

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ

А. А. ЖУМАЕВ, канд. техн. наук

Навоийский государственный горно-технологический университет

К. Э. БАРАНОВСКИЙ, канд. техн. наук,

А. П. БЕЖОК, канд. техн. наук

Белорусский национальный технический университет

Ю. Н. МАНСУРОВ, д-р техн. наук

Ташкентский государственный транспортный университет

Г. Ф. ЛИВШИЦ

Белорусский национальный технический университет

Проведено моделирование процесса затвердевания отливок из износостойкого хромистого чугуна (ИЧХ) с внутренними металлическими охлаждающими элементами. Изучены результаты исследований структуры и механических свойств отливок из износостойких хромистых чугунов, полученных с применением внутренних охлаждающих элементов. Экспериментально установлено, что использование внутренних холодильников в процессе литья способствует значительному улучшению микроструктуры материала и его твердости. Использование внутренних охлаждающих элементов позволяет существенно уменьшить размеры зерен в структуре чугуна, приводя к их измельчению в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными методами получения отливок. Повышение твердости отливок с 48 до 56 HRC является следствием качественного улучшения микроструктуры материала. Результаты работы имеют важное практическое значение для отраслей Республики Беларусь и экономики Узбекистана, где требуется использование износостойких материалов – машиностроения, горнодобывающей промышленности, производства оборудования для строительства и др.

Ключевые слова: износостойкие хромистые чугуны, внутренние охлаждающие элементы, структура, твердость, износостойкость

STUDY OF THE INFLUENCE OF INTERNAL COOLING ELEMENTS ON THE WEAR RESISTANCE OF CHROMIUM CAST IRONS

A. A. ZHUMAEV, Ph. D. in Technical Sciences
Navoi State Mining and Technological University
K. E. BARANOVSKY, Ph. D. in Technical Sciences,
A. P. BEZHOK, Ph. D. in Technical Sciences
Belarusian National Technical University
Y. N. MANSUROV, Dr. of Engineering Sciences
Tashkent State Transport University
G. F. LIUSHYTS
Belarusian National Technical University

Modeling of the solidification process of wear-resistant chromium cast iron (WRCI) castings with internal metal cooling elements has been carried out. The results of investigations of structure and mechanical properties of castings from wear-resistant chromium cast iron obtained with the use of internal cooling elements have been studied. It is experimentally established that the introduction of internal coolers in the casting process contributes to a significant improvement of the material microstructure and hardness. The use of internal cooling elements allows to significantly reduce the size of grains in the structure of cast iron, leading to their reduction in size by 1.5-2 times compared to traditional methods of obtaining castings. Increase in hardness of castings from 48 to 56 HRC is a consequence of qualitative improvement of material microstructure. The results of the work have important practical significance for the industries of the Republic of Belarus and the economy of Uzbekistan, where the use of wear-resistant materials is required - mechanical engineering, mining, production of equipment for construction and others.

Keywords: wear-resistant chromium cast irons, internal cooling elements, structure, hardness, wear resistance

Введение. Износостойкие чугуны хромистые являются одними из наиболее распространенных износостойких материалов, которые широко применяют в машиностроении, горно-перерабатывающей промышленности, строительной отрасли и т. д. Из этих материалов изготавливают облицовки шаровых и центробежных мельниц, улитки насосов для перекачки шламов и пульпы, рабочие органы и элементы защиты дробебетных аппаратов и др. Износостойкие чу-

гуны хромистые (ИЧХ) содержат 16–28 % хрома, а также легирующие элементы (Ni, Mo, V, Mn), количество которых составляет 2–3 %. Часть отливок из ИЧХ эксплуатируется в тяжелых условиях (высокая твердость абразива, высокие скорости, нагрузки и интенсивность воздействия абразивных частиц). В таких условиях эксплуатируются центробежные дробилки и мельницы [1, 2]. Ресурс работы центробежных дробилок определяется износостойкостью деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного воздействия. В таких условиях работают детали центробежных дробилок и мельниц, выпускаемых УП «НПО «Центр» (г. Минск), которые поставляются в Узбекистан. Это предприятие является крупнейшим в СНГ изготовителем оборудования для дробления и классификации минерального сырья.

Износостойкость деталей в значительной степени зависит от размеров эвтектических карбидов: чем они мельче, тем выше твердость и износостойкость. В свою очередь, при литье размер карбидов связан с толщиной детали (из-за меньшей скорости охлаждения в более толстых отливках образуются более крупные карбиды). В отливках имеется неравномерность по износостойкости, связанная с разным размером карбидов на поверхности детали и в центре. Поскольку в центре отливок из-за более низкой скорости затвердевания, чем на поверхности, кристаллизуются в 3–4 раза более крупные карбиды, чем в поверхностном слое, то и твердость в центре отливок ниже, а, следовательно, ниже и износостойкость [2, 3].

Отливки, особенно толстостенные, отлитые в песчаную форму (облицовка центробежных дробилок и мельниц), изготовленные из ИЧХ, обладают невысокой эксплуатационной стойкостью, так как при твердости наружной поверхности отливок в 48–50 HRC на глубине в 15–20 мм твердость составляет менее 46 HRC, а в центре отливок она еще ниже (менее 44 HRC). Это связано с неравномерной по толщине структурой отливок и крупным размером карбидов в центре [4]. Проблема усугубляется тем, что практически все отлитые в песчаную форму отливки имеют усадочную пористость и раковину.

Поэтому важной задачей является получение отливок, имеющих одинаковую структуру и твердость по всей толщине. Эту проблему можно решить, используя технологию литья ИЧХ с внутренними источниками теплоотвода (внутренними охлаждающими элемента-

ми). В этом случае твердость и структура получается более равномерной по толщине деталей [5].

Целью настоящей работы является определение влияния охлаждающих элементов на затвердевание отливок, полученных в земляных формах с помощью аппарата моделирования литейных технологий, исследование структуры и механические свойства отливок из износостойкого хромистого чугуна, полученных с использованием внутренних закладных охлаждающих элементов.

Для достижения цели в работе решены следующие задачи:

– проведено моделирование затвердевания отливок «Плитка» с внутренними охлаждающими элементами различного диаметра в программе LVMFlow (в земляной форме);

– определено влияние размера охлаждающих элементов на скорость охлаждения расплава в предкристаллизационный период с помощью графических возможностей программы LVMFlow;

– исследованы структуры и механические свойства (определена твердость отливок) отливок из износостойкого хромистого чугуна, полученных с использованием внутренних закладных охлаждающих элементов.

Материалы и методы исследования. При проведении исследований использован износостойкий хромистый чугун марки ИЧХ18ВН, химический состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Составы исследуемых чугунов

Марка чугуна	Содержание химических элементов, % по массе									
	C	Si	Cr	Mo	Mn	W	Ni	V	P	S
ИЧХ18ВН	3,4–3,6	0,47	18,5	0,34	0,59	0,38	0,55	0,2	≤ 0,05	≤ 0,01

Температура заливки ИЧХ составляла 1400 °С. Чугун применяют для отливок горно-обогачительного оборудования, работающих в условиях интенсивного абразивного износа (питающие диски, подложки, плиты для дробилок и др.).

Известно, что в литейном производстве для ускорения охлаждения и устранения усадочных дефектов в тепловых узлах устанавливают внутренние холодильники. При использовании внутренних закладных охлаждающих элементов скорость охлаждения отливки в центре увеличивается, что приводит к измельчению структуры. В

заводской практике используют внутренний закладной охлаждающий элемент. Он обеспечивает ускоренное охлаждение центральной части отливки, измельчает структуру, повышает твердость. Для выбора размеров холодильников можно использовать методику, применяемую для внутренних холодильников, используемых в литейном производстве [5].

Холодильники следует изготавливать из того же материала, что и отливки, а именно из хромистого чугуна. Холодильники имеют значительно меньшее поперечное сечение, чем отливки (приблизительно $0,2 D_b$, где D_b – диаметр окружности, вписанной в отливку по толщине). Структура самих холодильников значительно мельче, чем у отливки (а, следовательно, их твердость и износостойкость больше). В свою очередь, за счет ускоренного охлаждения структура отливки вокруг холодильника в центре будет значительно мельче, чем в отливке без холодильников.

В дальнейшем проведено моделирование процесса затвердевания отливок из ИЧХ с внутренними металлическими охлаждающими элементами разной толщины с помощью программы LVMFLow. Моделируемая литейная форма полностью соответствовала реально используемой песчаной форме (в форме находится 5 отливок), 3 отливки имеют внутренние охлаждающие элементы из ИЧХ диаметром 8; 12 и 15 мм, две отливки – без охлаждающих элементов для сравнения (рисунок 1, а). Использование аппарата моделирования затвердевания отливок позволяет оценить воздействие размера внутренних охлаждающих элементов на скорость охлаждения расплава в предкристаллизационный период, когда образуются центры кристаллизации, что в дальнейшем влияет на дисперсность структуры (рисунок 1, б).

Анализ распределения температур в затвердевающих отливках показал, что температура расплава в отливках с внутренними охлаждающими элементами значительно ниже, чем без их использования. Таким образом, для увеличения скорости охлаждения эффективно использовать только охлаждающие элементы диаметром не менее 15 мм (рисунок 2).

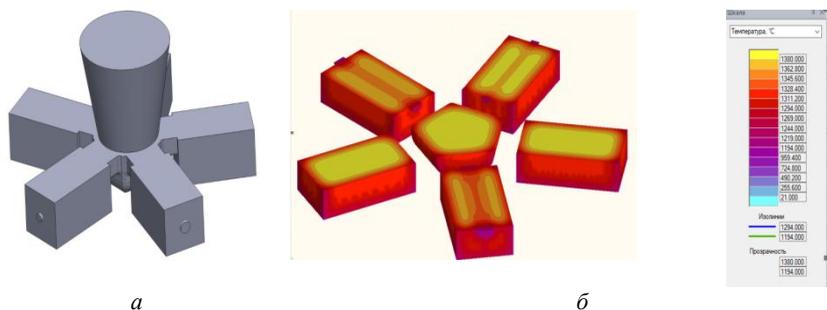


Рисунок 1 – Модель куста отливок:

a – «Плитка» с внутренними охлаждающими элементами различного диаметра и без них; *б* – распределение температурных полей в затвердевающих отливках с различными внутренними охлаждающими элементами и без них (15 с от начала охлаждения)

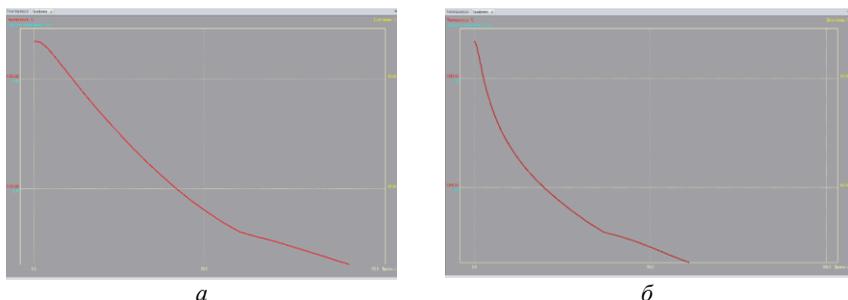


Рисунок 2 – Зависимость температуры расплава в песчаной форме от времени охлаждения в 9 мм от поверхности отливок:

a – отливка, охлаждающаяся без внутренних холодильников;
б – отливка, охлаждающаяся внутренним холодильником \varnothing 15 мм

Результаты и их обсуждение. Как видно из рисунка 2, скорость охлаждения расплава в предкристаллизационный период в отливке с внутренним холодильником \varnothing 15 мм в 2 раза выше, чем без его использования. В результате отливка с охлаждающим элементом будет иметь структуру в 1,5–2 раза более мелкую, а, следовательно, более высокую твердость и износостойкость, чем без охлаждающего элемента. Для эффективного измельчения структуры согласно результатам моделирования, необходимо использовать охлаждающие элементы массой не менее 2 % от массы отливки (\varnothing не менее 15 мм).

В качестве экспериментальной (для установки внутренних охлаждающих элементов) была выбрана отливка «Плитка». Отливка изготовлена в литейной форме из песчаной холодно-твердеющей смеси. Размеры отливки 90×50×50 мм. Изготовлены литейные формы из холодно-твердеющей смеси для отливки «Плитка». В литейные формы были вставлены внутренние охлаждающие элементы диаметром 8, 12, 15 мм (рисунок 3). Литейные формы с охлаждающими элементами были залиты расплавом ИЧХ18ВН. Полученные отливки показаны на рисунке 3, *а, б*.

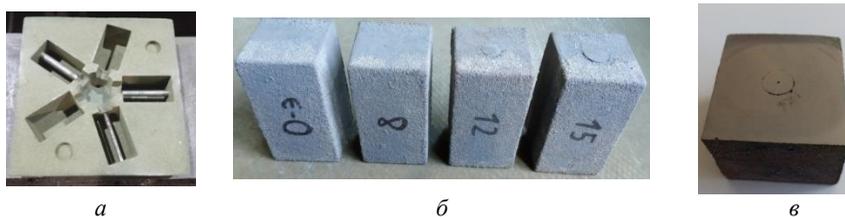


Рисунок 3 – Технология изготовления отливок с внутренними охлаждающими элементами:

а – литейная форма с закладными охлаждающими элементами;
б – отливки; *в* – отливка, разрезанная пополам

Как видно из рисунков, внутренние холодильники плотно удерживаются в центре отливок, они частично сварились с основным металлом. Все отливки не имеют трещин после затвердевания. Из разрезанных отливок были изготовлены шлифы для оценки микроструктуры (рисунок 4).

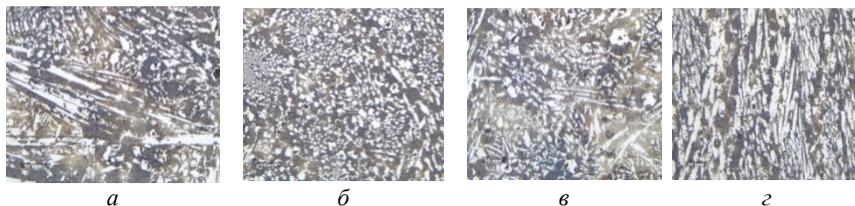


Рисунок 4 – Структура отливок:

а – структура в центре отливки без внутреннего холодильника; *б* – структура внутреннего холодильника Ø 15 мм; *в* – структура в 12,5 мм от поверхности отливки без внутреннего холодильника; *г* – структура в 12,5 мм от поверхности отливки с внутренним холодильником Ø 15 мм

Анализ структуры показал (рисунок 5), что использование внутренних охлаждающих элементов приводит к измельчению структуры (уменьшению размера эвтектических карбидов). Также показана зависимость размера эвтектических карбидов от диаметра внутреннего холодильника.



Рисунок 5 – Зависимость размера эвтектических карбидов от диаметра внутренних холодильников

Как следует из рисунка 5, использование внутренних холодильников приводит к измельчению карбидов в центре отливки почти вдвое (особенно при использовании холодильника Ø 15 мм). Использование холодильников повышает твердость в центре отливки от 48 HRC до 56 HRC. Наибольшую твердость (58 HRC) и износостойкость имеет внутренний закладной охлаждающий элемент, обладающий самой мелкой структурой.

На основании результатов настоящей работы на ПО «Навоийский машиностроительный завод» (г. Навои, Узбекистан) изготавливают отливки, полученные с помощью (внутренних) металлических холодильников из ИЧХ280Х29НЛ (рисунок 6).

Выводы. Применение внутренних холодильников позволило повысить износостойкость на 20 % деталей «Башмак» весом 45 кг для центробежных дробилок «СЕМКО KEV 96». Проведенные исследования износостойкости деталей, полученных с холодильниками для центробежных дробилок производства НПО «Центр» (г. Минск, Республика Беларусь), показали аналогичное повышение износостойкости на 20–25 %.



Рисунок 6 – Отливки «Башмак», полученные с помощью (внутренних) металлических холодильников из ИЧХ280Х29НЛ, *a* – внутренние холодильники

Анализ микроструктуры показал, что причиной повышения износостойкости, как и следовало ожидать, является использование внутренних холодильников, что приводит к измельчению карбидов в центре отливки почти вдвое (особенно при использовании холодильника Ø 15 мм).

Использование аппарата моделирования литейных процессов дает возможность определить размер охлаждающих элементов для различных отливок и литейных форм, который позволит существенно увеличить скорость охлаждения при кристаллизации отливок, за счет чего повышается твердость и износостойкость отливок. Работы по исследованию износостойкости отливок из хромистых чугунов, полученных с использованием внутренних охлаждающих элементов в промышленных условиях показали, что литье с их применением позволяют увеличить износостойкость деталей, не менее, чем на 20 %.

Список литературы

1. Гарбер, М. Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура технология, эксплуатация/ М. Е. Гарбер. – М.: Машиностроение, 2010. – 280 с.

2. Результаты исследования структуры отливок из белых износостойких чугунов. / А. А. Жумаев [и др.] // Черные металлы. – 2022. – № 2 (1082). – С. 4–10.

3. Повышение ресурса работы деталей из износостойких хромистых чугунов / К. Э. Барановский [и др.] // Металлургия. Республ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 40. – С. 78–83.

4. Жумаев, А. А. Анализ микроструктуры износостойких хромистых чугунов после термической обработки / А. А. Жумаев, К. Э. Барановский, Ю. Н. Мансуров // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 1. – С. 142–148.

5. Оптимизация состава и структуры износостойких белых чугунов, используемых в горнодобывающей промышленности / А. А. Жумаев [и др.] // *Черные металлы*. – 2020. – № 12 (1068). – С. 4–10.

References

1. Garber, M. E. *Iznosostojkie belye chuguny: svojstva, structura, tekhnologiya, ekspluatatsiya* [Wear-resistant white cast irons: properties, structure, technology], operation / M. E. Garber. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 2010. – 280 p.

2. *Rezul'taty issledovaniya struktury otlivok iz belyh iznosostojkih chugunov* [Results of research of structure of castings from white wear-resistant cast irons] / A. A. Zhumaev [et al.] // *CHernye metally = Ferrous Metals*. – 2022. – No 2 (1082). – P. 4–10.

3. *Povyshenie resursa raboty detalej iz iznosostojkih hromistyh chugunov* [Increasing the service life of parts made of wear-resistant chromium cast irons] / K. E. Baranovsky [et al.] // *Metallurgiya: Respublikanskij mezhdedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*. – Minsk: BNTU Publ., 2019. – Vyp. 40. – P. 78–83.

4. Zhumaev, A. A. *Analiz mikrostruktury iznosostojkih hromistyh chugunov posle termicheskoy obrabotki* [Analysis of microstructure of wear-resistant chrome cast irons after heat treatment] / A. A. Zhumaev, K. E. Baranovsky, Y. N. Mansurov. // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2021. – No. 1. – P. 142–148.

5. *Optimizatsiya sostava i struktury iznosostojkih belyh chugunov, ispol'zuemyh v gornodobyvayushchej promyshlennosti* [Optimisation of composition and structure of wear-resistant white cast irons used in the mining industry] / A. A. Zhumaev [et al.] // *CHernye metally = Ferrous Metals*. – 2020. – No. 12 (1068). – P. 4 – 10.

Поступила 11.11.2024

Received 11.11.2024