

УДК 621.74.[043.1+041]:669.15-196.5

Г. П. КОРОТКИН¹, канд. техн. наук

К. Э. БАРАНОВСКИЙ², канд. техн. наук, доц.

В. А. ПУМПУР¹, канд. техн. наук, доц.

П. Ю. ДУВАЛОВ¹,

В. М. АНДРИЕНКО¹

В. А. ДЕМЕНТЬЕВ¹

¹Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)

²Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

ЛИТЬЕ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДРОБИЛЬНО-РАЗМОЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ ИЗНОСОСТОЙКИХ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ В ИТМ НАН БЕЛАРУСИ

Аннотация

Решение задач в области повышения качества сменных деталей дробильно-размольного оборудования привело к созданию собственного производства износостойких хромистых чугунов в ИТМ НАН Беларуси, которое продолжает служить основой для научных исследований в сфере литья и металлостроения чугунов с высоким содержанием хрома.

Значительный вклад в развитие данных исследований внес Валерий Михайлович Ильюшенко, бывший заведующий лабораторией контактного теплообмена.

Ключевые слова:

износостойкий хромистый чугун, НРС, легирование, ХТС, кокиль, комбинированная форма.

В настоящее время важное место в экономике занимают отрасли промышленности, связанные с переработкой минерального сырья, в которых основной операцией является измельчение различных материалов. Одним из способов осуществления дробления материалов является применение центробежного дробильно-размольного оборудования. Надежность и долговечность дробилок и мельниц напрямую зависит от долговечности деталей и узлов, непосредственно контактирующих с перерабатываемым материалом. Быстрый износ данных деталей приводит к расходу значительного количества трудовых ресурсов, а также к снижению производительности машин и аппаратов. Предприятиями промышленности ежегодно расходуются сотни тонн металла на изготовление сменных деталей дробильно-размольного оборудования. Поэтому в современных условиях, где конкурентоспособность играет ключевую роль, повышение износостойкости и срока службы машин является значимой научно-производственной задачей.

Помол сыпучих материалов в центробежных измельчителях реализуется высокоскоростным ударным воздействием (65...120 м/с). Наиболее распространенные материалы для тонкого измельчения это: мрамор (твердость 110 HV), известняк (135 HV), доломит (325 HV), стекло (500 HV), полевой шпат (600...750 HV), кремень (950 HV), кварцевый песок (800...1000 HV), кварцит

(900...1280 HV). В частности, при размоле кварцевого песка, время эксплуатации деталей, наиболее подвергнутых износу, составляет от восьми до десяти суток.

Для решения задачи повышения ресурса работы деталей машин, работающих в условиях интенсивного взаимодействия с абразивными средами, наиболее эффективным является применение хромистых чугунов, таких как: X28H2 (25 %...30 % Cr, 1,5 %...2 % Ni), X16M2 (15 %...19 % Cr, 1 %...3 % Mo), а также 320X18 (3 %...3,4 % C, 17 %...19 % Cr, 0,4 %...0,6 % Mo и V, 0,5 %...0,8 % Ni), твердость которых в литом состоянии практически одинаковая.

Исследования по применению износостойких хромистых чугунов для изготовления литых деталей дробильно-размольного оборудования в ИТМ НАН Беларуси были начаты в 2007 году [1] под руководством Барановского К. Э. В 2008 году началось сотрудничество института с НПО «Центр» по замене чугуна X28H2 при литье сменных быстро изнашиваемых деталей мельниц [2]. Этот чугун, разработанный более 50 лет назад как износостойкий материал для работы в коррозионных средах, в условиях сухого абразивного воздействия показал неудовлетворительное соотношение цены и механических свойств. Высокая стоимость литья из сплава X28H2 и расходы на замену изношенных деталей центробежных дробилок и мельниц значительно снижают эффективность размольного оборудования [3].

В результате этого сотрудничества в ИТМ НАН Беларуси были разработаны сплавы из износостойких чугунов ИЧХ18ВМ и ИЧХ18ВН. Отливки из данных экспериментальных чугунов имеют более высокую износостойкость и другие механические свойства, чем самый распространенный в Беларуси и СНГ сплав X28H2. Их стоимость также существенно ниже, чем у сплава X16M3, при более высоких механических свойствах и износостойкости [4]. Производственные испытания показали, что отбойные плиты из разработанного сплава отработали более 115 ч, в то время, как отбойные плиты из чугуна X28H2 полностью износились уже после 30 ч эксплуатации.

В результате проведенных в 2007–2013 гг. исследований [1, 2, 4–14] создана технология получения износостойких хромистых чугунов (ИЧХ) специальными методами литья, включающая в себя следующие разработки:

– составы износостойких хромистых чугунов ИЧХ18ВМ и ИЧХ18ВН с содержанием хрома на уровне 16 %...20 % и экономным легированием Si, Mn, Ni, Mo, V, Ti, W, на которые был получен патент [10] и разработаны технические условия – ТУ ВУ 700001421.004–2011 «Отливки из износостойких чугунов ИЧХ18ВН и ИЧХ18ВМ»;

– способ защиты нижней металлической части кокиля и комбинированной формы (состоящей из металлических и песчаных элементов) за счет укладывания на ее поверхность кремнеземной термостойкой ткани с более низкой теплопроводностью, чем у кокильной краски, что исключает приваривание и обеспечивает получение качественной поверхности отливки [8], а также долговечность литейной оснастки (было получено два патента [11, 12]);

– технология литья сменных деталей из ИЧХ в металлические и комбинированные формы, которая позволяет получать отливки без усадочных дефектов с твердостью 58...61 HRC и размерами карбидной фазы в 3–4 раза меньше, чем при литье в землю, а также с ориентацией карбидов в направлении металлических частей формы на глубину до 25 мм [4] (по итогам разработки литейной оснастки было получено пять патентов [10–14]);

– математические модели теплообмена при литье в металлические и комбинированные формы отливок из ИЧХ и соответствующее программное обеспечение для их реализации, на основе которых были определены оптимальные режимы литья различных деталей дробильно-размольного оборудования;

– технология изготовления деталей из ИЧХ18ВМ и ИЧХ18ВН с применением вторичных материалов, которая подразумевает использование до 80 % стального легированного лома от общей массы шихты, что позволяет более чем на 20 % снизить себестоимость продукции [7].

– технология создания композиционного материала на основе ИЧХ18ВМ с армирующими элементами из вольфрамокобальтовых твердых сплавов типа ВК, в котором чугун выступает в качестве матрицы для твердых частиц, что позволило повысить износостойкость на 20 %...25 % по сравнению с обычным исполнением детали, полученной из ИЧХ [9].

В 2013–2015 гг. были продолжены исследования по усовершенствованию технологии литья и технологической оснастки, в частности была проведена работа по изучению термомеханических процессов в кокиле.

Также изучалось влияние легирующих элементов, таких как W и Ti, на износостойкость хромистого чугуна. Так, легирование чугуна ИЧХ18ВМ титаном на уровне 0,23 % резко повысило износостойкость сплава при испытании на лабораторном стенде. А по результатам производственных испытаний подкладных листов при размоле кварцевого песка установлено, что листы, изготовленные из такого чугуна, имеют износостойкость на 16,8 % выше, чем листы, отлитые из базового состава [15].

В 2016–2018 гг. проводились экспериментально-теоретические исследования по определению влияния на механические свойства совместного легирования и модифицирования высокохромистых чугунов с разной степенью эвтектичности. Среди таких легирующих элементов, как Hf, Ta, Nb, Mo и др., как наиболее перспективный, был выбран ниобий [16].

В ходе исследования было установлено, что у образцов эвтектического состава при содержании 1,41 % Nb наблюдается уменьшение износа до 30 % в сравнении с исходным чугуном. Предел прочности на изгиб, как в эвтектическом, так и заэвтектическом сплаве повысился на 17–29 % при легировании ниобием на 1,4 %...2,0 % [17]. Производственные испытания экспериментальной партии отбойных плит из разработанного чугуна, модифицированного комплексом AlSiTi+SiCa, при размоле кварцевого песка продемонстрировали уменьшение износа до 10 % по сравнению с базовым составом.

По результатам исследований разработан заэвтектический износостойкий чугун 450X18ВФМНБ, на состав которого получен патент Республики Беларусь

[18] и разработаны технические условия – ТУ ВУ 700002421.006–2018 «Отливки из износостойкого чугуна 450X18ВФМНБ».

За период 2019–2020 гг. проводились исследования по термоциклированию и закалке после нагрева в защитной среде образцов из ИЧХ18 с разным содержанием Ni, Mo и Mn [19]. В лабораторных условиях исследованы изменения износостойкости образцов из сплава ИЧХ18 после многократной закалки. Было установлено, что уже после трех циклов закалки износ уменьшился на 40,9 %, а после шести циклов – на 54,5 % в сравнении с износом образца в литом состоянии.

Износостойкость каленых отбойных плит из заэвтектического состава ИЧХ18 в производственных условиях при размоле кварцевого песка более чем на 10 % выше, чем у плит из базового состава в литом состоянии. По результатам работы разработаны и зарегистрированы технические условия ТУ ВУ 700002421.007–2020 «Отливки из износостойкого чугуна ИЧХ18Г2ВМ».

С 2021 года в ходе выполнения НИР «Исследование процессов управления структурообразованием при литье и создание новых функциональных материалов из износостойких чугунов для изготовления деталей машиностроения с повышенными эксплуатационными свойствами» (научный руководитель – Дувалов П. Ю.) проводятся исследования особенностей изготовления отливок из износостойких хромистых чугунов по технологии с использованием внутренних источников теплоотвода для улучшения механических свойств внутренней части отливки. Наиболее перспективным является применение следующих внутренних источников теплоотвода: дроби из белого чугуна [20], дробленого феррохрома марки «ФХ850», стального стержня или стержня из заэвтектического состава ИЧХ. Также перспективным подходом к улучшению механических характеристик отливок из ИЧХ является метод послойной заливки. За это время создано более 50 объектов новой техники. Продолжаются теоретические и экспериментальные исследования представленных выше направлений.

Проводятся работы по определению наиболее оптимального типа внутренних холодильников с целью дальнейшего изготовления экспериментальной партии деталей для испытаний в производственных условиях.

Также в 2024–2025 гг. под руководством канд. техн. наук, доц. Пумпура В. А. в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» будет выполняться комплексное задание «Повышение износостойкости высокохромистого чугуна путем стабилизации аустенитно-карбидной структуры отливок крупногабаритных защитных деталей дробильно-размольного оборудования», по итогам которого планируется подать заявку на получение патента и разработать технические условия на отливки из низколегированного высокохромистого чугуна, полученные с применением технологии стабилизации аустенитно-карбидной структуры.

Выполнение различных ГПНИ и проведение научно-исследовательских работ по ним привело к получению семи патентов, разработке трех технических условий на составы ИЧХ, а также созданию и внедрению в производство на опытно-промышленном участке ИТМ НАН Беларуси технологии литья деталей

центробежного дробильно-размольного оборудования из износостойких хромистых чугунов. За этот период научные исследования способствовали развитию и совершенствованию технологии производства, и, как результат, по итогам 2023 г., объем отгруженного ИТМ НАН Беларуси литья из высокохромистого чугуна составил 125 т на сумму в 1,6 млн р., половина которого отправлена на экспорт в Российскую Федерацию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка применимости износостойких хромистых чугунов для изготовления литых деталей оборудования по производству кирпича из глины / К. Э. Барановский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2007. – С. 110–112.
2. **Барановский, К. Э.** Износостойкие литейные сплавы для деталей мельниц по размолу стекла / К. Э. Барановский, В. М. Ильюшенко // *Центробежная техника – высокие технологии: материалы 3-й Междун. науч.-техн. конф.*, 9–11 сент. 2008 г. – Минск. – 235 с.
3. **Клейс, И. Р.** Износостойкость элементов измельчителей ударного действия / И. Р. Клейс, Х. Х. Ууэмыйс. – Москва: Машиностроение, 1986. – 160 с.
4. **Барановский, К. Э.** Износостойкость хромистых чугунов эвтектического состава / К. Э. Барановский, В. М. Ильюшенко // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 2. – С. 159–161.
5. **Барановский, К. Э.** Литье деталей из износостойких хромистых чугунов для центробежных мельниц в комбинированные формы и кокили / К. Э. Барановский, В. М. Ильюшенко, Ю. Л. Станюленис // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3. – С. 162–165.
6. Повышение ресурса работы деталей из износостойких хромистых чугунов оборудования по производству кирпича из глины и центробежных измельчителей / К. Э. Барановский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 3. – С. 43–47.
7. Применение вторичных материалов при изготовлении деталей из хромистых чугунов / Е. И. Марукович [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 3. – С. 72–73.
8. **Барановский, К. Э.** Получение отливок из износостойких хромистых чугунов в комбинированных формах и кокилях / К. Э. Барановский, В. М. Ильюшенко, П. Ю. Дувалов. // *Металл и литье Украины*. – 2012. – № 6. – С. 10–13.
9. **Дувалов, П. Ю.** Повышение износостойкости литых деталей из хромистых чугунов // *Молодежь в науке-2012: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф.*, 17–20 апреля. – Минск. – С. 299–303.
10. Износостойкий чугун: пат. ВУ 14155 / К. Э. Барановский, В. М. Ильюшенко. – Оpubл. 30.04.2011.
11. Кокиль с двумя горизонтальными плоскостями разъема: пат. ВУ 7459 / Е. И. Марукович, Э. Ф. Барановский, К. Э. Барановский, В. М. Ильюшенко. – Оpubл. 30.08.2011.
12. Кокиль с горизонтальной плоскостью разъема: пат. ВУ 16658 / Е. И. Марукович, Э. Ф. Барановский, К. Э. Барановский, В. М. Ильюшенко. – Оpubл. 30.12.2012.
13. Кокиль для литья отбойных плит центробежных мельниц: пат. ВУ 5356 / В. М. Ильюшенко, К. Э. Барановский, Э. Ф. Барановский, Г. П. Короткин. – Оpubл. 30.06.2009.
14. Комбинированная форма для литья отбойных плит центробежных мельниц: пат. ВУ 5369 / В. М. Ильюшенко, К. Э. Барановский, В. А. Пумпур. – Оpubл. 30.06.2009.
15. Повышение износостойкости хромистых чугунов / В. М. Ильюшенко [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 2. – С. 5–10.
16. Структура и твердость литых деталей из износостойких чугунов / Е. И. Марукович [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2017. – № 3. – С. 39–44.

17. Хромистый чугун, легированный ниобием / Е. И. Марукович [и др.] // Литейное производство и металлургия: сборник трудов 25-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–19 окт. 2017 г. / Под общ. ред. Е. И. Маруковича. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 76–81.

18. Износостойкий чугун: пат. ВУ 23010 / В. М. Ильюшенко, П. Ю. Дувалов, В. М. Андриенко, К. Э. Барановский, Е. В. Розенберг. – Опубл. 30.06.2020.

19. Влияние легирующих элементов и термической обработки на механические свойства хромистого чугуна / Е. И. Марукович [и др.] // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 36–40.

20. О применении внутренних источников теплоотвода при получении отливок из износостойких хромистых чугунов / В. А. Пумпур [и др.] // Наука и техника. – 2022. – № 21(6). – С. 464–472.

Контакты:

vmil48@mail.ru (Короткин Григорий Петрович);

k.baranouski@bntu.by (Барановский Константин Эдуардович);

pumpurva@itm.by (Пумпур Владимир Анатольевич);

lcti@yandex.by (Дувалов Павел Юрьевич);

slavanski.new@gmail.com (Андриенко Вячеслав Михайлович);

dmvva@itm.by (Дементьев Виталий Александрович).