

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.15-196 : 669.017

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-7>

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГОВАНИХ ВИСОКОХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ ДЛЯ МАСИВНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ВИЛИВКІВ

Воронов Олександр Сергійович,

аспірант

Державного біотехнологічного університету

ORCID ID: 0009-0009-2284-4152

Клочко Оксана Юріївна,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні

Державного біотехнологічного університету

ORCID ID: 0000-0003-3623-6587

У статті досліджено проблеми формування структури та механічних властивостей масивних композиційних виливків, робочий шар яких виготовляється з високохромистих чавунів. В умовах повільного охолодження та відсутності проміжного буферного шару критично важливим є забезпечення стабільності властивостей та міцності перехідної зони між зносостійким шаром та матеріалом серцевини. Для вирішення цього завдання проведено комплексний аналіз вибірки з 30 плавок із різним співвідношенням Cr/C та системою мікролегування. Застосовано методи регресійного аналізу для побудови математичних моделей впливу хімічного складу на твердість та характеристики міцності. Встановлено, що оптимальний баланс властивостей досягається при співвідношенні карбідоутворюючих елементів $5 < Cr/C < 7.5$ та вмісті хрому 15.0–18.0%. Це запобігає виділенню крихких первинних карбідів кубічного типу та суттєво знижує залишкові термічні напруження. Показано, що комплексний вплив легування нікелем і молібденом гальмує перлітне перетворення переохолодженого аустеніту в умовах сповільненого тепловідводу, а мікролегування титаном та бором сприяє подрібненню зерна та рівномірному розподілу карбідної фази. Визначено, що для забезпечення задовільної оброблюваності різанням та достатньої в'язкості перехідної зони співвідношення карбідо- до аустенітоутворюючих елементів має становити 1.5–2.0. Доведено наявність стійкої кореляції між твердістю та міцністю високохромистого чавуну, що дозволяє використовувати розраховані коефіцієнти переходу для неруйнівного контролю готових виробів. На основі отриманих даних запропоновано оптимізований хімічний склад комплексно-легованого чавуну, що гарантує високу експлуатаційну надійність масивних композиційних деталей.

Ключові слова: високохромистий чавун, механічні властивості, мікроструктура, масивні композиційні виливки, співвідношення Cr/C, комплексне легування, математичне моделювання.

Voronov Oлександр, Klochko Oksana. Structure and properties of complex-alloyed high-chromium cast irons for massive composite castings

The article investigates the problems of structure formation and mechanical properties of massive composite castings, the working layer of which is made of high-chromium cast irons. Under slow cooling conditions and in the absence of an intermediate buffer layer, it is critical to ensure the stability of properties and the strength of the transition zone between the wear-resistant layer and the core material. To address this issue, a comprehensive analysis of 30 heats with different Cr/C ratios and microalloying systems was conducted. Regression analysis methods were applied to build mathematical models of the chemical composition's influence on hardness and strength characteristics.

It has been established that the optimal balance of properties is achieved with a carbide-forming elements ratio of $5 < Cr/C < 7.5$ and a chromium content of 15.0–18.0%. This prevents the precipitation of brittle primary cubic carbides and significantly reduces residual thermal stresses. It is shown that the combined effect of alloying with nickel and molybdenum inhibits the pearlitic transformation of supercooled austenite under conditions of delayed heat dissipation, while microalloying with titanium and boron promotes grain refinement and uniform distribution of the carbide phase.

It was determined that to ensure satisfactory machinability and sufficient toughness of the transition zone, the ratio of carbide- to austenite-forming elements must be 1.5–2.0. The presence of a stable correlation between the hardness and strength of high-chromium cast iron is proven, which allows using the calculated transition coefficients to evaluate the properties of finished products. Based on the obtained data, an optimized chemical composition of complex-alloyed cast iron is proposed, which guarantees high operational reliability of massive composite components.

Key words: high-chromium cast iron, mechanical properties, microstructure, massive composite castings, Cr/C ratio, complex alloying, mathematical modeling.

Вступ. Високохромисті чавуни (ВХЧ) широко відомі своєю винятковою стійкістю до зносу та окислення. Завдяки гетерогенній структурі, що складається з твердих карбідів та металевої матриці, ці сплави незамінні в складних умовах експлуатації (термоциклічні навантаження, великі питомі тиски, агресивне середовище), зокрема в металургії, видобутку та переробці корисних копалин.

Сучасний розвиток технологій металургійного машинобудування демонструє еволюцію від монолітних деталей до складних композиційних систем. Такі вироби за своєю суттю є металевими макрокомпозицями, у яких кожен шар виконує свою функціональну роль: робочий шар забезпечує зносостійкість, а серцевина – конструкційну міцність. Сьогодні, окрім класичних двошарових виливків, у світовій практиці знаходять застосування тришарові конструкції [1]. У таких композиціях між робочим шаром із ВХЧ та в'язкою серцевиною вводиться додатковий буферний шар, який виконує роль демпфера термічних напружень та бар'єра для дифузії вуглецю. Це дозволяє більш плавно розподілити градієнт напружень і уникнути утворення крихких зон на межі шарів у надмасивних виробках.

Порівняльний аналіз розподілу механічних характеристик та залишкових напружень для дво- та тришарових систем [2] представлено на рис. 1. Як видно з наведених кривих, у двошаровому виконанні спостерігається різкий стрибок твердості та значний пік внутрішніх напружень на межі сплавлення двох металів. Введення буферного шару дозволяє "розмити"

ці максимуми, що суттєво знижує ризик відшарування робочого шару під час експлуатації.

Проте виготовлення тришарових систем є технологічно надскладним та економічно витратним процесом. Для більшості промислових застосувань (масивні прокатні валки, броні млинів) найбільш раціональним залишається використання масивних двошарових виливків. Основна складність їх виготовлення та експлуатації полягає у забезпеченні стабільності структури та міцності зчеплення шарів (за відсутності буферного шару) в умовах уповільненого охолодження великих мас металу.

Властивості високохромистих чавунів визначаються типом сформованих фаз і їх співвідношенням. В результаті аналізу ряду експериментальних даних [3-5] встановлено зв'язок зносостійкості, міцності з хімічним складом сплаву, що впливає на морфологію, кількість і розміри карбідної фази. Дослідження показали, що в аустенітному зерні виникають мікронеоднорідності в розподілі елементів. При розпаді переохолодженого аустеніту в областях, збагачених хромом і вуглецем (у центрі зерна), виявлено формування високодисперсних вторинних карбідів.

Як впливає з діаграми стану Fe-Cr-C, рис. 2 [6; 7], при співвідношенні $Cr/C < 3.5$ кристалізація сплаву відбувається з утворенням евтектики ледебуриту з карбідами цементитного типу Me_3C .

Оптимальна структура формується при відношенні $Cr/C = 3.5-10.2$: затвердіння чавунів починається з утворення аустеніту, а евтектика формується з аустеніту і тригональних карбідів

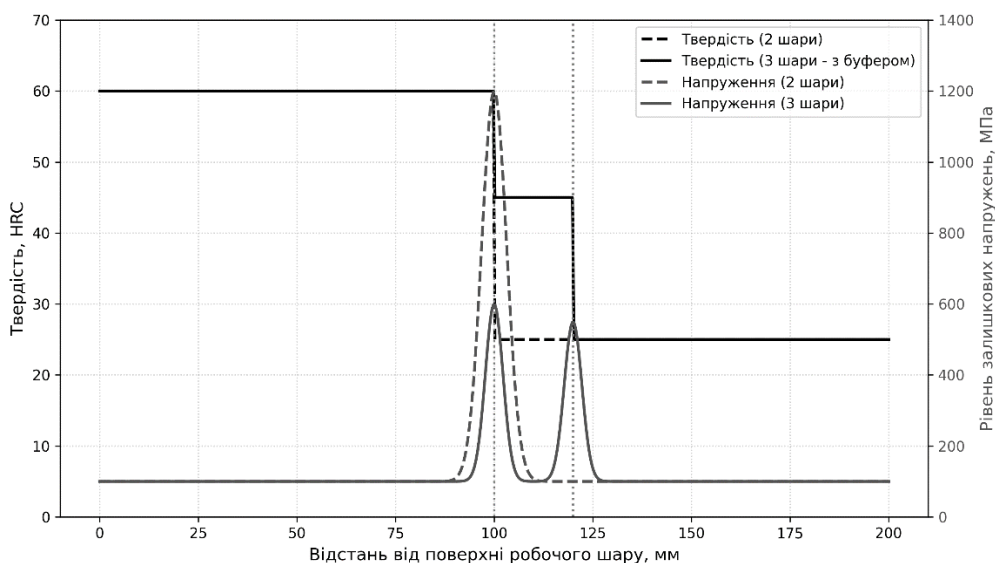


Рис. 1. Порівняльна схема розподілу твердості та залишкових напружень по глибині двошарового (пунктирна лінія) та тришарового (суцільна лінія) виливків

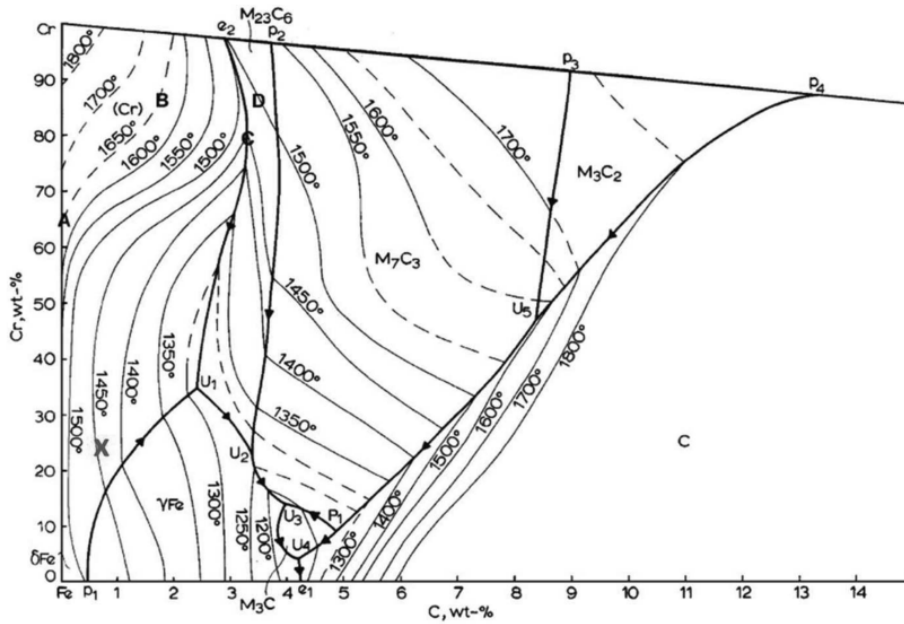


Рис. 2. Положення поверхонь ліквідусу поблизу кута з високою концентрацією заліза [7]

типу Me_7C_3 (містять 50 - 70%Cr). Це забезпечує більш сприятливе їх розташування і визначає зносостійкість та міцність чавуну. Подальше збільшення співвідношення $Cr/C > 10.2$ є недоцільним, оскільки зменшується частка спеціальних карбідів тригонального типу Me_7C_3 , натомість утворюється α -фаза та спеціальні карбіди кубічного типу $Me_{23}C_6$, що негативно позначається на зносостійкості сплаву. Отже, збільшення співвідношення Cr/C вище зазначених меж недоцільно внаслідок виділення великих і крихких первинних карбідів.

Актуальність та мета дослідження.

У виробництві масивних двохшарових виливків необхідно забезпечити такий рівень комплексного легування робочого шару, який дозволив би досягти заданої твердості, мінімізувати градієнт внутрішніх напружень на межі сплавлення та забезпечити необхідну міцність. Для обґрунтування вибору компонентів доцільно розглянути вплив як основних, так і легуючих складових на формування структури. У зв'язку з цим, метою даної роботи є оцінка впливу хімічного складу (зокрема співвідношення Cr/C) на механічні властивості високохромистих чавунів, що дозволить оптимізувати склад робочого шару масивних виливків та створити базу для використання неруйнівних методів контролю їх міцності.

Матеріали та методи досліджень. Досліджувані матеріали та легування. Для оцінки впливу хімічного складу на формування структури та механічних властивостей робочого шару масивних двохшарових виливків було

досліджено промислові та дослідно-промислові плавки високохромистих чавунів. Загальна вибірка становила 30 варіантів сплавів, що суттєво відрізнялися базовим співвідношенням карбідоутворюючих елементів (зокрема Cr/C) та комплексом мікролегування.

Хімічний склад досліджуваних чавунів варіювався в наступних межах (% мас.): 2.65-2.82 C; 0.62-0.93 Si; 0.63-1.45 Mn; ≤ 0.041 P; $0.052 \leq S$; 2.92-26.8 Cr; 0.11-1.0 Ni; 2.03-5.61 Cu; ≤ 0.079 V; ≤ 0.37 Mo; ≤ 0.44 V; 0.15-0.4 Ti. Вміст основних домішок (Si, Mn, S, P) підтримувався у вузькому технологічному інтервалі для мінімізації їхнього побічного впливу на результати експерименту.

Особливу увагу було приділено комплексному мікролегуванню, яке є критичним для масивних перерізів.

Титан (Ti) вводили в кількості 0.15–0.40 % як ефективний модифікатор другого роду для отримання дрібнозернистої структури та підвищення зносостійкості. Введення Ti в кількості менше 0,1-0,15% є неефективним, тоді як його надлишок (більше 2.0 %) є недоцільним через різке зменшення рідкоплинності чавуну, збільшення газонасиченості та підвищення пористості, що є критичним дефектом на межі сплавлення багатшарового виливка [8].

Бор (B) у зазначених межах використовували як активний аустенізатор, що сприяє рівномірному розподілу дрібнодисперсних карбідів по всьому масивному перерізу виливка, запобігаючи їх коагуляції при уповільненому охолодженні.

Підготовка зразків. Для коректної імітації швидкості охолодження масивного двошарового вилівка (де тепловідвід суттєво уповільнений) випробування проводили на спеціально виготовлених литих зразках. Заливка здійснювалася у форми з контрольованим тепловідводом, що дозволило наблизити умови кристалізації та формування первинних карбідів до реальних промислових умов виготовлення товстостінних деталей (броней млинів, прокатних валків).

Механічні випробування та неруйнівний контроль. Оскільки для крихких матеріалів, до яких належить високохромистий чавун, виготовлення стандартних зразків для випробувань на розтяг є ускладненим, оцінку характеристик міцності проводили комплексно. Вимірювання твердості здійснювали за методами Брінелля (НВ) та Шора (HSD). Випробування на міцність при вигині ($\sigma_{зг}$) та стисканні ($\sigma_{ст}$) виконували на універсальних випробувальних машинах.

Базуючись на фундаментальних дослідженнях (залежність Гуляєва-Гудцова) [9], яка підтверджує наявність стійкого співвідношення між рівнем твердості та міцністю крихких матеріалів [10], у роботі було використано розрахункову модель:

$$HB = k \cdot \sigma \quad (1),$$

де НВ – твердість за Брінеллем, k – коефіцієнт переходу, σ – границя міцності.

Визначення розрахункових коефіцієнтів переходу $\sigma_{зг}/HB$ та $\sigma_{ст}/\sigma_{ст}$ для сплавів з різним співвідношенням Cr/C стало основою для створення бази даних неруйнівного методу контролю. Це дозволяє оперативно оцінювати міцність робочого шару безпосередньо на готових масивних вилівках.

Статистична обробка даних (Математичне моделювання). Властивості ВХЧ залежать від великої кількості факторів, що ускладнює опис їхнього впливу точними термодинамічними функціями. Тому для аналізу результатів застосовано комп'ютерні методи багатовимірної математичної статистики та регресійного аналізу. Формальний математичний опис системи (кореляційний зв'язок) дозволив визначити рівень значущості кожного легуючого елемента та оптимізувати базовий хімічний склад для досягнення максимальних експлуатаційних властивостей.

Результати досліджень та їх обговорення. Виходячи з умов експлуатації масивних двошарових вилівок, головними вимогами до матеріалу робочого шару є високі показники твердості при збереженні достатнього рівня міцності для протидії магістральним тріщинам. Значення

твердості, розрахункові коефіцієнти переходу і характеристики міцності для досліджуваних сплавів з різним співвідношенням Cr/C наведені в табл. 1.

Аналіз масиву експериментальних даних свідчить, що зі збільшенням відношення Cr/C твердість і границя міцності при стисненні послідовно підвищуються, тоді як значення границі міцності при вигині починають зменшуватися. Наочна візуалізація цих залежностей представлена на рис. 3.

Як видно з наведених графіків, розкид значень $\sigma_{зг}$ суттєво зростає при Cr/C > 7.5. Це пояснюється зміною морфології первинних фаз, появою залишкового аустеніту і збільшенням загальної частки карбідної фази. Для масивних вилівок падіння міцності на вигин (або її нестабільність) є вкрай небажаним, оскільки саме цей параметр відповідає за опір відшаруванню робочого шару від в'язкої серцевини.

Користуючись отриманими залежностями, досліджувані зразки були класифіковані на групи (табл. 2).

Встановлено, що для умов уповільненого охолодження масивних деталей найбільшу стабільність комплексу механічних властивостей мають чавуни, що входять в область $5 < Cr/C < 7.5$ і містять хром в інтервалі 15-18.0%.

Рівень міцності і твердості високохромистого сплаву багато в чому визначається типом, розміром, розподілом карбідної фази, в меншій мірі структурою металевої матриці [3; 5; 11]. Співвідношення фаз матриці можна регулювати відповідним легуванням і наступною термообробкою. Властивості карбідної фази зумовлені умовами кристалізації. У зв'язку з цим, для вивчення міцності, була проведена оцінка впливу легуючих домішок на механічні властивості матеріалу робочого шару вилівок.

Оскільки властивості багатокомпонентних систем складно описати точними кінетичними функціями, шляхом статистичної обробки вибірки була отримана математична модель. Вона визначає рівень значущості кожного фактора (елемента) щодо формування характеристик міцності та твердості (табл. 3).

Аналіз коефіцієнтів моделі показує високий вплив хрому та вуглецю на базові характеристики, що підтверджує попередні висновки. Однак для масивних перерізів критично важливими виявилися показники впливу нікелю (Ni) та молібдену (Mo) на границю міцності ($\sigma_{зг}$). Комплексний вплив зазначених легуючих елементів забезпечує ефективне гальмування перлітного розпаду аустеніту за умов низьких швидкостей охолодження вилівка у ливарній формі.

Таблиця 1

Механічні властивості високохромистих чавунів залежно від хімічного складу

№ п/п	Cr/C	Механічні властивості					
		Твердість		Границя міцності		σ_{3r}/HB	$\sigma_{3r}/\sigma_{ст}$
		HSD	HB	при вигині, σ_{3r} МПа	при стисканні, $\sigma_{ст}$ МПа		
1	2.09	62	441	880	1790	2.00	0.49
2	1.08	60	437	820	1590	1.88	0.52
3	1.12	59	430	903	1600	2.10	0.56
4	1.10	58	423	856	1601	2.02	0.53
5	2.01	64	460	820	1800	1.78	0.46
6	1.05	58	423	780	1650	1.84	0.47
7	2.06	60	437	900	1890	2.06	0.48
8	4.50	65	469	930	2005	1.98	0.46
9	4.61	66	477	960	2010	2.01	0.48
10	4.61	64	460	950	2061	2.07	0.46
11	4.57	67	486	962	2150	1.98	0.45
12	7.67	71	523	920	2300	1.76	0.40
13	7.58	70	512	1021	2400	1.99	0.43
14	7.70	72	532	930	2430	1.75	0.38
15	7.78	74	545	1025	2500	1.88	0.41
16	4.51	73	538	885	2090	1.64	0.42
17	4.54	74	545	830	2001	1.52	0.41
18	4.75	71	523	900	1985	1.72	0.45
19	6.42	50	364	638	1790.5	1.75	0.36
20	8.27	55	402	533	2293.5	1.33	0.23
21	4.39	75	555	480	1900	0.86	0.25
22	3.77	66	477	412	1890	0.86	0.22
23	4.50	45	321	684	1896	2.13	0.36
24	6.54	46	332	644	1889	1.94	0.34
25	6.57	46	332	771.7	1994	2.32	0.39
26	9.43	73	538	766	2350	1.42	0.33
27	10.04	70	512	693	2400	1.35	0.29
28	6.09	70	512	522.25	1870	1.02	0.28
29	6.09	65	469	567.4	1877	1.21	0.30
30	6.20	65	469	559.2	1863	1.19	0.30

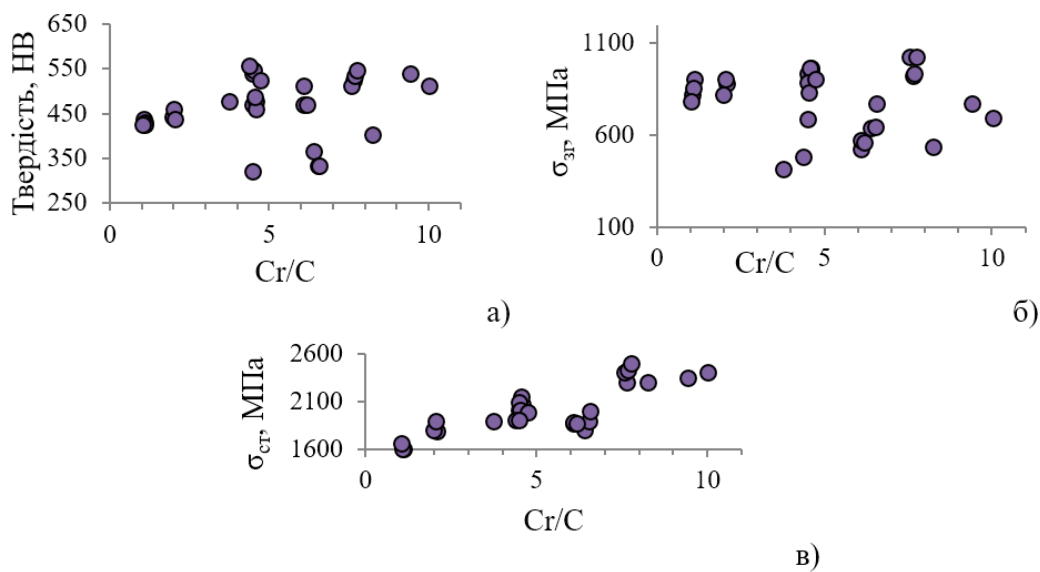


Рис. 3. Залежність механічних характеристик від співвідношення Cr/C: а) твердість; границя міцності при: б) вигині; в) стисканні

Таблиця 2

Залежність механічних властивостей від співвідношення Cr/C

Параметр	1<Cr/C<3,5	3,5<Cr/C<5	5<Cr/C<7,5	7,5<Cr/C<10
Cr, %	2,9-5,9	10,8-13,0	15,0-18,0	20,0-27,0
$\sigma_{зр}$, МПа	780-903	412-962	520-560	693-1021
$\sigma_{ст}$, МПа	1590-1900	1890-2150	1840-1900	2090-2400
HSD	58-64	64-75	65-70	70-74

Таблиця 3

Рівень значущості коефіцієнтів отриманої математичної моделі

Фактори	HSD	$\sigma_{зр}$	$\sigma_{ст}$
C	103,424	436,645	3,111
Si	1,718	38,125	2,387
Mn	16,669	1,181	2,285
P	1,194	1,405	1,015
S	8,655	3,080	1,035
Cr	31,834	3,130	132,987
Ni	10,234	29,402	37,455
Cu	1,473	1,200	10,150
B	1,095	2,210	3,789
Mo	4,655	3,072	7,941
V	1,001	1,023	1,588
Ti	19,668	4,387	3,148

Важливим етапом виготовлення двохарового вилівка є його механічна обробка. Отримані моделі дозволили встановити, що добра оброблюваність високохромистих чавунів у литому стані забезпечується за умови жорсткого контролю співвідношення карбідо- до аустенітоутворюючих елементів.

Виявлено, що це співвідношення повинно знаходитися в інтервалі 1.5–2.0. Вихід за ці межі призводить до різкого погіршення оброблюваності: при перевищенні показника (більше 2.0) різко зростає кількість високоміцної карбідної фази, що робить матеріал нездоланим для різального інструменту. При зниженні (менше 1.5) зростає частка залишкового аустеніту, що призводить до підвищеної в'язкості, наклепу при різанні та ризику фазових перетворень (утворення мартенситу деформації) під час механічної обробки.

На підставі результатів кореляційного аналізу та експериментальних даних розроблено комплексно-легований високохромистий чавун. Даний сплав оптимізовано спеціально для використання в якості робочого шару масивних двохарових вилівок, де відсутній буферний шар, що вимагає балансу між зносостійкістю поверхні та структурною стабільністю на межі зі матеріалом серцевини.

Оптимальний хімічний склад (% мас.):
 2.62-2.97C, 0.91-1.07Si, 0.80-0.86Mn,
 15.9-17.1Cr, 1.32-1.51Ni, 1.15-1.24Mo,
 0.21-0.38Cu, 0.20-0.37V, 0.05-0.07%B,

0.17-0.25%Ti. Проведений додатковий статистичний аналіз повністю підтверджує надійність отриманих експериментальних даних для запропонованого діапазону легування.

Висновки

1. Встановлено, що для забезпечення стабільності механічних властивостей робочого шару масивних композиційних вилівок оптимальним є співвідношення $5 < Cr/C < 7.5$ при вмісті хрому 15.0–18.0 %. Це запобігає виділенню крихких карбідів $Me_{23}C_6$ та дозволяє знизити рівень залишкових термічних напружень на межі сплавлення з матеріалом серцевини.

2. Доведено, що комплексний вплив легуючих елементів (зокрема Ni та Mo) забезпечує ефективно гальмування перлітного розпаду аустеніту за умов низьких швидкостей охолодження.

3. За результатами моделювання встановлено, що оптимальна в'язкість перехідної зони та оброблюваність різанням гарантуються при співвідношенні карбідо- до аустенітоутворюючих елементів у межах 1.5–2.0.

4. Визначені коефіцієнти переходу ($\sigma_{зр}/HB$ та $\sigma_{зр}/\sigma_{ст}$) створюють базу для неруйнівного контролю міцності безпосередньо на готових масивних композитах.

5. Запропоновано оптимізований хімічний склад чавуну для робочого шару масивних вилівок, %: 2.62–2.97 C; 15.9–17.1 Cr; 1.20–1.51 Ni; 0.90–1.25 Mo; 0.17–0.25 Ti та ін.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Li Y., Zhang S., Wang Q. et al. Microstructure and mechanical properties of bimetallic white cast iron/steel composites produced by liquid–liquid casting. *Materials & Design*. 2014. Vol. 56. P. 70–76.
2. Adams C.L. Residual stress investigations in layered metallic systems. 2025.
3. Скобло Т.С. та ін. Виробництво та застосування прокатних валків. *Довідник: під ред. проф. Скобло Т.С. Х.: ЦД № 1. 2013. 572 с.*
4. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сидашенко О.І., Белкін Є.Л. Теоретичні та експериментальні основи прогнозування структуроутворення, властивостей високовуглецевих легованих сплавів. Монографія: під ред. проф. Т.С. Скобло. Х.: Діса плюс. 2019. 278 с.
5. Wiczerzak K., Bała P., Stępień M., Cios G., Koziół T. The Characterization of Cast Fe–Cr–C Alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. Vol. 60, No. 2. P. 805–808.
6. Jackson R.S. The austenite liquidus surface and constitutional diagram for the Fe–Cr–C metastable system. *Iron and Steel Instit.* 1970. Vol. 208(2). P. 163–167.
7. Wiczerzak K., Bała P., Stępień M., Cios G., Koziół T. The Characterization of Cast Fe–Cr–C Alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. № 60 (2). DOI: 10.1515/amm-2015-0206
8. Spuzic S., Strafford K.N., Subramanian C. et al. Wear of hot rolling mill rolls: an overview. *Wear*. 1994. Vol. 176. P. 261–271.
9. Cahoon J.R., Broughton W.H., Kutzak A.R. Determination of yield strength from hardness measurement results. *Metallurgical Transactions*. 1971. T. 2. P. 1979–1983.
10. Клочко О.Ю. Вплив низькотемпературної циклічної термообробки на структурну неоднорідність у масивних виливках із високохромистого комплекснолегованого чавуну. *Вісник ХНТУСГ*. 2010. Вип.101. С. 73–77.
11. Tabrett C.P., Sare I.R., Ghomashchi M.R. Microstructure–property relationships in high chromium white iron alloys. *International Materials Reviews*. 1996. Vol. 41, No. 2. P. 59–82.

REFERENCES:

1. Li, Y., Zhang, S., Wang, Q., et al. (2014). Microstructure and mechanical properties of bimetallic white cast iron/steel composites produced by liquid–liquid casting. *Materials & Design*, 56, 70–76.
2. Adams, C. L. (2025). Residual stress investigations in layered metallic systems.
3. Skoblo, T. S., et al. (2013). Vyrobnystvo ta zastosuvannya prokatnykh valkiv [Production and application of rolling rolls]. Kharkiv: TsD No. 1 [in Ukrainian].
4. Skoblo, T. S., Klochko, O. Yu., Sidashenko, O. I., Bielkin, Ye. L. (2019). Teoretychni ta eksperymentalni osnovy prohnozuvannya strukturoutvorennia, vlastyvostei vysokovuhletsevykh lehovanykh splaviv [Theoretical and experimental foundations of predicting structure formation and properties of high-carbon alloyed alloys]. Kharkiv: Disa Plus [in Ukrainian].
5. Wiczerzak, K., Bała, P., Stępień, M., Cios, G., Koziół, T. (2015). The characterization of cast Fe–Cr–C alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(2), 805–808.
6. Jackson, R. S. (1970). The austenite liquidus surface and constitutional diagram for the Fe–Cr–C metastable system. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 208(2), 163–167.
7. Wiczerzak, K., Bała, P., Stępień, M., Cios, G., Koziół, T. (2015). The characterization of cast Fe–Cr–C alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(2). <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0206>
8. Spuzic, S., Strafford, K. N., Subramanian, C., et al. (1994). Wear of hot rolling mill rolls: an overview. *Wear*, 176, 261–271.
9. Cahoon, J. R., Broughton, W. H., Kutzak, A. R. (1971). Vyznachennia hranytsi tekuchosti za rezultatamy vymiriuvannya tverdosti [Determination of yield strength from hardness measurements]. *Metallurgical Transactions*, 2, 1979–1983 [in Ukrainian].
10. Klochko, O. Yu. (2010). Vplyv nyzkotemperaturnoi tsyklichnoi termoobrobky na strukturu neodnorodnist u masyvnykh vylyvkakh iz vysokokhromystoho kompleksnolehovanoho chavunu [Effect of low-temperature cyclic heat treatment on structural heterogeneity in massive castings of high-chromium alloyed cast iron]. *Visnyk KhNTUSG – Bulletin of KhNTUSG*, 101, 73–77. [in Ukrainian].
11. Tabrett, C. P., Sare, I. R., Ghomashchi, M. R. (1996). Microstructure–property relationships in high chromium white iron alloys. *International Materials Reviews*, 41(2), 59–82.



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 15.04.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.05.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026