

<https://doi.org/10.15407/plit2025.03.052>

621.74:669.131.6:620.179.13:621.89

І.В. Лук'яненко*, канд. техн. наук, доцент, доцент; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

Б.В. Кивгило*, асистент; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

Є.Г. Биба*, канд. техн. наук, доцент, доцент; e-mail: byba.evgen@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

М.М. Ямшинський*, докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри; e-mail: yamshinskiy@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>,

О.Г. Ковальчук**, канд. техн. наук, інженер загальноцехового персоналу хімічного цеху; e-mail: alex7kovalchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0639-2626>

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

**Філія «ВП «Хмельницька АЕС» (м. Нетішин, Хмельницька обл., Україна)

ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ, МІКРОЛЕГУВАННЯ ТА МОДИФІКУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ЗНОСОСТІЙКИХ ХРОМОМАРГАНЦЕВИХ ЧАВУНІВ

У роботі наведено результати дослідження впливу хімічного складу на зносостійкість високолегованих чавунів, що працюють в умовах гідроабразивного зношування. Обґрунтовано доцільність використання хромомарганцевих чавунів як матеріалу для виготовлення литих деталей систем гідрозоловидалення теплових електростанцій. Основну увагу зосереджено на дослідженні впливу вмісту хрому, марганцю, титану та рідкоземельних металів на структуру, твердість і зносостійкість чавунів. Встановлено оптимальний вміст легувальних елементів таких як хром та марганець, що забезпечать максимальну зносостійкість дослідного чавуну. Визначено вплив мікролегування високолегованого хромомарганцевого чавуну титаном та модифікування рідкоземельними металами. Досліджено вплив структурних складових і морфології карбідів на експлуатаційні властивості чавуну. Показано, що найбільш ефективною є структура чавуну з карбідами типу $(Cr, Fe)_7C_3$, рівномірно розподіленими у мартенситній або зміцненій основі, а також стабілізованим залишковим аустенітом, здатним до зміцнення в процесі зношування. Установлено, що введення 18–20 % Cr та 3,5–4,5 % Mn забезпечує підвищення зносостійкості дослідного чавуну на 20–25 % в порівнянні з еталонним зносостійким сплавом Cr28Ni2. Встановлено, що мікролегування титаном у межах 0,4–0,6 % дозволяє додатково підвищити зносостійкість чавуну на 15–20 % завдяки утворенню дисперсних зміцнювальних карбідів та

карбонітридів. Додавання рідкоземельних металів у кількості 0,2–0,4 % сприяє очищенню металу від неметалевих включень, зміні їхньої морфології та покращенню механічних властивостей. Запропоновано оптимальний склад зносостійкого чавуну, який доцільно застосовувати для виготовлення шнекових транспортерів, колін пульпопроводів, робочих коліс, корпусів і дисків багерних насосів, які працюють у безпосередньому контакті з пульпою та зазнають гідроабразивного зношування в системах золотодобування. Результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення литих виробів та різноманітних технологій зміцнення їх робочих поверхонь.

Ключові слова: зносостійкий чавун, гідроабразивне зношування, легування, мікролегування, модифікування, хром, марганець, титан, рідкоземельні метали, карбіди.

Вступ

Абразивна та гідроабразивна дія продуктів згорання палива на деталі теплоенергетичного устаткування призводить до суттєвих безповоротних втрат зносостійких сплавів, що актуалізує дослідження, які спрямовано на підвищення їх зносостійкості. Під час згорання палива в котлоагрегатах утворюється значна кількість шлаку та золи, які видаляють за допомогою струменя води. Суміш води і шлаку у вигляді пульпи потрапляє в систему видалення й транспортується до золотодобування. У системах видалення теплоелектростанцій (ТЕС) в умовах абразивного та гідроабразивного зношування працюють витки шламових шнекових транспортерів, робочі колеса, корпуси та диски багерних насосів, коліна пульпопроводів, які виготовляють литтям із зносостійкого чавуну марки Cr28Ni [1].

Основною причиною зношування деталей систем видалення є абразивні оксиди різноманітної форми, що входять до складу шлаку та золи, концентрація яких у пульпі досягає 25–30 %, а розміри частинок становлять від 0,04 мм до 100 мм [2, 3]. Опір металевих виробів зношуванню залежить від їх хімічного складу та структури, яка формується у результаті термічного оброблення що корелює з даними робіт [1–4].

У роботі [5] досліджено вплив кута атаки абразивного матеріалу на зношування білих чавунів у гідроабразивному середовищі і встановлено, що вони зносостійкі за кутів атаки близько 10°. Крім того, встановлено, що за малих кутів атаки із збільшенням вмісту вуглецю зносостійкість сплавів зростає, а за кутів атаки понад 70°, незалежно від вмісту вуглецю у дослідженому діапазоні, зносостійкість практично не змінюється.

Згідно із даними робіт [6, 7], необхідно розглядати форму, розмір і ступінь закріплення абразивних частинок як фактори, що істотно впливають на інтенсивність зношування. Збільшення їх розміру, кута атаки та підвищення ступеню закріплення збільшують інтенсивність зношування.

Чавуни, які мають високу зносостійкість, містять значну кількість дрібнодисперсних карбідів із високою мікротвердістю (10–16 ГПа) [8]. У чавунах, які вміщують до 7 % хрому, утворюються карбіди цементитного типу Me_3C , мікротвердість яких досягає до 1100 HV [9]. При вмісті хрому понад 7 % у чавуні з 3 % вуглецю кількість карбідів цементитного типу зменшується внаслідок утворення карбідів хрому з вищою мікротвердістю і зносостійкість чавуну підвищується. Максимальну зносостійкість мають чавуни з карбідами $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$. Такий ефект відбувається завдяки підвищеній мікротвердості таких карбідів при збільшенні вмісту хрому в чавуні в межах 11–13 % [10].

Збільшення кількості карбідів підвищує зносостійкість чавунів, якщо тип карбідів при цьому не змінюється. Отже, згідно із [9], у чавуні, що вміщує 13 % хрому та 3,2–3,4 % вуглецю, кількість карбідів Me_7C_3 складає ~ 30 %. Подальше збільшення вмісту вуглецю та кількості карбідів не призводить до підвищення зносостійкості, оскільки в структурі з'являються карбіди Me_3C . Збільшення розмірів карбідних вкраплень знижує зносостійкість чавуну. Крупні карбіди розтріскуються, деформуються та кришаться під дією навантажень, що створюються абразивною частинкою. Дрібні карбіди передають частину напружень на металеву основу і не руйнуються, що узгоджується із принципом Шарпі. В умовах зношування в гідроабразивному середовищі критичний розмір карбідів становить 7–8 мкм, після перевищення

якого зносостійкість чавуну зменшується стрибкоподібно [9, 10]. Тому, наприклад, збільшення кількості карбідів типу $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$ в структурі від 12 до 32 % призводить до підвищення зносостійкості перлітного чавуну лише на 50 %, а з мартенситного — втричі [11]. Максимальну зносостійкість білого чавуну забезпечує міцна і тверда мартенситна металічна основа. В умовах ударно-абразивного зношування перетворення залишкового аустеніту в мартенсит може супроводжуватися підвищенням зносу в результаті виникнення розтягувальних навантажень під час цього перетворення.

Суттєве підвищення зносостійкості може бути лише у сплавах, які в процесі пластичної деформації, зазнають фазових перетворень [12, 13]. Чавуни, основою яких у вихідному стані є нестабільний легований аустеніт, одержаний прискореним охолодженням виливка у металевій формі, має зносостійкість у рази вищу, ніж чавуни, що вміщують перевищену кількість карбідів, але не зазнають фазових перетворень у процесі деформації [14]. Важливим питанням у виборі зносостійкої структури є утримання карбідів металевою матрицею навіть у процесі фазових перетворень.

Метою роботи є дослідження нових зносостійких залізовуглецевих сплавів із високим вмістом хрому, визначення їх властивостей, впливу легування, мікролегування та модифікування.

Матеріали

Дослідні сплави виплавляли в індукційній печі ICT-0,06 з основною футеровкою із сталевого та чавунного брухту і феросплавів. Плавлення здійснювали методом переплавлення. Феросплави, що швидко окислюються додавали до чавуну при температурі 1450–1470 °C в кінці плавки. Розплав витримували до повного розчинення або розплавлення присадок, випускали в ківш і розливали у форми. Алюміній як розкислювач вводили в ківш у розрахованих кількостях у процесі заповнення його рідким металом із подальшим перемішуванням сплаву прутком.

Литі заготовки для дослідження зносостійкості сплавів у гідроабразивному середовищі на зразках розмірами 60×25×10 виготовляли в нижній напівформі в горизонтальному положенні для забезпечення відсутності усадкових та газових дефектів у місцях, які піддаються зношуванню під час випробувань.

Форми заливали розплавом чавуну при температурі від 1380 °C до 1410 °C. Після охолодження та вибивання форм зразки піддавали механічному обробленню.

Зразки випробовували в потоці абразивної рідини, яка діє на них під змінними кутами до їх поверхонь. Режим випробувань зразків у гідроабразивному середовищі визначений з урахуванням таких вимог: висока відтворюваність результатів, втрати металу, достатні для оцінки зносу зразка за порівняно короткий час перевірки і максимально стабільні умови тестувань зразків. Як абразивний матеріал для випробувань використовували кар'єрний пісок кутастої форми. Визначення режиму випробувань матеріалів у лабораторних умовах здійснювали з використанням зразків, виготовлених із сплаву Cr28Ni2. Зносостійкість досліджуваних сплавів порівнювали із зношенням цих самих зразків.

Результати і обговорення

Досліджено вплив хрому в діапазоні від 4,5 до 31,6 % на твердість та зносостійкість чавунів із вмістом вуглецю до 3,0 %. Для забезпечення повної прогартуваності виливків із чавуну вміст марганцю тримали у діапазоні від 4,0 до 5,0 % [14]. Властивості чавуну залежно від вмісту хрому наведено на рисунку 1.

Відомо, що хром — сильний карбідоутворюючий елемент у чавунах, зменшує розчинність вуглецю в α - та γ -залізі, збільшує стійкість твердого розчину і кількість евтектичної складової. У чавунах, навіть при невеликому вмісті хрому, утворюється карбідна фаза цементитного типу, яка збагачена хромом [14, 15]. Збільшення концентрації хрому від 4,5 до 21,1 % суттєво покращує експлуатаційні властивості марганцевого чавуну. З підвищенням вмісту хрому (понад 20 %) у чавунах кількість карбідів цементитного типу зменшується внаслідок утворення спеціальних карбідів хрому $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$ та $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ [11], [16]. При цьому евтектика ледебуритного типу витісняється евтектикою з розгалуженими диспергованими складними карбідами $(\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$ (рис. 2), яка значною мірою відповідає принципу Шарпі [8].

Кристалізація та структуроутворення сплавів

Карбіди Cr_7C_3 кристалізуються у вигляді довгих голкоподібних шестигранників та карбіди знижують зносостійкість і особливо міцність виливків, хоча твердість сплаву підвищується (див. рис. 1).

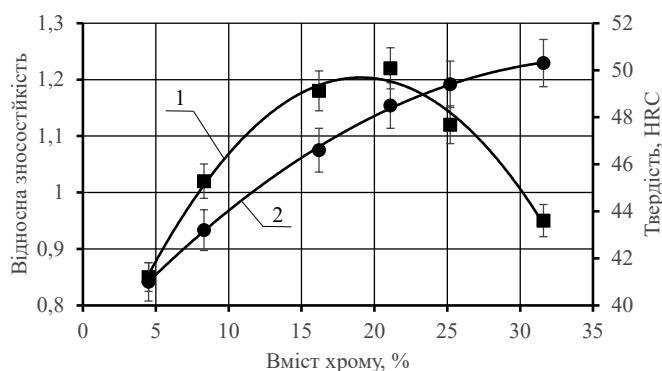


Рис. 1. Вплив легування хромом на відносну зносостійкість (1) і твердість (2) дослідного чавуну

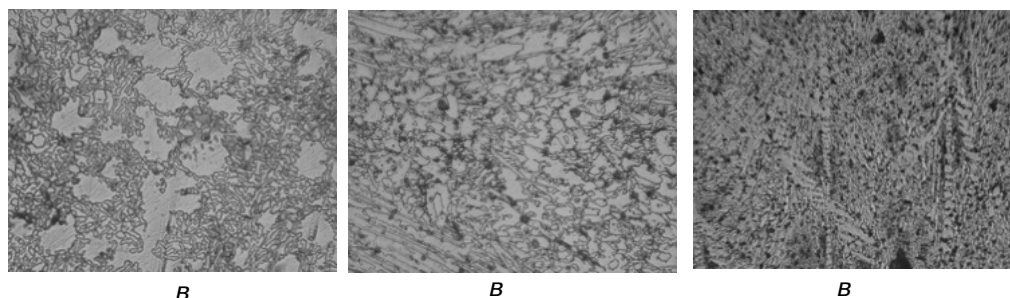


Рис. 2. Вплив хрому на мікроструктуру високолегованого чавуну ($\times 200$): а — 4,5 % Cr; б — 21,1 % Cr; в — 25,2 % Cr

Отже, для одержання чавуну зі зносостійкістю вищою, ніж у сплаву Cr28Ni2 , він має вмішувати від 8 до 30 % хрому. Проте з урахуванням повного комплексу ливарних і механічних властивостей, експлуатаційних та економічних показників доцільнішим діапазоном концентрацій хрому в зносостійких чавунах слід вважати 15–25 %. При такому вмісті зносостійкість чавуну на 15–20 % вища зносостійкості чавуну Cr28Ni2 .

Вплив марганцю на зносостійкість і твердість чавуну з вмістом хрому на рівні 19 % та вуглецю — 3,0 % досліджено в діапазоні концентрацій від 2 до 12 % (рис. 3).

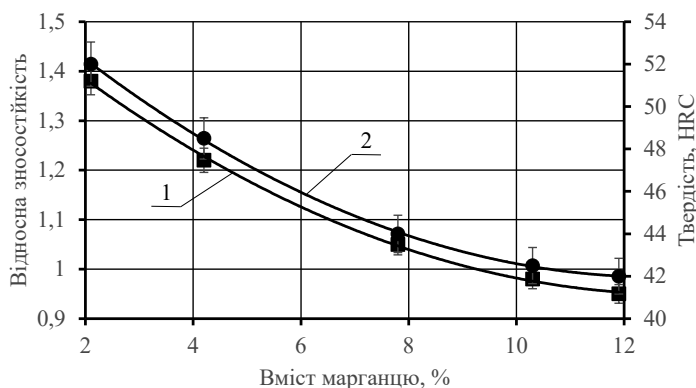


Рис. 3. Вплив легування марганцем на відносну зносостійкість (1) і твердість (2) дослідного чавуну

Із підвищенням вмісту марганцю в чавуні твердість сплаву знижується, що пояснюється збільшенням кількості залишкового аустеніту в основі металу та його стабілізацією (див. рис. 3). Крім того, марганець підвищує розчинність вуглецю в γ -залізі, що призводить до зменшення загальної кількості карбідів хрому. Спираючись на дані робіт [8, 17], можна вважати, що в хромомарганцевих чавунах кожен відсоток марганцю може знижувати вміст карбідної фази на 1,0–1,4 %. Зносостійкість сплаву при цьому зменшується — вже при вмісті марганцю близько 9 % вона стає меншою, ніж сплаву Cr28Ni2 (див. рис. 3). Враховуючи той факт, що марганець підвищує прогартованість залізобуглецевих сплавів і за незначних його концентрацій залишковий аустеніт у чавуні здатний зміцнюватися під дією ударів абразивних частинок, високохромистий чавун у своєму складі має вміщувати 3,0–5,0 % марганцю. За результатами проведених досліджень можна запропонувати хромомарганцевий чавун Cr19Mn4 із вмістом хрому 18–20 % та марганцю 3,5–4,5 %, зносостійкість якого на 20–25 % вища у порівнянні з Cr28Ni2.

У подальших дослідженнях отриманий чавун Cr19Mn4 мікролегували титаном у кількості до 1,2 %. Враховуючи високу спорідненість титану до кисню, його додавали у вигляді феротитану після розкиснення розплаву алюмінієм. Властивості чавуну, залежно від вмісту титану, наведено на рис. 4, а зміну його мікроструктури — на рис. 5. Титан має вищу спорідненість до вуглецю, ніж залізо, тому під час кристалізації залізобуглецевих сплавів, що вміщують титан, він виокремлюється перш за все у вигляді карбідів або карбонітрідів, якщо в сплаві наявна достатня кількість азоту.

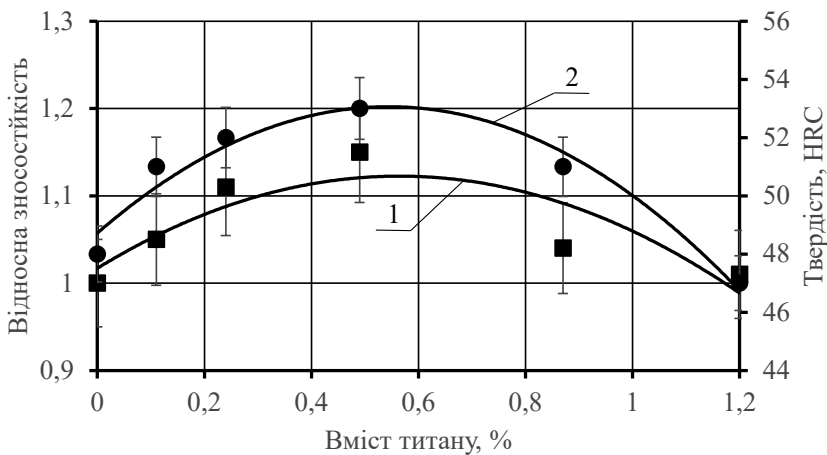


Рис. 4. Вплив мікролегування титаном на відносну зносостійкість (1) і твердість (2) дослідного чавуну

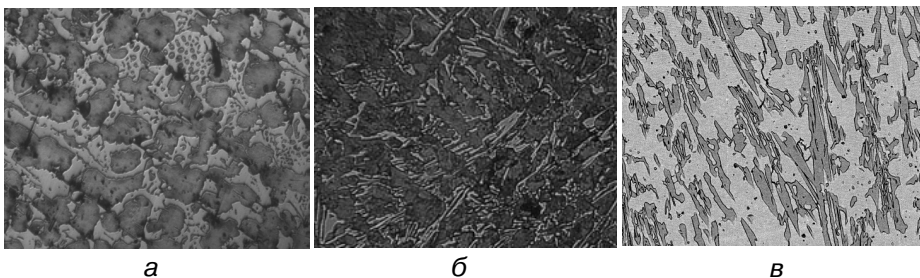


Рис. 5. Зміна мікроструктури чавуну Cr19Mn4 залежно від вмісту в ньому титану ($\times 200$): а — без Ti; б — 0,49 % Ti; в — 0,87 % Ti

За результатами досліджень встановлено, що при вмісті титану в дослідному чавуні на рівні 0,5 % зносостійкість і твердість чавуну максимальні. Подальше збільшення вмісту титану призводить до утворення розподілених нерівномірно колоній, які викришуються у процесі зношування, оскільки є концентраторами напружень та вільно викришуються під дією абразиву. Під час виготовлення товстостінних виливків, унаслідок повільної кристалізації та нерозчинності в рідкому чавуні, карбонітриди титану, які починають утворюватися при температурах, нижчих 1220 °С [17], можуть скупчуватися в окремих об'ємах і сприяти в подальшому локальному його окрихчуванню та погіршенню механічного оброблення [12], [15].

Отже, для підвищення зносостійкості чавуну Cr19Mn4 на 15–20 %, його доцільно додатково мікролегувати титаном у межах 0,40–0,60 %.

Для модифікування дослідного чавуну використовували лігатуру рідкоземельних металів (РЗМ) МЦ50ЖЗ із вмістом 49 % Се, 30 % La та 15 % Nd. Уплив РЗМ на експлуатаційні характеристики чавуну досліджували в діапазоні концентрацій до 0,8 %. РЗМ додавали у тигель печі перед випусканням за температури розплаву 1440–1460 °С.

У результаті проведених досліджень встановлено, що модифікування чавуну РЗМ у кількості до 0,30 % підвищує його відносну зносостійкість і твердість (рис. 6). Це пояснюється тим, що РЗМ ефективно зв'язують сірку та кисень у хромомарганцевих чавунах, змінюють форму неметалевих вкраплень із кутастої або продовгуватої на глобулярну й легко спливають у шлак [9, 15].

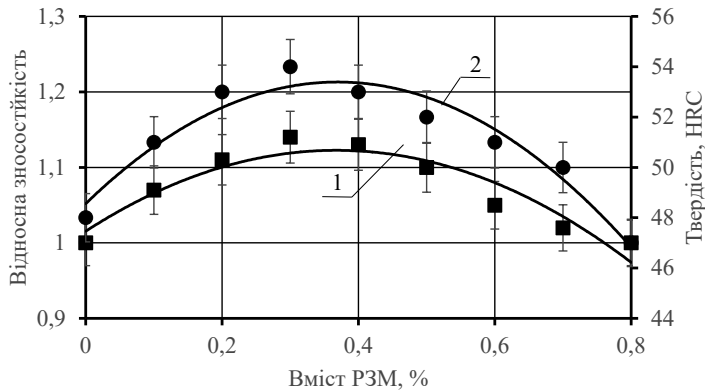


Рис. 6. Вплив модифікування РЗМ на відносну зносостійкість (1) і твердість (2) дослідного чавуну

Додавання РЗМ помітно подрібнює структуру дослідного чавуну (рис. 7). Сполуки церію, лантану та неодиму під час кристалізації діють як поверхнево-активні речовини (ПАР) на межі дендритів аустеніту і обмежують їх ріст. Крім того, у сплаві, що вміщує 0,1 % РЗМ, евтектика $\gamma + (\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$ має більш дисперсну будову [13, 18, 19]. Також РЗМ є ефективними дегазаторами, дефосфораторами та десульфураторами сплавів

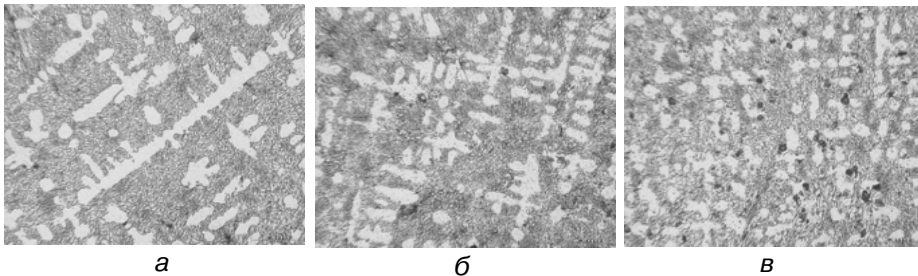


Рис. 7. Зміна мікроструктури чавуну Cr19Mn4 залежно від кількості РЗМ модифікатора (×200): а — без РЗМ; б — 0,3 % РЗМ; в — 0,6 % РЗМ

на основі заліза, що сприяють покращанню якості металу у виливках, оскільки вони зв'язують у стійкі хімічні сполуки кисень, азот, водень, сірку тощо.

Отже, модифікування дослідного чавуну РЗМ у кількості 0,2–0,4 % призводить до підвищення його зносостійкості у гідроабразивному середовищі на 10–15 %.

Висновки

1. Встановлено, що у дослідженому діапазоні легування хромом краща відносна зносостійкість чавуну забезпечується при його вмісті від 15 до 25 % в порівнянні з еталонним чавуном Cr28Ni2.

2. Легування марганцем у кількості до 12 % погіршує відносну зносостійкість і твердість чавуну в усьому діапазоні. Враховуючи позитивний вплив марганцю на прогартовуваність чавунів та експлуатаційні властивості залишкового аустеніту, його рекомендований вміст є на рівні 3,0–5,0 %.

3. Встановлено, що мікрولهгування зносостійкого хромомарганцевого чавуну титаном у кількості 0,40–0,60 % призводить до додаткового підвищення зносостійкості на 15–20 %, що пояснюється його здатністю утворювати дисперсні неметалеві включення у сплаві.

4. Досліджено вплив модифікування РЗМ на зносостійкість хромомарганцевого чавуну та виявлено зростання останньої на 10–15 % при вмісту модифікатора 0,2–0,4 %, що пояснюється ефективною розкислювальною дією та впливом на дисперсність структурних складових.

5. Рекомендовано новий склад зносостійкого хромомарганцевого чавуну для роботи в умовах гідноабразивного зношування деталей теплоенергетичного устаткування: 2,8–3,2 % C, 0,6–0,8 % Si, 15–25 % Cr, 3,0–5,5 % Mn, 0,40–0,60 % Ti та 0,2–0,4 % РЗМ.

Список література

- 1 Мелентьев В. Л. Золошлаковые материалы и золоотвалы. Москва: Энергия, 1978. 288 с.
- 2 Гаврилов Е. И. Топливо-транспортное хозяйство и золошлакоудаление на ТЭС : учеб. пособие для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 168 с.
- 3 Лютий В. А., Платонов Е. А., Федоров Г. Е., Кузьменко А. Е. Хромоалюминиевые стали для изготовления жаростойких деталей теплоэнергооборудования. *Литейное производство*. 2001. № 4. С. 13–15.
- 4 Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. Москва: Металлургия, 1976. 472 с.
- 5 Гудремон Э. Специальные стали: в 2 т. Т. 1. Москва: Металлургия, 1966. 736 с.
- 6 Ямшинский М. М., Федоров Г. Е., Платонов Е. А., Кузьменко А. Е., Радченко К. С. Підвищення гідроабразивної зносостійкості високолегованого білого чавуну. *Наукові вісті Національного технічного університету «КПІ»*. 2009. № 1. С. 22–32.
- 7 Нетребко В. В. Влияние отжига на твердость высокохромистых чугунов, легированных Mn и Ni. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2015. № 2. С. 65–70.
- 8 Беликов С. Б., Нетребко В. В., Волчок І. П. Оптимизация состава и свойств износостойких высокохромистых чугунов. *Високі технології в машинобудуванні*. 2015. № 1 (25). С. 18–26.
- 9 Нетребко В. В., Волчок І. П. Влияние легирования и термической обработки на распределение элементов и свойства высокохромистых чугунов. *Научный вестник ДГМА*. 2015. № 3 (18). С. 52–59.
- 10 Ямшинский М. М., Радченко К. С., Федоров Г. Е. Оптимизация химического состава износостойких высоколегированных белых чугунов. *Металл и литье Украины*. 2011. № 1 (212). С. 21–24.
- 11 Coronado J. J. Effect of (Fe,Cr)7C3 carbide orientation on abrasion wear resistance and fracture toughness. *Wear*. 2011. Vol. 270, No. 3–4. P. 287–293.

- 12 Fu H., Wu X., Li X. et al. Effect of TiC particle additions on structure and properties of hypereutectic high chromium cast iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009. Vol. 18, No. 8. P. 1109–1115.
- 13 Ямшинский М. М., Радченко К. С., Федоров Г. Е. Влияние микролегирования и модифицирования на структуру и свойства износостойкого хромомарганцевого чугуна. *Вісник ДДМА*. 2011. № 4 (25). С. 133–140.
- 14 Ямшинський М. М., Федоров Г. Є. Хромомарганцеві чугуни для роботи в екстремальних умовах. *Металл и литье Украины*. 2018. № 7–8 (302–303). С. 76–83.
- 15 Радченко К. С., Платонов Є. А., Ямшинский М. М., Федоров Г. Е. Влияние титана и редкоземельных металлов на структуру износостойкого высокохромистого чугуна. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 4. С. 40–42.
- 16 Ри Х. Комплексно-легированные чугуны специального назначения. Владивосток: Дальнаука, 2000. 287 с.
- 17 Ямшинский М. М., Радченко К. С., Федоров Г. Е., Платонов Е. А. Служебные характеристики микролегированных и модифицированных белых чугунов. *Литье и металлургия*. 2013. № 4 (73). С. 29–35.
- 18 Радченко К. С., Ямшинський М. М., Федоров Г. Є., Платонов Є. О. Ізотермічний ступінчастий відпал хромомарганцевих чавунів. *Вісник ДДМА*. 2014. № 1 (32). С. 218–223.
- 19 Ямшинський М. М., Федоров Г. Є., Радченко К. С. Оптимизация режимов смягчающего отжига износостойких хромомарганцевых чугунов для улучшения их обрабатываемости резанием // *Металл и литье Украины*. 2015. № 12 (271). С. 26–32.

Надійшла 13.05.2025

References

- 1 Melent'ev, V. L. (1978). *Zoloshlakovie materialy i zolootvaly* [Ash-slag materials and ash dumps]. Energiya.
- 2 Gavrilov, E. I. (1987). *Toplivno-transportnoe khozyaistvo i zoloshlakoudalenie na TES* [Fuel and transportation facilities and ash and slag removal at TPPs]. Energoatomizdat.
- 3 Lyutyi, V. A., Platonov, E. A., Fedorov, G. E., & Kuzmenko, A. E. (2001). Khromoaluminievie stali dlya izgotovleniya zharostoikikh detalei teploenergooborudovaniya [Chromium-aluminum steels for manufacturing heat-resistant parts of thermal power equipment]. *Liteinoe proizvodstvo*, (4), 13–15.
- 4 Zhuk, N. P. (1976). Kurs teorii korrozii i zashchiti metallov [Course on corrosion and metal protection]. Metallurgiya.
- 5 Gudremon, E. (1966). Spetsialnie stali [Special steels] (Vol. 1). Metallurgiya.
- 6 Yamshinskiy, M. M., Fedorov, G. E., Platonov, E. A., Kuzmenko, A. E., & Radchenko, K. S. (2009). Pdivyshchennia hidroabrazivnoi znosostiikosti vysokolehovanoho biloho chavunu [Increasing the hydroabrasive wear resistance of high-alloyed white cast iron]. *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KPI"*, (1), 22–32.
- 7 Netrebko, V. V. (2015). Vliyanie otzhiga na tverdst visokokhromistikh chugunov, legirovannikh Mn i Ni [Effect of annealing on hardness of high-chromium irons alloyed with Mn and Ni]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, (2), 65–70.
- 8 Belikov, S. B., Netrebko, V. V., & Volchok, I. P. (2015). Optimizatsiya sostava i svoistv iznosostoiikh visokokhromistikh chugunov [Optimization of composition and properties of wear-resistant high-chromium cast irons]. *Vysoki tekhnologii v mashynobuduvanni*, (1), 18–26.
- 9 Netrebko, V. V., & Volchok, I. P. (2015). Vliyanie legirovaniya i termicheskoi obrabotki na raspredelenie elementov i svoistva visokokhromistikh chugunov [Effect of alloying and heat treatment on element distribution and properties of high chromium cast irons]. *Nauchnii vestnik DGMA*, (3), 52–59.

- 10 Yamshinskiy, M. M., Radchenko, K. S., & Fedorov, G. E. (2011). Optimizatsiya khimicheskogo sostava iznosostoikikh visokolegirovannikh belikh chugunov [Optimization of chemical composition of wear-resistant high-alloyed white cast irons]. *Metall i lite Ukraini*, (1), 21–24.
- 11 Coronado, J. J. (2011). Effect of $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ carbide orientation on abrasion wear resistance and fracture toughness. *Wear*, 270(3–4), 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.009>
- 12 Fu, H., Wu, X., Li, X., et al. (2009). Effect of TiC particle additions on structure and properties of hypereutectic high chromium cast iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(8), 1109–1115. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9435-1>
- 13 Yamshinskiy, M. M., Radchenko, K. S., & Fedorov, G. E. (2011). Vliyanie mikrolegirovaniya i modifitsirovaniya na strukturu i svoystva iznosostoikogo khromomargantseвого chuguna [Effect of microalloying and modification on structure and properties of wear-resistant chromium-manganese cast iron]. *Visnyk DDMA*, (4), 133–140.
- 14 Yamshinskiy, M. M., Fedorov, G. E., & Radchenko, K. S. (2018). Khromomargantsevie chuguni dlya raboti v ekstremalnikh usloviyakh [Chromium-manganese cast irons for extreme conditions]. *Metall i lite Ukraini*, (7–8), 76–83
- 15 Radchenko, K. S., Platonov, E. A., Yamshinskiy, M. M., & Fedorov, G. E. (2013). Vliyanie titana i redkozemelnykh metallov na strukturu iznosostoikogo visokokhromistogo chuguna [Influence of titanium and rare-earth metals on the structure of wear-resistant high-chromium cast iron]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promishlennost*, (4), 40–42.
- 16 Ri, K. (2000). *Kompleksno-legirovannye chuguni spetsialnogo naznacheniya* [Complex-alloyed cast irons for special purposes]. Dalnauka.
- 17 Yamshinskiy, M. M., Fedorov, G. E., Radchenko, K. S., & Platonov, E. A. (2013). Sluzhebnye kharakteristiki mikrolegirovannikh i modifitsirovannikh belikh chugunov [Service characteristics of microalloyed and modified white cast irons]. *Lite i Metallurgiya*, (4), 29–35.
- 18 Radchenko, K. S., Yamshinskiy, M. M., Fedorov, G. E., & Platonov, E. A. (2014). Izotermichnyi stupinchastyi vidpal khromomargantsevykh chavuniv [Isothermal step annealing of chromium-manganese cast irons]. *Visnyk DDMA*, (1), 218–223.
- 19 Yamshinskiy, M. M., Fedorov, G. E., & Radchenko, K. S. (2015). Optimizatsiya rezhimov smyagchayushchego otzhiba iznosostoikikh khromomargantsevykh chugunov dlya uluchsheniya ikh obrabotivaemosti rezaniem [Optimization of modes of softening annealing of wear-resistant chromium-manganese cast irons to improve their machinability by cutting]. *Metall i lite Ukraini*, (12), 26–32.

Received 13.05.2025

I. V. Lukianenko*, PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>,

B. V. Kyvglyo*, Assistant; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

E. H. Byba*, PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: byba.evgen@gmail.com,; <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

M. M. Yamshynskiy*, Dr. Sci (Engin), Professor, Head of Department; e-mail: yamshinskiy@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

O. H. Kovalchuk**, PhD (Engin.), Engineer of general shop personnel of the chemical shop; e-mail: alex7kovalchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0639-2626>

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine).

**Khmelnitsky NPP (Netishyn, Khmelnytsky region, Ukraine)-

INFLUENCE OF ALLOYING, MICROALLOYING AND MODIFICATION ON THE PROPERTIES OF WEAR-RESISTANT

CHROMIUM-MANGANESE CAST IRONS

The paper presents the results of a study of the influence of chemical composition on the wear resistance of high-alloy cast irons operating under conditions of waterjet wear. The expediency of using chromium-manganese cast irons as a material for the manufacture of cast parts for ash removal systems of thermal power plants is substantiated. The main attention is focused on the study of the influence of chromium, manganese, titanium, and rare earth metals on the structure, hardness, and wear resistance of cast irons. The optimum content of alloying elements such as chromium and manganese, which will ensure maximum wear resistance of the experimental cast iron, was determined. The influence of microalloying of high-alloyed chromium-manganese cast iron with titanium and modification with rare earth metals was determined. The influence of structural components and morphology of carbides on the performance properties of cast iron has been studied. It is shown that the most effective is the structure of cast iron with carbides of the (Cr,Fe) C type, evenly distributed in a martensitic or hardened base, as well as stabilized residual austenite capable of hardening during wear. It has been established that the introduction of 18-20 % Cr and 3.5-4.5 % Mn increases the wear resistance of the experimental cast iron by 20-25 % compared to the reference wear-resistant Cr28Ni2 alloy. It has been established that microalloying with titanium in the range of 0.4-0.6 % can further increase the wear resistance of cast iron by 15-20 % due to the formation of dispersed hardening carbides and carbonitrides. The addition of rare earth metals in the amount of 0.2-0.4 % helps to purify the metal from non-metallic inclusions, change their morphology, and improve mechanical properties. The optimal composition of wear-resistant cast iron has been proposed, which is advisable to use for the manufacture of screw conveyors, knees of pulp pipelines, impellers, housings, and disks of baghouse pumps that operate in direct contact with the pulp and are subject to water-abrasive wear in ash removal systems. The results can be used to further improve cast products and various technologies for strengthening their working surfaces.

Keywords wear-resistant cast iron, hydroabrasive wearing, alloying, microalloying, modification, chromium, manganese, titanium, rare earth metals, carbides.

До уваги авторів

У зв'язку з переходом журналу «Процеси лиття» на новітню платформу Open Journal Systems та відповідним оновленням сайту журналу подача статей можлива через сайт <https://plit-periodical.org.ua/>

Після реєстрації в системі вам буде запропоновано покрокову процедуру завантаження статті за стандартами міжнародних журналів.

Спілкування з редакцією та подання статей здійснюється через пошту **plit.periodical@gmail.com**

Редакція журналу «Процеси лиття»