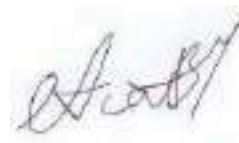


На правах рукописи



ТАХИРОВ Асиф Ашур оглы

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ
СРЕДНЕЛЕГИРОВАННОГО ХРОМНИКЕЛЕВОГО ЧУГУНА И
ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК
С ПОВЫШЕННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ**

Специальность: 05.16.04 – Литейное производство

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации
Акционерном обществе «Научно-производственное объединение «Центральный научно-
исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

Гущин Николай Сафонович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор, Президент Российской
ассоциации литейщиков

Дибров Иван Андреевич

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Литейные
технологии и художественная
обработка металлов» НИТУ «МИСиС»

Матвеев Сергей Владимирович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский политехнический
университет» (ФГБОУ ВО);

Защита диссертации состоится «08» июня 2017 г. в 16 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 217.042.01, созданного при Акционерного общества «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ») по адресу: 115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4. малый конференц-зал (главный корпус, 2 этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке АО «НПО «ЦНИИТМАШ». Диссертация и автореферат размещены на официальном сайте АО «НПО «ЦНИИТМАШ») <http://www.цниитмаш.рф>. Текст автореферата и объявление о защите размещены на официальном сайте Министерства образования и науки Российской Федерации по адресу: <http://vak.ed.gov.ru/>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просьба направлять по адресу: 115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4, диссертационный совет Д 217.042.01.

Копии отзыва можно направлять по e-mail: lenmark@inbox.ru

Автореферат разослан «___» апреля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 217.042.01, к. т. н.



Сафронов А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема модернизации и строительства новых современных автомобильных дорог в нашей стране остаётся весьма актуальной. В качестве покрытий дорог используют асфальт и бетон, которые изготавливают, как правило, на импортных стационарных или мобильных передвижных заводах.

Основными деталями смесеприготовительной системы асфальтобетонных заводов являются тонкостенные лопатки и бронефутеровки с толщиной стенки до 50 мм. Эти детали работают в условиях интенсивного абразивного износа в интервале температур 250-350°C. Их работоспособность определяет межремонтный период эксплуатации оборудования.

Быстроизнашивающиеся детали для смесеприготовительных систем импортных заводов изготавливают из высоколегированного белого хромоникелевого чугуна типа «Нихард-4», разработанного американской фирмой «International Nickel Company» (INC). В литом состоянии структура этого чугуна состоит из аустенита, а после термической обработки (нормализации) - из мартенсита. Карбидная фаза сформирована как из карбидов цементитного, так и тригонального типа. Промышленная эксплуатация смесеприготовительной системы импортных асфальтобетонных заводов, оснащенных лопатками и бронефутеровками из чугуна типа «Нихард-4» показала что, продолжительность ее эксплуатации составляет в среднем 9 месяцев.

Проблема увеличения срока службы быстроизнашиваемых деталей для смесеприготовительных систем и снижение себестоимости их изготовления является актуальной и имеет научную и практическую значимость.

Целью работы является разработка среднелегированного хромоникелевого чугуна и технологии изготовления износостойких тонкостенных деталей смесеприготовительного оборудования асфальтобетонных заводов, обеспечивающих увеличение межремонтного срока эксплуатации оборудования и снижения себестоимости изготовления отливок.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решались следующие основные задачи:

- разработка химического состава среднелегированного хромоникелевого чугуна для производства тонкостенных деталей смесеприготовительного оборудования асфальтобетонных заводов с высоким уровнем абразивной износостойкости, эксплуатируемых в интервале температур 250-350°C;
- исследование особенностей формирования структуры износостойкого среднелегированного хромоникелевого чугуна с учётом влияния микролегирующего комплекса (Al, Cu, V) на состав карбидной фазы и размер зерна;
- разработка эффективной технологии изготовления износостойких тонкостенных отливок из разработанного среднелегированного хромоникелевого чугуна;
- разработка нормативно-технической документации (НТД), регламентирующей промышленное изготовление износостойких тонкостенных деталей смесеприготовительного оборудования для производства асфальта и бетона.

Научная новизна работы определяется следующими основными положениями:

1. Выявлены закономерности кристаллизации и особенности формирования литой мартенситной структуры среднелегированного хромоникелевого чугуна и показано, что по мере увеличения содержания кремния в чугуне происходит изменение состава карбидной фазы за счет образования тригонального $(Cr, Fe)_7C_3$ карбида вместо карбида цементитного $(Fe, Cr)_3C$ типа.
2. Формирование эвтектики на базе карбида тригонального типа и выделение небольшого количества графита (до 1,5%) обеспечивают существенное снижение склонности затвердевающих тонкостенных отливок к возникновению термических напряжений и образованию трещин.
3. Определены закономерности комплексного влияния малых добавок Al, Cu и V (каждого

элемента в количестве 0,4 % от массы металла) на снижение «критического» содержания хрома с 9,0 до 3,4%, при котором формируются карбиды тригонального типа $(Cr, Fe)_7C_3$ в среднелегированном хромоникелевом чугуна. Выделение этих карбидов и обработка расплава малыми добавками Al, Cu и V и модификаторами на основе магния и церия позволяют уменьшить в 2-2,5 раз средний размер литого зерна металлической основы и включений карбидов в 5-10 раз.

4. На основе полученных данных и современных представлений о процессах кристаллизации эвтектических железо-углеродистых сплавов предложен экспериментально подтвержденный механизм формирования структуры среднелегированного хромоникелевого чугуна, заключающейся в том, что с повышением содержания кремния в расплаве (с 1,2 до 3,3%) его концентрация в кристаллизующемся аустените увеличивается (с 1,8 до 3,75%), а содержание углерода, наоборот, снижается (с 0,66 до 0,36%), что способствует в ходе последующей кристаллизации чугуна образованию карбидов тригонального типа и формированию при эвтектоидном превращении мартенсита. Эти факторы обеспечивают повышенную прочность, твердость и износостойкость отливок.

Новизна технических решений, разработанных на основе названных научных положений подтверждена патентами с участием автора на изобретения [RU 235366, RU 2384641, RU 2387729, RU 2511213], патент RU 2384641 стал победителем в номинации «100 лучших изобретений России», золотой медалью 14 Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД-2011», дипломом Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, дипломом за профессиональную презентацию продукции и услуг на выставке «Металлургия-Литмаш 2009» в составе коллектива авторов за создание нового поколения износостойких чугунов для изготовления высококачественных отливок различного назначения.

Практическая значимость работы:

1. Разработан износостойкий среднелегированный хромоникелевый чугун с пониженным содержанием хрома (3,4-4,5%) и никеля (3,8-4,2%), обладающий повышенной прочностью ($\sigma_{изг.}=850-1000 \text{ Н/мм}^2$) и твердостью (58-65 HRC), который защищен патентами РФ №2384641 от 2009 г.; №2387729 от 2009 г.; №2511213 от 2013 г.
2. Разработана и внедрена промышленная технология изготовления износостойких тонкостенных отливок из нового чугуна, эксплуатируемых в условиях абразивного износа при рабочих температурах 250-350°C, позволяющая исключить импорт этих деталей (Защищена патентом РФ №235366 от 2009 г.).
3. Производственные испытания в условиях дорожно-строительной организации ЗАО «Дорпрогресс - Егорьевск» показали, что срок службы деталей из нового чугуна в среднем 1,5 раза больше, чем зарубежных деталей. Продолжительность межремонтного периода эксплуатации оборудования увеличилась в среднем 1,5 раза, а себестоимость изготовления отливок снизилась на 40% (Производственные испытания подтверждены актом ЗАО «Дорпрогресс - Егорьевск» от 12.04.2014 г.).
4. Разработана техническая документация на изготовление тонкостенных отливок из среднелегированного хромоникелевого чугуна для смесеприготовительной системы асфальтобетонных заводов (ТУ 0812-10212179-2016 «Износостойкие отливки из хромоникелевого чугуна» от 12.01.2016 г. и Технологическая инструкция по выплавке хромоникелевого чугуна в индукционной печи ИСТ-016 от 21.04.2016 г.).

Апробация работы.

Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены:

- на II Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, 21-27 сентября, 2009 г.;
- на Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы обработки металлов и заготовительных производств». Комсомольск-на-Амуре, 27-30 сентября 2010 г.;

- на научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». Екатеринбург, 16-17 июня, 2011 г.;
- на II Международной конференции «Наука в Центральной России». Тамбов, 4-5 апрель, 2013 г.;
- на XI съезде литейщиков России, Екатеринбург, 16-20 сентября, 2013 г.;
- на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы машиностроения». Москва, 20-21 марта, 2014 г.;
- на XII съезде литейщиков России, Нижний Новгород, 7-11 сентября, 2015 г.;
- на VIII Международной научно-технической конференции «Прогрессивные литейные технологии». Москва, 16-20 ноября, 2015 г.;
- на Всероссийской научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития литейных технологии и оборудования в цифровую эпоху». Москва, 18 мая, 2016 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 9 публикаций в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также получены 4 патента РФ на изобретения.

На защиту выносятся:

1. Основные результаты исследований структуры и свойств нового износостойкого среднелегированного хромоникелевого чугуна для быстроизнашивающихся тонкостенных деталей смесеприготовительного оборудования асфальтобетонных заводов.
2. Условия получения высокой износостойкости среднелегированного хромоникелевого чугуна с учётом влияния микролегирующего комплекса Al, Cu, V на состав карбидной фазы и средний размер зерна.
3. Механизма формирования структуры и свойств износостойкого среднелегированного хромоникелевого чугуна в тонкостенных отливках.
4. Технология изготовления износостойких тонкостенных отливок из разработанного среднелегированного хромоникелевого чугуна для смесеприготовительного оборудования асфальтобетонных заводов.

Личный вклад автора заключается в постановке и решении задач, поставленных в данной работе, разработке методик, проведения экспериментов, анализ экспериментальных данных, позволивших обосновать основные положения научной новизны и практической значимости, а так же в непосредственном участии в внедрении результатов исследований при промышленном производстве износостойких тонкостенных отливок смесеприготовительного оборудования асфальтобетонных заводов.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современного экспериментального и исследовательского оборудования и методик исследований, проведением исследовательских и опытно-промышленных работ, анализа литературных данных и сопоставления полученных в работе результатов. Выводы основаны на современных теоретических представлениях металловедения и технологий литейного производства.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 116 стр. машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, заключения и выводов. Включает 45 рисунков и графиков, 24 таблиц, 4 приложения, библиографию из 112 наименований.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе выполнен анализ технической и патентной литературы по износостойким чугунам, дана оценка влияния легирующих элементов и методов модифицирования на структурообразование и свойства этих чугунов.

Анализ литературных данных показывает, что высокие значения механических и эксплуатационных свойств отливок из белых хромоникелевых чугунов достигаются, главным образом, за счет химического состава и термической обработки. Рассмотрено влияние легирующих элементов на формирование структурных составляющих белых хромоникелевых чугунов.

Сопоставлены данные о технологических особенностях хромоникелевых чугунов и закономерностях их абразивного изнашивания.

Несмотря на большое количество исследовательских работ, посвященных износостойким чугунам, в настоящее время нет обоснованных рекомендаций получения литой карбидно-мартенситной структуры в тонкостенных отливках из среднелегированного хромоникелевого чугуна.

Во второй главе приведена методика проведения исследований.

Для анализа химического состава и распределения элементов, определения механических свойств чугунов опытных и промышленных плавок использовали современную аппаратуру, имеющуюся в АО НПО «ЦНИИТМАШ» и других научно-исследовательских организациях, а также оригинальные методики изготовления образцов и проведение испытаний на износостойкость.

Влияние кремния на устойчивость аустенита при непрерывном охлаждении образцов со скоростью $4,0^{\circ}\text{C}$ в секунду ниже температуры 850°C проводили на термомагнитном анализаторе ТМА-2А.

Количественную оценку структурных составляющих хромоникелевого чугуна в ходе металлографического исследования осуществляли с помощью программного комплекса «Видео – Тест Структура 5.2».

Для определения абразивной износостойкости образцов исследуемого чугуна была специально разработана и изготовлена лабораторная установка. В качестве абразивного материала применяли сухой песок (формовочный) марки 2К20102 (ГОСТ 2138-91) и зеленый карбид кремния марки 64С (ГОСТ 26327-84). Относительную износостойкость рассчитывали, как отношение потерь массы испытуемого и эталонного образцов.

При исследовании влияния температуры выбивки отливок из литейной формы на образование в них термических трещин осуществляли следующим образом: исследуемые отливки извлекали из литейных форм, после заливки их расплавом, через каждые 2 минуты в интервале температур $920-700^{\circ}\text{C}$. Температуру поверхности отливки определяли с помощью пирометра TemPro-1200.

Третья глава посвящена разработке базового и оптимизации химического состава чугуна и исследованию влияния технологических факторов на структуру и свойства износостойкого среднелегированного хромоникелевого чугуна.

С целью оптимизации химического состава разрабатываемого хромоникелевого чугуна на основе данных технической литературы и производственного опыта был выбран базовый химический состав среднелегированного хромоникелевого чугуна по основным легирующим элементам (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав исследуемого хромоникелевого чугуна

Массовая доля элементов, %				
C	Si	Mn	Cr	Ni
2,4-3,5	2,0-2,5	0,4-0,6	3,0-6,0	3,0-5,0

Выплавка исследуемого хромоникелевого чугуна осуществлялась в индукционной тигельной печи типа ИСТ вместимостью 50 и 150 кг. Для проведения исследований отливали опытные отливки (плиты) размером 300 x 350 и толщиной 30 мм.

Для определения оптимального химического состава разрабатываемого чугуна использовали метод активного математического планирования эксперимента. Варьируемыми факторами являлись углерод, никель и хром. В качестве параметров (откликов) были приняты - твердость по Роквеллу (HRC) и предел прочности при изгибе ($\sigma_{изг}$, МПа). В результате было выведено уравнение регрессии, описывающее влияние химического состава на твердость хромоникелевого чугуна в литом состоянии, так как эта характеристика является сдаточной для износостойких отливок:

$$HRC = 54,75 - 1,25 [C] + 2,50 [Ni] + 0,75 [Cr]$$

На основании полученных результатов рекомендуется для практического применения следующий состав износостойкого среднелегированного хромоникелевого чугуна, %: углерод 2,3-2,5; хром 3,4-4,5; никель 3,8-4,2; кремний 2,2; марганец 0,6.

Исследовали влияние кремния на структуру хромоникелевого чугуна (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние содержания кремния в чугуне на среднее содержание углерода и кремния в аустените и распределение структурных составляющих

Номер образца, №№	Содержание, %			Площадь шлифа, занятая, %		
	В чугуне кремния	В аустените		Шаровидным графитом	Карбидной фазой	Металлической основой
		углерода	кремния			
1	1,2	0,66	1,79	нет	35,0	65,0
2	1,4	0,60	1,94	нет	33,5	66,5
3	2,0	0,45	2,49	0,6	31,0	68,4
4	2,2	0,42	2,72	1,2	28,0	70,8
5	2,5	0,40	2,97	1,7	26,0	72,3
6	3,3	0,36	3,74	2,3	23,0	74,7

Повышение содержания кремния от 1,2 до 3,3% в чугуне приводит к увеличению содержания кремния в аустените (рисунок 1), а содержание углерода, наоборот, снижается (рисунок 2). При этом температура превращения аустенита при охлаждении повышается от 80 до 520°C.

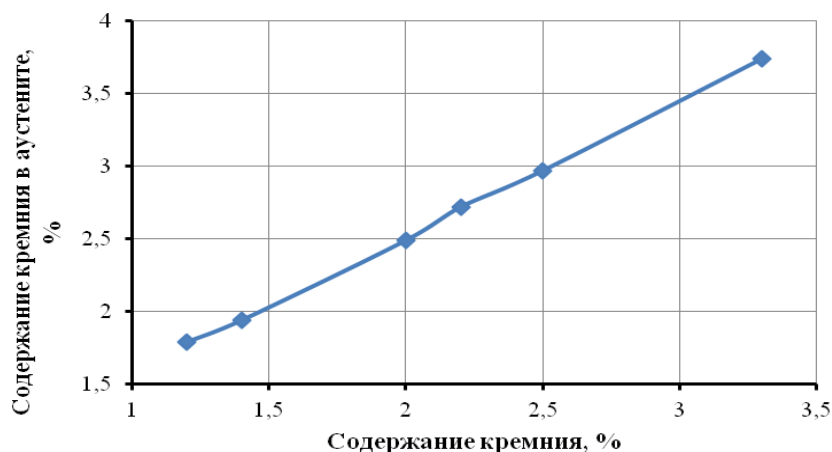


Рисунок 1. Влияние содержания кремния в хромоникелевом чугуне на содержание кремния в аустените

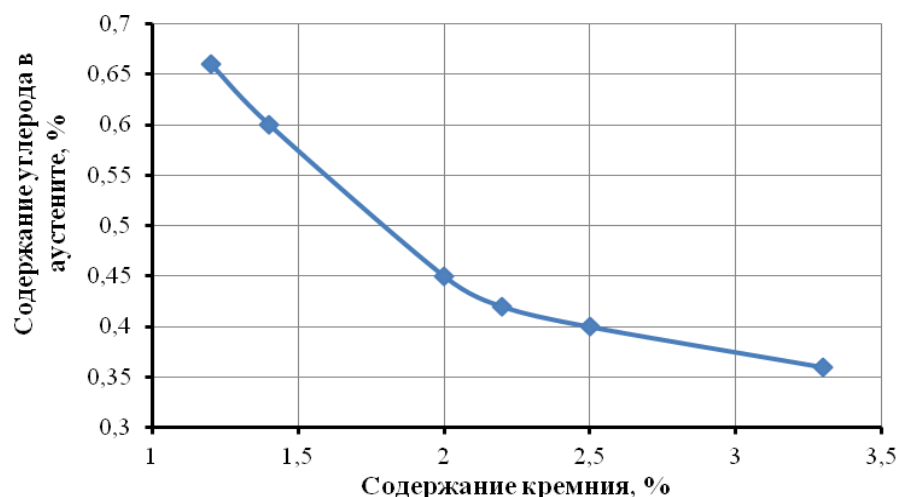


Рисунок 2. Влияние содержания кремния в хромоникелевом чугуна на содержание углерода в аустените

В результате этого в исследуемом чугуна в зависимости от содержания кремния происходит последовательное образование следующих структурных составляющих металлической основы: аустенит; мартенсит с остаточным аустенитом и включениями графита; перлит с включениями графита. При этом карбидная фаза состоит преимущественно из карбидов тригонального типа (таблица 3).

Таблица 3 – Влияние кремния на микроструктуру исследуемого чугуна

Содержание кремния в чугуна, %	Микроструктура металлической основы хромоникелевого чугуна					
	Номер образца №/№					
	1	2	3	4	5	6
1,2	A+K ₁ +K ₂	–	–	–	–	–
1,4	–	A+M+K ₁ +K ₂	–	–	–	–
2,0	–	–	M+A+K ₂ +Г	–	–	–
2,2	–	–	–	M+A+K ₂ +Г	–	–
2,5	–	–	–	–	П+K ₂ +Г	–
3,3	–	–	–	–	–	П+K ₂ +Г

Примечание: А–аустенит, М–мартенсит, П– перлит, K₁–карбид цементитного типа (Fe, Cr)₃C, K₂–карбид тригонального типа (Cr, Fe)₇C₃, Г–графит.

При увеличении содержания кремния выше 1,4% в хромоникелевом чугуна в его металлической основе начинает выделяться мартенсит. При содержании кремния в интервале 2,0-2,2 % в металлической основе выделяется структурно свободный углерод в виде графита в количестве 0,6-1,7 % от площади шлифа. Благодаря этому металлическая основа становится мартенситной с остаточным аустенитом, а твердость чугуна достигает максимального значения (58-65 HRC). Увеличение содержания кремния выше 2,2 % приводит к снижению твердости чугуна до 35 HRC за счет образования перлита.

Для оценки жидкотекучести исследуемого чугуна использовали песчаную форму для получения проб жидкотекучести металла (ГОСТ 16438-70). За счет увеличения содержания

кремния увеличивается жидкотекучесть разработанного чугуна (рисунок 3, таблица 4), что обеспечивает улучшение заполняемости литейных форм. Благодаря этому снижается температура заливки литейных форм.



Рисунок 3. Зависимость жидкотекучести разработанного среднелегированного хромоникелевого чугуна от содержания кремния при температуре заливки 1350 °C

Таблица 4 – Влияние кремния на жидкотекучесть исследуемого чугуна

Содержание кремния, %	0,5	0,9	1,4	2,2
Длина спирали, мм	700	800	950	1250

Влияние содержания кремния на количество структурных составляющих в тонкостенных отливках толщиной 30 мм представлено в таблице 5. Максимальное количество мартенсита достигается в отливке при содержании кремния в чугуне 2,2% и составляет 66,8%. Благодаря этому отливки имеют максимальные значения твердости (64 HRC) и предела прочности при изгибе (940 МПа). С повышением содержания кремния в чугуне количество структурно-свободного углерода увеличивается, а доля аустенита и карбидов уменьшается (таблица 5).

Таблица 5 – Влияние кремния на количество структурных составляющих и механические свойства износостойкой отливки толщиной 30 мм

Номер образцов №/№	Si, %	Структурные составляющие, %					Механические свойства	
		М	А	П	К	Г	Твердость, HRC	$\sigma_{изг}$, МПа
1	1,2	5,0	60	нет	35	нет	51	610
2	1,4	30,5	36	нет	33,5	нет	54	680
3	2,0	59,4	9	нет	31,0	0,6	61	820
4	2,2	66,8	4	нет	28,0	1,2	64	940
5	2,5	20,9	3	48,4	26,0	1,7	53	780
6	3,3	нет	нет	74,7	23,0	2,3	45	620

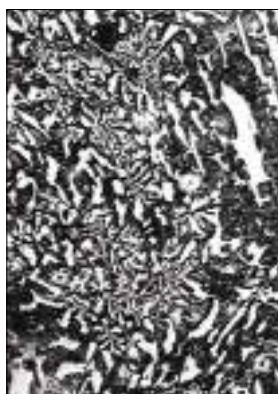
Совместная обработка чугуна малыми добавками Al, Cu, V в количестве 1,2 % (каждого элемента в количестве 0,4%) от массы расплава способствует снижению «критического» содержания хрома, при котором образуются карбиды тригонального типа, с 9,0 до 3,4%. Поэтому карбидная фаза состоит преимущественно из карбидов тригонального типа (таблица 6). Кроме этого эти элементы в количестве 1,2% существенно измельчают микроструктуру среднелегированного хромоникелевого чугуна (рисунок 4). Средний размер зерна и включений карбидов достигают минимальных значений и находятся в пределах 4-6 мкм (рисунок 4, а).

При дополнительной обработке хромоникелевого чугуна данными элементами в количестве 1,5 % (каждого элемента в количестве 0,5%) средний размер зерна металлической основы увеличивается от 6 до 10 мкм, а включений карбидов тригонального типа - от 4 до 8 мкм (рисунок 4, б).

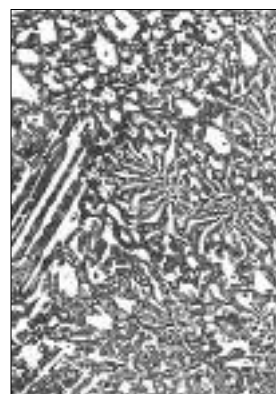
Таблица 6 – Влияние комплекса микролегирования Al, Cu, V на состав карбидной фазы и дисперсность структуры отливки толщиной 30мм

Номер образца, №№	Массовая доля элементов, %			Количество карбидов, %		Дисперсность структуры, мкм	
	Al	Cu	V	K ₁	K ₂	Металлическая основа	Карбиды
2	Без комплекса микролегирования			13	20	$\frac{12-18}{15}$	$\frac{36-46}{41}$
7	0,1	0,1	0,1	10	23	$\frac{12-16}{14}$	$\frac{20-36}{26}$
8	0,2	0,2	0,2	7	26	$\frac{9-13}{11}$	$\frac{20-24}{22}$
9	0,3	0,3	0,3	3	30	$\frac{6-10}{8}$	$\frac{8-12}{10}$
10	0,4	0,4	0,4	нет	33	$\frac{5-7}{6}$	$\frac{3-5}{4}$
11	0,5	0,5	0,5	нет	33	$\frac{8-12}{10}$	$\frac{6-10}{8}$
12	0,6	0,6	0,6	нет	33	$\frac{11-13}{12}$	$\frac{13-15}{14}$

Примечание: Дисперсность структуры в знаменателе – средние, в числителе – крайние значения.



а x500



б x500

Рисунок 4. Микроструктура (травлено) отливки толщиной 30 мм из хромоникелевого чугуна в литом состоянии

При исследовании влияния температурно-временной обработки расплава на структуру и свойства чугуна использовали опытные отливки (плиты) размером: 300 x 350 x 30 мм.

Температура перегрева расплава исследовалась в интервале 1400-1550°C через каждый 50°C (таблица 7). Продолжительность изотермической выдержки расплава во всех случаях составляла 30 мин.

Таблица 7 – Влияние температурно-временной обработки расплава на структуру и механические свойства хромоникелевого чугуна

Номер образца №/№	Температура перегрева расплава, °C	Толщина плиты, мм	Структура металлической основы	Твердость, HRC
13	1400	30	M+A+K+ПГ _{ф1}	55
14	1450		M+ A+K+ ПГ _{ф1}	57
15	1500		A+K	50
16	1550		A+K	49

Установлено что, в интервале температур 1400-1450°C выделяется структурно-свободный углерод в виде пластичного графита. Структура металлической основы образцов чугуна (образцы 13 и 14) при этом состоит из мартенсита, остаточного аустенита и карбидов. Твердость этих образцов находится в пределах 55-57 HRC. Твердость образцов из белого чугуна с аустенитной металлической основой не превышает 50 HRC.

Было исследовано влияние пластичного графита на предел прочности при изгибе. Результаты исследований показали, что увеличение количества пластинчатого графита от 0,5 до 2,8 % способствует снижению предела прочности при изгибе хромоникелевого чугуна с 640 до 450 МПа (рисунок 5).

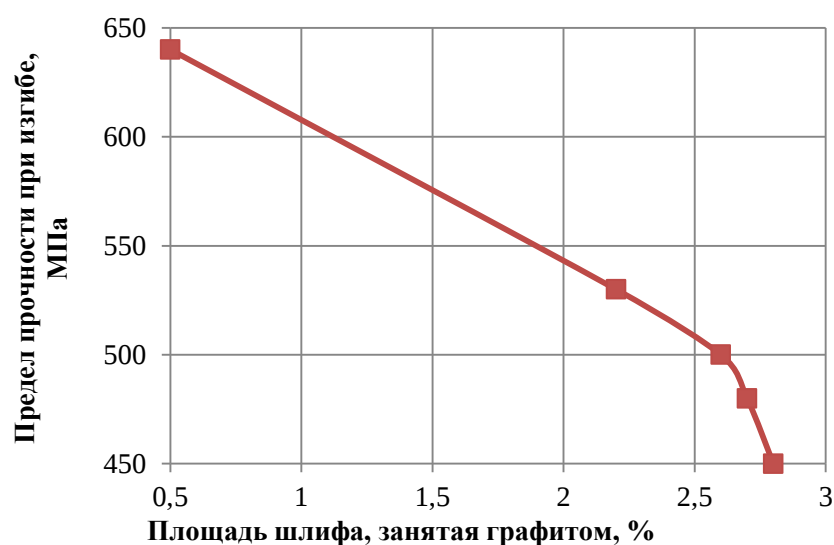


Рисунок 5. Влияние пластинчатого графита на предел прочности при изгибе хромоникелевого чугуна

В связи с этим, проведены исследования влияния шаровидного графита на уровень предела прочности при изгибе среднелегированного хромоникелевого чугуна.

При сфероидизирующей обработке хромоникелевого чугуна использовали различные модификаторы. В результате выбрали оптимальный вариант сфероидизирующего модификатора, состоящие из Ni-Mg (15-16 % Mg) и лигатуры совместно с цериевой присадкой МЦ-40 в количестве соответственно 0,5 и 0,3% от массы обрабатываемого расплава. Применение этих модификаторов позволило получить в чугуне максимальное количество шаровидного графита правильной формы ШГф5 (ГОСТ 3443-87).

Влияние шаровидного графита правильной формы на предел прочности при изгибе среднелегированного хромоникелевого чугуна представлено на рисунке 6. Из которого видно, что рост количества включений шаровидного графита правильной формы способствует повышению уровня предела прочности при изгибе хромоникелевого чугуна в 1,3 раза.

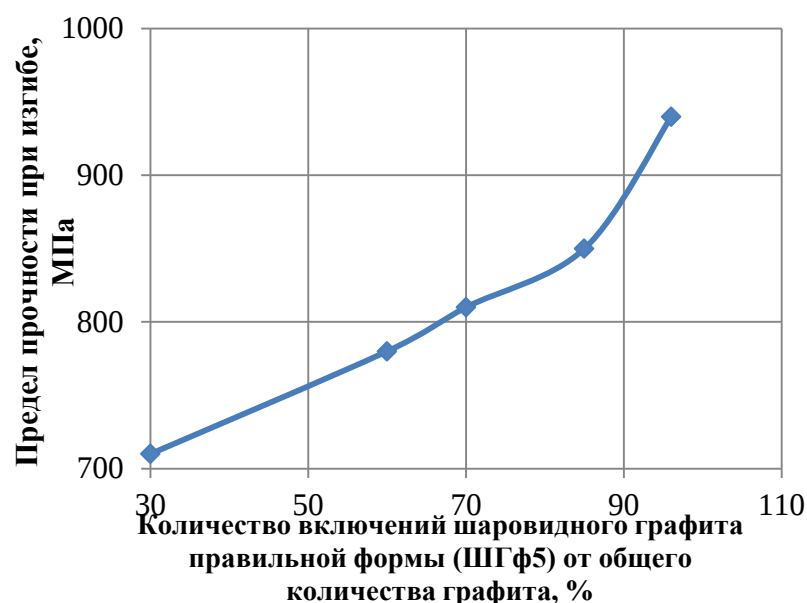


Рисунок 6. Влияние количества шаровидного графита правильной формы на предел прочности при изгибе хромоникелевого чугуна

В четвертой главе приведены исследования абразивной износостойкости хромоникелевого чугуна для тонкостенных отливок.

Для определения абразивной износостойкости исследуемых чугунов была разработана и изготовлена на опытном заводе АО НПО «ЦНИИТМАШ» лабораторная установка.

Рабочую емкость (объем $\approx 32,7 \text{ дм}^3$) предварительно загружали абразивным материалом в объеме 9 дм^3 и испытываемыми и эталонными образцами по 5 экземпляров каждого. Образцы имели диаметр 10 и длину 10 мм. В качестве эталона был выбран образец из высоколегированного белого чугуна типа «Нихард-4», который после нормализации имел твердость 60 HRC.

В таблице 8 приведена зависимость относительной абразивной износостойкости образцов от количества шаровидного графита. Повышение износостойкости происходит за счет измельчения структуры металлической основы и отсутствия в составе карбидной фазы карбидов цементитного типа. Максимальное значение коэффициента относительной износостойкости отливки толщиной 30 мм достигается при содержании шаровидного графита в чугуне 1,2% и составляет 1,42. Свыше этого количества шаровидного графита значение коэффициента относительной износостойкости резко снижается (рисунок 7), что связано с появлением перлита в металлической основе исследуемого чугуна и уменьшением количества карбидов тригонального типа.

Таблица 8 – Влияние графита на абразивную износостойкость тонкостенной отливки из хромоникелевого чугуна

Номер образца, №№	Площадь шлифа, занятая графитом, %	Толщина отливки, мм	Твердость, HRC	Коэффициент относительной абразивной износостойкости
Нихард-4	нет	10	60	1,00
17	нет	30	57	0,97
18	0,6		62	1,21
19	1,2		65	1,42
20	1,7		55	0,91



Рисунок 7. Влияние количества шаровидного графита на коэффициент относительной абразивной износостойкости образцов из среднелегированного хромоникелевого чугуна по сравнению с закаленным чугуном типа «Нихард-4»

Пятая глава посвящена разработке и освоению промышленной технологии изготовления тонкостенных деталей из среднелегированного хромоникелевого чугуна.

Опытно-промышленное изготовление износостойких отливок из среднелегированного хромоникелевого чугуна осуществлялось в условиях литейно-металлургической базы ЦНИИТМАШ. Химический состав опытно-промышленной партии износостойкого среднелегированного хромоникелевого чугуна представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Химический состав чугуна промышленной партии деталей

C	Ni	Cr	Si	Mn	Al
2,3-2,5	3,8-4,2	3,4-4,5	2,0-2,2	0,4-0,6	до 0,4
Cu	V	P	S	Mg	Ce
до 0,4	до 0,4	до 0,04	до 0,02	до 0,03	до 0,08

Для выплавки чугуна использовали индукционную тигельную печь ИСТ-016. Расплав перегревали до 1450-1470°C и выдерживали при этой температуре 30 мин. Выпуск расплава из печи в ковш осуществляется при температуре 1450-1440°C. Предварительно в ковш закладывали сфероидизирующие присадки. В качестве сфероидизирующего модификатора применяли никель-магниевою (15-17 % Mg) лигатуру совместно с цериевой присадкой МЦ-40 соответственно 0,5 и 0,3 % от массы обрабатываемого расплава. Затем расплав обрабатывали в ковше комплексом микролегирования Al, Cu, V в количестве 1,2 % (каждого элемента в количестве 0,4%) от массы обрабатываемого чугуна.

Заливка литейных форм, изготовленных на основе ХТС, производилась при 1320 - 1340°C.

Из литейных форм отливки выбивают при температуре 800-700 °C. После чего они охлаждаются на воздухе, при этом в металлической основе отливок выделяется структурно-свободный углерод в виде включений шаровидного графита, при этом аустенит обедняется углеродом и он при охлаждении, за счет повышения начала мартенситного превращения, превращается в мартенсит. Твердость отливок из нового чугуна достигает 58-65 HRC, а предел прочности при изгибе - 810-880 МПа в литом состоянии. Поэтому необходимость применения высокотемпературной обработки отпадает, что позволяет существенно снизить себестоимость изготовления износостойкого литья.

Благодаря ранней выбивке отливок из литейных форм, а также за счёт обработки расплава Al, Cu, V и модифицирования Mg и Ce, структура отливок из разработанного чугуна существенно измельчается, при этом абразивная износостойкость отливок из разработанного чугуна увеличивается.

Основными рабочими органами смесеприготовительной системы являются износостойкие детали (лопатки, кронштейны, отражатели, бронефутеровки и др.), которые отливались в условиях ЦНИИТМАШ (рисунки 8-10).



Рисунок 8. Отливки лопаток массой 8 кг



Отражатель
(масса-25 кг)



Кронштейн
(масса-18 кг)



Лопатка
(масса-9 кг)



Броня
(масса-12 кг)

Рисунок 9. Отливки для стационарных и передвижных мини – заводов



Рисунок 10. Отливки бронеплит с различной массой (6, 8 и 10 кг)

Разработанный износостойкий среднелегированный хромоникелевый чугун с пониженным содержанием хрома (3,5-4,5%) и никеля (3,0-4,2%) обладает повышенными технологическими характеристиками.

Жидкотекучесть нового чугуна больше, чем у зарубежного в 1,2-1,5 раза. Это связано с более низким содержанием хрома и никеля, а также с повышенным содержанием кремния.

В таблице 10 приведен сравнительный анализ основных параметров зарубежного и разработанного нами технологического процесса изготовления в условиях АО НПО «ЦНИИТМАШ» износостойких тонкостенных отливок массой 6-20 кг.

Таблица 10 – Сравнительный анализ основных параметров технологического процесса изготовления износостойких тонкостенных отливок массой 6-25 кг

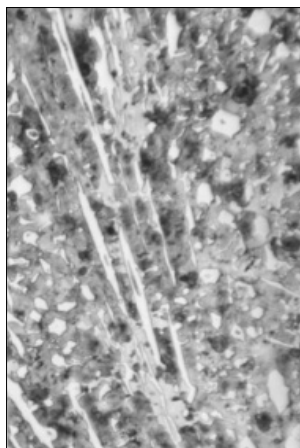
Тип чугуна	Химический состав (основных элементов), %				Темпера- тура перегрева чугуна в печи, °С	Темпера- тура выпуска чугуна из печи в ковш, °С	Темпера- тура заливки чугуна в литейную форму, °С	Механические свойства			
								Предел прочности при изгибе, МПа		Твердость, HRC	
	Состояние							литое	Т.О.	литое	Т.О.
Ni	Cr	Si	C								
Нихард-4	6,0	8,5	1,5	3,0	1550 (выдержка- 30 мин)	1460	1420	350- 502	610- 710	50- 53	58- 62
Разрабо- танный чугун	3,6	4,1	2,2	2,4	1450 (выдержка- 30 мин)	1420	1330	810- 880	н. о.	58- 65	н. о.

Примечание: Температура выливки разработанного чугуна 700-800 °С и время охлаждения отливки в литейной форме 12-18 минута.

Технико-экономические преимущества разработанной технологии производства износостойких тонкостенных отливок по сравнению с зарубежной технологией изготовления отливок из чугуна «Нихард-4» заключаются в следующем:

- снижается температура перегрева жидкого чугуна на 100°С;
- сокращается время плавки на $\approx 0,5$ ч, за счет снижения температуры перегрева;
- снижается температура заливки расплавом литейных форм на 90°С;
- сокращается продолжительность охлаждения отливки в литейной форме;
- исключается необходимость проведения дополнительной термообработки отливок;
- исключается механическая обработка отверстий в отливках;
- снижается на 40-50% себестоимость изготовления отливок.

Микроструктура отливки лопатки толщиной 40 мм из разработанного хромоникелевого чугуна после ранней выливки приведена на рисунке 11. Микроструктура этого чугуна состоит из мартенсита, остаточного аустенита и включений карбидов тригонального типа и шаровидного графита.



x500

Рисунок 11. Микроструктура (травлено) разработанного чугуна.

Износостойкие отливки поставляются предприятию ЗАО «Дорпрогресс-Егорьевск». Промышленная эксплуатация этих деталей в смесеприготовительных системах асфальтобетонных заводов показала, что по сравнению с импортными деталями работоспособность увеличилась с 9 до 12-14 месяцев. При этом снижается (1,4-1,5 раз) себестоимость их изготовления. Межремонтный период эксплуатации деталей из нового чугуна увеличился в 1,4-2,0 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан среднелегированного хромоникелевого чугуна с пониженным содержанием хрома 3,4-4,5 и никеля 3,8-4,2% для производства тонкостенных деталей смесеприготовительного оборудования асфальтобетонных заводов, обладающих высоким уровнем абразивной износостойкости при эксплуатации в интервале температур 250-350°C.
2. Выявлены особенности формирования структуры износостойкого среднелегированного хромоникелевого чугуна и показано, что микролегирующий комплекс, содержащий алюминий, медь и ванадий, способствует снижению «критического» содержания хрома (до 3,4%), необходимого для образования карбидов тригонального типа. При этом средний размер включений карбидов тригонального типа измельчается в 5-10 раз.
3. Исследовано влияние кремния на структуру среднелегированного хромоникелевого чугуна и показано, что дополнительный ввод кремния в пределах 1,4-2,2% способствует формированию эвтектики на базе карбида тригонального типа и выделению небольшого количества графита (до 1,5 % от площади микрошлифа, занятой графитом), что повышает трещиностойкость тонкостенных отливках при ранней выбивке из литейных форм.
4. Разработан и внедрен технологический процесс промышленного производства из нового чугуна износостойких тонкостенных деталей смесеприготовительного оборудования асфальтобетонных заводов.
5. Промышленная партия износостойких тонкостенных деталей прошла эксплуатационные испытания на импортном дорожном оборудовании в условиях дорожно-строительной организации ЗАО «Дорпрогресс - Егорьевск». Срок службы этих деталей увеличился в среднем 1,5 раза по сравнению со сроком службы деталей зарубежного производства.
6. Разработана нормативно-техническая документация (Технические условия и Технологическая инструкция), регламентирующие промышленное изготовление деталей смесеприготовительного оборудования асфальтобетонных заводов

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. Гушин Н.С., Тахиров А.А. Прокаливаемость износостойких отливок толщиной 50 мм // *Металлургия машиностроения*. –2012. –№ 4. –С.13-16.
2. Гушин Н.С., Степашкин Ю.А., Тахиров А.А. Зависимость прокаливаемости износостойких отливок от их толщины // *Металлургия машиностроения*. –2012. –№ 8. –С. 9-10.
3. Тахиров А.А., Гушин Н.С. Хромоникелевый чугун с шаровидным графитом // *Литейное производство*. –2012. –№ 12. –С. 2-4.
4. Тахиров А.А., Гушин Н.С. Влияние температуры перегрева и графитизирующего модифицирования на графитизацию хромоникелевого чугуна // *Литейщик России*. –2013. –№ 2. –С. 25-27.
5. Тахиров А.А., Гушин Н.С. Влияние легирования на графитизацию хромистого чугуна // *Заготовительные производства в машиностроении*. –2013. –№ 2. –С. 3-5.
6. Тахиров А.А., Гушин Н.С. Влияние углерода, хрома и кремния на графитизацию легированного чугуна // *Заготовительные производства в машиностроении*. –2013. –№ 6. –С. 7-8.
7. Тахиров А.А., Гушин Н.С. Влияние меди, алюминия и фосфора на графитизацию хромоникелевого чугуна // *Литейщик России*. –2013. –№ 7. –С. 20-22.
8. Тахиров А.А., Гушин Н.С., Нуралиев Ф.А. Изготовление мелющих элементов оборудования для приготовления асфальта // *Литейное производство*. –2013. – № 7. –С. 2-7.
9. Тахиров А.А., Гушин Н.С., Нуралиев Ф.А. Влияние термообработки на износостойкость и структуру хромоникелевого чугуна // *Литейное производство*. –2013. – № 9. –С. 6-8.
10. Тахиров А.А., Гушин Н.С. Влияние различных факторов на устойчивость аустенита при охлаждении // *Литейное производство*. –2015. –№ 1. –С. 17-20.
11. Гушин Н.С., Куликов В.Н., Нуралиев Ф.А., Тахиров А.А. Износостойкие легированные хромом чугуны со специальными свойствами // *Литейное производство*. –2015. –№ 4. –С. 7-11.

Изобретения

12. Патент №2387729 (RU). Коррозионно-стойкий чугун с шаровидным графитом / Н.С. Гушин, М.Ф. Дрожжина и А.А. Тахиров // Оpubл. 27.04.2010 г.
13. Патент РФ №2395366 (RU). Способ получения отливок из легированного чугуна / Н.С. Гушин, Н.Н. Александров, Ф.А. Нуралиев, А.А. Тахиров и др. // Оpubл. 27.07.2010 г.
14. Патент РФ №2384641 (RU). Износостойкий чугун / Н.С. Гушин, М.Ф. Дрожжина и А.А. Тахиров // Оpubл. 20.03.2010 г.
15. Патент РФ №2511213 (RU). Износостойкий чугун / Н.С. Гушин, Ф.А. Нуралиев, А.А. Тахиров, В.А. Дурынин и др. // Оpubл. 10.04.2014 г.