



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: ete@duet.edu.ua Journal homepage: <https://ete.org.ua>

JEL: L61

DOI: 10.62911/ete.2024.02.02.08

Study of the Influence of Modification and Heat Treatment of Cast Iron Grinding Balls on Their Operational Properties


Citation:

Suslo, N., Panchenko, H. & Huk, Y. (2024). Study of the Influence of Modification and Heat Treatment of Cast Iron Grinding Balls on Their Operational Properties. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol. 2 No. 2 (2024), 94-101. <https://doi.org/10.62911/ete.2024.02.02.08>

Nataliia Suslo

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: suslo_nv@duet.edu.ua

 *ORCID ID: 0000-0001-9280-6316*

Hanna Panchenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua

 *ORCID ID: 0000-0001-7565-0380*

Yelyzaveta Huk

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: huk_ys@duet.edu.ua

 *ORCID ID: 0000-0002-8866-9467*

Abstract: The study addresses the enhancement of wear resistance and impact strength of cast iron grinding balls used under intensive abrasive wear and impact conditions at ore processing plants. The primary aim is to improve the operating properties of cast iron by optimizing its chemical composition and introducing advanced thermal and chemical-thermal treatment methods, including controlled cooling. To achieve this goal, two alloyed cast iron compositions with added chromium, molybdenum, and nickel were used, and the base composition was further modified with titanium and titanium carbonitride to increase the microhardness of the matrix phases. Experimental samples underwent various heat treatment regimes, including quenching and normalization, to evaluate the effect of these processes on the microstructure, hardness, and impact resistance of the grinding balls. Microstructural analysis revealed that additional alloying elements and modifiers contributed positively to forming a more homogeneous and fine-grained structure with an increased proportion of carbide phases. The key findings indicated that the optimized structure of the cast iron grinding balls achieved 10 units higher hardness and 2-4 units greater impact resistance than the base composition after heat treatment. Furthermore, titanium and titanium carbonitride modifications enhanced the performance characteristics of the balls by several additional units. Thus, the developed treatment regimes and modified cast iron composition significantly increase the wear resistance of grinding balls, contributing to reduced grinding costs in industrial applications.

Keywords: grinding balls, cast iron, wear resistance, heat treatment, impact strength, alloying, carbides, microstructure, titanium, modification.

Received: 06/11/2024

Accepted: 20/11/2024




JEL: L61

Study of the Influence of Modification and Heat Treatment of Cast Iron Grinding Balls on Their Operational Properties

Nataliia Suslo

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: suslo_nv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-9280-6316

Hanna Panchenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7565-0380

Yelyzaveta Huk

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: huk_ys@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8866-9467

Abstract: The study addresses the enhancement of wear resistance and impact strength of cast iron grinding balls used under intensive abrasive wear and impact conditions at ore processing plants. The primary aim is to improve the operating properties of cast iron by optimizing its chemical composition and introducing advanced thermal and chemical-thermal treatment methods, including controlled cooling. To achieve this goal, two alloyed cast iron compositions with added chromium, molybdenum, and nickel were used, and the base composition was further modified with titanium and titanium carbonitride to increase the microhardness of the matrix phases. Experimental samples underwent various heat treatment regimes, including quenching and normalization, to evaluate the effect of these processes on the microstructure, hardness, and impact resistance of the grinding balls. Microstructural analysis revealed that additional alloying elements and modifiers contributed positively to forming a more homogeneous and fine-grained structure with an increased proportion of carbide phases. The key findings indicated that the optimized structure of the cast iron grinding balls achieved 10 units higher hardness and 2-4 units greater impact resistance than the base composition after heat treatment. Furthermore, titanium and titanium carbonitride modifications enhanced the performance characteristics of the balls by several additional units. Thus, the developed treatment regimes and modified cast iron composition significantly increase the wear resistance of grinding balls, contributing to reduced grinding costs in industrial applications.


Keywords: grinding balls, cast iron, wear resistance, heat treatment, impact strength, alloying, carbides, microstructure, titanium, modification.

Дослідження впливу модифікування та термічної обробки чавунних мелючих куль на їх експлуатаційні властивості

Наталія Сусло

доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: suslo_nv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-9280-6316

Ганна Панченко

доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7565-0380

Єлизавета Гук

асистент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: huk_ys@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8866-9467

Анотація: У статті розглянуто питання підвищення зносостійкості та ударної міцності чавунних мелючих куль, що використовуються в умовах інтенсивного абразивного зношування та ударних навантажень на рудозбагачувальних фабриках. Основною метою дослідження є вдосконалення технології термічної та хіміко-термічної обробки чавуну з метою покращення його експлуатаційних властивостей, зокрема, через оптимізацію хімічного складу та контрольоване охолодження. Для досягнення поставленої мети були застосовані два варіанти складу чавунного сплаву з додаванням хрому, молібдену та нікелю, а також використано титан і карбонітрид титану для підвищення мікротвердості матричних складових. Експериментальні зразки було піддано різним режимам термообробки, включаючи гартування та нормалізацію, що дало можливість оцінити вплив цих процесів на мікроструктуру, твердість та ударну стійкість мелючих куль. Мікроструктурний аналіз виявив позитивний вплив додаткових легуючих елементів і модифікуючих агентів на формування більш однорідної та дрібнозернистої структури з підвищеною кількістю карбідних фаз. Основні результати дослідження показали, що оптимізована структура чавунних мелючих куль забезпечує на 10 одиниць вищу твердість та на 2-4 одиниці більшу ударну стійкість порівняно з немодифікованим складом після термообробки. Крім того, модифікація титаном і карбонітридом титану підвищує експлуатаційні характеристики куль ще на кілька одиниць. Таким чином, розроблені режими обробки та модифікований склад чавуну дозволяють суттєво підвищити зносостійкість мелючих куль, що сприяє зменшенню витрат на подрібнення у виробничих умовах.

Ключові слова: мелючі кулі, чавун, зносостійкість, термообробка, ударна стійкість, легування, карбіди, мікроструктура, титан, модифікація

Вступ (Introduction)

Застосування сучасних методів термічної та хіміко-термічної обробки виливків із сірого, високоміцного, ковкого, модифікованого та легованого чавунів не лише дає змогу покращити властивості виливків, але й відкриває нові можливості для чавунного литва, зокрема в умовах жорстких навантажень та агресивних середовищ. Завдяки таким підходам стала можливою заміна дорогих сталевих виробів чавунними в широкому спектрі промислових галузей, особливо в гірничодобувній, металургійній та будівельній галузях.

Леговані й модифіковані чавуни після термічної обробки демонструють низку важливих переваг (*Kuzin, Yatsiuk, 2002*) таких як однорідність структури, висока зносостійкість, стабільність міцності, яка майже не залежить від маси виробу. Ці матеріали витримують агресивний вплив корозійного середовища та механічні удари, що є ключовим фактором для їхнього використання в складних умовах. Наприклад, їх зносостійкість у 5-7 разів перевищує аналогічний показник у сталі, а коефіцієнт тертя вище в 1,5-2 рази. Підвищення твердості легованих і модифікованих чавунів пояснюється унікальним механізмом зміцнення: ферит стає більш міцним завдяки легуванню, а графітові включення дробляться, що призводить до рівномірного розподілу навантажень.

Особливий інтерес становить виробництво чавунних мелючих куль для рудозбагачувальних фабрик (РЗФ) гірничо-збагачувального комплексу (ГЗК). На ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» кулі для барабаних млинів, що встановлені в корпусах збагачення РЗФ1 та РЗФ-2, виготовляють за технологією лиття в кокіль із точно визначеними параметрами хімічного складу та механічних характеристик, згідно з вимогами (*ТИ-УГМ-ЛЧ-009-2006, 2006*), (*ТУ У 322-228-144-2004, 2004*). Вони використовуються для подрібнення

магнетитових залізистих кварцитів на III стадії подрібнення. Цей етап процесу передбачає як корозійне зношування, так і значні ударні навантаження.

У структурі витрат на подрібнення РЗФ-1 ГЗК значну частку займають витрати металу, пов'язані зі зносом мелючих тіл, що становить 0,8 кг на тонну готового концентрату. При завантаженні млинів сталевими кулями, ці витрати складають 0,5 кг/т. Таким чином, зниження зносу мелючих куль за рахунок оптимізації складу та процесу їх термічної обробки, може суттєво скоротити загальні витрати на подрібнення.

Тож, у контексті вдосконалення якості мелючих куль варто розглянути питання підбору легуючих елементів і модифікаторів. Зокрема, додавання таких елементів, як хром, нікель і молібден, що дозволяє не тільки покращити корозійні та механічні властивості, а й зменшити ризик деформації куль під впливом ударних навантажень. Застосування нових підходів у термічній обробці, зокрема контрольованого охолодження, може сприяти створенню оптимальної мікроструктури, що забезпечить рівномірне зношування поверхні куль та підвищить термін її служби. Отже, використання марок сплаву та оптимізація технології виробництва чавунних куль на підприємствах дозволяють покращити їхні експлуатаційні властивості та сприяти зниженню витрат на тонну готового концентрату.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Для проведення досліджень використано чавунні мелючі кулі (ТУ У 322-228-144-2004, 2004), виготовлені за стандартною технологією лиття в кокіль (ТІ-УГМ-ЛЧ-009-2006, 2006), які застосовуються для подрібнення залізовмісних кварцитів у млинах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Було обрано два варіанти легованого складу з додаванням хрому, молібдену, нікелю.

Для покращення мікроструктури та збільшення дисперсності перліту в базовий склад додавали титан (0,08-0,10%), а також карбонітрид титану. Це дозволяє сформувати більш дрібнозернисту структуру, що підвищує мікротвердість складових матриці (цементиту, аустеніту, перліту) та загальну зносостійкість.

Вимірювання твердості досліджуваних зразків визначали за перерізом куль на універсальному приладі Micro Dur, що забезпечує точність вимірювання.

Оцінка ударної стійкості проводилась на спеціальному маятниковому копрі з енергією удару 450 Дж, що дозволяє оцінити опір матеріалу ударним навантаженням в умовах експлуатації.

Мікроструктуру зразків аналізували після модифікування та термічної обробки для визначення розподілу фаз, кількості та типу карбідів, їх дисперсності та впливу на загальні властивості. Для цього використовували оптичну мікроскопію на мікроскопах МІМ-8М і "Neofot-21" при різних збільшеннях, що забезпечила точне уявлення про зміни в структурі після термообробки і модифікування.

Результати (Results)

За результатами досліджень (Hryn, Savchuk, 2015), зносостійкість чавуну визначається типом і кількістю карбідів, їхньою дисперсністю, а також розподілом у металевій матриці. Найкращий опір ударно-абразивним навантаженням в умовах роботи млинів демонструють мелючі кулі з чавуну, у структурі яких містяться мартенсит, бейніт, залишковий аустеніт і спеціальні карбіди. Зносостійкість таких сплавів посилюється при збільшенні вмісту карбідів Me_7C_3 та $Me_{23}C_6$, мікротвердість яких може досягати 2500 HV. Для збільшення кількості цих карбідів, у чавуні підвищують вміст вуглецю та додаткових карбідоутворюючих елементів – таких як хром, молібден і титан.

Щодо ударостійкості, оптимальною структурою для матриці чавуну є поєднання аустеніту, сорбіту і мартенситу. Мартенсит надає металу високої стійкості до зношування, а

аустенитно-сорбітна складова добре витримує ударні навантаження і зменшує ризик сколювання карбідної фази.

Згідно з технічними вимогами ТВ 090-008:2008 (*Tekhnichni vymohy na chavunni meliuchi shary TV 090-008:2008, 2008*) для чавунних мелючих куль, що відливаються в кокіль, карбідоперлітна матриця є стандартом. Карбідна фаза в такій структурі представлена цементитом, який утворюється за рахунок швидкого охолодження під час лиття. На поверхні кулі твердість має бути не меншою за 46,0 HRC. Складність виготовлення чавунних куль полягає в забезпеченні одночасно високої твердості (зносостійкості) та ударної міцності, адже збільшення кількості цементиту, що надає кулям зносостійкість, знижує їх ударостійкість.

Щоб підвищити ударну міцність, можна покращити дисперсність перліту через легування нікелем або модифікування за допомогою рідкоземельних елементів, хоча це досить затратні технології. Більш економічним способом досягнення дрібнозернистої структури є інокуляція з використанням титану та карбонітриду титану у невеликій концентрації (0,08-0,10%).

Використання ультрадисперсних модифікаторів на основі титану сприяє значному подрібненню зерна, що підвищує мікротвердість цементиту на 8-12%, аустеніту на 18-36%, а перліту — на 28-47%, комплексно покращуючи робочі властивості куль (*Bockus, Valivonis, J., 2015*), (*Pavliuk, Velychko, Dudar, 2018*)

Ще один аспект експлуатаційних характеристик мелючих куль — стабільність міцності по перерізу відливки. Кульові млини зазвичай завантажують кульовою масою на 40-50% від об'єму. Після зношування куль до розміру 15-20 мм (рис. 1) їх вилучають з млина шляхом пересортування. Отже, підвищення зносостійкості мелючих тіл пов'язане з забезпеченням рівномірної міцності по всьому перерізу відливки.

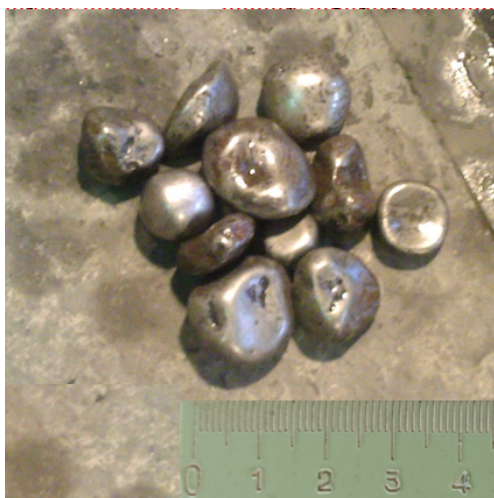


Рисунок 1. Загальний вигляд не придатних для експлуатації куль

З метою підвищення експлуатаційних властивостей чавуну було проаналізовано режими термічної обробки. За результатами літературного огляду (*Kuzin, Yatsiuk., 2002*), (*Bockus, S., Valivonis. 2015*) обрано два режими для проведення експерименту.

Перший режим – гартування при 850°C з витримкою 1 годину та охолодженням в олії, що забезпечує високу твердість без виникнення мікро- та субмікротріщин.

Другий режим – нормалізація при тій же температурі 850°C з витримкою 1 годину і подальшим охолодженням на повітрі.

Термообробку проводили в лабораторній муфельній печі СНОЛ 8,2/1100. Під час нагрівання температуру підвищували повільно (90°C на годину), оскільки швидше нагрівання може спричинити внутрішні напруження у виливці.

Після термообробки проводили перевірку твердості по перерізу куль універсальним приладом «Micro Dur» та визначали ударостійкість на спеціальному маятниковому копрі з енергією удару 450 Дж.

Результати експерименту наведені в таблиці 1. Вони свідчать, що термообробка дозволяє підвищити твердість чавунних мелючих куль на 10 одиниць, а ударну стійкість — на 2–4 одиниці. Модифікація титаном покращує твердість куль ще на 1–2 одиниці, а ударну стійкість — на 3–4 одиниці порівняно з базовим складом після термообробки. При додаванні карбонітриду титану, твердість і ударна стійкість куль зростає ще на 5–6 одиниць порівняно з немодифікованим складом після термообробки.

Таблиця 1. Результати виміру твердості куль по перетину

№ кулі	Склад	Середина охолодження	Показники твердості по перетину, HRC					Ударна стійкість, уд. (норма-25 уд)
			Поверхня	½ радіусу	центр	½ радіусу	поверхня	
1.	Базовий склад	Без ТО	46,0	41,0	35,0	39,8	46,0	25
2.	Базовий склад	Олія	56,2	54,9	50,0	53,2	56,4	27
3.	Модифікований титаном	Олія	57,6	57,5	55,0	56,0	58,0	30
4.	Модифікований карбонітридом титану	Олія	62,4	59,8	56,0	62,1	63,1	32
5.	Базовий склад	Повітря	55,2	53,7	52	52,3	55,0	29
6.	Модифікований титаном	Повітря	57,0	56,5	52,5	56,2	56,9	33
7.	Модифікований карбонітридом титану	Повітря	61,0	58,2	58,0	58,3	60,0	35

На рисунку 2 показано мікроструктури базового складу куль, а також після модифікування карбонітридом титану з гартуванням та нормалізацією. З таблиці 1 видно, що термічна обробка після модифікування карбонітридом титану дозволяє підвищити твердість чавунних мелючих куль на 1-3 од., в порівнянні з базовим складом куль після термообробки.

Найбільшу твердість і ударну стійкість мають кулі з чавуну модифікованого карбонітридом титану, що пов'язано з подрібненням структурної складової матриці та більш сприятливим розташуванням карбідної складової. Причому одержувані після модифікування карбонітридом титану карбіди є стійкими і при термічній обробці не піддаються процесу графітизації, що, в свою чергу, сприяє стабільним показникам підвищеної твердості.

Таким чином, в результаті досліджень впливу термічної обробки на модифіковані чавуни, встановлено, що термічна обробка підвищує твердість в 1,37 разів і ударну стійкість в 1,4 рази, причому модифікування карбонітридом титану більшою мірою сприяє підвищенню цих характеристик, що пов'язано з подрібненням структурної складової матриці та більш сприятливого розташування карбідної складової.

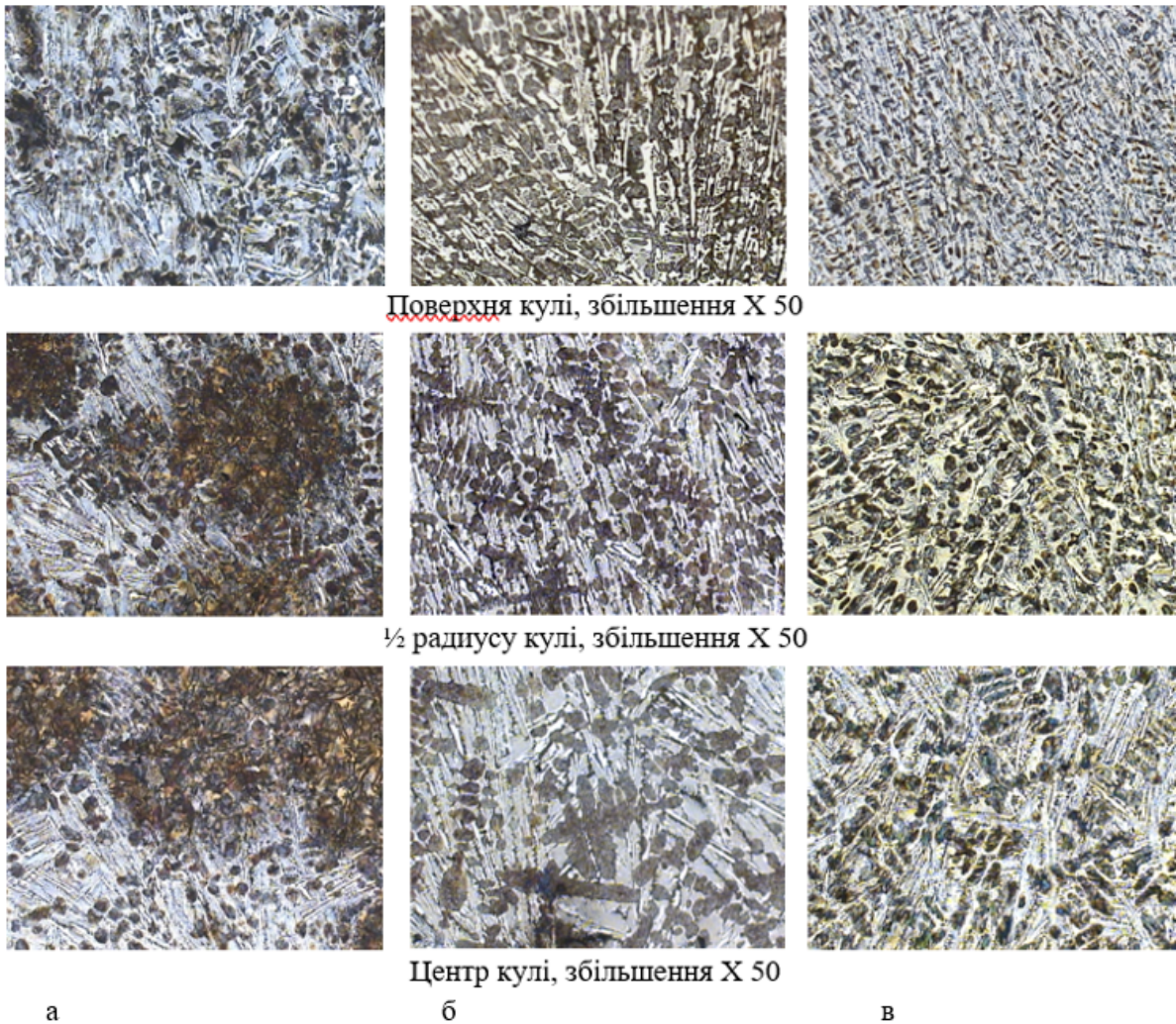


Рисунок 2. Мікроструктури куль: а - базового складу; б – після модифікування карбонітридом титану + загартування; в - – після модифікування карбонітридом титану + нормалізація

Висновки (Conclusions)

Термообробка за першим і другим режимами підвищує твердість і ударну стійкість чавунних мелючих куль, причому модифікація титаном і карбонітридом титану забезпечує ще більший приріст цих характеристик. Найвищі твердість і ударна стійкість спостерігаються у куль, модифікованих карбонітридом титану, що обумовлено подрібненням матриці та сприятливим розташуванням карбідної фази (рис. 2). Карбіди, які утворюються при модифікації карбонітридом титану, залишаються стабільними і не піддаються графітизації під час термообробки.

Для впровадження у виробництво рекомендовано кулі, модифіковані карбонітридом титану та оброблені за другим режимом (нормалізація).

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація, С.Н.; формальний аналіз, С.Н. та Г.Є.; методологія, С.Н. та П.Г.; візуалізація, П.Г. та Г.Є.; оригінальна чернетка, С.Н.; перегляд і редагування, П.Г. та Г.Є. Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Bockus, S., & Valivonis, J. (2015). Effect of heat treatment on microstructure and properties of cast iron. *Journal of Iron and Steel Research International*, 22(5), 476–481. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(15\)30050-2](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)30050-2)
- Hryn, O.P., & Savchuk, V.M. (2015). *Osnovy znosostiikosti materialiv dlia metalurhiinoho obladnannia (pidruchnyk dlia studentiv i fakhivtsiv)*. Lviv: Afisha.
- Kuzin, O.A., & Yatsiuk, R.A. (2002). *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*. Lviv: Afisha.
- Pavliuk, M.I., Velychko, O.Yu., & Dudar, Ye.M. (2018). Modyfikuvannia chavunnykh vidlyvok iz vykorystanniam nanoporoshkiv. *Problemy materialoznavstva*, 3, 55–60. <https://doi.org/10.15407/pmat2018.03.055>
- Tekhnichni vymohy na chavunni meliuchi shary TV 090-008:2008. (2008). PAT «ArselorMittal Kryvyi Rih».
- TI-УГМ-ЛЧ-009-2006. (2006) Vyrobnystvo kul meliuchykh chavunnykh. PAT «ArselorMittal Kryvyi Rih».
- ТУ У 322-228-144-2004. (2004) Kuli meliuchi chavunni. PAT «ArselorMittal Kryvyi Rih»