

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.74

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.51-57](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.51-57)

**В.М. Ломакін**, доц., канд. техн. наук, **В.М. Кропівний**, проф., канд. техн. наук, **В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Кропівна**, доц., канд. техн. наук, **Л.А. Молокост**, викл.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: vik284333@gmail.com*

## Дослідження та порівняльний аналіз зносостійкості литих мелючих тіл з хромистих чавунів

Випробувано мелючі тіла, відлиті з хромистого чавуну в багатомісному кокіллі, на ударно-абразивну зносостійкість і ударостійкість. Для дослідження прийнято три типи хромистих чавунів: низькохромистий (~1% Cr), середньохромистий (до 5% Cr) і високохромистий (ВХБЧ, до 20% Cr). Досліджено макро- і мікроструктуру зазначених сплавів, як матеріалу литих мелючих куль. Встановлено підвищення ударно-абразивної зносостійкості і ударостійкості таких виробів при збільшенні масової частки хрому в чавуні за рахунок утворення в металевій основі карбідів типу  $(Fe, Cr)_3C$  і особливо  $(Fe, Cr)_7C_3$ . Економічно обґрунтовано в якості матеріалу мелючих куль низькохромистий білий чавун. **чавун, розплав, кокіль, куля, легування, хром, зносостійкість, ударостійкість**

**Постановка проблеми.** Потреба гірничо-збагачувальних комбінатів в мелючих тілах (МТ) досить велика. В Україні таку продукцію виготовляють Павлоградський верстатобудівний завод, компанія Energosteel (м. Київ), НВП “Фероліт” (м. Горішні Плавні) та інші. Багато сучасних розробок по виробництву литих чавунних МТ було випробувано на Криворізькому центральному рудоремонтному заводі. Проте, незважаючи на досить велику кількість підприємств, все ще існує дефіцит таких виробів через швидкий їх знос в мелючих млинах [1].

Для ефективного розмелювання порід загальновідомо, що найкращою формою МТ є сферична. Зазвичай мелючі кулі (МК) виготовляють катаними із сталі діаметром 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100 і 120 мм. При подрібненні порід МК падають в мелючих млинах з висоти 2,7–3,8 м. Це є причиною їх ударно-абразивного зносу. Крім того, розмелювання більшості гірських порід, які є досить жорстким абразивним середовищем, викликає інтенсивне абразивне стирання МК. Отже, матеріал МК має бути твердим і в’язким [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сталеві МК з підвищеним вмістом вуглецю порівняно дорогі і мають нерівномірну по об’єму твердість. В сталевій катаній кулі Ø60 мм твердість зменшується від зовнішньої поверхні до центру від 500 НВ до 150 НВ, а основна маса металу має твердість 300 НВ. Низька зносостійкість таких виробів призводить до великих безповоротних втрат металу, а витрата сталевих катаних куль досягає 5 кг на 1 т розмелювальної руди.

Чавунні литі МК вдвічі дешевші сталевих. В кулі з білого чавуну Ø60 мм твердість зменшується від зовнішньої поверхні до центру від 500 НВ до 350 НВ, а основна маса металу має твердість 400 НВ. Одним з вагомих факторів, який обумовлює формування вибіленого шару в чавуні, є низька масова частка кремнію в його складі.

При збільшенні вмісту кремнію вище 1,2% знос МК підвищується, а твердість знижується [3, 4].

Основними недоліками нелегованого або низьколегованого білого чавуну є порівняно висока крихкість і відносно низькі ударна в'язкість і міцність. При цьому не слід ігнорувати важливе питання дешевизни використання саме цього матеріалу в порівнянні з іншими.

За кордоном для виготовлення відповідальних деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного впливу і високих ударних навантажень застосовують середньолегований чавун Ніхард (до 5% Ni). Деталі з такого матеріалу працюють як мінімум вдвічі довше в порівнянні зі сталлю 110Г13Л [5]. Проте, в нашій країні, у зв'язку з дорожнечою нікелю такий матеріал не знайшов широкого використання.

В Україні і країнах ближнього зарубіжжя це питання отримало розвиток у напрямку використання марганцевих і високохромистих чавунів. Марганець, на даний час, є одним із самих дешевих карбідоутворюючих елементів. Карбіди цементитного типу  $(Fe, Mn)_3C$  здатні чинити значний опір зношуванню металу. Разом з цим, ледебурит в структурі визиває зниження пластичності, в'язкості і підвищує схильність до утворення і розповсюдження тріщин [6, 7, 8].

Відома висока ефективність застосування високохромистого білого чавуну (ВХБЧ) з мертенситно-аустенітною металевою основою і спеціальними карбідами в структурі. Збільшення вмісту хрому в чавуні від 0 до 30% сприяє підвищенню зносостійкості. В сприятливому напрямку змінюється і тип карбідів  $(Fe, Cr)_3C \rightarrow (Fe, Cr)_7C_3 \rightarrow (Fe, Cr)_{23}C_6$ . При цьому відомо, що максимум зносостійкості можна досягти певним зменшенням вмісту вуглецю [9, 10]. Останніми дослідженнями показана висока ефективність застосування для литих МК хромомарганцевих і хромомолібденових чавунів, таких як ІЧХ4Г7, ІЧХ12Г5, ІЧХ12Г3М, ІЧХ15Г4, ІЧХ12М, ІЧХ15МЗ, ІЧХ16МТ та інших [11].

Незважаючи на вищевикладене ВХБЧ поки що не знаходить широкого застосування в якості основного матеріалу для МК. Висока вартість феросплавів і великі енергетичні витрати при виплавці ВХБЧ являють собою значну перепону.

**Постановка завдання.** Задача дослідження полягала у визначенні раціонального, економічно обґрунтованого, хімічного складу хромистого чавуну для забезпечення високої ударно-абразивної зносостійкості литих мелючих куль.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження ударно-абразивної зносостійкості литих чавунних куль в даній роботі прийнято три типи сплавів: 1) низьколегований хромистий чавун (<1% Cr); 2) легований чавун типу Ніхард (або ІЧХ4Г7) з вмістом хрому до 5%, але без нікелю і значних добавок марганцю; і 3) високохромистий чавун типу ІЧХ15МЗ, ІЧХ16МТ з вмістом хрому до 20%.

Сплави виплавлялись в індукційній печі середньої частоти, типу ІЧТ, з основною футеровкою на чистому чушкового чавуні і сталевому низьковуглецевому брутті. Рідкий чавун піддавали легуванню середньовуглецевим ферохромом, марки ФХ200А. Температура випуску чавуну становила 1500°C.

Легування розплаву хромом у невеликій кількості, до рівня 0.8-1% Cr, здійснювали в ковші. При більш високому вмісту в чавуні хрому легування проводили в індукційній печі. У табл. 1 наведено хімічний склад відлитих дослідних чавунів.

Таблиця 1 – Хромисті чавуни

Тип сплаву	Хімічний склад, %					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
A	3,22	1,03	0,34	0,11	0,07	0,81
B	2,72	0,85	0,65	0,10	0,13	4,65
C	2,81	0,93	0,9	0,09	0,11	18,48

Джерело: розроблено авторами

В якості чавуну А був прийнятий типовий сплав, що використовується при виробництві мелючих куль і цильпесців на багатьох заводах. Склад чавунів типу В і С був прийнятий здебільшого як експериментальний.

Мелючі тіла відливали в багатомісних кокілях. Із отриманих виливків електроерозій-ним методом, що не викликає розігріву в зоні різання металу, вирізались зразки в радіальному напрямку, у вигляді паралелепіпедів і виготовлялися шліфи.

Металографічні дослідження чавунних куль проводились на нетравлених і травлених шліфах. На травлених шліфах при збільшенні в 500 разів досліджувалася мікроструктура металевої основи чавуну.

Дослідження макроструктури у виливку діаметром 60 мм показало, що при невеликому вмісті хрому (менше 0,15%) при кристалізації утворюється половинчастий чавун з вибіленим поверхневим шаром (рис. 1). Величина шару залежить від швидкості затвердіння [12, 13, 14]. При вмісті хрому в металі більше 0,3% домішки структурно вільного графіту відсутні по всьому перерізу виливки діаметром 60 мм.



Рисунок 1 – Злом кулі Ø60 мм (0,1 % Cr)

*Джерело: розроблено авторми*

Дослідження мікроструктури проводили на мікротвердомірі РМ-6 OLYMPUS науково-виробничої фірми Shimadzu (Японія). Тип хромистих карбідів і металевої основи визначали тепловим травленням і рентгеноспектральним аналізом.

Встановлено, що мікроструктура чавуну А перліто-ледебуритна. Карбідна фаза представлена легованим цементитом ( $(Fe, Cr)_3C$ ) (рис. 2).



Рисунок 2 – Мікроструктура білого чавуну (0,81% Cr)  $\times 500$

*Джерело: розроблено авторми*

Поверхнева зона виливки кулі має мілкодисперсну перліто-цементитну структуру. При збільшенні вмісту хрому дисперсність структури підвищується. При переході від поверхневої до центральної зони структура стає грубішою, змінюється кількісне співвідношення між структурними складовими. В цілому структура має так звану сотову будову, що свідчить про високу чистоту сплаву, зокрема про відносно низький вміст сірки і фосфору.

Всі дослідні зразки куль з вмістом у металі ~5% Cr мають структуру білого чавуну, що складається із ледебуриту і пластинчастого перліту (рис. 3). Середня мікротвердість евтектики становить ~763 Нц, перліту – 450-763 Нц, карбідів – ~1135 Нц. Звертає на себе увагу в такій структурі порівняно висока твердість легованого перліту.

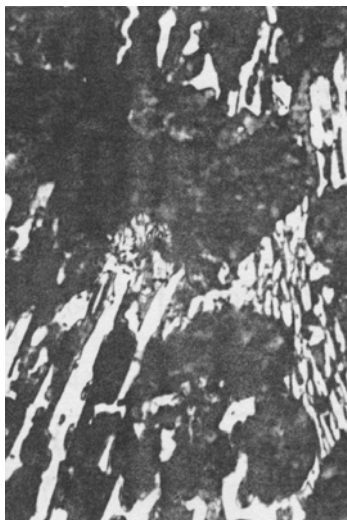


Рисунок 3 – Мікроструктура легованого чавуну (4,65% Cr)  $\times 500$

*Джерело: розроблено авторами*

Мікроструктура високохромистого чавуну С (табл. 1) складається з аустеніто-карбідної евтектики на основі спеціального карбиду хрому  $(Cr, Fe)_7C_3$ , окремих ділянок троосто-мартенситу з мікротвердістю 644-750 Нц та дрібних вторинних карбідів. Середня мікротвердість евтектики становить ~790 Нц, карбідів типу  $(Cr, Fe)_7C_3$  – 1620-1854 Нц. Ділянки троосто-мартенситу мають колоподібну в полі зору шліфа форму (рис. 4).

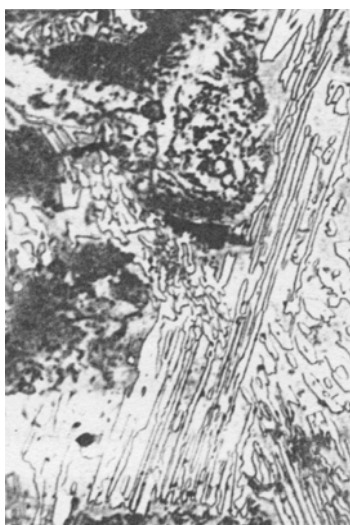


Рисунок 4 – Мікроструктура високохромистого чавуну (18,48% Cr)  $\times 500$

*Джерело: розроблено авторами*

В центральній зоні кулі спостерігається мікропористість, а в поодиноких випадках концентрована усадкова раковина, що пов'язано з особливостями кристалізації кулі (рис 5). Зовнішня поверхня виливки формується в кокілі без явних дефектів. В місці спряження ливника з виливком усадкові дефекти не спостерігаються (рис. 6).



Рисунок 5 – Злом кулі Ø60 мм (18,48% Сг)  
Джерело: розроблено авторами

Рисунок 6 – Мелюча куля Ø60 мм (0,81% Сг)  
Джерело: розроблено авторами

В табл. 2 приведені значення твердості чавуну на різній відстані від поверхні виливки.

Таблиця 2 – Твердість чавунної кулі Ø60 мм

Тип чавуну	Твердість чавуну, HV на відстані від поверхні кулі, мм				HRC на поверхні кулі
	5	10	20	30	
А	587	528	528	490	52
В	644	644	593	537	54
С	473	441	441	412	42

Джерело: розроблено авторами

Зносостійкість чавунів визначали на зразках, вирізаних з кулі в радіальному напрямку. Випробування проводили в лабораторному млині. Зразки зважували, завантажували в млин разом з подрібнюваним середовищем, що складалося із суміші щебеню і води, і випробували на протязі 10 годин. Знос визначали зважуванням зразків через кожні дві години. Відносну зносостійкість визначали як відношення втрати маси зразка із сталі Ст.5, вирізаного в радіальному напрямку із катаної кулі, до середньої втрати маси зразків із дослідного сплаву.

Динамічну міцність мелючих кулі досліджували на механізованому копрі за стандартною методикою [15]. При таких випробуваннях по мелючій кулі наносився удар бойка масою 50 кг, що падав з висоти 0,5 м. з частотою 10 уд/хв. Ударостійкість визначали по середній кількості ударів, витриманих мелючою кулею до руйнування. Результати випробувань приведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Експлуатаційні характеристики чавунних кулі Ø60 мм

Тип сплаву	Середня твердість, HRC	Відносна абразивна зносостійкість	Ударостійкість
А	45	1,25	50
В	50	2,15	75
С	42	2,42	129

Джерело: розроблено авторами

Згідно з отриманими даними зносостійкість чавуну В перевищує зносостійкість чавуну А в 1,72 рази (72 %); зносостійкість чавуну С перевищує зносостійкість чавуну А в 1,94 рази (94 %). Ударостійкість чавуну В перевищує ударостійкість чавуну А в

1,50 рази (50 %); ударостійкість чавуну С перевищує ударостійкість чавуну А в 2,58 рази (158 %).

**Висновки.** Результати проведених досліджень ударно-абразивної зносостійкості і ударостійкості литих чавунних мелючих куль вказують, що 20-и кратне перевищення вартості ВХБЧ саме по хрому перед низькохромистим чавуном є занадто великою платою. В умовах сьогодення, низькохромистий білий чавун є економічно обґрунтованим матеріалом для литих мелючих тіл.

## Список літератури

1. Крутилин А. Н., Бестужев Н. И., Бестужев А. Н., Каленкович Д. Н. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы. *Литье и металлургия*. 2009. Вып. 4 (53). С. 26-33.
2. Цыпин И. И. Износостойкие отливки из белых легированных чугунов. М.: НИИмаш, 1983.
3. Владимирова А. А., Косоконова Э. А., Удовиков В. И., Карпенко В. Ф. Литые мелющие шары из чугуна. *Литейное производство*. 1988. Вып. 11. С. 27-28.
4. Щербакова В. М., Удовиков В. И., Бутко Н. И., Соболев А. Н., Киковка Е. И. Износостойкий чугун для оливок мелющих цилиндров. *Литейное производство*. 1981. Вып. 4. С. 24.
5. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
6. Поддубный А. Н., Сакало В. И., Жарков В. Я., Кульбовский И. К., Игнатенко Ю. В., Михайлов Н. Н. Влияние строения литых шаров из белого чугуна на его прочность. *Литейное производство*. 1994. Вып. 8. С. 10-12.
7. Поддубный А. Н., Александров Н. Н., Кульбовский И. К., Жарков В. Я. Изготовление литых чугунных мелющих шаров. *Литейное производство*. 1994. Вып. 8. С.8-10.
8. Поддубный А. Н. Мелющие шары из чугуна, изготовленные кокильным литьем. *Литейное производство*. 1998. Вып. 1. С.8-11.
9. Кириевский Б. А., Изюмова Т. К. Хромистые чугуны. Перспективы совершенствования их структуры и свойств. *Процессы литья*. 1993. Вып. 4. С. 115-124.
10. Лучкин В. С., Пирогова Э. К., Леско А. Г. Влияние углерода и марганца на износостойкость хромистых чугунов. *Литейное производство*. 1988. Вып. 4. С. 23.
11. Солёный В., Пыхтин Я., Владимирова А., Косоконова Э. Производство и использование мелющих тел из высоколегированного чугуна. *Промышленность Казахстана*. 2013. №5(80). С. 48-50.
12. Бестужев Н. И., Королев С. П. Графитизированный белый чугун – перспективный материал для мелющих тел. *Литейное производство*. 1999. Вып. 3. С. 20-21.
13. Ломакін В.М., Клименко В.В., Пукалов В.В., Ломакін А.В. Дослідження впливу кінетики кристалізації на властивості кокильних виливків чавунних цильпелбсів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. 2016. Вип. 29. С. 132-139.
14. Ломакін В.М., Клименко В.В., Пукалов В.В., Кузик О.В., Дубоделов В.І., Горюк М.С. Дослідження процесу затвердіння та прогнозування структури литих чавунних молотильних тіл. *Збірник наукових праць Центральноукраїнського національного технічного університету*. 2018. Вип. 31. С. 66-74.
15. Ломакін В.М., Молокост Л.А. Ударостійкий чавун для молотильних тіл. *Збірник наукових праць Центральноукраїнського національного технічного університету*. 2020. Вип. 3 (34). С. 65-72.

## References

1. Krutinin, A.N., Bestugev, N.I., Bestugev, A.N. & Kalenkovic, D.N. (2009). Melyushchie tela. Problemy. Perspektivy [Grinding bodies. Problems. Perspectives]. *Litje i metallucyrgia, Vol. 4 (53)*, 26-33 [in Russian].
2. Cypin, I.I. (1983). *Iznosostojkie otlivki iz belyh legirovannyh chugunov [Wear-resistant white cast iron castings]. NIImash* [in Russian].
3. Vladimirova, A.A., Kosogonova, E.A., Udovikov, V.I. & Karpenko, V.F. (1988). Litye melyushchie shary iz chuguna [Cast iron grinding balls]. *Litejnoe proizvodstvo, Vol. 11*, 27-28 [in Russian].
4. Shcherbakova, V.M., Udovikov, V.I., Butko, N.I., Sobolev, A.N. & Kikovka, E.I. (1981). Iznosostojkij chugun dlya otlivok melyushchih cilindrov [Wear resistant cast iron for olives grinding cylinders]. *Litejnoe proizvodstvo, Vol. 4*, 24 [in Russian].
5. Garber M. E. (2010). *Iznosostojkie belye chuguny: svoystva, struktura, tehnologiya, ekspluatatsiya [Wear-resistant white cast irons: properties, structure, technology, operation]*. Moskow: Mashinostroyenie [in Russian].

6. Poddubnyj, A.N., Sakalo, V.I., Zharkov, V.Ya., Kulybovskij, I.K., Ignatenko, Yu.V. & Mikhailov, N.N. (1994). Vliyanie stroeniya lityh sharov iz byelogo chuguna na yego prochnost' [The influence of the structure of cast balls of white cast iron on its strength]. *Litejnoe proizvodstvo*, Vol. 8, 10-12 [in Russian].
7. Poddubnyj, A.N., Alexandrov, N.N., Kul'bovskij, I.K. & Zharkov, V.Ya. (1994). Izgotovlenie lityh chugunnyh melyushchih sharov [Cast iron grinding balls]. *Litejnoe proizvodstvo*, Vol. 8, 8-10 [in Russian].
8. Poddubnyj, A.N. (1998). Melyushchie shary iz chuguna, izgotovlennye kokil'nym litjem [Making cast iron grinding balls, made by chill casting]. *Litejnoe proizvodstvo*, Vol. 1, 8-11 [in Russian].
9. Kirievskij, B.A. & Izyumova, T.K. (1993). Hromistye chuguny. Perspektivy sovershenstvovaniya ih struktury i svojstv [Chrome cast iron. Prospects for improving their structure and properties]. *Processy litja*, Vol. 4, 115-124 [in Russian].
10. Luchkin, V.S., Pirogova, E.K. & Lesko, A.G. (1988). Vliyanie ugleroda i marganca na iznosostojkost' hromistyh chugunov [The effect of carbon and manganese on the wear resistance of chromium cast irons]. *Litejnoe proizvodstvo*, Vol. 4, 23 [in Russian].
11. Soljenyj, V., Pyhtin, Ja., Vladimirova, A. & Kosogonova, E. (2013). Proizvodstvo i ispol'zovanie melyushchih tel iz vysokolegirovannogo chuguna [Production and use of grinding media from high-alloy cast iron]. *Promyshlennost' Kazahstana*, Vol. 5 (80), 48-50 [in Russian].
12. Bestuzhev, N.I. & Korolev, S.P. (1999). Grafitizirovannyj belyj chugun – perspektivnyj material dlya melyushchih tel [Graphitized white cast iron - a promising material for grinding bodies]. *Litejnoe proizvodstvo*, Vol. 3, 20-21 [in Russian].
13. Lomakin, V.M., Klymenko, V.V., Pukalov, V.V. & Lomakin, A.V. (2016). Doslidzhennya vplyvu kinetyky krystalizacii na vlastyosti kokil'nyh vylyvkiv chavunnyh cyl'pebsiv [Investigation of the effect of crystallization kinetics on the properties of chill castings of cast iron grinding bodies]. *Zbirnyk naukovykh prac' Kirovohrads'koho nacional'noho tekhichnoho universytetu*, Vol. 29, 132-139. [in Ukraine].
14. Lomakin, V.M., Klymenko, V.V., Pukalov, V.V., Kuzyk, O.V., Dubodelov, V.I. & Goryuk, M.S. (2018). Doslidzhennya procesu zatverdinnya ta prognozuvannya struktury lytyh chavunnyh molol'nyh til [Investigation of the process of solidification and prediction of the structure of cast iron grinding bodies]. *Zbirnyk naukovykh prac' Central'noukrains'koho nacional'noho tekhichnoho universytetu*. Vol. 31, 66-74. [in Ukraine].
15. Lomakin, V.M. & Molokost, L.A. (2020). Udarostijkyj chavun dlya molol'nyh til [Research and comparative analysis of wear resistance of cast grinding media from chromium cast irons]. *Zbirnyk naukovykh prac' Central'noukrains'koho nacional'noho tekhichnoho universytetu*. Vol. 3 (34), 65-72. [in Ukraine].

**Viktor Lomakin**, Assos. Prof., PhD in tech. sci., **Volodymyr Kropivnyi**, Prof., PhD in tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assos. Prof., PhD in tech. sci., **Olena Kropivna**, Assos. Prof., PhD in tech. sci., **Lyudmyla Molokost**, lecturer

*Central Ukrainian National University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Research and Comparative Analysis of Wear Resistance of Cast Grinding Media From Chromium Cast Irons**

A study was made of the impact-abrasive wear resistance and impact resistance of grinding bodies cast in a multi-plate mold. Three types of chromium cast irons were adopted for the study: low chromium (~1% Cr), medium chromium (up to 5% Cr) and high chromium (up to 20% Cr). The macro- and microstructure of these alloys as a material for cast grinding balls has been studied. Installed an increase in the impact-abrasive wear resistance and impact resistance of such products with an increase in the mass fraction of chromium in cast iron due to the formation of carbides of the  $(Fe, Cr)_3C$  and especially  $(Fe, Cr)_7C_3$ . Balls were cast in multi-seat chill molds.

Cast iron was smelted in a medium-frequency induction furnace, such as IChT, with the main lining on a charge of pure pig iron and steel low-carbon scrap. The temperature of cast iron production was 1500 °C. Liquid cast iron was subjected to alloying with medium carbon ferrochrome.

The wear resistance of cast irons was determined on samples cut from balls in the radial direction. The tests were performed in a laboratory mill. When tested for impact resistance, the grinding ball received a striking blow of mass 50 kg, falling from a height of 0,5 m. The frequency of application of dynamic loads was 10 beats per minute. Impact resistance was determined by the average number of impacts sustained by the grinding body prior to destruction.

Nevertheless, significant excess of the cost high-chromium over low-chromium cast iron forces us to agree with the opinion of the majority of researchers and the practice of production of such metal products. In today's conditions, low-chromium white cast iron is an economically viable material for grinding media.

**cast iron, melt, chill mold, ball, alloying, chromium, wear resistance, shock resistance**

*Одержано (Received) 13.04.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 29.04.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 30.05.2022*