



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-142-148>  
УДК 669.13.017:620.18

Поступила 07.02.2021  
Received 07.02.2021

## АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ИЗНОСОСТОЙКИХ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*А. А. ЖУМАЕВ, Навоийское отделение Академии наук Республики Узбекистан, г. Навои, Узбекистан, ул. Галаба Шох. E-mail: ahmadjon\_jumayev@maul.ru*

*К. Э. БАРАНОВСКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: baranosky\_metolit@tut.by*

*Ю. Н. МАНСУРОВ, Институт общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, ул. Мирзо Улугбека, 77-А. E-mail: yulbarsmans@gmail.com*

*В Навоийском горно-металлургическом комбинате, использующем в большом количестве детали машин для горных работ, стал вопрос оптимизации составов используемых износостойких хромистых чугунов при сохранении их эксплуатационных характеристик. В работе представлены результаты исследования фазового состава литого сплава, а также влияния термообработки чугуна с высоким содержанием хрома на его структуру и свойства. В качестве операции термообработки применяли закалку по различным режимам и низкий отпуск. Исследование позволило систематизировать известные литературные данные параметров термообработки группы износостойких хромистых чугунов, а также оптимизировать их режимы термообработки для деталей, работающих в горно-обогательном производстве.*

**Ключевые слова.** Железо, углерод, чугун, легирующие элементы, высокохромистый белый чугун, термическая обработка, свойства.

**Для цитирования.** 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. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-142-148>.

## ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF WEAR RESISTANT CHROME CAST IRONS AFTER HEAT TREATMENT

*A. A. JUMAEV, Navoi branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Navoi, Uzbekistan str. Galaba Shokh. E-mail: ahmadjon\_jumayev@maul.ru*

*K. E. BARANOVSKY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: baranosky\_metolit@tut.by*

*Yu. N. MANSUROV, Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, 77-A, Mirzo Ulugbek str. E-mail: yulbarsmans@gmail.com*

*At the Navoi Mining and Metallurgical Combine, which uses a large number of machine parts for mining operations, the issue of optimizing the compositions of wear-resistant chromium cast irons while maintaining their operational characteristics has arisen. The paper presents the results of studying the phase composition of the cast alloy, as well as the effect of heat treatment of cast iron with a high chromium content on its structure and properties. As heat treatment operations, quenching in various modes and low tempering were used. The study made it possible to systematize the known literature data on the heat treatment parameters of a group of wear-resistant chromium cast irons, as well as to optimize their heat treatment modes for parts operating in mining and processing industry.*

**Keywords.** Iron, carbon, cast iron, alloying elements, high-chromium white cast iron, heat treatment, properties.

**For citation.** Jumaev A. A., Baranovsky K. E., Mansurov Yu. N. Analysis of the microstructure of wear resistant chrome cast irons after heat treatment. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 142–148. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-142-148>.

Современное машиностроение требует применения материалов, обладающих не только повышенными механическими свойствами, но и высокими специальными свойствами, такими, как твердость и износостойкость, обеспечивающих продолжительный срок службы деталей в конкретных условиях эксплуатации. В первую очередь, это относится к таким материалам, как высоколегированные износостойкие хромистые чугуны, область применения которых постоянно расширяется [1, 2].

В настоящее время на Навоийском машиностроительном заводе (Узбекистан) производится около 120 т в месяц литых деталей (заготовок) из износостойких хромистых чугунов. Наибольшую долю литья составляют детали оборудования для измельчителей горных пород. Примером таких деталей является «Питающий диск», который изготавливается из чугуна марки ИЧ280Х29НЛ. Состав чугуна отличается повышенным содержанием хрома и никеля. Для изготовления названной марки чугуна используют импортные дорогостоящие ферросплавы и легирующие элементы. Однако расход дорогостоящих ферросплавов и легирующих (феррохром и никель) может быть существенно уменьшен, если изготавливать отливку «Питающий диск» из менее легированного износостойкого хромистого чугуна, а затем литые детали подвергнуть термической обработке, повышающей твердость и износостойкость [3].

**Цель работы** – исследование возможности использования более дешевого износостойкого хромистого чугуна взамен ИЧХ280Х29НЛ, предназначенного для изготовления деталей типа «Питающий диск» турбодробилки двойного удара мод. KEV 96, и определение режима его термической обработки.

**Материалы, используемые в исследовании.** Научно-исследовательскую работу проводили на базе центральной заводской лаборатории производственного объединения «Навоийский машиностроительный завод». Объектом исследования являлась деталь «Питающий диск» (масса детали – 35 кг) турбодробилки двойного удара мод. KEV 96 установки «СЕМСО», предназначенной для измельчения рудных пород путем дробления. При работе деталь (рис. 1) испытывает скоростное механическое воздействие от размалываемого материала, что приводит к ударно-абразивному износу в процессе эксплуатации (рис. 2).

Ранее детали «Питающий диск» из износостойкого хромистого чугуна, выпускаемого по ASTM 532, имели следующий химический состав: С – 2,88%, Si – 0,56, Cr – 28,2, Mo – 0,2, Ni – 0,63, Ti – 0,02, P – 0,025, S – 0,023% и импортировались из-за рубежа в Узбекистан. Твердость импортных деталей составляла 59–60 HRC.

Из подобного импортному сплаву на Навоийском машиностроительном заводе было налажено производство деталей «Питающий диск» из износостойкого чугуна ИЧ300Х32Н2М2ТЛ. Отливки изготавливали в песчаных формах. Твердость полученных деталей составляла 47–50 HRC. Детали не термообработывали и использовали в литом состоянии.

В настоящее время деталь «Питающий диск» на Навоийском машиностроительном заводе выпускается из сплава ИЧ280Х29НЛ [4]. Детали эксплуатируются в литом состоянии без термообработки, а их твердость составляет 42–45 HRC.

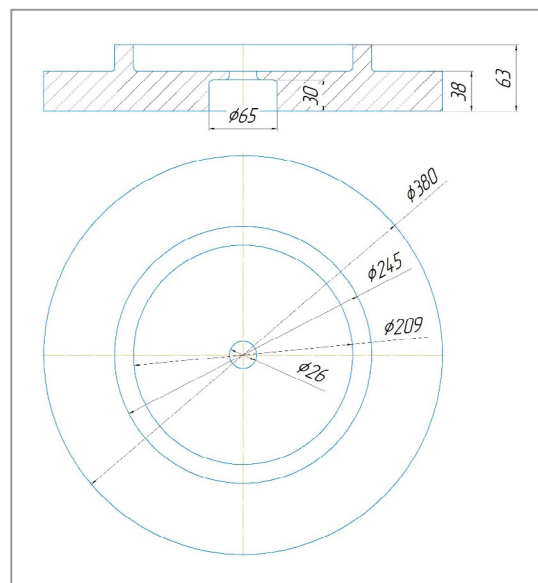


Рис. 1. Чертеж детали «Питающий диск»



а



б

Рис. 2. Деталь «Питающий диск»: а – до эксплуатации; б – после эксплуатации

В то же время в Республике Беларусь для изготовления деталей центробежных дробилок в течение последних 15 лет успешно используется сплав ИЧ320Х18, дополнительно легированный никелем, молибденом, ванадием и вольфрамом [5, 6]. Детали из этого сплава используются как в литом, так и в термообработанном состоянии, имея твердость в литом состоянии при литье в землю 48–52 HRC, а после термообработки – 61–64 HRC. Для изготовления деталей «Питающий диск» Навоийскому заводу был предложен подобный, но более дешевый, чем ИЧ320Х18, сплав ИЧ330Х17Л. Химический состав сплавов ИЧ300Х32Н2М2ТЛ, ИЧ280Х29НЛ и ИЧ330Х17Л приведен в табл. 1. Марки стали приведены согласно принятым обозначениям на Навоийском машиностроительном заводе.

Таблица 1. Химический состав износостойких хромистых чугунов, предназначенных для литья деталей дробильных установок

Номер сплава	Марка чугуна	Содержание химических элементов, мас. %							
		C	Si	Cr	Mo	Ni	Ti	P	S
1	ИЧ300Х32Н2М2ТЛ	2,60	1,2	32,0	1,7	2,1	0,4	0,067	0,032
2	ИЧ280Х29НЛ	2,5	0,6	28,23	–	1,5	–	0,062	0,030
3	ИЧ330Х17Л	3,31	0,65	17	0,4	0,5	–	0,042	0,030

Особенность этих сплавов состоит в том, что все они предназначены для литья конкретной детали. Химический состав их заметно отличается по количеству легирующих элементов. Поскольку задача заключалась в том, чтобы заменить быстроизнашиваемую деталь из дорогих сплавов, химический состав которых принимался на базе импортных чугунов (сплавы 1, 2), на деталь, изготовленную из чугуна собственного производства (сплав 3), то работа была направлена на изучение структуры и свойств чугунов разных марок. При этом необходимо было установить возможные преимущества менее легированного чугуна с точки зрения технологичности изготовления требуемой детали. Из таблицы видно, что содержание никеля, молибдена, титана, хрома в сплаве 3 ниже, чем в сплавах 1 и 2, что обеспечивает его более низкую себестоимость.

Было решено, что отливки после литья будут термообработываться (закалка на воздухе), что позволит повысить твердость и износостойкость без использования значительного количества легирующих элементов [7, 8].

### Результаты работы

Плавку чугунов марок ИЧ300Х32Н2М2ТЛ, ИЧ280Х29НЛ, ИЧ330Х17Л проводили в индукционной тигельной печи ИЧТ-2,5. Сплав готовили при температуре 1420 °С, температура заливки жидкого расплава в формы составляла 1380 °С. Для исследований в земляные формы отливали образцы размером 20х20х25 мм. Затем они прошли термическую обработку в лабораторной печи. Режим термообработки показан на рис. 3.

После закалки образцы подвергали низкому отпуску для снятия внутренних напряжений при температуре 180–220 °С в течение 2,5 ч.

После литья и термообработки твердость образцов определяли методом Роквелла, а микротвердость – методом Виккерса. Результаты исследований приведены в табл. 2.

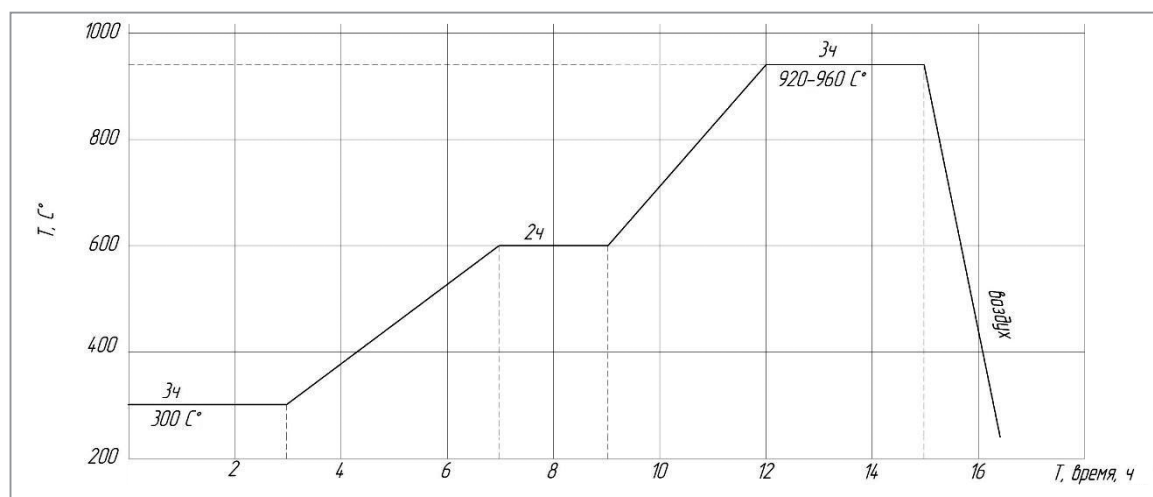


Рис. 3. Режим термообработки отливок

Таблица 2. Результаты исследований образцов сплавов

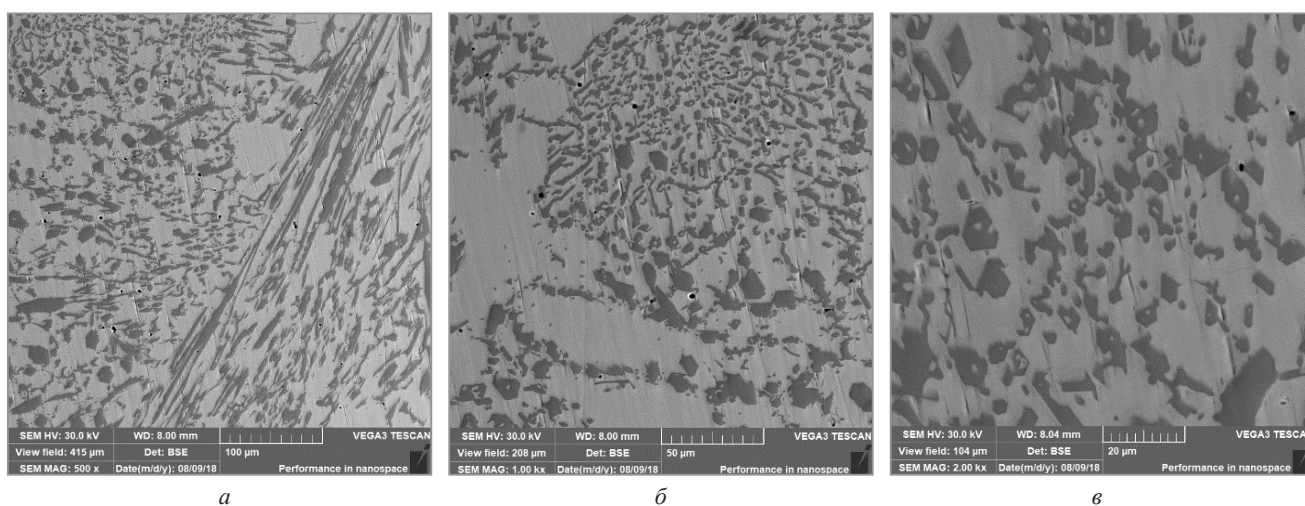
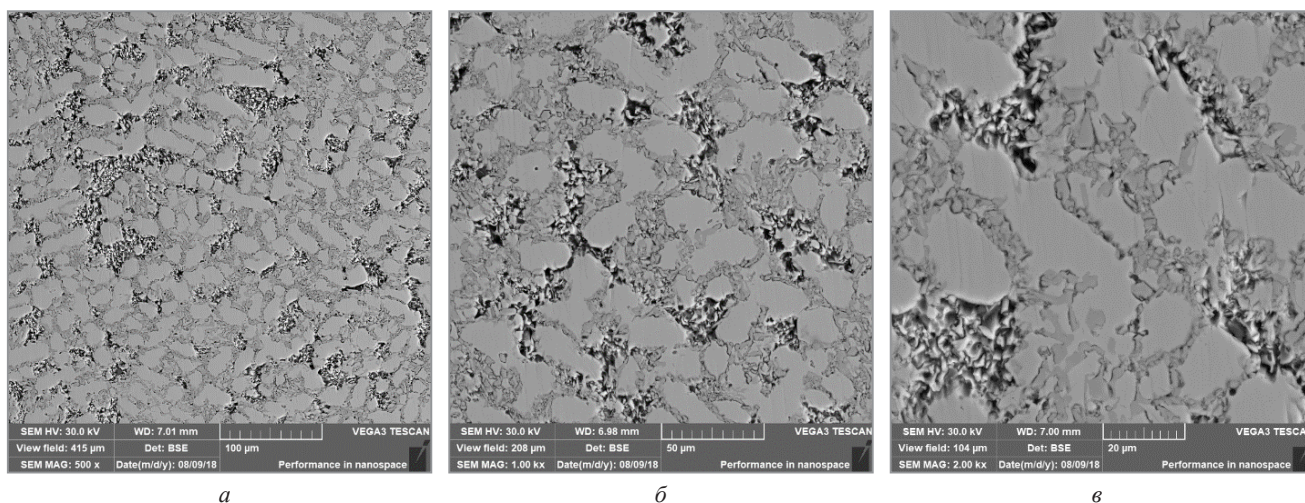
Номер сплава	Сплав	Твердость HRC		Структура металлической матрицы и микротвердость (HV <sub>50</sub> ) образцов сплавов	
		до термообработки	после термообработки	до термообработки	после термообработки
1	ИЧ300Х32Н2М2ТЛ	52–53	60–62	Троостит, аустенит; 640	Мартенсит; 966
2	ИЧ280Х29НЛ	45–46	53–54	Троостит, аустенит; 541	Мартенсит; 795
3	ИЧ330Х17Л	47–48	59–61	Троостит, аустенит; 580	Мартенсит; 922

Как видно из таблицы, после термической обработки твердость сплавов 1–3 увеличилась на 9–15 единиц в результате перехода от аустенитной металлической матрицы к мартенситной металлической основе. Твердость и микротвердость сплава ИЧ280Х29НЛ повысились незначительно, что свидетельствует о нецелесообразности термообработки.

В результате термообработки твердость и микротвердость сплава ИЧ300Х32Н2М2ТЛ и менее легированного ИЧ330Х17Л значительно выросли и стали практически одинаковыми. Это делает возможным изготовления деталей «Питающий диск» из более дешевого хромистого чугуна ИЧ330Х17Л.

### Микроструктура сплавов

Оценку микроструктуры осуществляли с помощью электронной и оптической микроскопии. Для проведения фазового и элементного анализов сплавов использовали методы электронной и оптической микроскопии, рентгеноспектрального и элементного анализов на современном оборудовании НИТУ «МИСиС» (г. Москва). Микроструктуры термически обработанных сплавов представлены на рис. 4–6.

Рис. 4. Микроструктура сплава ИЧ300Х32Н2М2ТЛ: а –  $\times 500$ ; б –  $\times 1000$ ; в –  $\times 2000$ Рис. 5. Микроструктура сплава ИЧ280Х29НЛ: а –  $\times 500$ ; б –  $\times 1000$ ; в –  $\times 2000$

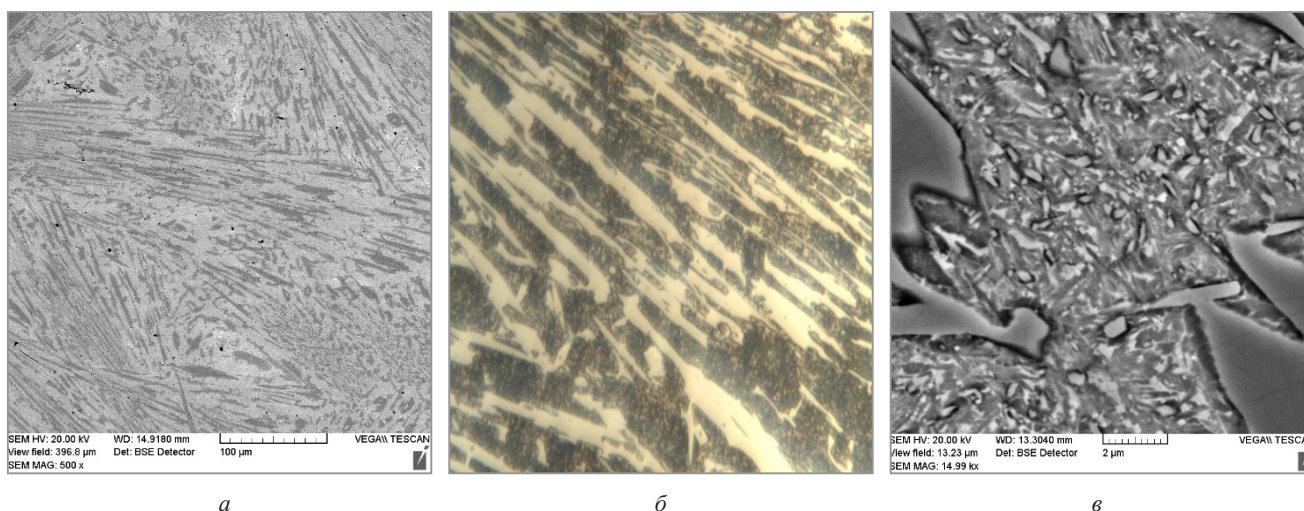


Рис. 6. Микроструктура сплава ИЧ330Х17Л: а –  $\times 500$ ; б –  $\times 1000$ ; в –  $\times 15000$

Сравнение микроструктуры сплавов показывает, что сплав ИЧ300Х32Н2М2ТЛ (см. рис. 4) по составу близок к эвтектическому, содержание карбидов в нем составляет 35–37% [1]. Сплав ИЧ280Х29НЛ представляет собой доэвтектический чугун (см. рис. 5), эвтектические карбиды расположены между дендритами первичного аустенита. Содержание карбидов невысокое (30–32%). Сплав ИЧ330Х17Л полностью эвтектический (рис. 6) и содержит 39–40% мелких эвтектических карбидов, равномерно распределенных в металлической матрице. Такая структура более предпочтительна, так как не содержит участков металлической матрицы, не прикрытых карбидами от износа.

При охлаждении металлическая аустенитная матрица становится мартенситной и в ней выделяются вторичные карбиды. Во время термообработки металлическая матрица пересыщена углеродом и хромом, что при охлаждении приводит к выделению вторичных карбидов (рис. 6) [9, 10].

### Термообработка отливок

В настоящее время в литературе содержится много информации о термической обработке хромистых чугунов, но она часто противоречива. Поэтому для уточнения режимов термообработки необходимо было провести ряд экспериментов для оптимизации процесса термообработки деталей «Питающий диск» из чугуна марки ИЧ330Х17Л с целью повышения твердости и износостойкости.

В производственных условиях использовали следующую технологию термической обработки отливок.

1. Отливки при загрузке в термическую печь размещали на поддоне рабочими поверхностями вверх.
2. Нагрев отливок под закалку проводили строго с заданной скоростью, учитывая массу, толщину отливок и низкую теплопроводность хромистых чугунов. В противном случае отливки могли разрушиться вследствие неравномерного нагрева, приводящего к возникновению больших термических напряжений. Так как особенно опасен начальный тепловой удар, отливки помещали в печь, нагретую до 300 °С и обеспечивали при этой температуре выдержку 3 ч. Дальнейший нагрев проводили в соответствии с графиком [11].

3. В процессе нагрева при температуре выше 300 °С из аустенита выделяются мелкие вторичные карбиды хрома. Выдержка при температуре 600 °С способствует образованию большого количества вторичных карбидов и в связи с этим обеднению металлической матрицы углеродом и снижению ее стабильности [12].

4. При нагреве отливок до 920–960 °С и в процессе выдержки происходит частичное растворение вторичных карбидов и выравнивание содержания углерода и легирующих элементов в колониях эвтектического аустенита. При последующем резком охлаждении на воздухе аустенит претерпевает мартенситное превращение (закалку) с выделением мартенсита, что способствует значительному повышению твердости и износостойкости хромистых чугунов [13].

После закалки отливки следует подвергнуть низкому отпуску при температуре 180–220 °С в течение 2,5 ч для снятия термических напряжений.

Из сплава ИЧ330Х17Л на Навоийском заводе были отлиты экспериментальные детали «Питающий диск». Для получения отливок использовали технологию литья в песчаные формы с внешним металлическим холодильником (рис. 7).

В изготовленных таким методом отливках была реализована строго направленная перпендикулярно поверхности износа структура, обладающая более высокой износостойкостью (рис. 8).

Детали прошли термообработку по режиму, указанному выше, и были установлены для испытаний в центробежные дробилки. Наилучшие результаты (твердость и износостойкость) были получены при закалке отливок с температуры 920–960 °С. Испытания показали увеличение ресурса работы термообработанных деталей на 35–40% по сравнению с деталями из сплава ИЧ280Х29НЛ [14, 15].

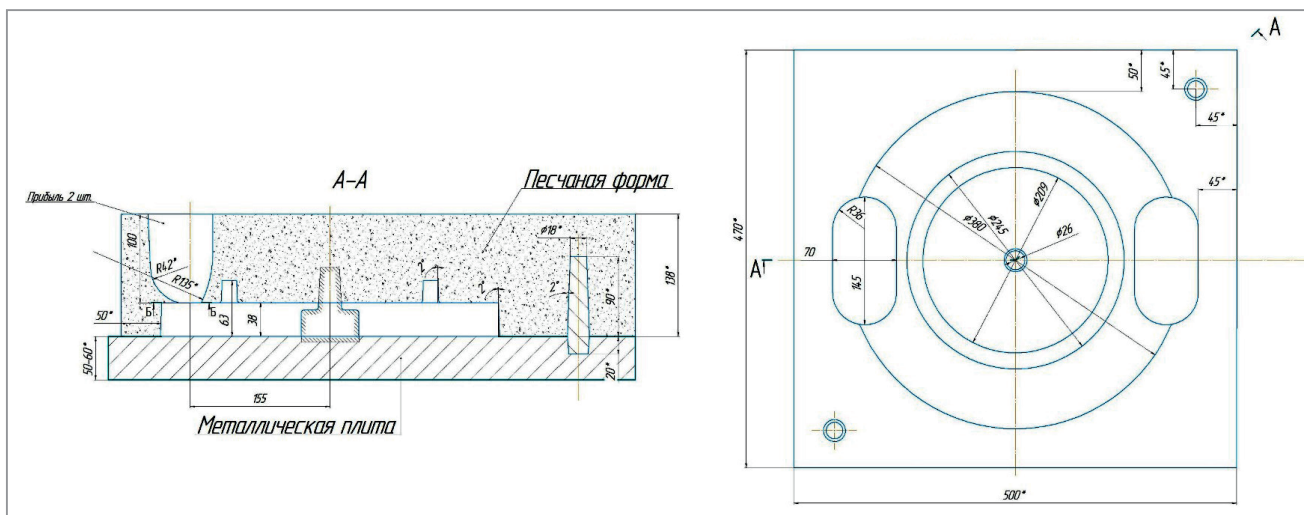


Рис. 7. Литейная форма для изготовления отливок «Питающий диск» с использованием внешнего металлического холодильника

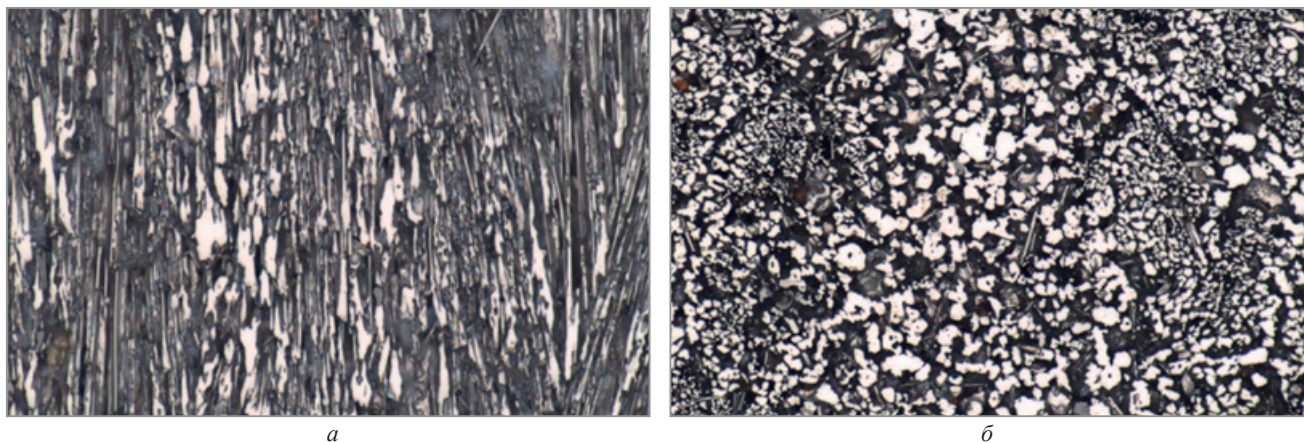


Рис. 8. Структура отливки «Питающий диск»: а – перпендикулярно поверхности износа; б – параллельно поверхности износа

### Выводы

1. В литом состоянии структура чугунов марок ИЧ300Х32Н2М2ТЛ, ИЧ280Х29НЛ, ИЧ330Х17Л представляет собой троостит и остаточный аустенит с большим количеством эвтектических колоний на базе карбидов хрома розеточной формы. Из-за высокого содержания хрома повышается устойчивость против распада пересыщенного твердого раствора при охлаждении, вследствие чего в структуре сохраняется до 36% остаточного аустенита.

2. После закалки с охлаждением на воздухе получена однородная мартенситно-карбидная структура в исследуемых чугунах, причем в чугуне марки ИЧ330Х17Л вследствие меньшего содержания хрома распределение карбидов более равномерное по сравнению с чугунами марок 300Х32Н2М2ТЛ и 280Х29НЛ.

3. Исследования позволили определить оптимальную термическую обработку для чугуна ИЧ330Х17Л. Наилучшие результаты (твердость и износостойкость) были получены при закалке отливок с температуры 920–960 °С, твердость отливок после закалки была более 60 HRC.

4. Проведенные исследования показали перспективность замены более легированного сплава ИЧ280Х29НЛ на менее легированный сплав ИЧ330Х17Л с последующей термообработкой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. М.: Metallurgija, 1983. 176 с.
2. Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
3. Xiang, Ch. & Yanxiang, L. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron // *Materials Science and Engineering*. 2010. No 2 (528). P. 770–775.
4. Jumaev A.A. Comparative study of the structure of castings from white wear resistant cast iron // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2018. Vol. 5. No 12. P. 7575–7577.
5. Повышение ресурса работы центробежных дробилок и мельниц. / К.Э. Барановский, В.М. Ильюшенко, В.В. Воробьев и др. // *Центробежная техника – высокие технологии*. Материалы 3-й МНТК. Минск: НПО «Центр», 2008. С. 27–28.
6. Барановский К.Э., Ильюшенко В.М., Станюленис Ю.Л. Литье деталей из износостойких хромистых чугунов для центробежных мельниц в комбинированные формы и кокили // *Литье и металлургия*. 2009. № 3. С. 162–165.
7. Gevelmann G., Theisen W. Proc. Int. Conf. on Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills. 2011. P. 171–181.
8. Hashimoto M.: Proc. Int. Conf. on Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills, 2011. P. 183–192.
9. Albertin E., Beneduce F., Matsumoto M., Teixeira I. Optimizing heat treatment and wear resistance of high chromium cast irons using computational thermodynamics. *Wear*. 2011. Vol. 271. P. 1813–1818.
10. Hou Y., Wang Y., Pan Z., Yu L. Influence of rare earth nanoparticles and inoculants on performance and microstructure of high chromium cast iron // *Journal of Rare Earths*. 2012. Vol. 30. P. 283–288.
11. Kopyciński D., Kawalec M., Szczęśny A., Gilewski R., Piasny S. Analysis of the structure and abrasive wear resistance of white cast iron with precipitates of carbides. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2013. Vol. 58. No 3. P. 973–976.
12. Pearce JTH (2002) High-chromium cast irons to resist abrasive wear // *Foundryman*. 2020. No 4 (95). P. 156–166.
13. Sain P.K., Sharma C.P., Bhargava A.K. Microstructure aspects of a newly developed, low cost, corrosion-resistant white cast iron // *Metall Mater. Trans*. 2012. Vol. 44, No 4. P. 1665–1672.
14. Жумаев А., Мансуров Ю., Маматкулов Дж., Абдуллаев К. Фазовые превращения в сплавах железа с углеродом, легированных РЗМ и ПМ // *Черные металлы*. 2020. № 11. С. 22–28.
15. Жумаев А., Мансуров Ю., Маматкулов Дж., Улугов Г. Оптимизация состава и структуры износостойких белых чугунов, используемых в горнодобывающей промышленности // *Черные металлы*. 2020. № 12. С. 4–9.

## REFERENCES

1. Cypin I.I. *Belye iznosostojkie chuguny* [Wear resistant white cast irons]. Moscow, Metallurgija Publ., 1983, 176 p.
2. Garber M.E. *Iznosostojkie belye chuguny* [Wear resistant white cast irons]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, 280 p.
3. Xiang, Ch. & Yanxiang, L. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron, *Materials Science and Engineering = Materials Science and Engineering*, 2010, no. 2 (528), pp. 770–775.
4. Jumaev A.A. Comparative study of the structure of castings from white wear resistant cast iron. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology = International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2018, vol. 5, no.12, pp. 7575–7577.
5. Baranovskij K. Je., Il'jushenko V.M., Vorob'ev V.V. Povyshenie resursa raboty centrobezhnyh drobilok i mel'nic [Increasing the service life of centrifugal crushers and mills.]. *Materijaly 3-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii* [Materials of the 3rd International Scientific and Technical Conference]. *Centrobezhnaja tehnika – vysokie tehnologii = Centrifugal technology – high technology*. Minsk, NPO "Centr" Publ., 2008, pp. 27–28.
6. Baranovskij K. Je., Il'jushenko V.M., Stanjulenis Ju. L. Lit'e detalej iz iznosostojkih hromistyh chugunov dlja centrobezhnyh mel'nic v kombinirovannye formy i kokili [Casting of wear-resistant chromium cast irons for centrifugal mills into combined molds and chill molds]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no.3, pp. 162–165.
7. Gevelmann G., Theisen W. Proc. Int. Conf. on Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills, 2011, pp. 171–181.
8. Hashimoto M.: Proc. Int. Conf. on Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills, 2011. pp. 183–192.
9. Albertin E., Beneduce F., Matsumoto M., Teixeira I. Optimizing heat treatment and wear resistance of high chromium cast irons using computational thermodynamics. *Wear*. 2011, Vol. 271, pp. 1813–1818.
10. Hou Y., Wang Y., Pan Z., Yu L. Influence of rare earth nanoparticles and inoculants on performance and microstructure of high chromium cast iron. *Journal of Rare Earths*, 2012., vol. 30, pp. 283–288.
11. Kopyciński D., Kawalec M., Szczęśny A., Gilewski R., Piasny S. Analysis of the structure and abrasive wear resistance of white cast iron with precipitates of carbides. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 58, no.3, pp. 973–976.
12. Pearce JTH (2002) High-chromium cast irons to resist abrasive wear. *Foundryman*, 2020, no. 4 (95), pp. 156–166.
13. Sain P.K., Sharma C.P., Bhargava A.K. Microstructure aspects of a newly developed, low cost, corrosion-resistant white cast iron. *Metall Mater. Trans*. 2012, vol. 44, no. 4, pp. 1665–1672.
14. Zhumaev A., Mansurov Ju., Mamatkulov Dzh., Abdullaev K. Fazovye prevrashhenija v splavah zheleza s uglerodom, legirovannyh RZM i PM [Phase transformations in iron-carbon alloys doped with REM and PM]. *Chernye metally = Black metals*, 2020, no. 11, pp. 22–28.
15. Zhumaev A., Mansurov Ju., Mamatkulov Dzh., Ulugov G. Optimizacija sostava i struktury iznosostojkih belyh chugunov, ispol'zuemyh v gornodobyvajushhej promyshlennosti [Optimization of the composition and structure of wear-resistant white cast irons used in the mining industry]. *Chernye metally = Black metals*, 2020, no.12, pp. 4–9.