



УДК 621.74

Поступила 23.12.2015

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ ЦИЛЬПЕБСОВ STUDY OF CYLPEBS CHILLING

*Е. И. МАРУКОВИЧ, А. М. БРАНОВИЦКИЙ, Ю. А. ЛЕБЕДИНСКИЙ, Ю. В. САЧЕНКО, В. А. ХАРЬКОВ,  
Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11.*

*E-mail: info@itm.by, inmet@mail.ru,*

*О. Г. ПРОХОЦКИЙ, ООО «ПромПоиск», г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 15*

*E. I. MARUKOVICH, A. M. BRANOVICKY, Y. A. LEBEDINSKY, Y. V. SACHENKO, V. A. HARKOV,  
Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11,  
Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: info@itm.by, inmet@mail.ru,*

*O. G. PROHOCKY, LLC «PromPoisk», Minsk, Belarus, 15, Academic str.*

*Рассмотрены способы увеличения ударостойкости чугунных мелющих тел. Приведены модели теплопереноса в процессе литья и ударно-абразивного износа. Изготовлена технологическая оснастка для получения экспериментальных образцов мелющих тел литьем в кокиль, получены образцы цельпесов.*

*Methods of increasing the shock resistance of cast-iron grinding bodies are researched. The models of heat transfer in the process of casting and shock-abrasive wear are presented. Tooling to produce experimental samples of milling bodies chilling(-gravity die casting) is manufactured, samples of cylpebs are produced.*

**Ключевые слова.** Мелющие тела, цельпесы, износостойкий чугун, кокиль, кокильное литье.

**Keywords.** Grinding bodies, cylpebs, wear-resistant cast iron, mold, permanent mold casting.

**Введение.** Мелющие тела из чугуна получили широкое применение при производстве строительных материалов в Республике Беларусь и во всем мире ввиду высоких износостойкости и ударопрочности. Получение мелющих тел, обладающих большим ресурсом работы, с применением вторичных материалов является важной задачей. В настоящее время в мире проводится большое количество исследований по этой тематике.

Мелющие тела должны обладать уникальным сочетанием механических свойств – высокой износостойкостью и высокой ударопрочностью. Высокая износостойкость связана в первую очередь с наличием в составе чугунов высокотвердых карбидов [1]. Для чугунных отливок существует много методов повышения одной из этих характеристик в ущерб другой. Однако в последнее время в исследовании литья мелющих тел наметилась тенденция поиска методов значительного удешевления производства отливок со стойкостью как к износу, так и к ударам одновременно [2].

**Анализ способов увеличения ударопрочности.** Увеличение ударопрочности достигается за счет одновременного воздействия многих факторов:

1. Параметры литья, влияющие на размер карбидов и зерен матрицы железа.

1.1. Добавление в расплав нерастворимых частиц, служащих для зародышеобразования при затвердевании. При этом могут использоваться как традиционные добавки, например, кремний, так и новые виды, например, углеродные наномодификаторы [3, 4].

1.2. Выбор режимов литья с быстрым охлаждением в температурных зонах, в которых происходит активное зарождение – рост карбидов и зерен матрицы [5].

1.3. Выбор режимов литья и добавок для затвердевания карбидов как отдельных включений, без образования сплошной сетки [6].

2. Выбор режимов охлаждения с образованием матрицы с аустенитной структурой либо с бейнитно-трооститной мелкозернистой структурой. Уменьшение размеров зерна и удаление транскристаллитной структуры увеличивает как износостойкость, так и ударопрочность [7, 8–10].

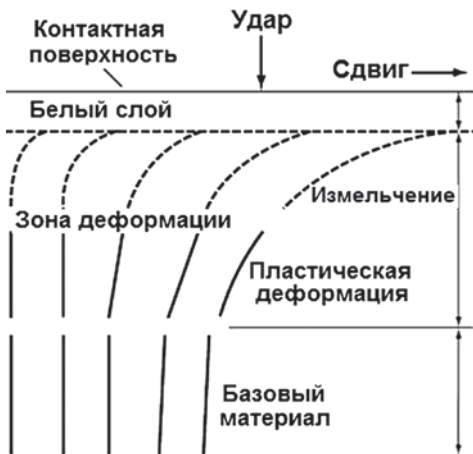


Рис. 1. Схематическое представление подповерхностных зон вблизи поверхности, подверженной повторяющимся ударным нагрузкам [13]

3. Добавление в расплав веществ, способствующих образованию шаровидного графита, обеспечивающего дополнительную ударопрочность [11–13].

**Ударно-абразивный износ металлов.** Для металлических тел, подверженных повторяющейся импульсной нагрузке, вблизи поверхности для большинства материалов под различными типами и направлениями нагрузок наблюдаются характерные подповерхностные зоны. Могут быть выделены три зоны (рис. 1) [14]. Первая, самая дальняя относительно контактной поверхности, состоит из исходного базового вещества. Зона деформации – промежуточная зона состоит из пластически деформированного базового материала. Деформация изменяется от нуля вблизи первой зоны до максимума вблизи третьей зоны, называемой белым слоем. Белый слой, содержащий саму контактную поверхность, обычно однородный и мелкоструктурированный.

В области зоны деформации белого слоя иногда имеются трещины или следы их образования. Это зависит от вида материалов и величин нормальной и тангенциальной нагрузок.

Известно, что на поверхности ударяющихся тел их твердость увеличивается. Внутри деформационного слоя это приписывают деформационному упрочнению, в белом слое это свойство самого материала.

В случае хрупкой или недеформированной матрицы промежуточный слой деформации может отсутствовать.

В общем случае существует много способов удаления материала при ударном износе. Для достаточно больших нагрузок – это абразивный износ; образование трещин и хрупкий излом; выдавливание из узкой зоны контакта при пластической деформации.

В этом случае из-за усталостных явлений под поверхностью могут возникать трещины, что приводит к образованию осколков. Очень большие ударные нагрузки приводят к разрушению самой поверхности и быстрому удалению материала.

Абразивный износ проявляется как «распаханные» бороздки и ведет к огрублению контактной поверхности. Бороздки становятся более акцентированными при увеличении нагрузки. Однако при более близком исследовании видно, что с ростом нагрузки появляется зарождение трещин и образование плоских пластинчатых частиц в зоне бороздок.

При усталости поверхностной зоны и расслоении дефекты усталости в основном появляются в белом слое. Белый слой, материал которого становится хрупким из-за наклепа, подвержен образованию трещин и отслоению.

Осколки имеют место, когда микротрещины распространяются в глубь материала в зону деформации.

Факторами, определяющими механизм и скорость разрушения поверхности, являются нагрузка при контакте и скорость скольжения. Здесь только отметим, что увеличение скорости скольжения может приводить как к увеличению износа, так и к его уменьшению за счет улучшения механических свойств белого слоя, материал которого состоит из материалов обоих трущихся тел.

Анализ отколовшихся от обоих тел частиц показывает следующие закономерности:

- в целом частицы имеют пластинчатую форму;
- выделенная кристаллографическая ориентация существует;
- металлические частицы состоят из малых и/или искривленных первичных кристаллов;
- заметно формирование оксидов;
- имеет место фазовое превращение металлических компонентов.

При этом часть оксидов была сформирована еще на этапе, когда частица была в составе исходного материала. Фазовые превращения говорят о высокой температуре, поле напряжений и уровне диффузии в материалах.

**Моделирование ударно-абразивного износа.** Модель ударно-абразивного износа основана на двух стадиях прогресса износа [15]. Первая стадия – период индукции, во время которого происходит деформация и формируются повреждения износа, но нет существенной потери материала. Конец этого периода называется лимитом нулевого износа. Он представляет собой начальную точку измеряемого износа.

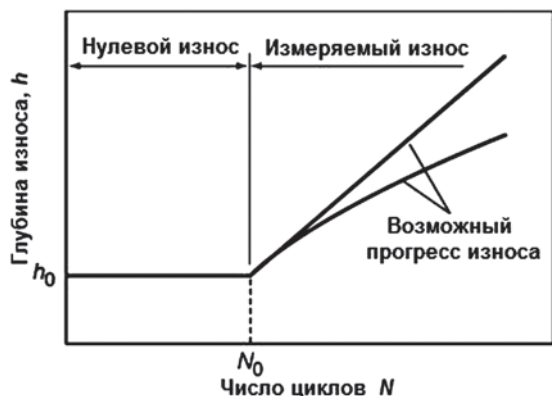


Рис. 2. Нулевой и измеряемый износ

Как видно из рис. 2, прогресс износа в этой области может принимать разные виды. Это зависит от механизма износа, связанного со свойствами материала и степенью контакта.

Большинство компонентов не теряет функциональность и после лимита нулевого износа их использование связано с износом на определенную глубину. По этой причине измеряемый процесс износа важен при попытке предсказать время работы компонента.

Существует полуэмпирическое уравнение для числа циклов  $N_0$  в случае упругого напряжения в образце, после которого начинается измеряемый износ. Считается, что это число зависит от поверхностного напряжения сдвига  $\tau_1$  и максимального подповерхностного напряжения сдвига  $\tau_2$  во время удара:

$$N_0 = \frac{2000}{1 + \beta} \left[ \frac{\gamma \sigma_y}{\sigma} \right]^9, \quad (1)$$

где  $\sigma_y$  – соосный предел текучести;  $\sigma$  – пиковое контактное давление;  $\gamma$  – эмпирически вводимый фактор износа (для углеродистых и инструментальных сталей с большим содержанием карбидов примерно 1,1) [16]. Величина  $\beta$  есть отношение вкладов поверхностного разрушения  $D_1$  и подповерхностного  $D_2$ :

$$D_1 = \int_0^{t_*} \tau_1^9(t) dt, \quad D_2 = \int_0^{t_*} \tau_2^9(t) dt, \quad (2)$$

где  $t_*$  – длительность цикла удара;  $t$  – время до начала проскальзывания, это означает, что износ имеет место только до проскальзывания.

На этапе измеряемого износа часто используется линейная модель для объема износа  $W$ :

$$W = KP_x/H, \quad (3)$$

где  $P$  – нагрузка (сила);  $x$  – расстояние скольжения;  $H$  – твердость;  $k$  – безразмерный коэффициент износа. Нагрузка может быть заменена на силу трения, деленную на коэффициент трения  $\mu$ . Иначе это выражение можно переписать как:

$$W = KIn/H, \quad (4)$$

где  $I$  – энергия одного удара;  $n$  – число ударов;  $K$  – безразмерный коэффициент износа. Для трения металлов без смазки величина  $K$  порядка  $10^{-6}$ – $10^{-4}$ . Для ударяющихся больших тел износ уменьшается со временем:

$$W = KNe^n, \quad (5)$$

где  $e$  – энергия толчка;  $N$  – число циклов;  $K, n$  – эмпирические коэффициенты.

**Модель оценки теплопереноса при затвердевании цильпесов.** Модель основана на решении уравнения теплопроводности в отливке и кокиле:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (6)$$

где  $T$  – температура в точке  $(x, y, z)$  в момент времени;  $t, \rho$  – плотность;  $\lambda$  – теплопроводность. Уравнение (6) в данной постановке не имеет источников тепла в правой части, а выделение теплоты при затвердевании учитывается добавлением дополнительного члена при расчете теплоемкости:

$$c = \begin{cases} c, & \text{при } T > T_{lik} \text{ и } T < T_{sol}, \\ c + \frac{L}{T_{lik} - T_{sol}} & \text{в зоне затвердевания,} \end{cases} \quad (7)$$

где  $L$  – теплота плавления;  $T_{lic}$  и  $T_{sol}$  – температуры ликвидус и солидус для затвердевающей отливки. На границах тел имеют место условия третьего рода:

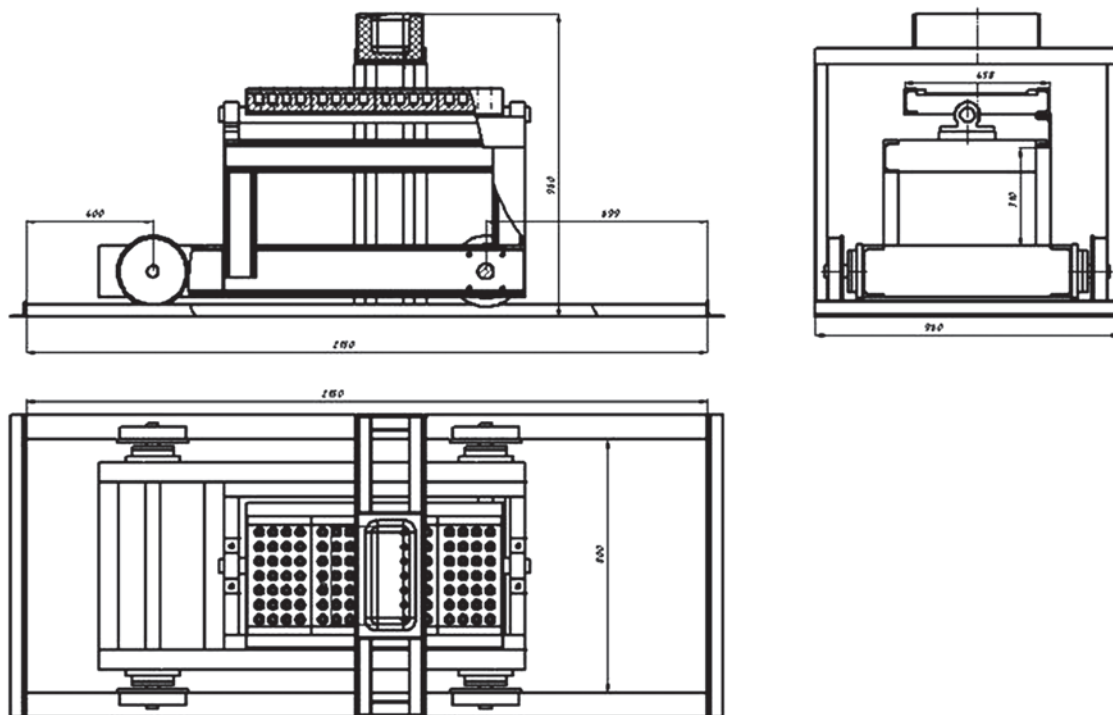


Рис. 3. Экспериментальная установка для литья центробежков

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T'). \quad (8)$$

Здесь  $\frac{\partial T}{\partial n}$  – производная по направлению, нормальному к границе;  $T'$  – температура вблизи данной точки, но с другой стороны границы.

На практике обычно для производства мелющих тел используют чугуны, близкие к белым, имеющие в составе большое количество карбидов металлов. Это обеспечивает повышенную износостойкость, но и порождает ряд проблем.

Карбиды имеют очень низкую теплопроводность, что приводит к низкой теплопроводности белого чугуна (1–2 Вт/(м·К)). Это в десятки раз меньше теплопроводности серого чугуна. Вместе с высоким модулем упругости до 200 кН/мм<sup>2</sup> это приводит к образованию трещин, особенно холодных, в таком чугуне. Вместе с тем, само по себе большое количество карбидов, даже очень твердых карбидов хрома, не является достаточным условием высокой износостойкости. Карбиды очень хрупкие и могут выкрашиваться из матрицы при ударно-абразивном воздействии.

Для улучшения износостойкости процесс затвердевания проводят таким образом, чтобы кристаллы карбидов имели малый размер. Одним из обязательных условий при этом является достаточно быстрое охлаждение в зоне порядка 1000 °С. Увеличение переохлаждения в этой области ведет к активному зародышеобразованию и увеличению плотности кристаллов на единицу объема.

Достаточно быстрое охлаждение и легирование является также одним из условий роста карбидов, кристаллы которых немного вытянуты перпендикулярно поверхности, что увеличивает «зацепляемость» карбидов в матрице и износостойкость. При этом вместо связанной карбидной «сетки» образуются изолированные кристаллы, что тоже увеличивает ударопрочность чугуна.

Считается, что скорость охлаждения расплава в температурной области образования первичных карбидов должна быть не менее 10 °С. При больших значениях размер карбидов уже не уменьшается [7]. При этом достаточно высокая скорость охлаждения приводит к преимущественному росту карбидов в направлении теплоотвода. Поэтому при изнашивании поверхности, перпендикулярной теплоотводу, карбиды лучше закреплены в матрице.

**Изготовление и экспериментальная апробация технологической оснастки для получения экспериментальных образцов мелющих тел.** Для исследования процесса литья центробежков разработана и изготовлена экспериментальная кокильная установка (рис. 3). Кокиля закреплены на платформе, установленной на направляющих, с возможностью передвижения вдоль заливочного лотка.



Рис. 4. Экспериментальная установка для литья мелких тел

Вид экспериментальной кокильной установки для литья мелких тел приведен на рис. 4. Получали образцы цильпесов следующего химического состава: С – 3,04–3,07%; Si – 1,82–1,905; Mn – 0,85–0,87; Cr – 0,19–0,21; Ni – 0,29–0,295; Cu – 0,316–0,32; Mg – 0,012–0,013%. Температура заливки составляла 1400–1420 °С.

Исследовали влияние температуры кокиля на качество получаемых отливок. На рис. 5 приведены фотографии центрального сечения отливок, полученных при заливке в холодный кокиль (рис. 5, а) и кокиль, подогретый до температуры 200–250 °С (рис. 5, б). Как видно из рисунка, при заливке в холодный кокиль отливка имеет дефекты в виде пор. Твердость вблизи поверхности образцов, полученных в холодный и подогретый кокиль, различается несущественно и составляет 34–35 HRC в нижней части отливки, 30–32 HRC в средней части и 25–26 HRC в верхней части.

На рис. 6 приведены образцы микроструктуры нетравленного шлифа отливок.

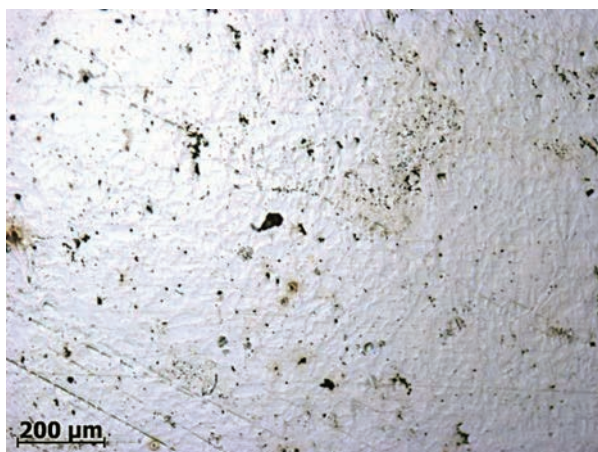
На рис. 6 приведены образцы микроструктуры нетравленного шлифа отливок.



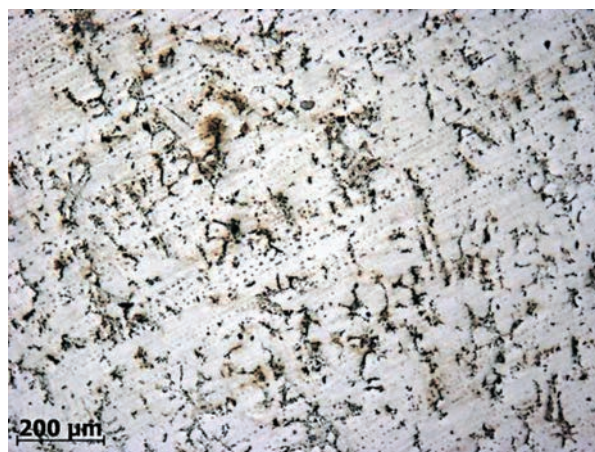
а

б

Рис. 5. Фотографии центрального сечения отливок полученных при заливке: а – в холодный кокиль; б – в подогретый кокиль



а



б

Рис. 6. Микроструктура нетравленного шлифа отливок: а – низ; б – верх

## Выводы

Рассмотрены способы увеличения ударостойкости чугунных мелющих тел, приведена модель ударно-абразивного износа. Создана модель теплопереноса, позволяющая определять режимы затвердевания (скорость охлаждения, ориентация фронта затвердевания), обеспечивающие оптимальный размер и ориентацию упрочняющих карбидов при расчете затвердевания отливок для мелющих тел. Разработана геометрическая схема кокиля и других элементов оснастки. Изготовлена технологическая оснастка для получения экспериментальных образцов мелющих тел, состоящая из рамы для фиксации и перемещения кокилей в процессе заливки, комплекта кокилей и заливочного лотка. Технологическая оснастка позволяет получать мелющие тела диаметром 26 мм и высотой 35 мм. Получены опытные образцы цельпечсов.

## Литература

1. Марукович Е. И., Карпенко М. И. Износостойкие сплавы. М.: Машиностроение, 2005. 428 с.
2. Vikulin V. V., Shkarupa I. L. Способ получения отливок из износостойкого белого чугуна: пат. 2412780 РФ, 2011.
3. Сусли Н. В. Научное обоснование и технологические основы литья шаров из модифицированного дисперсными брикетированными материалами чугуна для повышения их эксплуатационных свойств: Дис. ... канд. техн. наук. Днепропетровск, 2013. 167 с.
4. Белый чугун для мелющих тел: пат. 21662 Украина МПК(51)6 C22 C37/10 / А. А. Владимирова, В. К. Соленьий, Л. Я. Сохаккий и др.; заявитель Укр. гос. науч.-исслед. ин-т металлов. заявл. 22.05.95; опубл. 30.04.98. Бюл. № 2.
5. Способ получения отливок из износостойкого белого чугуна: пат. 2307171 RU МПК C21C1/08 C22C37/00 / И. М. Кавицкий, Б. А. Рушаник; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Литейные технологии»; заявл. 05.10.05; опубл. 10.04.07. Бюл. № 27.
6. А. с. 1154362 СССР: МКИ С 22 37/10. Чугун / Е. И. Марукович, М. И. Карпенко, Ю. А. Рогов и др. – № 3684880/22–02; заявл. 04.01.84; опубл. 07.05.85. Бюл. № 17.
7. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
8. Крутилин Н. И., Бестужев Н. И., Бестужев А. Н., Каленкович Д. Н. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы // Литье и металлургия. 2009. № 4. С. 27–33.
9. Способ получения литой заготовки из белого износостойкого чугуна для быстроизнашиваемой детали: пат. 2113495 RU МПК C21C1/08 / И. К. Кульбовский, А. Н. Поддубный, Н. Ф. Коряков, Ю. В. Игнатенко; заявл. 23.01.96; опубл. 20.06.98.
10. Стеблов А. Б., Березов С. Н., Козлов А. А. Литые чугунные шары для помола материалов // Литье и металлургия. 2012. № 3. С. 45–50.
11. Износостойкий чугун: пат. 2384641 RU МПК C22C37/04 C22C37/08 / Н. С. Гушин, М. Ф. Дрожжина, А. А. Тахиров; заявитель ОАО НПО «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»; заявл. 20.03.09; опубл. 20.03.10, Бюл. № 8.
12. Износостойкий чугун: пат. 2448183 RU МПК C22C37/04 C22C37/10 / Н. С. Гушин, Ф. А. Нуралиев, О. Н. Гулак и др.; заявитель ОАО НПО «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»; заявл. 06.06.11; опубл. 20.04.12. Бюл. № 11.
13. Износостойкий чугун: пат. RU 2451099 C1 / Н. С. Гушин, Ф. А. Нуралиев, О. Н. Гулак и др.; заявитель ОАО НПО «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» – № 2011122568/02; заявл. 06.06.11; опубл. 20.05.12.
14. Rice L. A. Review of Wear Mechanisms and Related Topics // Proc. International Conf. on the Fundamentals of Tribology. Massachusetts Institute of Technology Press. 1978. P. 469–476.
15. Zangori E. S., Blau P. J. Effect of Incidence Angle on the Impact-Wear Behaviour of Silicon Nitride // Ceram J. Am., Soc. 1998. Vol. 81. No. 4. P. 901–909.
16. Engel P. A. Percussive Impact Wear // Tribol. Int. Vol. 11. 1978. P. 169–176.

## References

1. Marukovich E. I., Karpenko M. I. *Iznosostojkie splavy* [Wear-resistant alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 428 p.
2. Vikulin V. V., Shkarupa I. L. Spособ poluchenija otlivok iz iznosostojkogo belogo chuguna [A method of producing castings of wear-resistant white cast iron]. *Patent RF*, 2011, no. 2412780.
3. Suslo N. V. Nauchnoe obosnovanie i tehnologicheskie osnovy lit'ja sharov iz modifitsirovannogo dispersnymi briketirovannymi materialami chuguna dlja povyshenija ih jekspluatacionnyh svojstv [Scientific substantiation and technological bases of casting balls of modified dispersed briquetted iron materials to improve their performance properties]. *Diss. kand. tehn. nauk*. Dnepropetrovsk, 2013. 167 p.
4. Vladimirova A. A., Solenyj V. K., Sohackij L. Ja. i dr. Belyj chugun dlja meljushih tel [White iron for grinding media]. *Patent UK*, 1998, no. 21662.
5. Kavickij I. M., Rushanik B. A. Spособ poluchenija otlivok iz iznosostojkogo belogo chuguna [A method of producing castings of wear-resistant white cast iron]. *Patent RF*, 2007, no. 2307171.
6. А. с. 1154362 SSSR, MKI S 22 37/10. Chugun. E. I. Marukovich, M. I. Karpenko, Ju. A. Rogov i dr. – № 3684880/22–02; zajavl. 04.01.84; opubl. 07.05.85, bjul. no.17.
7. Garber M. E. *Iznosostojkie belye chuguny* [Wear-resistant white cast irons]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 280 p.

8. Krutilin N. I., Bestuzhev N. I., Bestuzhev A. N., Kalenkovich D. N. Meljushhie tela [Grinding bodies]. Problemy. Perspektivy. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 4, pp. 27–33.
9. Kul'bovskij I. K., Poddubnyj A. N., Korjakov N. F., Ignatenko Ju. V. Sposob poluchenija litoj zagotovki iz belogo iznosostojkogo chuguna dlja bystroiznashivaemoj detali [A method for producing a cast billet of wear-resistant white cast iron for wearing parts]. *Patent RF*, 1998, no. 2113495.
10. Stebl'ov A. B., Berezov S. N., Kozlov A. A. Litye chugunnye shary dlja pomola materialov [Cast-iron grinding balls for materials]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 45–50.
11. Gushhin N. S., Drozhzhina M. F., Tahir'ov A. A. Iznosostojkij chugun [Wear-resistant cast iron]. *Patent RF*, 2010, no. 2384641.
12. Gushhin N. S., Nuraliev F. A., Gulak O. N. i dr. Iznosostojkij chugun [Wear-resistant cast iron]. *Patent RF*, 2012, no. 2448183.
13. Gushhin N. S., Nuraliev F. A., Gulak O. N. i dr. Iznosostojkij chugun [Wear-resistant cast iron]. *Patent RF*, 2012, no. 2451099 C1.
14. Rice L. A. Review of Wear Mechanisms and Related Topics. *Proc. International Conf. on the Fundamentals of Tribology*. Massachusetts Institute of Technology Press., 1978, pp. 469–476.
15. Zanolari E. S., Blau P. J. Effect of Incidence Angle on the Impact-Wear Behaviour of Silicon Nitride. *Ceram J. Am., Soc.*, 1998, vol. 81, no. 4, pp. 901–909.
16. Engel P. A. Percussive Impact Wear. *Tribol. Int.*, 1978, vol. 11, pp. 169–176.