахованих у ймовірнісному підході.

Список літератури

- 1 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Шляхи розв’язання прямої і оберненої задач «хімічний склад–властивості чавунного литва». *Процеси лиття*. 2026. № 1 (162). С. 43–50. <https://doi.org/10.15407/plit2026.01.043>
- 2 Семесенко М.П., Пельх С.Г. ЭВМ в управлении литейными процессами. Донецк: Донбасс. 1975. 96 с.
- 3 Пельх С.Г., Семесенко М.П. Оптимизация литейных процессов. Киев: Вища школа. 1977. 192 с.
- 4 Справочник по чугуному литью. Под ред. Н.Г. Гиршовича Ленинград: Машиностроение. 1978. 758 с.
- 5 Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. Москва: Машиностроение. 1984. 432 с.
- 6 Шумихин В.С., Лузан П.П., Жельнис М.В. Синтетический чугун. Киев: Наукова думка. 1971. 159 с.
- 7 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Прогнозування механічних властивостей сірого чавуну (ймовірнісний підхід). Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». 2023. Том. 29 (107). № 3. С. 19–30. <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.019>
- 8 Сіренко К.А. Напрями розвитку методології регулювання хімічного складу і властивостей чавуну в ливарному виробництві на базі ймовірнісного підходу. Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». 2023. Т. 29 (108). № 4. С. 23–33. <https://doi.org/10.15407/mom2023.04.023>
- 9 Беньковский М.А., Мазур В.Л., Мелешко В.И. Производство автомобильного листа. Москва: Металлургия. 1979. 256 с.

References

- 1 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2026). Methods for solving the direct and inverse problems of «chemical composition–properties of cast iron castings». *Casting processes*, 1(162), 43–50 [in Ukrainian].
- 2 Semesenko, M.P., Pelykh, S.G. (1975). Computers in the control of casting processes. Donetsk: Donbass. 96 p. [in Russian].
- 3 Semesenko, M.P., Pelykh, S.G. (1975). Computers in the control of casting processes. Donetsk: Donbass. 96 p. [in Russian].

- 4 Handbook on cast iron casting. (1978). Edited by N.G. Girshovich. L.: Mashinostroenie. 758 p. [in Russian].
- 5 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].
- 6 Shumikhin, V.S., Luzan, P.P., Zhelnis, M.V. (1971). Synthetic Cast Iron. Kyiv: Naukova Dumka. 159 p. [in Russian].
- 7 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. Prediction of the mechanical properties of grey cast iron (probabilistic approach). (2023). Scientific and Technical Journal «*Metallurgy and Metal Processing*», 29(107), 3, 19–30 [in Ukrainian] <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.019>
- 8 Sirenko, K.A. (2023). Directions for the development of a methodology for regulating the chemical composition and properties of cast iron in foundry production based on a probabilistic approach. Scientific and Technical Journal «*Metallurgy and Metal Processing*», 29(108), 4, 23–33. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.15407/mom2023.04.023>
- 9 Benyakovsky, M.A., Mazur, V.L., Meleshko, V.I. (1979). The Production of Automotive Sheet Metal. Moscow: Metallurgiya. 256 p. [in Russian].

Одержано / Received 12.06.2026

Прийнято / Accepted 03.08.2026

Опубліковано / Published 07.09.2026

K.A. Sirenko, PhD (Engin.), Deputy Head of Department; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

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

APPROACHES TO DETERMINING HOW THE PROPERTIES OF GREY CAST IRON VARY WITH ITS CHEMICAL COMPOSITION

The relevance, potential and effectiveness of implementing a non-destructive method for determining the mechanical properties of iron-carbon alloy castings in foundry production are demonstrated, based on the results of monitoring the chemical composition of the melt directly during the smelting process in induction furnaces. The dependencies of the strength, hardness, etc., of grey cast iron on the content of carbon, silicon and phosphorus in its composition, as reported in the technical literature, are analysed. It is shown that, as generalised indicators of the chemical composition of grey cast iron when solving the «chemical composition–properties» problem typical of foundry production, it is recommended to use the values of the carbon equivalent (S_{ECV}), the degree of eutecticity (S_{EVT}), and the carbon-to-silicon ratio (C/Si). A positive aspect of efforts to address the «chemical composition–properties» problem in cast iron is the attempt to account, in the formulas developed for this purpose, for the influence of casting thickness on mechanical properties. A probabilistic approach using the Monte Carlo method is proposed to solve the «chemical composition–mechanical properties» problem for grey cast iron in both its direct and inverse forms. Examples are given of solving the «chemical composition–properties» problem using the probabilistic approach and a database of mechanical properties and chemical element content in grey cast iron with flake graphite in accordance with DSTU 8833:2019. Calculation formulas developed to solve this problem are proposed. The results of their numerical solution are presented.

Keywords: foundry production, grey cast iron, chemical composition, properties, forecasting, non-destructive testing.