

properties of composite coatings from the ratio of components, makes it possible to control a set of operational properties and obtain high-quality coatings to increase the durability of parts of systems and vehicle units.

As a result of the conducted researches it is offered to consider composite coverings and composite materials as the systems characterized by a certain complex of operational properties depending on filler content and regularity of structure. According to the theory of cluster components, the content of the component determines the parameters and properties of composite coatings and materials. The method of cluster components makes it possible to present a set of operational properties as an additive model of its components. The packaging of components in composite coatings and materials is represented by atomic crystal structures: simple cubic, volume-centered cubic, face-centered cubic and hexagonal densely packed.

The implementation of the method of cluster components on the example of a binary system of components A and B is considered. The basic configuration in accordance with the approximations of the statistical ordering theory is chosen. The visual interpretation and physical content of a mixture of powders, components of composite coatings and materials, particles A and B are given. The configurational entropy and formation of cluster components of the intermediate composition AB along with the basic AA and BB are considered. Based on the π -theorem, a complete set of quasi-chemical reactions is outlined. For binary composite coatings and materials ACB1-C the matrices of size and relative content of components are constructed, the quasi-chemical formalism of the method of cluster components and the law of active masses for volume-centered cubic lattice are used. This is taken into account when building functional models of operational properties. Their specification on the criterion of correctness is carried out.

composite coating, cluster component, packing, performance properties

Одержано (Received) 16.06.2020

Прорецензовано (Reviewed) 23.06.2020

Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020

УДК 621.74

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).65-72](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).65-72)

В.М. Ломакін, доц., канд. техн. наук, **Л.А. Молокост**, викл.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: vik284333@gmail.com

Ударостійкий чавун для молольних тіл

Проведено дослідження динамічної міцності (ударостійкості) молольних тіл, відлитих з низькохромистого чавуну в багатомісному кокіль, в залежності від вмісту хрому в сплав. Встановлено підвищення ударостійкості виливків куль при збільшенні масової частки хрому в чавуні в межах до 1%. При цьому найбільше зростання динамічної міцності спостерігається при збільшенні масової частки хрому від 0,3% до 0,5%. При подальшому зростанні вмісту хрому ударостійкість білого низьколегованого чавуну підвищується менш помітно і при вмісту хрому 0,7-0,8% досягає максимуму.

чавун, розплав, куля, кокіль, легування, хром, ударостійкість

В.Н. Ломакин, доц., канд. техн. наук, **Л.А. Молокост**, викл.

Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Ударостойкий чугу́н для мелющих тел

Проведено исследование динамической прочности (ударостойкости) мелющих тел, отлитых из низкохромистого чугуна в многоместном кокиле, в зависимости от содержания хрома в сплаве. Установлено повышение ударостойкости отливок шаров при увеличении массовой доли хрома в чугуне в пределах до 1%. При этом наибольший рост динамической прочности наблюдается при увеличении массовой доли хрома от 0,3% до 0,5%. При дальнейшем росте содержания хрома ударостойкость белого низколегированного чугуна повышается менее заметно, и при наличии хрома 0,7-0,8% достигает максимума.

чугун, расплав, шар, кокиль, легирование, хром, ударостойкость

Постановка проблеми. Проблема забезпечення оптимальних експлуатаційних властивостей молоткових тіл, таких як твердість, абразивна зносостійкість і динамічна міцність досі не вирішена. Вся складність такого завдання полягає в тому, що такі властивості залежать від великої кількості факторів, серед яких: хімічний склад, металографічна структура, мікротвердість складових структури, кількість і розподіл карбідів ледебуриту. Тому при вирішенні завдання отримання необхідних властивостей молоткових тіл слід враховувати всю різноманітність чинників, що докорінно впливають на технологію виготовлення таких виробів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відносно механічного стирання є підстави вважати, що між умовами роботи молоткових тіл різних діаметрів суттєвої різниці немає. Знос матеріалу молоткового тіла визначається тертям з різанням його поверхні, а також ступенем абразивності матеріалу, що розмелюється. Довговічність кулі залежить не тільки від опору стиранню і ударостійкості, але і лімітується також границею втоми матеріалу [2, 3].

Опір виливка стиранню зазвичай може бути підвищений наявністю в металевій матриці металу карбідів цементитного (Fe_3C) або інших типів (Me_7C_3 , Me_{23}C_6). З цією метою в практиці виробництва таких виробів застосовується легування чавуну карбидоутворюючими елементами, зокрема марганцем або хромом. Марганець в умовах сьогодення є більш дешевим. Проте хром здатен ефективніше покращити зносостійкість завдяки утворенню в металі карбідів $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ і $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$. Саме тому в якості матеріалу для молоткових куль все частіше пропонується низькохромистий чавун [4, 5, 6, 7].

Абразивна зносостійкість молоткових тіл може бути визначена в звичайному лабораторному млину, оскільки фізична природа явища при переході з великого на малий масштаб принципово не змінюється. Оцінка динамічної міцності (ударостійкості) молоткових тіл при зношуванні в лабораторному млину не може бути визначена. При такому дослідженні не можуть бути відтворені умови, пов'язані з ударною втомою матеріалу.

Молоткові тіла зі звичайних білих чавунів не відповідають вимогам по ударостійкості. Підвищення цієї важливої експлуатаційної властивості досягається легуванням чавунів і проведенням термообробки литих виробів. У роботах [8, 9] вказується, що при комплексному легуванні чавуну можна підвищити динамічну міцність молоткових тіл і без проведення термічної обробки.

Останніми дослідженнями [9] показано, що кремній здатен підвищити динамічну міцність (ударостійкість і втомну міцність) куль, зменшити схильність чавуну до усадки і розмір зерна. Такі дані були отримані при дослідженні експлуатаційних властивостей куль з легованого марганцем чавуну. Проте ця рекомендація знаходиться в певному протиріччі з загальновизнаними вимогами до зносостійких матеріалів для молоткових тіл. За літературними даними кремній знижує абразивну зносостійкість чавунних виливків, і в зв'язку з цим рекомендується обмежувати вміст такого елемента в металі до 1%. Крім того, в роботі [10] вказується, - щоб уникнути крихкості куль, особливо великих розмірів, потрібно мати зовнішній вибілений шар товщиною до 20-25 мм, а внутрішню частину необхідно зберегти з сірого чавуну, тобто кращим є вибілений чавун.

В даній роботі усі вищеперераховані положення були перевірені по відношенню до експлуатаційних характеристик молоткових тіл сферичної форми, відлитих із низькохромистого чавуну.

Постановка завдання. Задача дослідження полягала у визначенні раціонального, економічно обґрунтованого, хімічного складу хромистого чавуну для молоткових куль для забезпечення високої ударостійкості таких виробів.

Виклад основного матеріалу. В якості вихідного служив чавун наступного складу: вуглець – 3,0%, кремній – 1,6%, марганець – 0,4%, сірка – 0,05%, фосфор – 0,06%.

Для дослідження були відлиті кілька партій куль діаметром 60 мм з різним вмістом хрому в чавуні, від 0 до 1%. Чавун виплавляли в індукційній печі середньої частоти, типу ІЧТ, з основною футеровкою на чистому чушковому чавуні і сталевому низьковуглецевому брукті. Температура випуску чавуну становила 1500 °С. Рідкий чавун піддавали легуванню середньовуглецевим ферохромом. Кулі відливали в багатомісних кокілях.

Збільшення вмісту хрому в чавуні в межах до 1% призводить до зростання об'ємної твердості і абразивної зносостійкості. Але, з точки зору динамічної міцності (ударостійкості) молоткових тіл в цьому питанні немає ясності.

Дослідження динамічної міцності, як відомо, проводиться шляхом випробування куль на ударостійкість, тобто здатність куль не руйнуватися при ударно-напруженому стані при навантаженні, близькому до руйнівного.

Іншим різновидом дослідження динамічної міцності є випробування молоткових тіл на міцність від втомних при ударному навантаженні. Метою такого дослідження є визначення порівняльної довговічності кулі при ударній роботі в млину.

Проведення випробувань куль на динамічну міцність викликало труднощі, оскільки для досліджуваних сплавів невідома величина граничних, близьких до руйнуючих, динамічних зусиль. Крім того, ударостійкість молоткових тіл не регламентується держстандартом, і на різних ливарних підприємствах, що виробляють литі молоткові вироби, для визначення втомної стійкості і ударостійкості куль застосовуються різні пристосування. При цьому використовується різна частота і величина динамічних зусиль.

В даній роботі динамічну міцність молоткових тіл досліджували на спеціальному механізованому копрі (рис. 1).

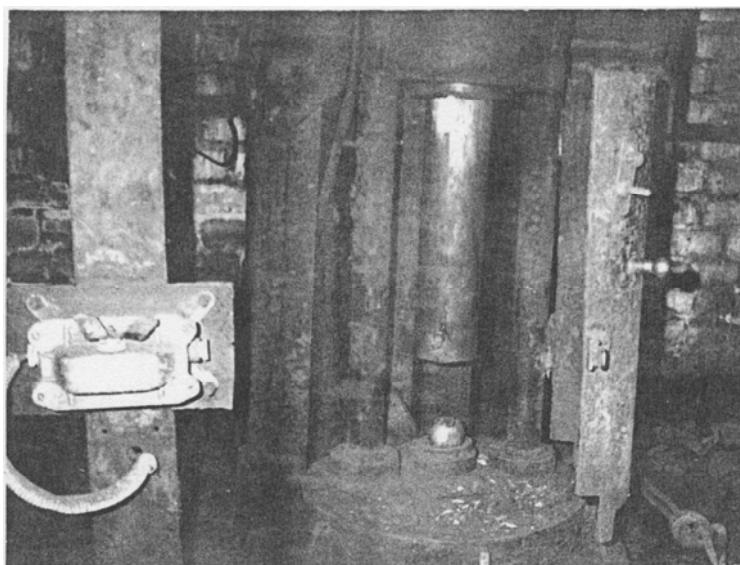


Рисунок 1 – Механізований копер

Джерело: розроблено авторами

При випробуваннях на ударостійкість молоткова куля отримувала удар бойка масою 50 кг, що падав з висоти 0,5 м. Частота прикладання динамічних навантажень становила 10 ударів за хвилину. Ударостійкість визначали по середній кількості ударів, витриманих молотковим тілом до руйнування.

Металографічні дослідження структури отриманих виливків проводили з використанням мікроскопа. Вивчення кількості і форми виділень графіту проводилося на нетравлених шліфах. При цьому встановлено, що при вмісту хрому більше 0,3% виділення структурно вільного графіту відсутні по всьому перетину виливка (рис. 2).



Рисунок 2 – Мікроструктура білого чавуну (0,7-0,8% Сг)×500

Джерело: розроблено авторами

Вивчення травлених шліфів показало, що мікроструктура усіх досліджених виливків являє собою мікроструктуру доєвтектичного білого чавуну, що складається з продуктів розпаду надлишкового аустеніту і ледебуритної евтектики. У перетині виливка можна виділити три зони: поверхневу, перехідну і центральну. Поверхнева зона має мілкодисперсну перлитно-цементитну структуру. При збільшенні вмісту хрому дисперсність структури підвищується. При переході від поверхневої до центральної зони виливка структура стає більш грубою, змінюється кількісне співвідношення між структурними складовими, збільшується частка ділянок розпаду надлишкового аустеніту. У центральній зоні спостерігається мікропористість, що пов'язано з особливостями кристалізації куль.

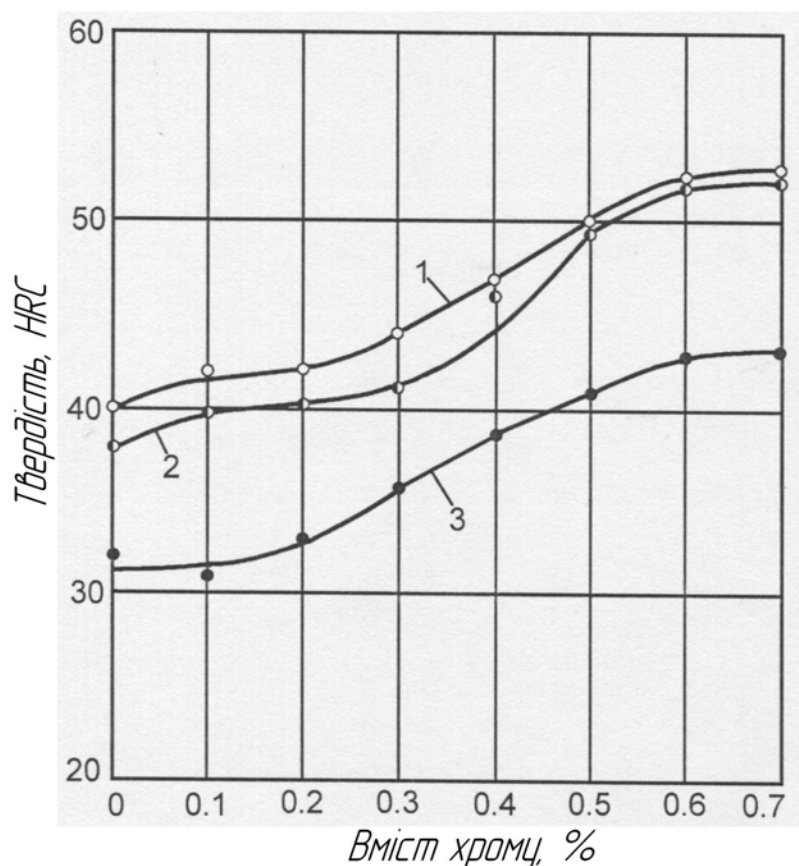
У табл. 1 приведені результати дослідження твердості чавуну у різних перетинах виливка.

Таблица 1 – Властивості виливків молоткових куль Ø60 мм

Вміст хрому, %	Твердість HRC в різних перетинах виливка			Ударостійкість, уд
	поверхня	середній шар	центр	
Вихідний сплав	40	38	32	42
0,1	42	40	31	72
0,2	42	40	33	144
0,3	44	41	36	281
0,4	47	46	39	546
0,5	50	50	41	722
0,6	52	52	43	768
0,7	53	52	43	774

Джерело: розроблено авторами

За результатами проведеного дослідження побудовані залежності твердості чавуну від вмісту в ньому хрому для центральної, середньої (перехідної) і поверхневої частин сферичного виливка (рис. 3).



1 - поверхнева зона виливка; 2 - середня частина виливка (1/2 радіуса кулі);
3 - центральна частина виливка

Рисунок 3 – Зміна твердості по перетину кулі

Джерело: розроблено авторами

Згідно з рис. 3 твердість поверхневої зони виливка і прилеглої до неї основної маси металу з підвищенням вмісту-хрому в чавуні зростає (криві 1 і 2). Максимальна твердість білого легованого чавуну досягається при вмісту хрому 0,7-0,8% (<2% Si). При цьому перепад твердості від поверхні (~ 52 HRC) до центру кулі (~ 42 HRC) становить величину, порядку 10 одиниць.

Як видно з рис. 4 ударостійкість виливків куль (динамічна міцність) підвищується зі збільшенням масової частки хрому в чавуні в межах до 1%. При цьому найбільше зростання динамічної міцності спостерігається при збільшенні масової частки хрому від 0,3% до 0,5%. При подальшому зростанні вмісту хрому, ударостійкість білого низьколегованого чавуну підвищується менш помітно, і при наявності хрому 0,7-0,8% досягає максимуму.

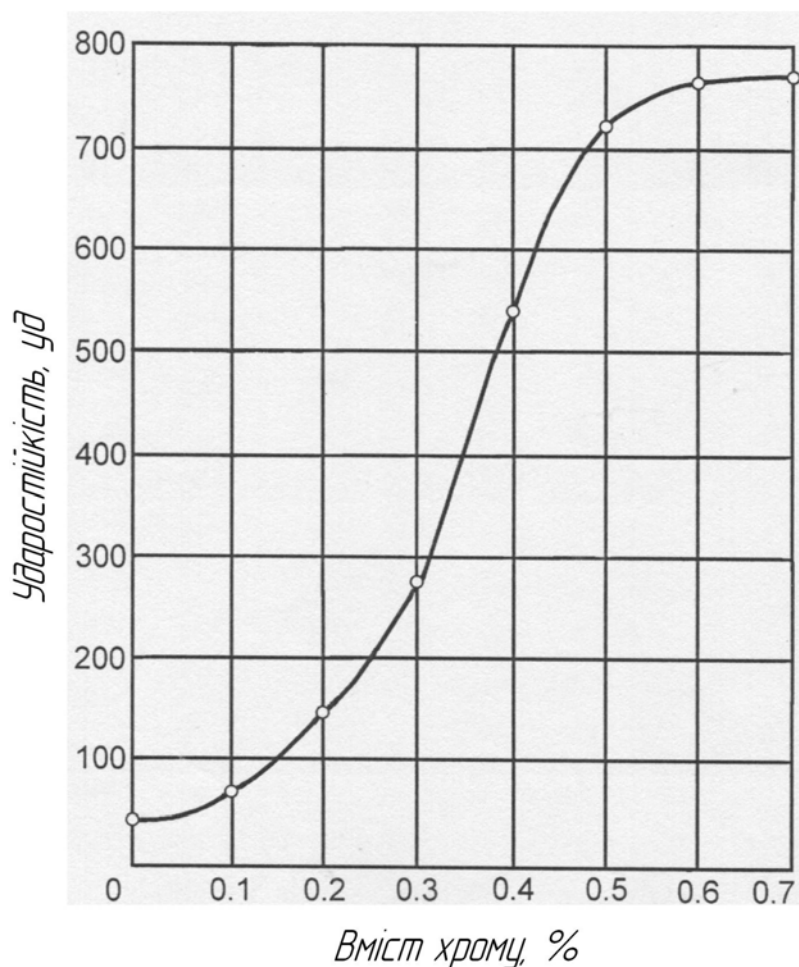


Рисунок 4 – Ударостійкість куль із низькохромистого чавуну

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Встановлена залежність ударостійкості молоткових тіл і вже відомі з наукової літератури експериментальні дані по абразивній зносостійкості білого чавуну дозволили зробити висновок: при розмелюванні твердих гірничих порід, з великим вмістом твердого кварцу, застосування низькохромистого чавуну в якості матеріалу для молоткових тіл є найбільш ефективним, як в плані досягнення високої ударостійкості, так і для забезпечення економічності експлуатаційних характеристик.

Список літератури

1. Самойлов В. Н., Коновалов Ю. Н., Тистечок В. Д. Состояние и перспективы развития литья чугуновых мелющих тел в условиях КГ ГМК “Криворожсталь”. *Металл и литье Украины*. 1999. Вып. 9, 10. С. 13-16.
2. 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.
3. 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.
4. Лучкин В. С., Пирогова Э. К., Леско А. Г. Влияние углерода и марганца на износостойкость хромистых чугунов. *Литейное производство*. 1988. Вып. 4. С. 23.
5. Кириевский Б. А., Изюмова Т. К. Хромистые чугуны. Перспективы совершенствования их структуры и свойств. *Процессы литья*. 1993. Вып. 4. С. 115-124.
6. Владимиров А. А., Косогонова Э. А., Удовиков В. И., Карпенко В. Ф. Литые мелющие шары из чугуна. *Литейное производство*. 1988. Вып. 11. С. 27-28.

7. Ломакін В. М., Клименко В. В., Пукалов В. В., Кузик О. В., Дубодєлов 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.
8. Поддубный А. Н., Александров Н. Н., Кульбовский И. К., Жарков В. Я. Изготовление литых чугуных мелющих шаров. *Литейное производство*. 1994. Вып. 8. С.8-10.
9. Поддубный А. Н. Мелющие шары из чугуна, изготовленные кокильным литьем. *Литейное производство*. 1998. Вып. 1. С.8-11.
10. Бестужев Н. И., Королев С. П. Графитизированный белый чугун – перспективный материал для мелющих тел. *Литейное производство*. 1999. Вып. 3. С. 20-21.

References

1. Samoilov, V.N., Konovalov, Yu.N., Tistechok, V.D. (1999). *Sostoyanie i perspektivy razvitiya litja chugunnyh melyushchih tel v usloviyah KG GMK "Krivorogstal"* [The state and development prospects of cast iron grinding bodies casting under the conditions of the Krivorozhstal mining and metallurgical complex]. *Metall i litje Ukrainy*, Vol. 9, 10, 13-16 [in Russian].
2. 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].
3. 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].
4. 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].
5. Kirievskij, B.A., Izyumova, T.K. (1993). *Hromistye chuguny. Perspektivy sovershenstvovaniya ih struktury i svoystv* [Chrome cast iron. Prospects for improving their structure and properties]. *Processy litja*, Vol. 4, 115-124 [in Russian].
6. 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].
7. Lomakin, V.M., Klymenko, V.V., Pukalov, V.V., Kuzyk, O.V., Dubodelov, V.I., Goryuk, M.S. (2018). *Doslidzhennya procesu zatverdinnya ta prognovuvannya struktury lityh chavunnyh molol'nyh til* [Investigation of the process of solidification and prediction of the structure of cast iron grinding bodies]. *Zbirnyk naukovykh prac' Central'noukraiins'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*. 2018. Vol. 31. С.66-74 [in Ukraine].
8. 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].
9. 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].
10. 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].

Viktor Lomakin, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Lyudmyla Molokost**, lecturer
Central Ukrainian National University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Impact Resistant Cast iron for Grinding Bodies

A study of the dynamic strength (impact resistance) of grinding bodies cast from low-chromium cast iron in a multi-seat chill mold depending on the chromium content in the alloy is carried out.

As a starting point, cast iron of the following composition was used: carbon – 3,0%, silicon – 1,6%, manganese – 0,4%, sulfur – 0,05%, phosphorus – 0,06%. For the study, several batches of balls with a diameter of 60 mm were cast with different chromium content in cast iron, from 0 to 1%. 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. Balls were cast in multi-seat chill molds.

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.

An increase in the impact resistance of ball castings has been established with an increase in the mass fraction of chromium in cast iron up to 1%. Moreover, the greatest increase in dynamic strength is observed with an

increase in the mass fraction of chromium from 0,3% to 0,5%. With a further increase in the chromium content, the impact resistance of white low-alloy cast iron increases less noticeably, and in the presence of chromium 0,7-0,8% reaches a maximum. The difference in hardness from the surface (~ 52 HRC) to the center of the ball (~ 42 HRC) is a value of about 10 units.

The established impact resistance of grinding bodies made it possible to conclude: when grinding solid rocks with high content of solid quartz, the use of low chromium cast iron as a material for grinding media is the most effective, as in terms of achieve high impact resistance, and to ensure cost-effective performance.

cast iron, melt, ball, chill mold, alloying, chrome, impact resistance

Одержано (Received) 20.05.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.06.2020

Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020

УДК 621.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).72-81](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).72-81)

А.В. Рутковський, канд. техн. наук, ст. наук. співр.

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна

e-mail: coating@ipp.kiev.ua

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.

Центральнотуркїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: markob0@ukr.net; sergejmihajluta2@gmail.com

Теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі

В роботі проведено дослідження основного параметру, що обмежує застосування поршнів з алюмінієвих сплавів при форсуванні двигунів - теплостійкості та її залежності від дифузійних іонноазотованих шарів. При аналізі останніх досліджень і публікацій визначено найбільш поширені методи нагрівання зразків при випробуваннях, їх переваги та недоліки. Завдання дослідження - виявити взаємозв'язок факторів, що визначають теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом зміцнення поршнів. Для дослідження використовувався комплекс лабораторного устаткування на основі установки "Щелкунчик", що забезпечує циклічну зміну температури й навантаження зразка, контроль та запис значень температури, навантаження й деформації та функціонування в автоматичному режимі. При цьому використовувалися плоскі зразки з алюмінієвого сплаву АЛ21 з теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами, що нанесені в установці ВІПА-1 та зразки без обробки. Характеристики термічного циклу: 500 °С ↔ 720 °С. час нагрівання - 10 сек., охолодження 15 сек., що відповідає реальним умовам експлуатації поршнів. Визначені криві ізотермічної та термоциклічної повзучості що мають чітко виражені три ділянки повзучості, в залежності від температури тривалість їх різна. Це зумовлено наявністю в поверхневому шарі зміцнюючої фази AlN_i; рівномірністю розподілу компонентів покриття по поверхні й ступінню їх тугоплавкості. З цим пов'язано ускладнення руху дислокацій, які на своєму шляху зіштовхуються з необхідністю долати при своєму русі великі перепони, що викликані наявністю зміцненого шару. Вид кривих повзучості залежить від температури та умов її впливу на композицію "основа-покриття". Час до руйнування при термоциклічному режимі випробувань менший, ніж при ізотермічному. В процесі повзучості алюмінієвого сплаву АЛ21 із теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами спостерігається два конкуруючих процеси: зміцнення в наслідок пластичної деформації та зняття зміцнення під впливом підвищеної температури. Опір ізотермічній та термоциклічній повзучості зміцненого алюмінієвого сплаву АЛ21 підвищився в 1,8...2,2 рази.

вакуумне азотування, алюмінієві сплави, теплостійкість, ізотермічні та термоциклічні випробування, криві повзучості