

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения
институт
Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.П. Жереб
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры
поверхностных слоев серого чугуна СЧ20

тема
22.04.02 «Металлургия»
код и наименование направления

22.04.02.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»
код и наименование магистерской программы

Руководитель _____
подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук
должность, ученая степень

В. Ю. Таскин
инициалы, фамилия

Выпускник _____
подпись, дата

А. А. Тонких
инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Продолжение титульного листа МД по теме: Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры поверхностных слоев серого чугуна СЧ20

Консультанты по
разделам:

Литературный обзор

наименование раздела

подпись, дата

В. Ю. Таскин

инициалы, фамилия

Методическая часть

наименование раздела

подпись, дата

В. Ю. Таскин

инициалы, фамилия

Экспериментальная часть

наименование раздела

подпись, дата

В. Ю. Таскин

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

В. Ю. Таскин

инициалы, фамилия

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

институт

Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.П. Жереб

_____ _____
подпись инициалы, фамилия

« _____ » _____ 2020 г.

Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры
поверхностных слоев серого чугуна СЧ20

наименование ВКР (МД)

22.04.02 «Металлургия»

наименование темы, код и наименование специальности (специализации), направления,

22.04.02.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

магистерской программы

Научный руководитель/
руководитель _____

подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

В. Ю. Таскин

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

А. А. Тонких

инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

С.Б. Наумов

инициалы, фамилия

Консультанты:

Литературный обзор

наименование раздела

подпись, дата

В. Ю. Таскин

инициалы, фамилия

Методическая часть

наименование раздела

подпись, дата

В. Ю. Таскин

инициалы, фамилия

Экспериментальная часть

наименование раздела

подпись, дата

В. Ю. Таскин

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

В. Ю. Таскин

инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения
институт
Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.П. Жереб
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Реферат

Магистерская диссертация по теме «Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры поверхностных слоев серого чугуна СЧ20» содержит 70 страниц текстового документа, 24 использованных источника, микроструктуры (в количестве 50 шт.), таблицы (в количестве 19 шт.), диаграммы (в количестве 9 шт.) фотографии оборудования (в количестве 4 шт.), приложения А (в количестве 1 шт.). Работа включает следующие главы: литературный обзор, методическая часть, экспериментальная часть, заключение.

Объектом исследования являются образцы серого чугуна СЧ20 с различным покрытием и скоростью кристаллизации.

Цель исследования магистерской диссертации: Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры поверхностных слоев серого чугуна СЧ20.

Металлографически показали, изменение структуры образца в зависимости от толщины стенки и выбранного модификатора. Доказали, что с увеличением толщины стенки отливки (до 75 мм) уменьшается влияние теплопроводности покрытия на структуру поверхности отливки, а величина поверхностного слоя снижается.

Ключевые слова: ЧУГУН, МИКРОСТРУКТУРА, МИКРОТВЕРДОСТЬ, СКОРОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1. Литературный обзор.....	10
1.1 Историческая справка	10
1.2 Классификация чугунов и диаграмма состояния.....	10
1.3 Особенности легирования белых износостойких чугунов.....	12
1.4 Влияние режима термической обработки на структуру и свойства износостойких чугунов.....	17
1.4.1 Отжиг чугунов	17
1.4.2 Закалка и отпуск чугунов	18
1.4.3 Старение чугунов	19
1.4.4 Чугуны ледебуритного класса.....	24
1.4.5 Чугуны структурных классов с карбидами M_{7C_3} и M_{23C_6}	25
1.5 Химический состав износостойких чугунов	27
1.6 Определение графита в структуре чугуна с пластинчатым графитом.....	28
1.7 Патентный поиск.....	30
1.8 Применение износостойких чугунов	38
2 Методическая часть	41
2.1 Исходный материал	41
2.2 Методика приготовления микрошлифов.....	41
2.3 Полирование образцов.....	42
2.4 Металлографический анализ	43
2.5 Сравнение с ГОСТ.....	45
2.6 Измерение микротвердости.....	45
3. Экспериментальная часть.....	Error! Bookmark not defined.
3.1 Металлографические исследования.....	Error! Bookmark not defined.
3.1.1 Визуальное сравнение микроструктур исследуемых образцов с ГОСТ.....	Error! Bookmark not defined.
3.1.2 Анализ микроструктуры исходного образца в программе Siams	Error! Bookmark not defined.
3.1.3 Влияние толщины стенки на микроструктуру поверхностных слоев образца.....	Error! Bookmark not defined.

3.1.4 Результаты анализа микроструктур в программе Siams и ГОСТ	Error! Bookmark not defined.
3.2 Измерение твердости и микротвердости образцов.....	Error! Bookmark not defined.
Заключение	50
Список использованной литературы.....	52

ВВЕДЕНИЕ

Чугуном называют сплав железа с углеродом (и другими элементами), содержащими более 2,14 % С. [1]

Задача по повышению износостойкости деталей из хромистых чугунов является комплексной и включает в себя выбор состава износостойкого чугуна в зависимости от условий эксплуатации детали, определение технологии литья, разработку оптимальных режимов литья, а также использование дополнительного легирования базового состава чугуна.

Параметры затвердевания хромистых чугунов влияют на эксплуатационные свойства в значительно большей степени, чем в других литейных сплавах. Увеличение скорости охлаждения при кристаллизации и использование направленного затвердевания изменяют такие характеристики структуры, как размер и взаимное расположение карбидной фазы. Поэтому определение рациональной технологии изготовления отливок из хромистых чугунов имеет такое же важное значение, что и выбор состава сплава. [2]

1. Литературный обзор

1.1 Историческая справка

Первые сведения о чугуне относятся к 6 веку до нашей эры. В Китае из высокофосфористых железных руд получали чугун, содержащий до 7% P, с низкой температурой плавления, из которого отливали различные изделия. Чугун был известен и античным металлургам 4-5 веков до нашей эры.

Производство чугуна в Западной Европе началось в 14 веке с появлением первых доменных печей для выплавки чугуна из руд. Полученный чугун использовали или для передела в сталь в кричном горне, или для изготовления различных строительных деталей и оружия (пушки, ядра, колонны и др.).

В России производство чугуна началось в 16 веке; в дальнейшем оно непрерывно расширялось, и при Петре I Россия по выпуску чугуна превзошла все страны, но через столетие вновь отстала от западно-европейских стран. Появление во второй половине 18 века вагранок позволило литейным цехам отделиться от доменных, т. е. положило начало независимому существованию чугунолитейного производства. В начале 19 века возникает производство ковкого чугуна. Во второй четверти 20 века начинают применять легирование чугуна, что дало возможность существенно повысить его свойства и получать специальный чугун (износостойкие, коррозионностойкие, жаростойкие и т.д.).
[3]

1.2 Классификация чугунов и диаграмма состояния

Чугун отличается от стали: по составу – более высокое содержание углерода и примесей; по технологическим свойствам – более высокие литейные свойства, малая способность к пластической деформации, почти не используется в сварных конструкциях.

В зависимости от состояния углерода в чугунах различают:

- белый чугун – углерод в связанном состоянии в виде цементита, в изломе имеет белый цвет и металлический блеск;

- серый чугун – весь углерод или большая часть находится в свободном состоянии в виде графита, а в связанном состоянии находится не более 0,8 % углерода. Из-за большого количества графита его излом имеет серый цвет;

- половинчатый – часть углерода находится в свободном состоянии в форме графита, но не менее 2 % углерода находится в форме цементита. Мало используется в технике.

Диаграмма состояния железо – углерод (рис. 1) дает основное представление о строении железоуглеродистых сплавов – сталей и чугунов. [4]

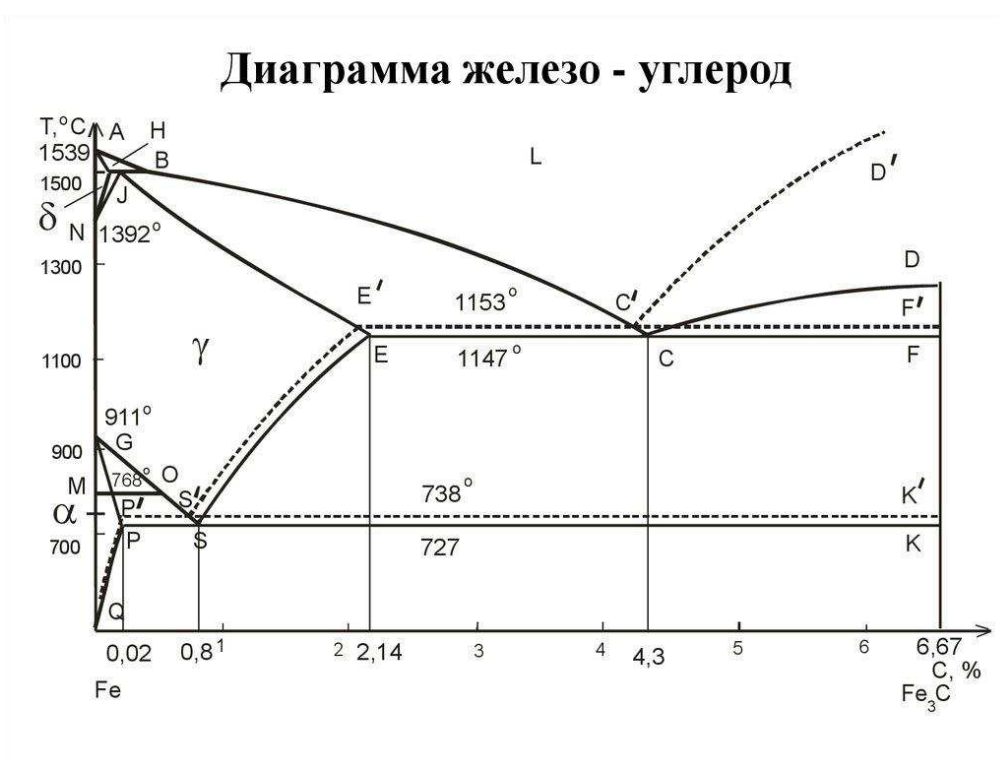


Рисунок 1– Диаграмма состояния железо – углерод [4]

В результате превращения углерод может не только химически взаимодействовать с железом, но и выделяться в элементарном состоянии в форме графита. Жидкая фаза, аустенит и феррит могут находиться в равновесии и с графитом.

Диаграмма состояния железо – графит показана штриховыми линиями на (рис. 1). Линии диаграммы находятся выше линий диаграммы железо – цементит. Температуры эвтектического и эвтектоидного превращений,

соответственно, 1153°C и 738°C. Точки С, Е, S – сдвинуты влево, и находятся при концентрации углерода 4,24, 2,11 и 0,7 %, соответственно.

1.3 Особенности легирования белых износостойких чугунов

Повышение долговечности оборудования, связанное с оптимизацией химического состава сплавов, является актуальной задачей, имеющей практическую ценность.

Хром – это основной легирующий элемент износостойких чугунов. Его содержание в металлической основе определяют износостойкие и коррозионностойкие свойства этих сплавов. [5–7] В первую очередь, хром взаимодействует с углеродом, образуя различные карбиды. Количество и тип карбида определяют износостойкие свойства чугунов. В зависимости от содержания хрома и углерода в белых чугунах образуются карбиды $(Cr, Fe)_3C$, $(Cr, Fe)_7C_3$ и $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Хром, связанный в карбиды, не участвует в легировании металлической основы и не влияет на ее антикоррозионные свойства. По данным [4], 1% углерода может связать 6–16% хрома. В работе [5] отмечалось, что в легированных белых чугунах природа и закономерности роста карбида могут значительно изменяться в присутствии легирующих примесей. При образовании или выделении карбидов в твердом растворе образуются зоны, обедненные хромом, что приводит к снижению коррозионной стойкости.

Марганец, обладая большим сродством к углероду, замещает железо в цементите и карбидах хрома, при этом образуются карбиды хрома, легированные железом и марганцем [10–12]. В системе Fe-Mn марганец образует непрерывный ряд твердых растворов с γ -железом [13]. Особенностью этого процесса является то, что марганец усиливает обеднение хромом металлической основы в зонах, прилегающих к карбидам, что приводит к снижению коррозионной стойкости.

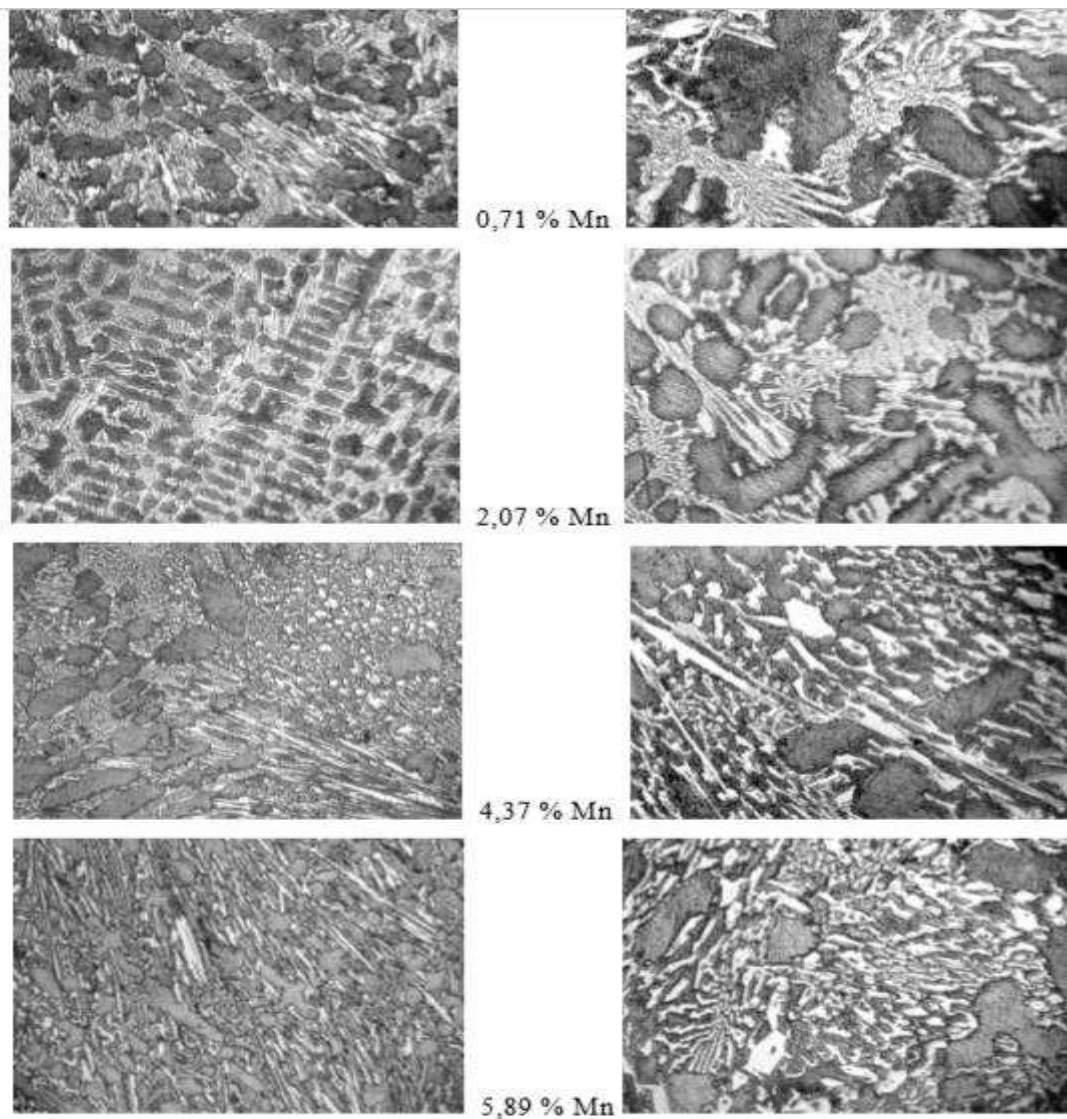


Рисунок 2– Типичные микроструктуры высокохромистых чугунов с различным содержанием марганца: слева x150, справа x370 [10].

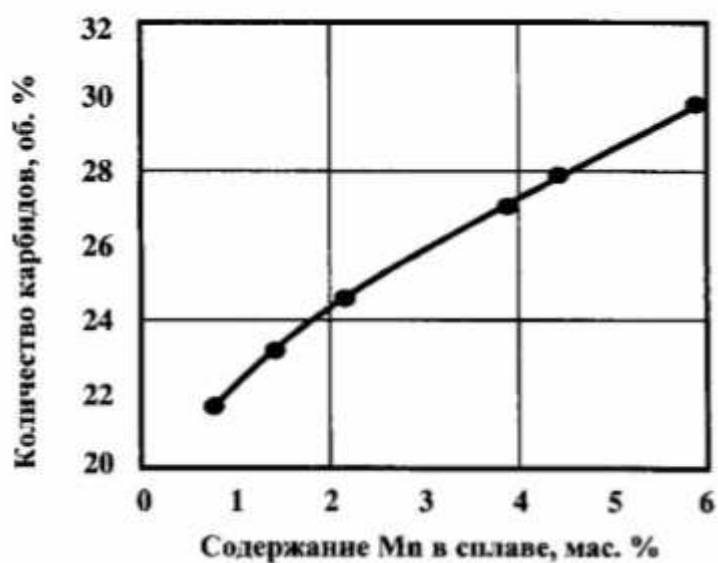


Рисунок 3– Влияние марганца на количество карбидов в высокохромистых чугунах [10].

Структура представленных высокохромистых чугунов состоит из легированной металлической основы и карбидов (рис.2). При этом по мере увеличения содержания марганца в сплаве происходит увеличение количества карбидной фазы с 22 при содержании марганца 0,71% до 30 % при 5,89 % Mn и укрупнение карбидов (рис.3). Увеличение размеров черной оторочки, свидетельствующее о повышении травимости сплава, происходит по мере увеличения в нем содержания марганца (рис.2). При содержании марганца 5,77% черная оторочка не наблюдается в связи с тем, что металлическая основа стала практически полностью аустенитной. Таким образом, черная оторочка представляет собой зону ускоренного коррозионного разрушения. Можно утверждать, что увеличение содержания марганца в высокохромистых чугунах снижает их коррозионную стойкость в результате обеднения металлической основы хромом в зонах, примыкающих к карбидам и карбидной эвтектике, вследствие процесса карбидообразования в твердом растворе.

Никель повышает вязкость разрушения и является незаменимым компонентом материалов, работающих в условиях ударных нагрузок. Содержание никеля ограничивают в связи с его высокой стоимостью, однако он оказывает большое влияние на износостойкие и коррозионностойкие свойства белых чугунов. Никель как аустенитообразующий элемент увеличивает растворимость углерода (карбидов хрома) в аустените, что приводит к увеличению содержания хрома в твердом растворе и повышает коррозионную стойкость сплава [14].

Углерод является регулятором количества карбидов. Для износостойких чугунов его содержание находится в пределах 2,4–3,6%, что обеспечивает 25–40% карбидов в структуре. Для коррозионностойких чугунов содержание углерода понижается до 0,5–1,6%. Чугуны для деталей, эксплуатируемых в условиях гидроабразивного изнашивания в коррозионной среде, должны обладать одновременно как износостойкими, так и коррозионностойкими свойствами. Содержание углерода в этих чугунах находится в пределах 2,2–3,0% [15].

Кремний в белом чугуна можно рассматривать как легирующий элемент, распределяющийся при кристаллизации между аустенитом и эвтектическим расплавом. Его содержание может находиться в пределах 0,3 - 2,0%. Кремний повышает температуру эвтектической кристаллизации, расширяет интервал эвтектического превращения, препятствует переохлаждению, уменьшает влияние скорости охлаждения. Кремний способствует графитизации чугуна. Изменяя его содержание и скорость охлаждения отливки, можно получить чугуны различной структуры.

Фосфор не оказывает существенного влияния на процесс графитизации. При повышенном содержании фосфора в структуре чугуна образуются твердые включения фосфидной эвтектики, которая повышает его литейные свойства.

Молибден в износостойких чугунах может содержаться в пределах 0,3 - 5,0%. Он относится к числу элементов, сильно задерживающих распад аустенита в перлитной области, увеличивающих прокаливаемость и получение мартенсита. С увеличением концентрации молибдена износостойкость и твердость повышаются, особенно при Mo 0,8%, а прочность достигает максимума в интервале 1,3-1,8% Mo и почти не изменяется с увеличением его концентрации. Молибден распределяется между тремя фазами - карбидами Mo₃C, M₇C₃ и твердым раствором. В чугунах с Mo до 1,5% половина его связана в карбид Mo₂C, около одной четверти находится в аустените, остальная часть - в карбиде MoC. Лишь незначительная часть молибдена (0,2%) находится в растворе. Этого недостаточно для существенного влияния на перлитное превращение, поэтому при легировании высокохромистых чугунов необходимы добавки молибдена 3,0% и выше. Но молибден дорог и дефицитен, поэтому целесообразнее использовать его в комплексе с Ti, V, Si, W. При этом содержание молибдена можно понизить до 0,3 - 1,0% в зависимости от концентраций других элементов [12, 27,30].

Сера является вредной примесью. Она обуславливает ухудшение литейных свойств чугуна, увеличение усадки, повышение склонности к трещинообразованию, снижение температуры краснеломкости чугуна.

По степени легирования и типу карбидов ИБЧ подразделяют на несколько структурных классов:

- низколегированные или ледебуритные (с эвтектикой на основе легированного цементита M_3C , где М – металл);
- хромистые с карбидами M_7C_3 типа Cr_7C_3 , представляющие собой основную группу чугунов, легированных хромом;
- высокохромистые с карбидами $M_{23}C_6$ или с карбидами двух типов ($M_{23}C_6$ и M_7C_3);
- ванадиевые, ниобиевые и титановые с карбидами MC ;
- хромомолибденовые с карбидами M_7C_3 и M_2C ;
- комплексно-легированные с несколькими видами специальных карбидов, например, M_7C_3 и MC , M_7C_3 и M_6C , MC и M_6C [23].

Свойства карбидных фаз и структурных составляющих приведены в табл.1

Таблица 1– Свойства фаз и структурных составляющих [23]

Фазы, структурные составляющие	Микро-твердость H_{50}	Температура плавления, $^{\circ}C$	Плотность, $г/см^3$	Фазы, структурные составляющие	Микро-твердость H_{50}
$(Fe,Cr)_3C$	840-1100	-	7,67	Феррит	70-200
$(Cr,Fe)_7C_3$	1200-1600	-	-	Перлит	250-320
Cr_7C_3	1370-2000	1665	6,92	Аустенит низколегированный	250-320
$Cr_{23}C_6$	1225-2280	1550	6,97		
VC	3000	2810	5,36	Аустенит высокохромистый	300-600
TiC	3147-3200	3100-3200	4,93		
WC	1780-2200	2720	15,6	Мартенсит	500-1010
Mo_2C	1500	2500	8,82		

1.4 Влияние режима термической обработки на структуру и свойства износостойких чугунов

Термическую обработку чугунов проводят с целью снятия внутренних напряжений, возникающих при литье и вызывающих с течением времени изменения размеров и формы отливки, снижение твердости и улучшение обрабатываемости резанием, повышение механических свойств.

1.4.1 Отжиг чугунов

Различают несколько видов отжига чугунов.

1. Отжиг для снятия внутренних напряжений. Этому виду отжига подвергают чугуны при следующих температурах: серый чугун с пластинчатым графитом – при 550-570 °С; высокопрочный чугун с шаровидным графитом – при 550-650 °С; высоколегированный чугун (типа «кирезитс») – при 620-650 °С. Скорость нагрева составляет примерно 70-100 град/ч, выдержка при температуре нагрева зависит от массы и конструкции отливки и составляет от 1 до 8ч.

Охлаждение до 200 °С медленное, со скоростью 20-50град/ч, что достигается охлаждением отливки вместе с печью. Далее отливки охлаждаются на воздухе.

При этом отжиге не происходит фазовых превращений, снимаются внутренние напряжения, повышается вязкость, исключается коробление и образование трещин в процессе эксплуатации.

2. Смягчающий отжиг (отжиг графитизирующий низкотемпературный) проводят для улучшения обрабатываемости резанием и повышения пластичности. Его осуществляют продолжительностью выдержкой при 680-700 °С (ниже точки A_{c1}) или медленным охлаждением отливок при 760-700 °С. Время выдержки должно быть достаточным для полного и требуемого частичного распада эвтектоидного цементита (для серых чугунов время

выдержки 1-4ч, для ковких – до 60ч). Охлаждение медленное для деталей сложной конфигурации.

В результате этого отжига в структуре чугунов увеличивается количество феррита.

3. Отжиг графитизирующий, в результате которого из белого чугуна получают ковкий чугун.

4. Нормализация (серого и ковкого чугуна) при температуре 850-950 °С.

Время выдержки должно быть достаточным для насыщения аустенита углеродом и в зависимости от конфигурации изделий составляет от 1 до 3ч.

Охлаждение ускоренное, чтобы аустенит смог превратиться в перлит, и чаще всего осуществляется на воздухе. Для деталей сложной формы охлаждение с температуры 600-550 °С должно быть замедленное, чтобы уменьшить величину термических напряжений.

В результате нормализации получается: перлит+графит – и повышается прочность и износостойкость.

После нормализации для снятия внутренних напряжений применяется высокий отпуск при 650-680С с выдержкой 1-1,5ч.

1.4.2 Закалка и отпуск чугунов

Для закалки чугун нагревают до 850-959 °С. Скорость нагрева изделий сложной формы меньше, чем изделий простой формы. Время выдержки обычно составляет от 1 до 3ч. Охлаждение осуществляют в воде или масле. При закалке аустенит превращается в неравновесные структуры: мартенсит или троостит+графит.

После закалки проводят отпуск при температуре 200-600 °С. В результате повышаются твердость, прочность и износостойкость чугуна.

При изотермической закалке чугун нагревают так же, как и при обычной закалке, выдерживают от 10 до 90 мин и охлаждают в расплавленной соли при 200-400 °С. При этом происходит изотермический распад аустенита с образованием структуры: игольчатый троостит+графит.

В результате изотермической закалки повышаются твердость и прочность, но сохраняется пластичность.

Возможность поверхностная закалка кислородно-ацетиленовым пламенем, токами высокой частоты или электролите. Температура нагрева - 900-1000 °С. Охлаждение – в воде, масле или масляной эмульсии. При поверхностной закалке в поверхностном слое образуются структуры: мартенсит+графит или троосмартенсит+графит. После отпуска при 200-600 °С и охлаждения на воздухе повышаются твердость, прочность и износостойкость поверхностного слоя при наличии мягкой сердцевины.

1.4.3 Старение чугунов

Старение применяют для стабилизации размеров отливок, предотвращения коробления и снятия внутренних напряжений.

Естественное старение осуществляют на открытом воздухе или в помещении. Изделия после литья выдерживаются в течении 6-15 месяцев. При естественном старении снижение напряжений в отливках составляет 3-10%.

При вибрационном старении снижение напряжений достигает 10-15%. Во время вибрации в отливке возникают дополнительные временные напряжения, вызывающие локальные пластические деформации чугуна и таким образом повышающие стойкость к короблению.

Старение методом статистической перегрузки отличается тем, что для создания дополнительных временных напряжений деталь подвергают воздействию статистических внешних нагрузок.

Старение методом термоударов (термоциклическое старение) осуществляют путем быстрого нагрева и охлаждения всей детали или отдельных ее участков. Стойкость против коробления повышается за счет пластических деформаций, вызываемых временными температурными напряжениями. Общий уровень напряжений снижается на 10-20%. Термоциклическое старение осуществляют по следующему режиму: загрузка в печь и нагрев за 3-3.5ч до 350 °С, выдержка 2-2,5ч, затем резкое

охлаждение (на воздухе), снова поверхностный нагрев (за 1-1,5ч) до 320 °С, выдержка 4-5ч, охлаждение вместе с печью до 150-100 °С.

Искусственное старение осуществляют при повышенных температурах; длительность – несколько часов.

При искусственном старении отливки чугуна загружают в печь, нагретую до 100-200 °С, нагревают до температуры 555-570 °С со скоростью 30-60 °С/ч, выдерживают 3-5ч и охлаждают вместе с печью со скоростью 20-40 °С/ч до температуры 150-200 °С, а затем охлаждают на воздухе. Обычно старение проводят после грубой механической обработки.

Свойства белых износостойких чугунов приведены в таблице 2–4

Таблица 2– Относительная износостойкость и механические свойства хромистых чугунов эвтектического состава (литье в земляные формы) [24]

Марка чугуна	ИЧХ28Н2	ИЧХ18	ИЧХ18ВМ
Твердость в литом состоянии НРС	52–53	54–55	54–55
Коэффициент относительной износостойкости чугунов в литом состоянии*	1,0	2,2	2,4
Ударная вязкость, Дж/см ²	11,4	10,5	13,8

Наиболее перспективной технологией, позволяющей повысить эксплуатационные характеристики деталей из износостойких чугунов за счет увеличения скорости охлаждения при кристаллизации (по сравнению с литьем в земляные формы), является метод литья в металлические формы.

Таблица 3– Относительная износостойкость и ударная вязкость хромистого чугуна ИЧХ18ВМ эвтектического состава (литье в земляные формы и кокиль) [24]

Марка чугуна	ИЧХ18ВМ (литье в земляные формы)	ИЧХ18ВМ (литье в металлические формы)
Твердость в литом состоянии НРС	54–55	57–61
Коэффициент относительное износостойкости чугунов в литом	1,0	1,25

состоянии*		
Ударная вязкость, Дж/см ²	13,8	15,8

Кроме повышения износостойкости на 20–30% и твердости до 61 HRC, при литье в кокиль увеличивается и ударная вязкость на 15–20%, до 15,5–17,0 Дж/см². Дальнейшее увеличение износостойкости деталей из хромистых чугунов, полученных в металлических формах, возможно за счет выбора оптимальных режимов литья. Известно, что на процесс формирования отливки в кокиле сильное влияние оказывают такие параметры литья, как температура заливаемого расплава и время заполнения формы расплавом. Изменяя эти параметры, можно воздействовать на формирование структуры отливки и, как следствие, на износостойкость получаемых деталей.

Структура чугуна при литье в земляную форму и кокиль представлена на рисунке – 4.

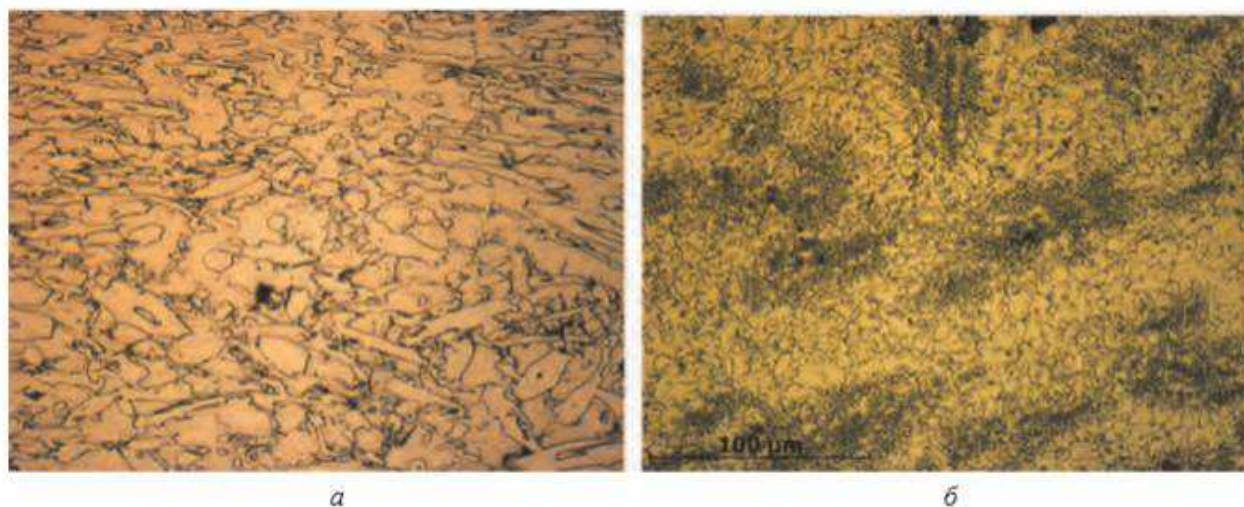


Рисунок 4– Структура чугуна ИЧХ18ВМ: а – литье в земляную форму; б – литье в металлическую форму ×500 [24]

Структура при литье в металлические формы измельчается в 3–4 раза, за счет чего повышаются механические свойства изделия.

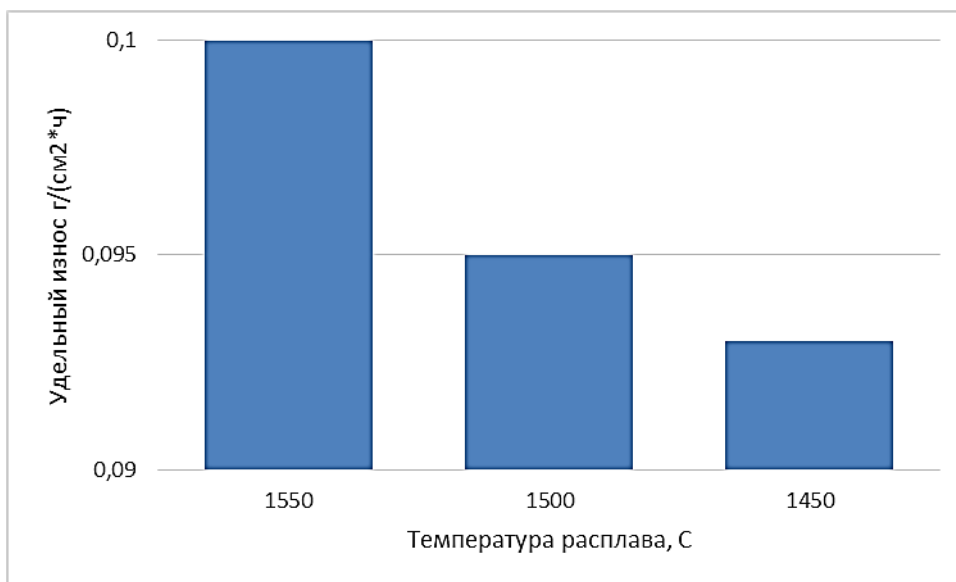


Рисунок 5– Влияние температуры расплава на износостойкость [24]

Изменение износостойкости при уменьшении температуры с 1550 до 1450 °С составило около 7%, что укладывается в пределы погрешностей.

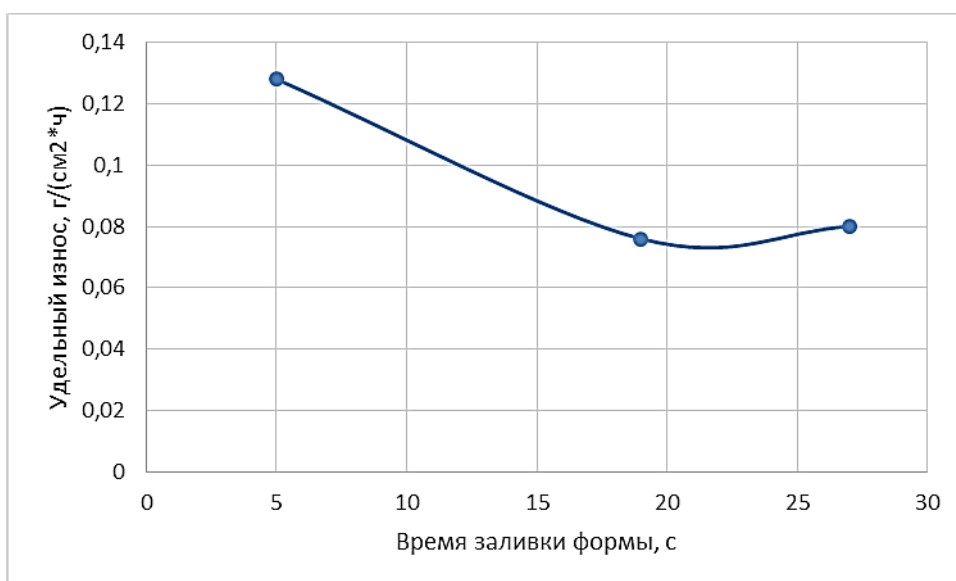


Рисунок 6– Влияние времени заполнения формы расплавом на износостойкость [24]

Увеличение времени заливки от 5 до 26 с повысило износостойкость рабочей поверхности отливки «подкладной лист» на 37%. Это можно объяснить тем, что при увеличении времени заливки до 20–25с в полости

формы практически полностью снимается перегрев расплава, а в нижней части отливки образуется слой затвердевшего металла.

На свойства чугунов влияет не только тип карбидов, но и их количество и размеры включений. Количество карбидов определяется содержанием углерода, характером и степенью легирования и может регулироваться в пределах от 4-12% (в чугунах с карбидами MC) до 50% (в низколегированных эвтектических чугунах). Наиболее распространенные марки чугунов имеют в структуре 20-30% карбидов (хромистые, хромомолибденовые, комплексно-легированные чугуны).

Размеры карбидных частиц в плоских сечениях деталей (в том числе и на поверхностях, подвергающихся изнашиванию) зависят от типа карбидов и скорости охлаждения отливок в интервале температур кристаллизации чугуна. Для отливок с толщиной стенки от 3 до 100 мм средний размер эвтектических карбидов M_7C_3 составляет соответственно от 4 до 12 мкм. При этом длина включений больше поперечного размера в 10 и более раз. Размеры вторичных карбидов значительно меньше 1 мкм.

Металлическую основу (матрицу) ИБЧ составляют аустенит и продукты его превращения. В наибольшей степени требованиям, предъявляемым к ИБЧ, отвечают мартенсит и неустойчивый остаточный аустенит. Например, увеличение количества карбидов M_7C_3 в структуре чугуна от 12 до 32% приводит к повышению износостойкости чугуна с перлитной матрицей только на 50%, а с мартенситной – в 3 раза [2].

Известно, что для обеспечения высокой износостойкости гетерогенных сплавов при достаточно высоких значениях прочности и вязкости структура этих сплавов должна состоять из твердой износостойкой составляющей (например, карбидной), располагающейся на изнашиваемой поверхности в виде мелких изолированных включений, и более мягкой, но достаточно прочной и вязкой основы [16]. Этот принцип аналогичен правилу, установленному ранее Шарпи применительно к антифрикционным сплавам. Он соблюдается лишь в чугунах определенных структурных классов (в

наибольшей степени – в чугунах с карбидами MC , значительно меньше – в чугунах с карбидами M_7C_3) и совершенно не соблюдается в чугунах ледебуритного класса.

ГОСТ 7769-82 предусматривает девять марок: износостойких белых чугунов (ЧХЗТ, ЧХ9Н5, ЧХ16, ЧХ16М2, ЧХ22, ЧХ28Д2, ЧХ32, ЧГ7Х4, ЧН4Х2), которые классифицированы по химическому составу [15]. Однако более целесообразно использовать приведенную выше классификацию по структуре.

1.4.4 Чугуны ледебуритного класса

Наиболее известными представителями чугунов этого класса являются чугуны, легированные никелем и хромом (в отношении 2-2,5 к 1) получившие название “нихард”. Их обычно подразделяют на три вида: высокоуглеродистый (стандартный), низкоуглеродистый и высокопрочный. Стандартный (3,0-3,6%С, 0,4-0,7%Si, 0,4-0,7%Mn; 1,4-2,5%Сг, 3,4-4,75%Ni) и высокопрочный (~2,9%С) чугуны отличаются только содержанием углерода и имеют твердость ~ НВ 550. Твердость низкоуглеродистого (~ 1,3%С; 0,6%Si; 0,5%Mn; 1,6%Сг; 4,5%Ni) составляет НВ 380-430. Для повышения сопротивления чугуна механическим ударам его подвергают отжигу при 300°С (12-24 ч) или при 750-800°С (4-6 ч); иногда применяют двухступенчатую обработку: отжиг при 450°С (4 ч), охлаждение на воздухе, отпуск 250-300 °С (4-6 ч).

Низкоуглеродистый нихард по механическим свойствам занимает промежуточное положение между чугуном и сталью ($\sigma_B = 600-700$ МПа, $KC = 6-8$ Дж/см²), но он менее износостоек по сравнению со стандартным нихард. Недостатком стандартного нихард является низкая удароустойчивость.

Чугуны нихард применяют для деталей, работающих в условиях интенсивного изнашивания при умеренных ударных нагрузках и при рабочих температурах до 400°С: шары и футеровки шаровых мельниц, валковые головки мельниц для тонкого помола угля, колена трубопроводов в

пневмотранспорте песка, детали бегунов и пескометов. Нихард можно использовать и для условий гидроабразивного изнашивания.

1.4.5 Чугуны структурных классов с карбидами M_7C_3 и $M_{23}C_6$

Структура чугунов этих классов обеспечивается необходимым содержанием хрома. Содержание углерода обычно составляет до 3,8% при содержании хрома до 18%. Замена ледебурита структурой с карбидами M_7C_3 происходит при содержании в чугуне 9,0-9,5%Сг. Это приводит к значительному повышению прочности, твердости и износостойкости чугуна. Максимальной износостойкостью обладают чугуны, содержащие 12-18%Сг. Углерод повышает твердость чугуна, но снижает его прочность.

Для условий абразивно-коррозионного изнашивания целесообразно использовать чугуны с повышенным содержанием хрома (около 30%). Для изготовления массивных деталей, требующих сквозной прокаливаемости, используют чугуны, дополнительно легированные молибденом (до 3%) или содержащие повышенное количество марганца (3-5% в зависимости от содержания углерода). Хромомарганцевые чугуны с мартенситно-аустенитной матрицей обладают повышенной ударно-абразивной износостойкостью. Чугуны с высоким содержанием марганца (6% и более) имеют в структуре большое количество аустенита и отличаются повышенной ударной вязкостью. Аустенитные чугуны имеют невысокую твердость (HRC25-30), но поверхность деталей из этих чугунов может наклепываться до HRC40-42.

Особую группу в этом классе представляют высокомарганцевые термообработываемые чугуны [6]. За счет особого химического состава (2,0-2,8%С; 15-35%Mn, небольшие количества кремния и хрома) и высокотемпературного (1000-1100 °С) отжига обеспечивается композитная структура, полностью соответствующая правилу Шарпи и состоящая из аустенитной матрицы и равномерно распределенных в ней мелких

изолированных включений карбида $(Fe,Mn)_7C_3$. Особенностью этих чугунов являются высокие пластичность и ударная вязкость, а также хорошая наклепываемость при ударном нагружении и повышенных нагрузках. Такие чугуны можно использовать взамен стали 110Г13Л для деталей, работающих в условиях износа и ударных нагрузок, например, для деталей дробильно-размольного оборудования.

Некоторые прочностные свойства износостойких чугунов приведены в таблице– 4.

Таблица 4– Некоторые прочностные свойства износостойких чугуновN [6]

Марки чугунов	Твердость HRC	Прочностные свойства МПа		Относительная износостойкость ε *) при твердости HRC	
		σ_B	$\sigma_{изг.}$	ε	HRC
1	2	3	4	5	6
ЧХ9Н5	50-60	350	700	-	-
ЧХ16	42-50	350	700	-	-
ЧХ16М2	50-62	170	490	8,0	60-61
ЧХ22	35-60	290	540	-	-
ЧХ32	24-36	390	690	-	-
ЧХ28Д2	41-62	390	690		
ИЧХ12М	60-64	-	780	10,6	61-62
ИЧХ28Н2	50-55	350	700	6,7	50-51

Примечание: *) относительная износостойкость ε определена при испытаниях в нейтральной абразивной среде, в качестве эталона использована сталь 20 с твердостью HB 110-120 ($\varepsilon = 1$); в этих же условиях у стали 110Г13Л $\varepsilon = 1,3$.

1.5 Химический состав износостойких чугунов

Химический состав износостойких чугунов по ГОСТу 7769-82 представлен в таблице –5.

Таблица 5– Химический состав чугунов [15]

Марки чугунов	Содержание элементов. %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Другие элементы
ЧХ9Н5	2,8-3,6	1,1-2,0	0,5-1,5	8,0-9,5	4,0-6,0	до 0,4	-
4Х16	1,6-2,4	1,5-2,2	до 1,0	13-19	-	-	-
ЧХ16М2	2,4-3,6	0,5-1,5	1,5-2,5	13-19	-	0,5-2,0	1,0-1,5 Cu
4Х22	2,4-3,6	0,2-1,0	1,5-2,5	19-25	-	-	0,15-0,35 V
ЧХ32	1,6-3,2	1,5-2,5	до 1,0	30-34	-	-	0,1-0,3 Ti
ЧХ28Д2	2,2-3,0	0,5-1,5	1,5-2,5	25-30	9,4-0,8	-	1,5-2,5 Cu
ИЧХ12М	2,6-3,0	до 0,7	0,5-1,0	11,5-14	-	1,4-1,6	-
ИЧХ28Н2	2,5-3,0	0,7-1,4	0,5-1,0	25-30	1,5-2,0	-	-
ИЧ300Х18ГЗ	2,7-3,0	0,4-0,8	2,0-4,5	17-21	-	-	0,05-0,1 В
ИЧ210Х12Г5	1,9-2,3	0,4-1,0	4,6-5,6	11-14	-	-	-
ИЧ210Х30ГЗ	2,0-2,3	0,5-0,9	2,8-3,5	30-33	-	-	0,05-0,1 Zr
ИЧ170Х30ГЗ	1,7-2,0	0,5-0,9	2,8-3,5	29-32	-	-	0,05-0,1 Zr

1.6 Определение графита в структуре чугуна с пластинчатым графитом

Согласно ГОСТ 3443–87 графит в структуре чугуна характеризуется по следующим признакам [17]:

– форма включений графита;

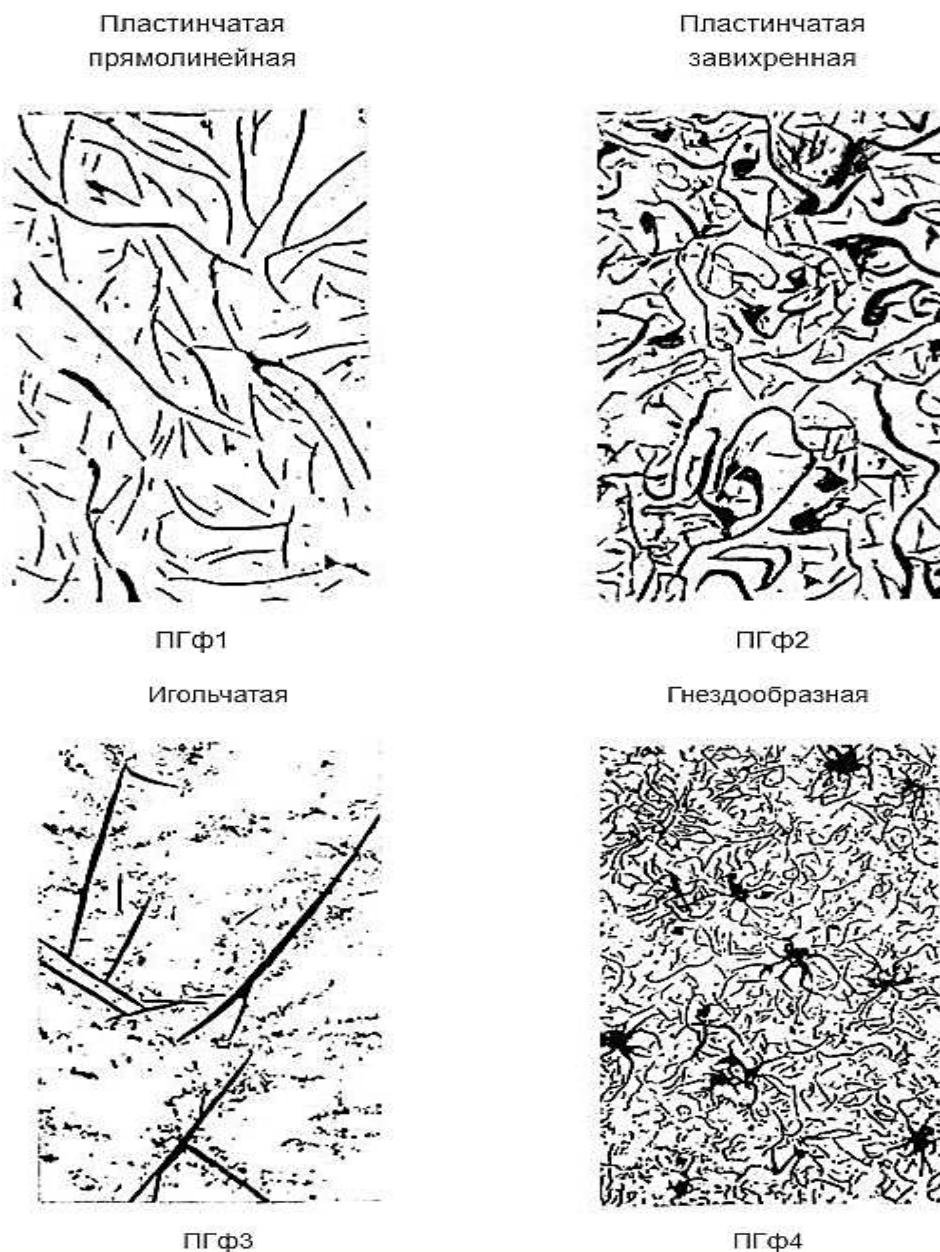


Рисунок 7– Форма включений графита [17]

– Распределение включений графита

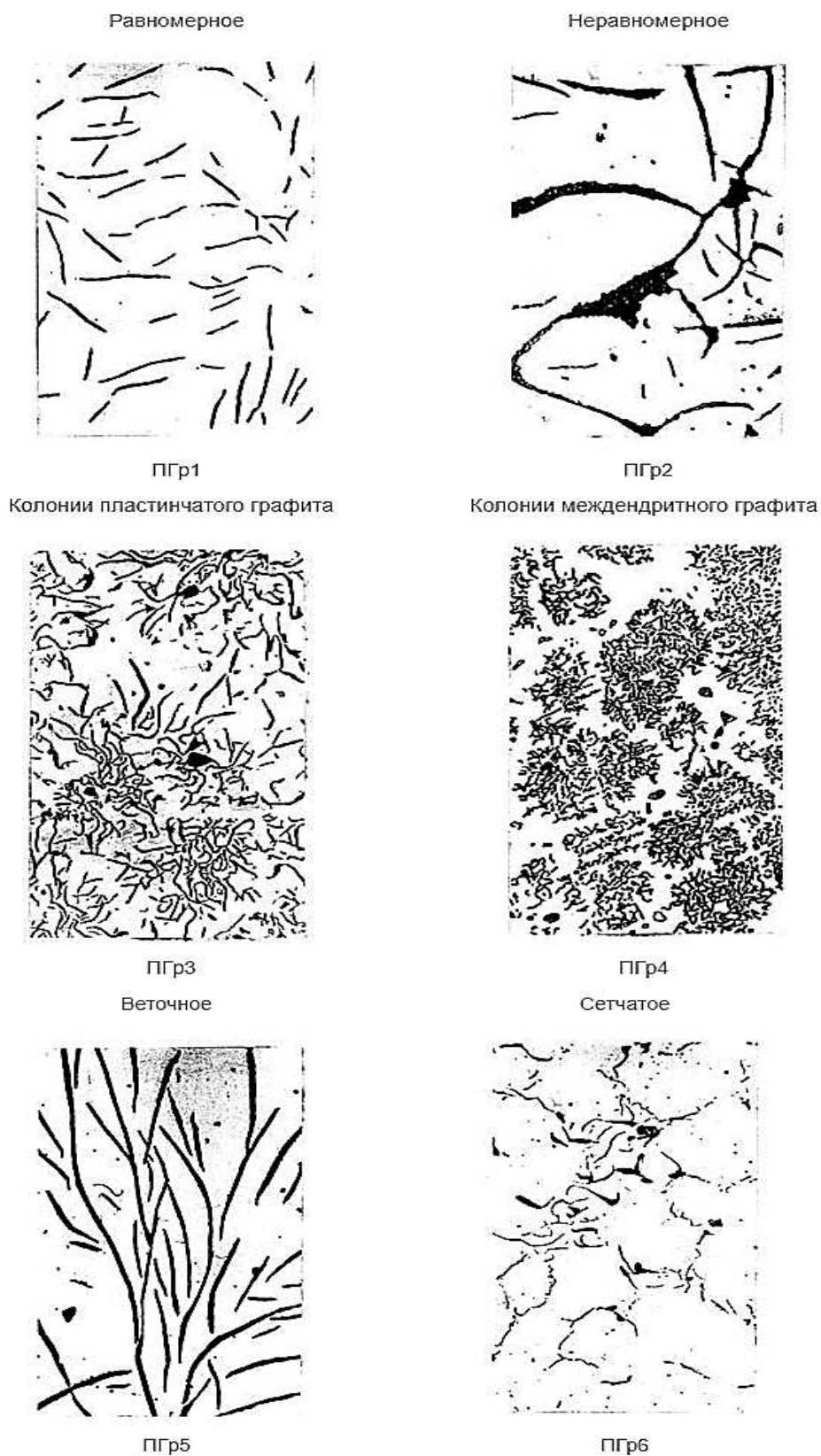


Рисунок 8– Распределение включений графита [17]

– Количество включений графита

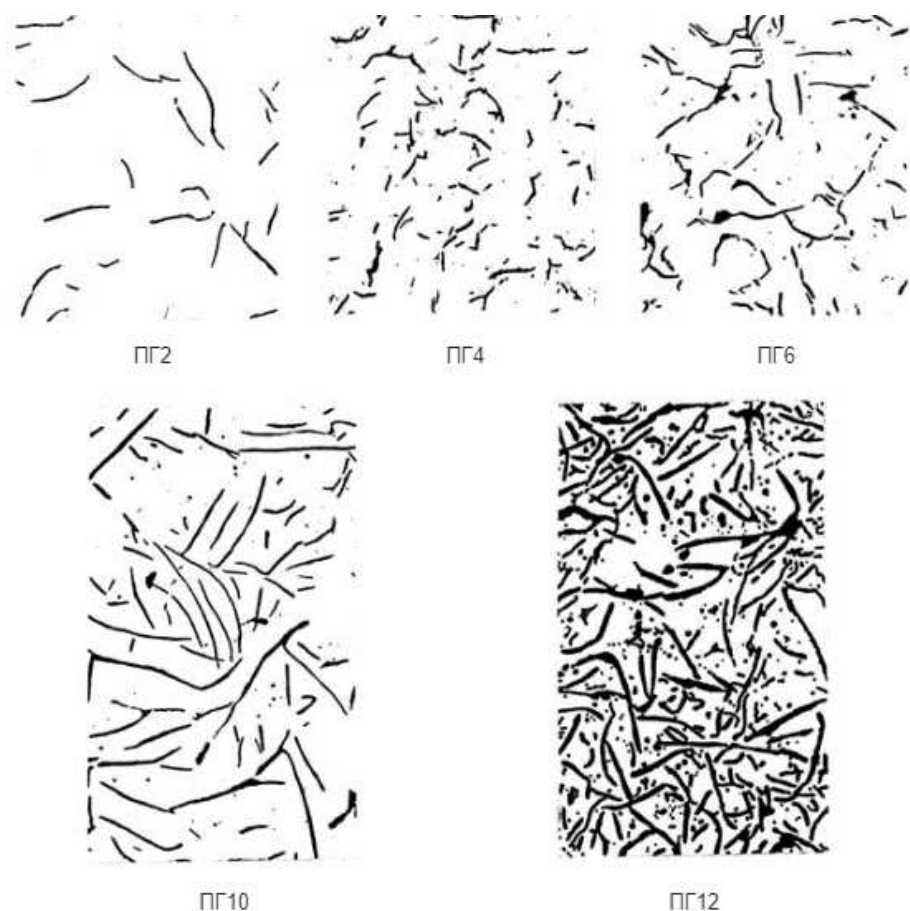


Рисунок 9– Количество включений графита [17]

1.7 Патентный поиск

Патентный поиск по теме «Износостойкие чугуны» проводили для того чтобы ознакомиться с уже имеющимися результатами исследований по нашей теме. Результаты патентного поиска представлены в таблице 6.

Таблица 6– результаты патентного поиска

№	Номер документа	Дата публикации	Название
1	2272086	20.03.2006	Износостойкий чугун «1»
2	2212467	20.09.2003	Антифрикционный чугун «1»
3	2384641	20.03.2010	Износостойкий чугун «2»
4	2699343	04.09.2019	Чугун
5	2409690	20.01.2011	Антифрикционный чугун «2»
6	2401316	10.10.2010	Износостойкий чугун «3»

В качестве примера ниже приведен один из рассматриваемых патентов.

(57) Реферат:

Изобретения относится к металлургии, в частности к легированным чугунам. Может использоваться для изготовления деталей, работающих в условиях интенсивного изнашивания при высоких температурах до 900°C, например валков горячей прокатки, бандажей и роликов проволочных и ленточных станов и др. Чугун содержит, мас. %: углерод 2,8-3,2; кремний 0,2-0,6; марганец 0,2-0,6; хром 20,0-26,0; молибден 0,8-1,2; титан 0,2-0,4; ванадий 3,5-4,2; медь 0,5-0,8; бор 0,01-0,03; вольфрам 1,8-2,2; железо - остальное. Техническим результатом является повышение износостойкости, жаростойкости и теплостойкости.

Известен чугун, содержащий углерод, кремний, марганец, хром, ванадий, молибден, алюминий, кальций, церий, иттрий и железо при следующем соотношении компонентов, мас. %:

Углерод	2,00-3,50
Кремний	0,80-1,00
Марганец	0,30-0,60
Хром	12,0-20,0
Ванадий	3,20-4,00
Молибден	0,50-0,90
Алюминий	0,05-0,15
Кальций	0,001-0,05
Церий	0,11-0,20
Иттрий	0,05-0,09
Железо	остальное

(см. авт.св. СССР №1280039; С 22 С 37/10).

Недостатком известного чугуна являются низкие тепло-, жаро-, износостойкие свойства, так как он содержит редкоземельные металлы,

которые образуют неметаллические включения (оксиды, сульфиды, оксисульфиды и др.) с высокой плотностью, трудноудаляемые из расплава. Кроме того, при охлаждении уже твердого чугуна кристаллические оксисульфиды РЗМ (например, церия) вследствие уменьшения растворимости расстекловываются, приобретают остроугольную форму, что также приводит к снижению свойств деталей.

Наиболее близким аналогом к заявляемому чугуну является износостойкий чугун, используемый для изготовления деталей, работающих в условиях абразивного износа, содержащий следующие компоненты, мас. %:

Углерод	2,2-3,6
Кремний	0,5-1,5
Марганец	3,0-4,0
Хром	13,0-24,0
Молибден	0,3-0,4
Титан	0,2-0,4
Ванадий	6,5-9,0
Медь	1,0-1,5
Бор	0,005-0,02

(см., авт.св. СССР №1425245, С 22 С 37/10).

Чугун не обладает достаточной износостойкостью из-за высокого содержания марганца, который приводит к снижению точки начала мартенситного превращения. При этом стабильность и количество остаточного аустенита возрастают, а износостойкость и твердость снижаются. Кроме того, пониженное содержание молибдена и хрома и высокое содержание кремния, углерода, ванадия уменьшает прокаливаемость чугуна, приводит к образованию крупных заэвтектических карбидов и обеднению металлической основы легирующими элементами, что снижает устойчивость чугуна к высокотемпературному абразивному изнашиванию, тепло- и жаростойкость.

В основу изобретения поставлена задача - разработать состав чугуна, обладающего одновременно комплексом высоких технических свойств: износостойкостью, жаростойкостью, теплостойкостью.

Поставленная задача решается тем, что известный чугун, содержащий углерод, кремний, марганец, хром, молибден, титан, ванадий, медь, бор и железо, согласно изобретению дополнительно содержит вольфрам при следующем соотношении компонентов, мас. %:

Углерод	2,8-3,2
Кремний	0,2-0,6
Марганец	0,2-0,6
Хром	20,0-26,0
Молибден	0,8-1,2
Титан	0,2-0,4
Ванадий	3,5-4,2
Медь	0,5-0,8
Бор	0,01-0,03
Вольфрам	1,8-2,2

Известно применение вольфрама в чугунах в качестве легирующего элемента (См. Ри Хосен, Ри Э.Х. Комплексно-легируемые чугуны специального назначения. - Владивосток: Дальнаука, 2000 г., 287 с.).

В заявляемом чугуне вольфрам, также, как и в известном чугуне, предназначен для легирования. Однако наравне с известным техническим свойством вольфрам проявляет новое техническое свойство, заключающееся в обеспечении чугуна требуемой тепло-, жаро-, износостойкости за счет комплексного воздействия на его структуру: инвертирующее, твердорастворное, композиционное и дисперсионное упрочнение.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для специалиста заявляемый чугун не следует явным образом из известного

уровня техники, а, следовательно, соответствует условию патентоспособности "изобретательский уровень".

Введение вольфрама (W) в заявляемый чугун в количестве 1,8-2,2 мас.% придает чугуно комплекс высоких технических свойств: тепло- и жаростойкость при одновременном повышении износостойкости. Это обеспечивается за счет того, что в чугуне вольфрам легирует металлическую матрицу и образует сложные, устойчивые карбиды типа M_6C , содержащие, кроме вольфрама, молибден, хром, ванадий. Вольфрам, молибден, ванадий при совместном присутствии в чугуне в заявляемых количествах затрудняют распад мартенсита, обеспечивая высокие тепло- и жаростойкость. Одновременно с этим нерастворенная часть карбида M_6C приводит к повышению износостойкости чугуна. Наличие в чугуне вольфрама в количестве более 2,2 мас.% приводит к ухудшению его теплопроводности, а следовательно, к увеличению склонности отливок к образованию горячих и холодных трещин, а также карбидной неоднородности. При содержании вольфрама менее 1,8 мас.% снижаются тепло- и жаростойкость чугуна.

Введение в чугун углерода (C) в заявляемом количестве обеспечивает образование карбидов типа M_7C_3 , которые способствуют повышению износостойкости чугуна. Введение в чугун углерода в количестве менее 2,8 мас.% приводит к увеличению доли первичного аустенита, а в количестве более 3,2 мас.% приводит к уменьшению содержания легирующих компонентов в твердом растворе, нарушению однородности литой структуры за счет выделения крупных разветвленных карбидов. И то, и другое отрицательно сказывается на свойствах чугуна.

Кремний (Si) в заявляемом количестве, являясь технологической добавкой, распределяется при кристаллизации между аустенитом и эвтектическим расплавом, улучшает жидкотекучесть чугуна. Содержание кремния в количестве менее 0,2 мас.% не обеспечивает достаточной жидкотекучести чугуна, а более 0,6 мас.% снижает прокаливаемость,

увеличивает верхнюю критическую скорость отбеливания чугуна, уменьшая его отбеливаемость, а также приводит к увеличению хрупкости отливок.

Марганец (Mn) в заявляемом количестве повышает прокаливаемость и жаростойкость чугуна. Увеличение содержания марганца более 0,6 мас.% приводит к понижению точки начала мартенситного превращения и возрастанию стабильности остаточного аустенита, обеднению металлической основы чугунов углеродом и хромом, что снижает тепло-, жаро- и абразивостойкость. При содержании марганца менее 0,2 мас.% снижаются прокаливаемость и жаростойкость чугуна.

Хром (Cr) в заявляемом количестве необходим для образования комплексных карбидов типа $(Fe,Cr)_7C_3$, придающих чугуну максимальную износостойкость. При содержании хрома менее 20 мас.% в структуре чугуна образуются наряду с карбидами $(Fe,Cr)_7C_3$ карбиды $(Fe,Cr)_3C$, что снижает тепло-, жаро-, износостойкость чугуна. При содержании хрома более 26 мас.% в структуре чугуна появляются крупные и хрупкие карбиды типа $(Fe,Cr)_{23}C_6$, что приводит к снижению тепло-, жаро-, износостойких свойств. Кроме этого, увеличивается общая доля крупных первичных карбидов, что также приводит к снижению указанных свойств.

Титан (Ti) в заявляемом количестве способствует измельчению зерна, устраняет столбчатое строение отливок, модифицирует чугун, что позволяет получать однородные механические свойства по толщине отливок. Кроме того, титан способствует образованию эвтектоида с достаточно высокой твердостью и исключению цементитной эвтектики. Совокупность этих факторов приводит к увеличению вязкости чугуна и уменьшению выкрашивания эвтектики в процессе изнашивания. Влияние титана на свойства чугуна более эффективно при введении его совместно с ванадием, молибденом, бором.

При содержании титана менее 0,2 мас.% износостойкость чугуна будет незначительной, так как невелико количество карбидов TiC. При содержании

титана свыше 0,4 мас.% в чугуна образуются карбонитриды титана и пленочные включения оксидов больших размеров, которые располагаются по границам аустенитных зерен, что снижает износостойкость и жидкотекучесть чугуна.

Легирование чугуна медью снижает необходимое (критическое) содержание ванадия в чугуна, обеспечивающее инверсию микроструктуры, что способствует полному устранению ледебурита. Медь также активно влияет на структурообразование отливок после затвердевания. Изменением условий охлаждения и содержания меди можно регулировать структуру основы чугуна от перлитной до мартенситно-аустенитной с различным количественным соотношением фаз и морфологию карбидной фазы. Увеличение скорости охлаждения при затвердевании (залитка в кокиль, изменение толщины стенки отливки и т.п.) данного чугуна с медью изменяет размеры и форму карбидов. Карбиды становятся менее разветвленными, увеличивается их дисперсность, а также измельчается эвтектика.

Введение меди в количестве 0,5-0,8 мас.% в заявляемый чугун устраняет продукты перлитного распада в литой структуре, повышает износо-, тепло- и химическую стойкость, прокаливаемость, теплопроводность. При введении в чугун меди в количестве менее 0,5 мас.% повышение указанных свойств не наблюдается, а увеличение количества меди свыше 0,8 мас.% приводит к появлению в структуре полей, обогащенных медью, что снижает износостойкость и жаростойкость чугуна.

Бор (В) в количестве (0,01-0,03%), являясь поверхностно-активным элементом, упрочняет и стабилизирует границы зерен, замедляет рост кристаллов, способствуя измельчению структуры, что повышает износостойкость чугуна в условиях абразивного износа и высоких температур.

Присадка бора меньше 0,01 мас.% малоэффективна, а больше 0,03 мас.% приводит к охрупчиванию вследствие выделения гексаборидов, образованию

термических трещин, огрублению структуры и, следовательно, снижению свойств чугуна.

Молибден (Mo) в заявляемом количестве оказывает легирующее и модифицируемое воздействие на структуру чугуна, увеличивает его прокаливаемость и закаливаемость. Легирует твердый раствор, что повышает стабильность структуры в условиях эксплуатации и его износо-, тепло-, жаростойкость. Молибден повышает жаростойкость чугуна за счет увеличения содержания хрома в твердом растворе. Вводить молибден в чугун в количествах, выходящих за заявляемые пределы, нецелесообразно. Введение в чугун молибдена в количестве менее 0,2 мас.% неэффективно. При содержании молибдена более 1,2 мас.% возрастает склонность к отдельной кристаллизации эвтектических фаз и образованию конгломератных структур.

Ванадий (V) в заявляемом количестве образует с углеродом специальные карбиды типа VC с высокой микротвердостью (HV 3000). Кроме того, в структуре чугуна заявляемого химического состава образуются два вида ванадиевых эвтектик: двойная аустенитно-ванадиево-карбидная и тройная аустенитно-хромованадиево-карбидная, которые, являясь композиционными упрочнителями, значительно повышают тепло- и жаростойкие свойства чугуна и износостойкость.

При содержании ванадия менее 3,5 мас.% доля эвтектик в структуре чугуна уменьшается, что снижает указанные выше свойства, а при содержании ванадия более 4,2 мас.% наблюдается его переизбыток, который препятствует приросту свойств чугуна, а также способствует выделению крупных конгломератов карбидов.

Пример. В индукционной тигельной печи емкостью 60 кг с основной футеровкой выплавляли опытные составы заявляемого чугуна (составы №1-5, табл.1) и чугуна, взятого за прототип (составы №6, 7, табл.№1), по общепринятой технологии. Титан, бор, ванадий, хром, вольфрам, медь, молибден вводили в чугун в виде ферротитана ФТи 35, ферробора ФБи 20,

феррованадия ФВд 38, феррохрома ФХ 72, ферровольфрама ФВ 65, меди М1, ферромolibдена ФМ 65.

Износостойкость определяли согласно ГОСТ 23.208-79. Износостойкость исследуемых образцов оценивали путем сравнения их износа с износом эталонного образца. В качестве эталона использовали сталь 45.

Для определения теплостойкости чугуна проводили 4-х часовой нагрев образцов при температуре 650, 680, 710°C в соляной ванне, после чего измеряли твердость по Роквеллу (HRC.)

Жаростойкость оценивали по ГОСТ 6130-71 после выдержки в печи в течение заданного времени (100 ч) при постоянной температуре (900°C) весовым методом по увеличению массы образца.

Результаты испытаний образцов, изготовленных из заявляемого чугуна (составы №1-5) и чугуна, взятого за прототип (составы №6 и 7), приведены в таблице №2.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что заявляемый чугун по сравнению с прототипом имеет в среднем:

- на 36,8% выше износостойкость;
- на 21,8% выше жаростойкость;
- на 17,8% выше теплостойкость при 650°C, на 28,4% - при 680°C, на 19,0% - при 710°C.

Использовать составы чугунов с содержанием компонентов, выходящих за заявляемые пределы (состав №1 и 5), нецелесообразно, так как в этих случаях у чугунов наблюдается снижение вышеуказанных свойств. [18]

1.8 Применение износостойких чугунов

Изделия из износостойких высокохромистых чугунов (ИЧХ) эксплуатируются в условиях гидроабразивного изнашивания в коррозионных средах с рН 3–12.

Многие детали оборудования горнодобывающей и металлургической промышленности (насосы, запорная арматура, трубопроводы и другие механизмы) работают в условиях интенсивного абразивного изнашивания и гидроабразивного изнашивания. Большая доля этих деталей изготавливается из белых чугунов типа С-Fe-Cr-Mn-Ni в различных их сочетаниях.

Области применения хромистых ИБЧ приведены в таблице– 7.

Таблица 7– Применение деталей из хромистых чугунов [5]

Назначение	Оборудование	Детали
1	2	3
Горнодобывающая промышленность		
Обогащение руд черных и цветных металлов, угля, сырья для химической промышленности и минеральных удобрений	Стержневые и шаровые рудоразмольные мельницы	Футеровки барабана, торцевых крышек, черпаки питателей, загрузочные патрубки и разгрузочные воронки, шары
	Песковые и шламовые насосы	Рабочие колеса, бронедиски, корпуса, всасывающие и напорные патрубки
	Системы конвейер. транспортировки	Течки желобов, футеровки бортов питателей, отбойные стенки
	Гидроциклоны	Насадки, конуса, спиральные корпуса
	Гидротранспорт	Трубы, колена
	Спиральные классификаторы	Монолитные и комбинированные футеровки спиралей
	Сушилки для концентрата	Насадки
Горнодобывающая промышленность		
Открытая добыча полезных ископаемых	Карьерные экскаваторы	Комбинированные футеровки передних стенок, днища механизма закрывания ковшей, отбойные стенки дробилок, приемные течки роторных экскаваторов
	Карьерные автосамосвалы	Комбинированные футеровки днища кузова
	Промышленные тракторы	Кольца торцевых уплотнений
Металлургия		

Производство кокса, агломерата и окатышей	Обжиговые машины и коксовые батареи	Футеровки бункеров и желобов, приемные течки
	Хоппера	Футеровки
	Дробилки	Валки и сегменты
Производство чугуна	Доменная печь	Футеровки конусов загрузочного аппарата, скипов, бункеров на рудном дворе

Продолжение таблицы–7

Прокатное производство	Прокатный стан	Рабочие валки, проводки, ролики, направляющие, детали насосов для удаления окалины
Литейное производство	Копер	Шары для разделки скрапа
	Очистные камеры	Лопатки и турбинки дробеметных аппаратов, футеровки и отражательные плиты
	Пескометы	Ковши
	Бегуны, смесители	Ножи, плуги, лопатки, бегуны
Строительная индустрия		
Производство цемента	Мельницы для размола клинкера и сырья	Футеровки барабана, межкамерные перегородки, шары, цельпессы
	Шламовые насосы	Рабочие колеса, бронедиски, корпуса
Гидротранспорт и классифик. строительных материалов	Землесосы	Рабочие колеса, бронедиски, корпуса, колена, патрубки
	Гидроциклоны	Конуса, насадки
	Промывочные машины	Сегменты классификаторов, ножи мешалок
Производство бетона	Смесители	Лопатки, желоба, ножи, уплотнительные кольца
	Штампы	Защитные втулки пустотообразователей
Энергетика		
Приготовление твердого топлива	Углеразмольные мельницы	Футеровки, шары, течи, бандажи валков, плиты стола
Удаление золы из котлов тепловых электростанций	Шнеки	Футеровки корпуса, футеровки витков шнека
	Шламовые насосы	Рабочие колеса бронедиски, корпуса
	Дымососы	Футеровки, гибы пылепроводов

2 Методическая часть

2.1 Исходный материал

Для проведения исследования были использованы образцы детали из чугуна, которая вышла из строя на одном из промышленных предприятий.

2.2 Методика приготовления микрошлифов

Микрошлифом называют специально подготовленный образец металла, поверхность которого приготовлена для микроанализа. В зависимости от цели исследования, формы исследуемой детали выбирают место вырезки образца. На вырезанном образце выравнивают поверхность до состояния плоскости, которая будет использоваться для микроанализа. Если исследуемый материал мягкий, то поверхность получают опиливанием напильником, а если твердый, то затачивают на абразивном круге.

Шлифование начинают на бумаге с крупным абразивным зерном, постепенно переходя на бумагу с более мелким зерном. Поверхность образца выравнивали на шлифовальном круге так, чтобы края образца не сминались и не было завалов, затем шлифовали наждачной бумагой, нескольких размеров ГОСТ 1766 - 78 с последовательно уменьшающейся зернистостью. Перед каждой сменой наждачной бумаги образец тщательно промывается проточной водой до полного устранения абразивных частиц. При шлифовании образец поворачивали на 90^0 по отношению к предыдущему положению, для того чтобы риски при последующей обработке получались перпендикулярно к рискам от предыдущей обработки. Шлифы изготавливали в поперечном и продольном сечении образца. Шлифование заканчивается в тот момент, когда на поверхности шлифа не будет рисков от шлифовальной бумаги.

Механическое шлифование выполняется на специальных автоматизированных шлифовально-полировальных станках Saphir 520 (рис.

10), Germany и расходных материалах фирмы Lam Plan, France по методикам, предоставленным ООО «Митэла».



Рисунок 10 – Шлифовально - полировальный станок Saphir 520

Методика механического шлифования аналогична методике ручного шлифования. Это значит, нельзя переходить с крупнозернистой бумаги сразу на мелкозернистую. В этом случае грубые риски полностью не устранятся. При шлифовании не нужно сильно прижимать на образец, иначе это может вызвать серьезный нагрев шлифуемой поверхности и внедрение абразивных зерен в металл, в результате чего на микрошлифе будут видны черные точки.

В процессе шлифования на абразивный круг должна постоянно поступать вода для охлаждения образца и удаления абразивных частиц [22].

2.3 Полирование образцов

После завершения процесса шлифования наступает следующая стадия подготовки – полировка. Суть данного процесса состоит в получении ровной

зеркальной поверхности образца, то есть данная поверхность не должна иметь риски, царапин, следов травления. Механическое полирование проводят на тех же станках, что и шлифование поверхности образцов. К вращающемуся кругу, покрытому фетром или сукном, прижимают шлифованной поверхностью образец и в процессе шлифования поворачивают. Необходимо постоянно смачивать вращающийся круг водой, чтобы поверхность образца не перегревалась. Для более качественного полирования образец не следует сильно прижимать к сукну, так как при этом, хотя и ускоряется удаление рисков, но происходит деформирование поверхностного слоя и искажение структуры. Сильный нажим на образец так же приводит к быстрому выдавливанию полировальной жидкости и к возможному пригоранию поверхности. Окончательной стадией полировки является промывка образца водой и дополнительное протирание ватой полированной, затем образец дополнительно просушивают фильтровальной бумагой или протирают сухой ватой [22].

2.4 Металлографический анализ

В данной работе металлографический анализ образцов проводили с использованием оптического микроскопа производства компании Carl Zeiss модель Observer.D1m (рис. 11) при увеличении X100, X500 крат.

Микроструктуру чугуна изучали в нетравленном состоянии.

Под металлографическим анализом подразумевают изучение микроструктуры металлов и сплавов, а также их макроструктуры в условиях металлографической лаборатории при помощи специального оборудования, приспособлений и по специализированным методикам.

Основным инструментом металлографического анализа является металлографический микроскоп. В настоящее время существует большой

выбор специализированных металлографических микроскопов, ориентированных на те или иные производственные условия. Кроме того, получили широкое распространение полуавтоматические системы металлографического анализа изображений, включающие в себя цифровую [22].



Рисунок 11 – Оптический микроскоп Carl Zeiss Observer.D1m

Снимки микроструктуры получили с экрана монитора, соединенного с микроскопом посредством фотокамеры.

2.5 Сравнение с ГОСТ

Полученные снимки микроструктур оценивали с помощью программы Siams и ГОСТ 3443–87 Отливки из чугуна с различной формой графита.

Визуальное сравнение микроструктур с ГОСТ проводили для того, чтобы определить:

- 1) Форму включений графита;
- 2) Длину включений графита;
- 3) Распределение включений графита;
- 4) Количество включений графита.

Зная все эти параметры мы можем наиболее точно оценить микроструктуру исследуемых образцов чугуна.

2.6 Измерение микротвердости

При помощи метода измерения твердости и микротвердости оценивали твердость образцов из чугуна, на приготовленных металлографических шлифах. Метод микротвердости стандартизован по (ГОСТ 9450-76) [19].

После исследования микроструктуры на образцах измерили микротвердость, используя микротвердомер марки DM8, при нагрузке 200 кгс (рис. 12).



Рисунок 12 – Цифровой микротвердомер DM8

Схема микротвердомера DM8 представлена на рисунке 13

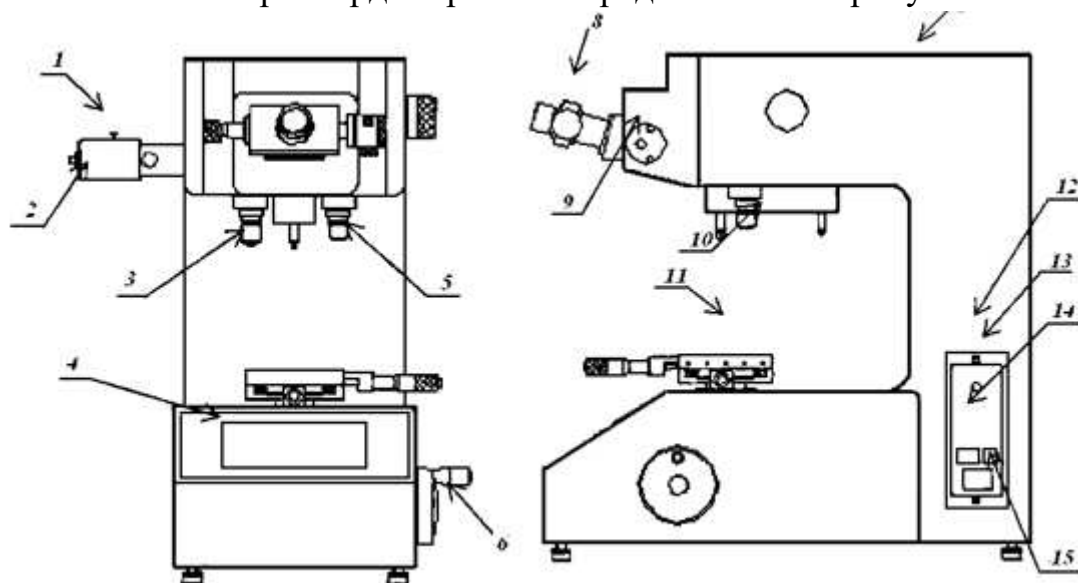


Рисунок 13 – Схема микротвердомера DM8; 1 – регулировочный болт; 2 – корпус лампы; 3 – линза А ($\times 40$); 4 – панель управления; 5 – линза D ($\times 10$); 6 – рукоятка перемещения столика; 7 – верхняя крышка; 8 – электронный измерительный микроскоп; 9 - рукоятка выбора нагрузки; 10 – револьверное устройство; 11 - измерительный столик; 12 – боковая панель; 13 – лампа включения; 14 – источник питания; 15 – вход.

Порядок работы на приборе:

- Включите прибор, на панели управления появится главное меню
- Выберите метод измерения (HV).
- Поверните револьверное устройство таким образом, чтобы линза А заняла переднюю позицию.
- Разместите блок на измерительном столике и вращайте рукоятку перемещения столика до достаточного приближения образца к линзе (0,5 мм). Поверхность образца должна быть строго перпендикулярна оси вдавливания индентора.
 - Посмотрите в микроскоп и отрегулируйте интенсивность освещения при помощи «Up key» и «Down key».
 - Путём вращения подстройте окуляр под свои глаза.
 - Сфокусируйтесь на блоке. Никогда не поднимайте столик, глядя в окуляр, так как существует вероятность повреждения линзы. После фокусировки можете повернуть рукоятку вверх и вниз для небольшой регулировки. Если фокусировка неправильно произведена, повторите пункт 4.
 - После правильной фокусировки поместите измеряемый образец в центр видимого поля.
 - Установите нагрузку с помощью рукоятки выбора нагрузки.
 - Нажмите «Start key», кнопка загорается и подаётся нагрузка.

Если кнопка «Start key» нажата в позиции линзы, то револьверное устройство автоматически устанавливает индентор и подаётся нагрузка.

Во время измерения исключите различного рода вибрации.

Никогда не поворачивайте револьверное устройство во время работы. Это может привести к неисправности микротестера.

- Когда «START» перестаёт мерцать, револьверное устройство автоматически устанавливает линзу.

- Через электронный микроскоп Вы можете видеть отпечаток. Снова сфокусируйтесь. Фокусируйтесь на 4 границах, не на центре отпечатка.
- При помощи кнопки сведите измерительные линии вместе так, чтобы они не перекрывали друг друга.
- Нажмите на дисплее ZERO. Диагональ $D1$ становится «0,0».
- Немного разделите линии, так, чтобы был виден отпечаток.
- Поверните левую ручку микроскопа и передвигайте левую измерительную линию до тех пор, пока она не достигнет края отпечатка.
- Тоже проделайте с правой границей.
- Нажмите «READ». На дисплее отобразится длина диагонали $D1$. Поверните микроскоп на 90° и измерьте длину по вертикали. То же самое проделайте по вертикали
- Нажмите «READ». На дисплее отобразится длина диагонали $D2$.
- Полученное значение микротвёрдости HV отобразится на дисплее.

Меры предосторожности

Использование грязного индентора может привести к получению нечётких отпечатков либо к невозможности проведения измерений.

Необходимо убрать грязь чистой тряпочкой или аппликатором. С образца также необходимо удалить грязь и пыль. [20]

Универсальный стационарный твердомер (рис. 14) – это прибор, используемый для определения твердости разных материалов. Такие твердомеры имеют возможность измерения по нескольким методам твердости. Основная классификация универсальных твердомеров касается методов измерения твердости, лежащих в основе работы оборудования, а также шкал отображения полученных данных [21].



Рисунок 14 Твердомер EMCO TEST [21]

Измерения проводятся по шкалам Бринелля согласно стандартам EN ISO 6506, ASTM E-10, ГОСТ 8.062-85 и ГОСТ 9012-59, по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла согласно стандартам EN ISO 6508, ASTM E-18, ГОСТ 8.064-94, ГОСТ 9013-59, ГОСТ 22975-78, по шкалам Виккерса согласно стандартам EN ISO 6507, ASTM E-92, ASTM E-384, ГОСТ 8.063-2007, ГОСТ 9450-76, ГОСТ Р ИСО 6507-1-200

Закключение

1. Учитывая, что скорость охлаждения чугуна по сечению отливки постепенно замедляется от периферии к центру, то в наружных зонах наблюдается мелкий графит, располагающийся тем глубже, чем больше скорость охлаждения. Поскольку с увеличением толщины стенки отливки (до 75 мм) уменьшается влияние теплопроводности покрытия на структуру поверхности отливки, величина поверхностного слоя снижается.

2. В результате измерения микротвердости выяснили, что у всех образцов прослеживается тенденция к уменьшению микротвердости от периферии к центру. Наибольшее среднее значение микротвердости наблюдается в образце №7, это свидетельствует о том, что покрытие ГЛС-2+ГЛС-2А, используемое для этого образца, положительно влияет на микротвердость исследуемого чугуна СЧ20.

3. Таким образом, водное графито-бентонитовое покрытие для чугунного литья на активированных графитах имеет улучшенные технологические и эксплуатационные свойства (снижается расход твердых компонентов, обеспечивается возможность оптимизации глубины проникающего и толщины покровного слоев для каждой конкретной формы или стержня, уменьшается себестоимость покрытия).

4. Основываясь на результатах исследования структур образцов в программе Siams, выяснили, что форма включений пластинчатого графита почти не изменяется от образца к образцу, а распределение включений пластинчатого графита в образце №6 равномерней всего. Наибольшая площадь, занятая графитом, наблюдается в образце №7, что может свидетельствовать о наибольшей износостойкости среди исследуемых образцов, т.к. графит обеспечивает чугунам хорошие антифрикционные свойства и играет роль смазки в парах трения. Так же в образце №7 длина

включений графита меньше, чем у остальных образцов, отсюда следует, что скорость кристаллизации в этом образце была самой высокой.

Список использованной литературы

1. Чугун: материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D1%83%D0%B3%D1%83%D0%BD>
2. Цыпин, И. И. Белые износостойкие чугуны: учебное пособие/ И. И. Цыпин. – Москва: Металлургия, 1983. –176 с.
3. Чугун. История: материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: <https://wikipedia.tel/%D0%A7%D1%83%D0%B3%D1%83%D0%BD#%D0%98%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F>
4. Диаграмма состояния Fe–Fe₃C: материал из Studfiles – файлового архива студентов. URL: <https://studfile.net/preview/4202637/>
5. Гарбер, М. Е. Отливки из белых износостойких чугунов: учебное пособие/ М. Е. Гарбер. – Москва: Машиностроение, 1972.
6. Цыпин, И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства: учебное пособие/ И. И. Цыпин. – Москва: Металлургия, 1983.
7. Капустин, М. А., Оптимизация химического состава износостойкого чугуна для литых мелющих шаров/ М. А. Капустин., И. А. Шестаков // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні . 1999 . № 2 . С. 32–33 .
8. Герек, А. Легированный чугун – конструкционный материал: учебник / А. Герек, Л. Байка – Москва.: Металлургия, 1978.
9. Бунин, К. П. Основы металлографии чугуна: учебное пособие для вузов / К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. – Москва.: Металлургия, 1969.
10. Волчок, И. П., Нетребко В. В. Влияние марганца на процессы структурообразования износостойких высокохромистых чугунов // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. 2012. Вып. 64. С. 301–304.
11. Belikov, S., Volchok I., Netrebko V. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron // Archives of Metallurgy and Materials. 2013. Vol. 58 . N 3. P. 895–897.
12. Чейлях, А. П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии: учебное пособие/ А. П. Чейлях. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2003.
13. Кубашевски, О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа: справ. изд./ О. Кубашевски / Пер. с англ. – Москва.: Металлургия, 1985.
14. Нетребко, В. В. Особенности легирования белых износостойких чугунов: учебник/ В. В. Нетребко. – Харьков: Запорожский национальный технический университет. 2014.

15. ГОСТ 7769–82 Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки (с Изменением N 1). – Введ. 01.01.1983. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004.

16. Марукович, Е. И. Исследование формирования в кокиле отливок из специальных износостойких чугунов для изготовления деталей центробежных дробилок / Е. И. Марукович, В. А. Пумпур, Г. П. Короткин, П. Ю. Дувалов // Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь», Жлобин, 21–22 октября 2015 г. С. 23–31.

17. ГОСТ 3443-87 Отливки из чугуна с различной формой графита. – Введ. 01.07.1988. – Москва: Стандартиформ, 2005.

18. Износостойкий чугун [Электронный ресурс]: Федеральный институт промышленной собственности – Режим доступа: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?index=1>

19. ГОСТ 9450-76 – Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – Введ. 01.01.1977. – Москва: Издательство стандартов, 1993.

20. Приборы для определения твердости [Электронный ресурс]: Микротвердомер AFFRI DM8 предназначен. – Режим доступа: <http://osk-pribor.ru/catalog/tverdometriya/tverdomery-AFFRI/tverdomer-po-mikrovikkersu-AFFRI-DM8.html>

21. Приборы для определения твердости [Электронный ресурс]: Универсальный стационарный твердомер. – Режим доступа: <https://www.melytec.ru/production/hardometer/universal/>

22. Материаловедение. Методы анализа структуры и свойств металлов и сплавов: учеб. пособие / Т. А. Орелкина, Е. С. Лопатина, Г. А. Меркулова, Т. Н. Дроздова, А. С. Надолько; под ред. Т. А. Орелкиной. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 214 с.

23. Сильман, Г. И. Чугуны. Рекомендации по выбору марки чугуна для литых деталей машин и оборудования: учеб. пособие/ Г. И. Сильман – Брянск, 1999.

24. Барановский, К. Э. Получение отливок из износостойких чугунов в комбинированных формах и кокилях/ К. Э. Барановский, В. М. Ильюшенко, П. Ю. Дувалов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы VI МНТК. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 14–16 сентября 2011 г. С. 18–22.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения
институт
Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.П. Жереб

подпись инициалы, фамилия

«10» июля 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры
поверхностных слоев серого чугуна СЧ20

тема

22.04.02 «Металлургия»

код и наименование направления

22.04.02.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

код и наименование магистерской программы

Руководитель

Таскин В.Ю.

подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

В. Ю. Таскин

инициалы, фамилия

Выпускник

Тонких А.А. 10.07.2020

подпись, дата

А. А. Тонких

инициалы, фамилия

Рецензент

Наумов С.Ю. 10.07.2020

подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

С. Ю. Наумов

инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Продолжение титульного листа МД по теме: Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры поверхностных слоев серого чугуна СЧ20

Консультанты по
разделам:

Литературный обзор
наименование раздела


подпись, дата 10.07.2020

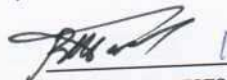
В. Ю. Таскин
инициалы, фамилия

Методическая часть
наименование раздела


подпись, дата 10.07.2020

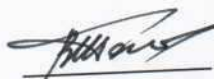
В. Ю. Таскин
инициалы, фамилия

Экспериментальная часть
наименование раздела


подпись, дата 10.07.2020

В. Ю. Таскин
инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата

В. Ю. Таскин
инициалы, фамилия

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения
институт
Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.П. Жереб

подпись инициалы, фамилия

« 10 » июля 2020 г.

Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры
поверхностных слоев серого чугуна СЧ20
наименование ВКР (МД)

22.04.02 «Металлургия»

наименование темы, код и наименование специальности (специализации), направления,

22.04.02.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»
магистерской программы

Научный руководитель/
руководитель

В.Ю. Таскин
подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук
должность, ученая степень

В. Ю. Таскин
инициалы, фамилия

Выпускник

А.А. Тонких
подпись, дата

А. А. Тонких
инициалы, фамилия

Рецензент

С.Б. Наумов
подпись, дата

09.07.20

Доцент, канд. техн. наук
должность, ученая степень

С.Б. Наумов
инициалы, фамилия

Консультанты:

Литературный обзор
наименование раздела

В.Ю. Таскин
подпись, дата

В. Ю. Таскин
инициалы, фамилия

Методическая часть
наименование раздела

В.Ю. Таскин
подпись, дата

В. Ю. Таскин
инициалы, фамилия

Экспериментальная часть
наименование раздела

В.Ю. Таскин
подпись, дата

В. Ю. Таскин
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

В.Ю. Таскин
подпись, дата

В. Ю. Таскин
инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения
институт
Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.П. Жереб

подпись инициалы, фамилия

« 17 » Жереб 2020 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Реферат

Магистерская диссертация по теме «Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры поверхностных слоев серого чугуна СЧ20» содержит 70 страниц текстового документа, 24 использованных источника, микроструктуры (в количестве 50 шт.), таблицы (в количестве 19 шт.), диаграммы (в количестве 9 шт.) фотографии оборудования (в количестве 4 шт.), приложения А (в количестве 1 шт.). Работа включает следующие главы: литературный обзор, методическая часть, экспериментальная часть, заключение.

Объектом исследования являются образцы серого чугуна СЧ20 с различным покрытием и скоростью кристаллизации.

Цель исследования магистерской диссертации: Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры поверхностных слоев серого чугуна СЧ20.

Металлографически показали, изменение структуры образца в зависимости от толщины стенки и выбранного модификатора. Доказали, что с увеличением толщины стенки отливки (до 75 мм) уменьшается влияние теплопроводности покрытия на структуру поверхности отливки, а величина поверхностного слоя снижается.

Ключевые слова: ЧУГУН, МИКРОСТРУКТУРА, МИКРОТВЕРДОСТЬ, СКОРОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ.

Магистерская диссертация – 72 страниц, изъято – 66 страниц.