

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-464-472>

УДК 621.74.04:669.27

О применении внутренних источников теплоотвода при получении отливок из износостойких хромистых чугунов

Канд. техн. наук, доц. В. А. Пумпур¹⁾, докт. физ-мат. наук, проф. А. Г. Анисович²⁾,
канд. техн. наук, доц. К. Э. Барановский³⁾, П. Ю. Дувалов¹⁾, В. М. Андриенко¹⁾

¹⁾Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси
(Могилев, Республика Беларусь),

²⁾Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Исследованы особенности формирования отливок из хромистого чугуна при литье в комбинированную форму с использованием внутренних источников теплоотвода, введенных в расплав. Проведена серия экспериментов с износостойким хромистым чугуном ИЧХ18ВМ. В качестве макроохладителей использованы: пластина из силумина толщиной 0,5 мм с содержанием 3–5 % Ti, смесь буры и дробленого феррохрома (1–4 мм), дробь из белого чугуна. Методом рентгеноструктурного анализа определен фазовый состав образцов, а также изучена их микроструктура. Для образцов, полученных с применением дробы из белого чугуна, проведено испытание на твердость. Определен наиболее эффективный способ применения внутреннего источника теплоотвода, оказывающий существенное влияние на скорость охлаждения отливки и ее микроструктуру. Наиболее перспективной оказалась смесь буры и частиц дробленого феррохрома, которые не растворились в расплаве и образовали зоны с локальным измельчением структуры, а также дробы из белого чугуна – более технологичной альтернативы феррохрому. Применение дробы из белого чугуна привело к измельчению структуры детали «Лист подкладной УЗ.1.1» из износостойкого хромистого чугуна, а также к повышению твердости ее рабочей поверхности на 2,6 HRC. Практически вся введенная в расплав дробь расплавилась. В результате проведенных исследований выявлено, что применение феррохрома и дробы из белого чугуна является эффективным способом локального измельчения структуры и практической возможностью получения детали из хромистого чугуна с повышенной твердостью. Все это может повысить износостойкость деталей дробильно-размольного оборудования.

Ключевые слова: износостойкий хромистый чугун, литье, комбинированные формы, внутренние источники теплоотвода, макроохладители, феррохром, дробь из белого чугуна

Для цитирования: О применении внутренних источников теплоотвода при получении отливок из износостойких хромистых чугунов / В. А. Пумпур [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 464–472. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-464-472>

On Application of Internal Heat Sink Sources when Producing Castings from Wear-Resistant Chromium Cast Iron

V. A. Pumpur¹⁾, A. G. Anisovich²⁾, K. E. Baranouski³⁾,
P. Yu. Duvalau¹⁾, V. M. Andryienka¹⁾

¹⁾Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus (Mogilev, Republic of Belarus),

²⁾Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The features of the formation of castings from chromium cast iron during casting in a combined mold are studied using internal sources of heat removal introduced into the melt. A series of experiments has been carried out with wear-

Адрес для переписки
Дувалов Павел Юрьевич
Институт технологии металлов НАН Беларуси
ул. Бялыницкого-Бирули, 11,
212030, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 222 64-30-20
lcti@yandex.by

Address for correspondence
Duvalau Pavel Yu.
Institute of Technology of Metals of NAS of Belarus
11, Bialynitskaga-Biruli str.,
212030, Mogilev, Republic of Belarus
Tel.: +375 222 64-30-20
lcti@yandex.by

resistant chromium cast iron. The following macrocoolers have been used: a 0.5 mm thick silumin plate containing 3–5 % Ti; a mixture of borax and crushed ferrochrome (1–4 mm); white cast iron shot. The phase composition of the samples has been determined by X-ray diffraction analysis, and their microstructure has been also studied. Hardness testing has been carried out on specimens obtained with cast iron shot. The most effective method of using an internal source of heat removal, which has a significant effect on the cooling rate of the casting and its microstructure, has been determined. The most promising was a mixture of borax and crushed ferrochrome particles, which did not dissolve in the melt and formed zones with local structure refinement, as well as white cast iron shot, a more technological alternative to ferrochrome. The use of white cast iron shot has led to a refinement of the structure of the part “Backing sheet Y3.1.1 [U3.1.1]” made of wear-resistant chromium cast iron, as well as to an increase in the hardness of its working surface by 2.6 HRC. Almost all of the shot introduced into the melt has been melted. As a result of the research, it has been revealed that the use of ferrochrome and white cast iron shot is an effective way of local structure refinement and a practical possibility of obtaining a part made of chromium cast iron with increased hardness. All this can increase the wear resistance of parts of crushing and grinding equipment.

Keywords: wear-resistant chromium cast iron, casting, combined molds, internal heat removal, macrocoolers, ferrochrome, white cast iron shot

For citation: Pumpur V. A., Anisovich A. G., Baranouski K. E., Duvalau P. Yu., Andryienka V. M. (2022) On Application of Internal Heat Sink Sources when Producing Castings from Wear-Resistant Chromium Cast Iron. *Science and Technique*. 21 (6), 464–472. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-464-472> (in Russian)

Введение

Эффективность работы центробежного дробильно-размольного оборудования (ДРО) напрямую зависит от работоспособности деталей основных рабочих элементов. К материалам, из которых изготавливаются эти детали, предъявляется ряд требований, и главные из них – высокая прочность и абразивная стойкость.

Основной фактор, влияющий на срок службы литых деталей ДРО из износостойкого хромистого чугуна (ИЧХ), – скорость кристаллизации отливки, которая напрямую зависит от скорости ее охлаждения в литейной форме. Существенное влияние скорости охлаждения на величину карбидов и, следовательно, на износостойкость отливок из ИЧХ наблюдается при увеличении ее до 10 К/с [1]. Дальнейший рост скорости охлаждения на размере карбидов и износостойкости сказывается незначительно, в связи с чем является нецелесообразным.

Однако вне зависимости от типа литейной формы детали, изготовленные из ИЧХ, имеют гораздо меньшую твердость в центре отливок, чем на поверхности. Так, твердость отбойной плиты УПМ-1,0.001 для ДРО по сечению уменьшается с 60–62 HRC вблизи поверхности до 51–54 HRC в середине. Это связано с тем, что в середине отливки размер карбидов в 2–2,5 раза больше, чем на поверхности [2]. Поэтому для улучшения эксплуатационных свойств защитных деталей и увеличения их срока службы важно обеспечить одинаково высокую скорость охлаждения отливок по всему сечению.

Для выравнивания скорости кристаллизации по всему сечению детали применяются способы внутреннего воздействия, например с использованием расплавляемых и нерасплавля-

емых внутренних холодильников, вводимых в расплав. Положительный эффект от их применения связывают с увеличением переохлаждения объема расплава [3]. Внутренние холодильники (как расплавляемые, так и нерасплавляемые) способствуют измельчению структуры отливок и улучшению механических свойств металла [4].

Ранее коллективом авторов была проделана работа по увеличению износостойкости отливок из хромистых чугунов, а также, в частности, по исследованию различных способов преодоления падения твердости и укрупнения микроструктуры в глубине отливки. В [5] изучено легирование износостойких хромистых чугунов Ti и W, а в [2] исследовано влияние способов литья и геометрических параметров деталей из хромистых чугунов на твердость их внутренних слоев. Влияние углерода (от 3,25 до 4,74 %) и типа литейных форм изучено в [6], а различных режимов термической обработки на структуру и механические свойства образцов из ИЧХ18ВМ – в [7]. Ряд исследований был посвящен легированию ниобием заэвтектического высокохромистого чугуна [8, 9], по итогам которых проводились производственные испытания отбойных плит для центробежных мельниц [10], был получен патент [11].

Методика исследований

В Институте технологии металлов НАН Беларуси выполнялись исследования особенностей формирования отливок из ИЧХ на основе технологии литья с использованием внутренних источников теплоотвода (холодильников). На первом этапе проводили серию экспериментов по литью износостойких хромистых

чугунов с внутренними и наружными расплаваемыми и нерасплаваемыми источниками теплоотвода. Образцы отливали в комбинированную форму, в которой средняя и верхняя части изготавливались из холодно-твердеющей смеси, а в качестве нижней части использовалась металлическая плита, покрытая теплоустойчивой кремнеземной тканью.

Исследования проводили с хромистым чугуном ИЧХ18ВМ, расплав готовили в индукционной печи ИСТ-0,25/0,32И1, разливка происходила при температуре 1380–1420 °С. Температура нижней (металлической) части комбинированной формы перед заливкой составляла 100–120 °С.

Из хромистого чугуна ИЧХ18ВМ отливали:

- образец, полученный без применения холодильников, принятый в качестве эталонного;
- образцы с пластиной из силумина толщиной 0,5 мм с содержанием 3–5 % Ti, пластина укладывалась на теплоустойчивую ткань нижней плиты комбинированной формы;
- образцы со смесью буры и дробленого феррохрома (1–4 мм) марки ФХ850 (бура в качестве наполнителя для равномерного распределения частиц феррохрома), смесь высыпали на ткань перед заливкой.

Были получены три экспериментальных образца массой 0,8–1,0 кг, один из которых – эталонный. С помощью оптико-эмиссионного спектрометра GNR SCP (Solaris CCD) определяли их химический состав. Фазовый состав образцов исследовали методом рентгеноструктурного анализа на установке «ДРОН 3», оснащенной аппаратно-программным комплексом для управления дифрактометром и обработки результатов измерений. Контроль измерительной системы гониометра осуществляли по стандартному эталонному кристаллу кварца. Микроструктуру образцов изучали с приме-

нием металлографического комплекса на основе инвертированного микроскопа «МИ-1».

На втором этапе проводили эксперименты по заливке детали «Лист подкладной УЗ.1,1» из износостойкого хромистого чугуна с применением в качестве внутреннего источника теплоотвода дробы чугунной литой (ДЧЛ) производства ОАО «Могилевский металлургический завод» следующего химического состава: С – 2,7–3,2 %, Si – 0,8–1,5 %, Mn – 0,30–0,85 %, P < 0,20 %, S < 0,15 %, Fe – остальное. Химический состав дробы соответствует доэвтектическому белому чугуну.

Дробь подавалась в струю расплава через 4–5 с с момента начала заливки. Для введения дробы использовали швеллер 10П длиной 40 см. Время начала введения дробы в расплав выбирали с такой задержкой, чтобы вся попавшая в расплав дробь локализовалась в верхней части утолщения детали. Перед заливкой дробь нагревали до температуры 120 °С и выдерживали в течение 30 мин для удаления влаги.

Для исследований были отлиты два подкладных листа, в один из которых засыпалась ДЧЛ диаметром 1,4–1,8 мм, а другой служил эталоном. Кристаллическое строение исследовали в среднем сечении детали вдоль высоты с применением металлографического микроскопа Leica DMi8. Для более отчетливого выявления карбидной фазы образцы прошли предварительный отжиг при температуре 960 °С с выдержкой в течение 30 мин и последующим охлаждением в печи СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И2. Твердость измеряли на твердомере модели ТК-14-250 по методу Роквелла.

Результаты исследований

Химический состав полученных на первом этапе исследований литейных образцов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав экспериментальных образцов
Chemical composition of experimental samples

Образец	Содержание элементов, %								
	C	Cr	Ni	Mn	Si	W	Al	V	Mo
Эталонный	3,20	18,30	0,28	0,57	0,22	0,40	Следы	0,22	0,22
С пластиной из силумина с содержанием 3–5 % Ti	3,42	18,85	0,22	0,50	0,30	0,38	0,3–0,4	0,21	0,33
Со смесью буры и феррохрома	3,30	18,15	0,26	0,51	0,40	0,30	Следы	0,21	0,23

В двух образцах наблюдались небольшие отклонения получившегося состава хромистого чугуна от технических условий, в частности содержание вольфрама на 0,02 и 0,10 % меньше, что, впрочем, никак не должно сказаться на результате эксперимента. Также в образце, отлитом на силуминовую пластину с 3–5 % Ti, обнаружен алюминий.

Фазовый состав всех образцов состоял из аустенита, цементита и карбидной фазы состава $(Cr, Fe)_7C_3$. Исключение – образец, полученный литьем на смесь буры и феррохрома (верхняя часть образца), в котором отсутствует цементит. Судя по интенсивности линий, образцы могут несколько различаться количеством аустенита и карбидов. Микроструктура в верхней части эталонного образца представлена на рис. 1. При увеличении 500 крат в структуре различимы первичные дендриты аустени-

та (рис. 1a). В междендритном пространстве располагаются эвтектические колонии (рис. 1b).

Микроструктуру в нижней части эталонного образца составляли аустенит и карбиды (рис. 2a). Дендриты аустенита выражены менее четко.

В нижней части образца структура более мелкая (рис. 2), что вполне объяснимо, так как нижняя часть формировалась в контакте с металлической плитой, а верхняя – в контакте с холодно-твердеющей смесью. В остальном структуры низа и верха отливки – без существенных отличий.

Микроструктура в верхней части образца, отлитого на пластину из силумина, соответствует микроструктуре доэвтектического хромистого чугуна (рис. 3a). Матрица сплава – аустенит, присутствуют карбиды хрома различной ориентации, а также эвтектические розетки вокруг центральных стержней (рис. 3b).

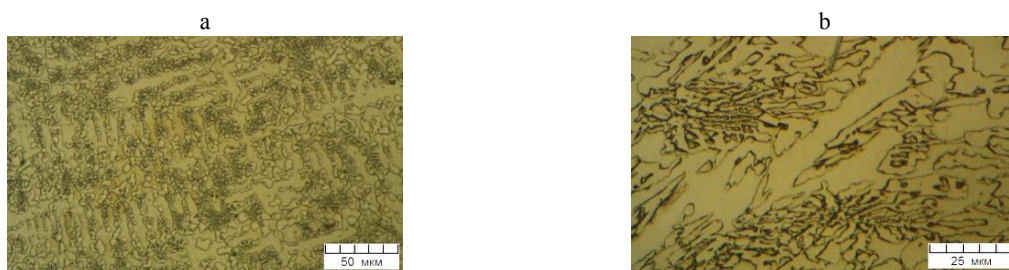


Рис. 1. Микроструктура в верхней части эталонного образца

Fig. 1. Microstructure at the top part of reference sample

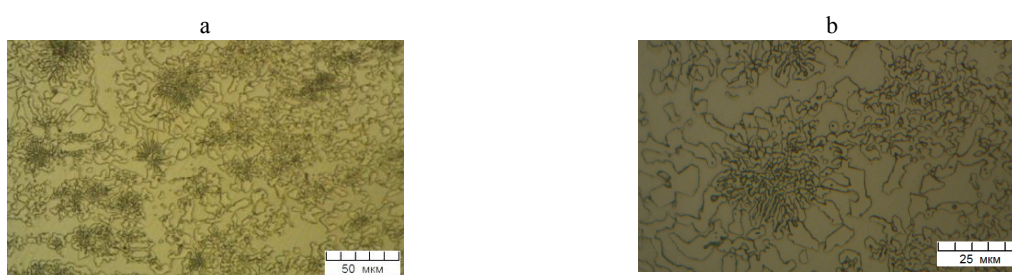


Рис. 2. Микроструктура в нижней части эталонного образца

Fig. 2. Microstructure at the bottom part of reference sample

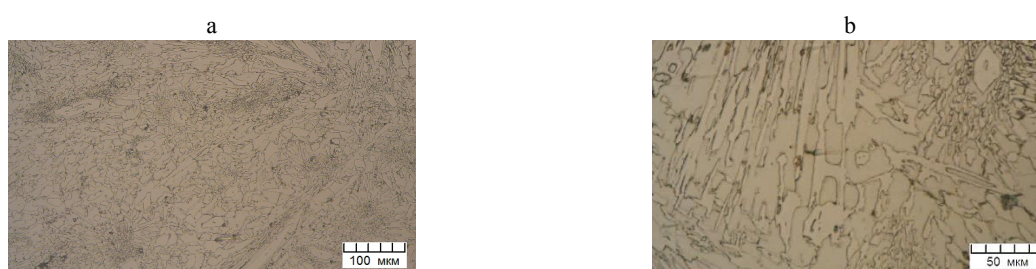


Рис. 3. Микроструктура в верхней части образца, отлитого на пластину из силумина с содержанием 3–5 % Ti

Fig. 3. Microstructure at the top part of sample cast on silumin plate with content of 3–5 % Ti

В микроструктуре нижней части отливки присутствуют поры и значительное количество неметаллических включений (рис. 4а). В поляризованном свете они показывают опалесцирующий эффект (рис. 4b). Состав включений соответствует оксиду кремния. Вокруг включений наблюдается ободок, в котором матрица сплава приобретает темный цвет. При анализе в растровом микроскопе установлено, что на данном участке произошло перлитное превращение, продукты распада соответствуют перлиту повышенной дисперсности (рис. 4с). Поскольку теплопроводность оксида кремния значительно меньше, чем аустенитной матрицы, включение при кристаллизации остывает медленнее, в силу чего является концентрированным источником теплоты. За счет этой теплоты

успевает произойти перлитное превращение. В остальной микроструктуре нижней и верхней частей отливки принципиально не отличаются.

Макроструктура в верхней части образца, полученного литьем на смесь буры и дробленого феррохрома ФХ850, представлена на рис. 5.

В структуре образца присутствуют включения феррохрома, температура плавления которого существенно выше температуры расплава. Они являются центрами кристаллизации, от которых расходятся «лучи» направленно закристаллизованной структуры, состоящей из аустенита и ориентированных карбидов (рис. 5а). В промежутках между «лучами» располагаются участки структуры, где произошло перлитное превращение (рис. 5b).

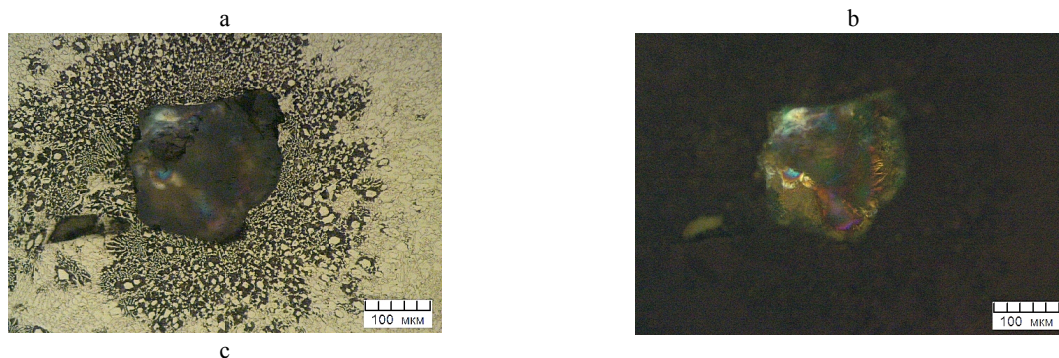


Рис. 4. Микроструктура в нижней части образца, отлитого на пластину из силумина с содержанием 3–5 % Ti: а – светлопольное освещение; b – поляризованный свет; с – структура матрицы на участке распада аустенита

Fig. 4. Microstructure at the bottom part of sample cast on silumin plate with content of 3–5 % Ti: а – bright field lighting; b – polarized light; с – matrix structure at the site of austenite decay

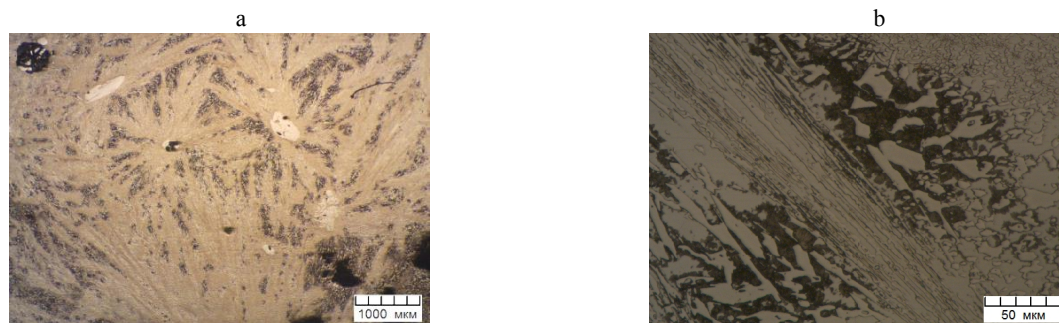


Рис. 5. Структура в верхней части образца, полученного литьем на смесь буры и дробленого феррохрома: а – макроструктура; b – микроструктура

Fig. 5. Structure at the top part of sample obtained by casting on mixture of borax and crushed ferrochrome: а – macrostructure; b – microstructure

Микроструктура в нижней части образца неоднородная (рис. 6а, б) и представляет собой смесь аустенита и карбидов, распределенных неравномерно в зависимости от присутствия крупных включений феррохрома.

Поскольку рентгеноструктурный анализ не зафиксировал иных фаз, кроме аустенита и карбидов, присущих таким чугунам, крупные включения фаз белого цвета следует отнести к карбидам. На рис. 6б показана граница такого крупного карбидного включения, из которого растут дендриты карбидов.

В результате проведенной серии экспериментов имеются следующие результаты. В образце, полученном литьем на пластину из силумина с 3–5 % Ti, явного влияния наружного источника теплоотвода на структуру нижней части образца по сравнению с верхней не выявлено. Образец, отлитый на смесь буры и дробленого феррохрома марки ФХ850, продемонстрировал перспективность применения феррохрома в качестве внутреннего источника теплоотвода. Части-

цы феррохрома ожидаемо не расплавились в хромистом чугуне и выступили холодильниками, вокруг которых сформировались зоны с локальным измельчением структуры. Это натолкнуло на поиск более технологичной альтернативы. Обычно используемые при литье внутренние холодильники растворяются в расплаве, улучшая свойства. Для случая применения ИЧХ полное расплавление частиц хоть и не обязательно, но желательно. Поэтому было принято решение вместо феррохрома использовать дробь чугунную литейную при изготовлении экспериментального образца из ИЧХ с внутренними холодильниками в виде дробленых материалов на основе реальной детали для ДРО. В качестве последней выбрали «Лист подкладной УЗ.1,1» – сложную деталь переменного сечения, заливаемую в комбинированную форму, в которой средняя часть выполнена из холодно-твердеющей смеси, а верхняя и нижняя части представляют собой металлические плиты (рис. 7).

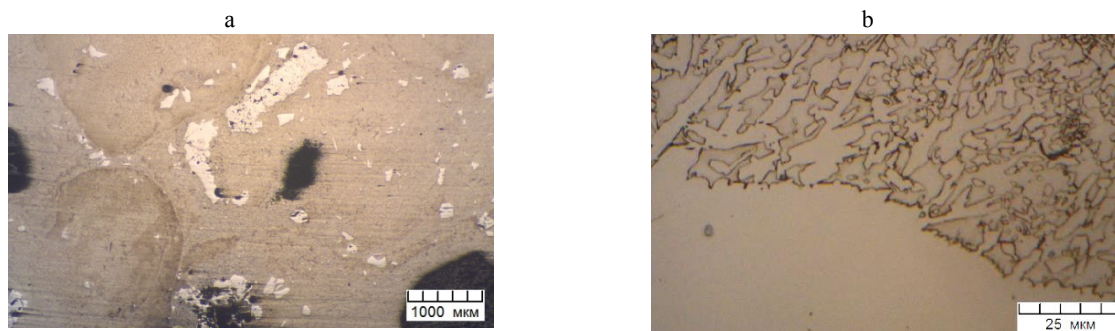


Рис. 6. Структура в нижней части образца, полученного литьем на смесь буры и дробленого феррохрома: а – макроструктура; б – микроструктура

Fig. 6. Structure at the bottom part of sample obtained by casting on mixture of borax and crushed ferrochrome: а – macrostructure; б – microstructure



Рис. 7. Оснастка для литья детали «Лист подкладной УЗ.1,1»: а – средняя часть из холодно-твердеющей смеси; б – комбинированная форма в сборе

Fig. 7. Equipment for casting part “Backing sheet UZ.1,1”: а – middle part of cold-hardening mixture; б – combined mold assembly

Масса детали «Лист подкладной У3.1,1» составляла 7,1 кг, масса рабочего элемента (утолщения), выступающего над тонкой частью отливки, – примерно 2,6–2,8 кг, масса дробы – 120 г, что соответствует 4,3–4,6 % от массы рабочего элемента. По причине того, что деталь имеет массу, в семь раз большую исследуемых ранее экспериментальных образцов, и более сложную форму, был опробован способ введения дробы в струю расплава, зарекомендовавший себя как наиболее эффективный [12, 13].

В ходе эксперимента были отлиты два подкладных листа, в один из которых засыпалась дробь чугунная литая диаметром 1,4–1,8 мм, а другой служил эталоном. Детали были отлиты из износостойкого хромистого чугуна ИЧХ18ВМ. Химический состав расплава и твердость полученных экспериментальных деталей «Лист подкладной У3.1,1» представлены в табл. 2.

У подкладного листа, отлитого с применением дробы, твердость больше на 2,6 единицы HRC. Экспериментальная деталь «Лист подкладной У3.1,1», полученная с использованием дробы в качестве внутреннего источника теплоотвода, представлена на рис. 8.

Как видно из рис. 8, несколько дробинкой потоком расплава вынесло на верхнюю (рабо-

чую) поверхность детали. Это позволяет предположить, что, как и ожидалось, большая часть дробы локализовалась в верхней части детали. Изучение изломов обеих деталей показало, что у экспериментального подкладного листа, полученного с применением дробы, заметно измельчение верхнего слоя в несколько миллиметров, с чем предположительно и связана немного более высокая твердость (62,3 HRC против 59,7 HRC). Вся чугунная дробь, введенная в отливку, расплавилась (за исключением нескольких дробинок на поверхности). Микроструктуры двух подкладных листов представлены на рис. 9.

Как видно из рис. 9, введение дробы значительно измельчило микроструктуру. В образце из подкладного листа, отлитого с применением ДЧЛ, крупные первичные карбиды не встречаются и наблюдается большее количество колоний мелких эвтектических карбидов. Следует отметить, что расплавление дробы из белого чугуна вызывает некоторое обеднение химического состава, прежде всего по хрому, которое тем не менее незначительно и им можно пренебречь в связи с малым количеством подаваемой в расплав ДЧЛ.

Таблица 2

Химический состав и твердость экспериментальных деталей
Chemical composition and hardness of experimental parts

Образец	Содержание элементов, %								Твердость рабочей поверхности, HRC
	C	Cr	Ni	Mn	Si	W	V	Mo	
Эталонный (без дробы)	3,59	18,8	0,11	0,47	0,52	0,4	0,16	0,25	59,7
С дробью									62,3



Рис. 8. Экспериментальная деталь «Лист подкладной У3.1,1», изготовленная с применением дробы чугунной литой: а – общий вид; б – участок поверхности

Fig. 8. Experimental part “Backing sheet U3.1,1”, made using shot: a – general view; b – surface area



Рис. 9. Микроструктура образцов, вырезанных из отливок детали «Лист подкладной У3.1,1»: а – эталон; б – с дробью (увеличение $\times 200$)

Fig. 9. Microstructure of specimens cut from castings of the part “Backing sheet U3.1,1”: а – standard, without shot; б – using shot (magnification $\times 200$)

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенной работы по определению материалов для внутренних источников теплоотвода при литье износостойких хромистых чугунов установлено, что применение феррохрома и дроби чугунной литой оказалось эффективным способом локального измельчения структуры.

2. Эксперимент по изготовлению детали «Лист подкладной У3.1,1» с использованием дроби чугунной литой продемонстрировал практическую возможность получения отливки с повышенной твердостью с применением внутреннего источника теплоотвода. Результатом испытаний стало измельчение структуры износостойкого хромистого чугуна, что положительно сказывается на износостойкости и прочности детали, обеспечивая тем самым оптимальный комплекс свойств.

ЛИТЕРАТУРА

- Гарбер, М. Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация / М. Е. Гарбер. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
- Структура и твердость литых деталей из износостойких чугунов / Е. И. Марукович [и др.] // Литье и металлургия. 2017. Т. 88, № 3. С. 39–44. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-3-39-44>.
- Скребцов, А. М. О переохлаждении расплавленного металла при использовании внутренних расплавляемых кристаллизаторов / А. М. Скребцов, Б. А. Павлюк // Известия вузов. Черная металлургия. 1993. № 9–10. С. 78–79.
- О некоторых возможностях измельчения зерна металла отливки при внешнем воздействии на затвердевающий металл / А. М. Скребцов [и др.] // Металл и литье Украины. 1996. № 1–2. С. 30–34.
- Повышение износостойкости хромистых чугунов / В. М. Ильющенко [и др.] // Литье и металлургия. 2016. Т. 83, № 2. С. 5–9.
- Эксплуатационные свойства износостойких хромистых чугунов с разной степенью эвтектичности / Е. И. Марукович [и др.] // Литье и металлургия. 2018. Т. 93, № 4. С. 50–54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-50-54>.
- Влияние термической обработки на механические свойства износостойкого хромистого чугуна / Е. И. Марукович [и др.] // Металлургия машиностроения. 2021. № 5. С. 19–22.
- Хромистый чугун, легированный ниобием / Е. И. Марукович [и др.] // Металлургия машиностроения. 2018. № 1. С. 21–24.
- Влияние ниобия на структуру и механические свойства заэвтектического износостойкого хромистого чугуна / Е. И. Марукович [и др.] // Литейное производство. 2018. № 12. С. 20–23.
- Исследование модифицирования хромистых чугунов при литье в песчаную и комбинированную формы / Е. И. Марукович [и др.] // Литейное производство. 2019. № 6. С. 12–14.
- Износостойкий чугун: пат. 23010 Респ. Беларусь, МПК С22С 37/08 / В. М. Ильющенко, П. Ю. Дувалов, В. М. Андриенко, К. Э. Барановский, Е. В. Розенберг. Опубл. 30.06.2020.

12. Рыжиков, А. А. Расчет и применение суспензионной заливки / А. А. Рыжиков, И. В. Гаврилин // Литейное производство. 1970. № 8. С. 11–13.
13. Особенности теплофизического и физико-химического взаимодействия кипящей стали с введенной в расплав дробью / Л. А. Соколовская [и др.] // Процессы литья. 2000. № 2. С. 35–37.

Поступила 09.06.2022

Подписана в печать 16.08.2022

Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Garber M. E. (2010) *Wear-Resistant White Cast Irons: Properties, Structure, Technology, Operation*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 280 (in Russian).
2. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Kalentsionak A. I., Baranouski K. E. (2017) Structure and Hardness of Castings Made from Wear-Resistant Cast Irons. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, 88 (3), 39–44. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-3-39-44> (in Russian).
3. Skrebtsov A. M., Pavlyuk B. A. (1993) On Supercooling of Molten Metal When Using Internal Molten Crystallizers. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, (9), 78–79 (in Russian).
4. Skrebtsov A. M., Dan L. A., Sekachev A. O., Prokopov A. A. (1996) On Some Possibilities of Grinding the Grain of the Casting Metal under External Action on the Solidifying Metal. *Metal i Lityo Ukrainy = Metal and Casting of Ukraine*, (1–2), 30–34 (in Russian).
5. Ilyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Baranowski K. E., Provorova I. B., Rozenberg E. V. (2016) The Wear Resistance Increase of Chromium Cast Iron. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, 83 (2), 5–9 (in Russian).
6. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Korotkin G. P., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M., Baranouski K. E. (2018) The Performance Properties of Chromium Cast Irons with Different Degree of Eutectic. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, 93 (4), 50–54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-50-54> (in Russian).
7. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Anisovich A. G., Pumpur V. A., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M. (2021) An Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Wear-Resistant Chromium Iron. *Metallurgiya Mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, (5), 19–22 (in Russian).
8. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Anisovich A. G., Baranovskii K. E. (2018) Chromium Cast Iron Alloyed with Niobium. *Metallurgiya Mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, (1), 21–24 (in Russian).
9. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M., Baranovskiy K. E. (2018) Influence of Niobium on Structure and Mechanical Properties of Hypereutectic Wear-Resistant Chromium Iron. *Liteynoe Proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, (12), 20–23 (in Russian).
10. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Pumpur V. A., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M. (2019) Investigation of the Modification of Chromogenous Irons for the Casting in the Sand and Combined Forms. *Liteynoe Proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, (6), 12–14 (in Russian).
11. Ilyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M., Baranovsky K. E., Rozenberg E. V. (2020) *Wear-Resistant Cast Iron*. Patent No 23010 Republic of Belarus (in Russian).
12. Ryzhikov A. A., Gavrillin I. V. (1970) Calculation and Application of Suspension Pouring. *Liteynoe Proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, (8), 11–13 (in Russian).
13. Sokolovskaya L. A., Osipov V. P., Mamishev V. A., Diyuk E. F. (2000) Features of Thermophysical and Physico-Chemical Interaction of Boiling Steel with Shot Introduced Into the Melt. *Protsessy Litya = Casting Processes*, (2), 35–37 (in Russian).

Received: 09.06.2022

Accepted: 16.08.2022

Published online: 30.11.2022