

На правах рукописи



**Зенкин
Руслан Николаевич**

**РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ
ТВЕРДО-ЖИДКОФАЗНОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА
ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА
С ШАРОВИДНОЙ ФОРМОЙ ГРАФИТА**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель:

ВАЛЬТЕР Александр Игоревич,
доктор технических наук, профессор
ДИБРОВ Иван Андреевич
доктор технических наук, президент
Российской ассоциации литейщиков
(Общероссийская общественная
организация), (г. Москва)

Официальные оппоненты:

СЛУЗОВ Павел Анатольевич,
к.т.н., начальник технического отдела
ОАО «ЛМЗ» (Нижегородская обл., г.
Семенов)

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Санкт - Петербургский
политехнический университет Петра
Великого»

Защита диссертации состоится 15.12.2017 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.165.07 при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корп.1, ауд. 1315.

С авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по адресу: г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24 или на сайте: http://www.nntu.ru/sites/default/files/file/dissertacii/2017/zenkin_r_n.pdf?13-09.

Автореферат разослан « 25 » __ октября __ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пачурин Герман Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В современном машиностроении чугун остается одним из наиболее широко используемых материалов. Он становится все более прочным и пластичным в результате новейших достижений в технологии плавки, внепечной обработки расплава и термической обработки. Изменяется традиционное представление о чугуне как о хрупком материале. Он не уступает по прочности, пластичности многим сталям и обладает целым рядом преимуществ: повышенной жидкотекучестью и меньшей усадкой, высокой износостойкостью и демпфирующей способностью. Именно поэтому на протяжении многих лет в центре внимания находится проблема совершенствования технологического процесса получения чугунных деталей с повышенными механическими характеристиками.

Вопросами обработки чугуна с целью улучшения механических характеристик занимались многие известные отечественные и зарубежные ученые. Большой вклад в разработку технологий получения чугунных отливок внесли: Ващенко К.И., Воронцов В.И., Гиршович Н.Г., Гуртовой Д.А., Дибров И.А., Изосимов В.А., Ковалевич Е.В., Кривошеев А.В., Крючков Ю.П., Леках С.Н., Панфилов Э.В., Русманов Р.Г., Рябчиков И.В., Рыжиков А.А., Тэн Э.Б., Warrich R.I., Skaland T., Zeedijk H.V.

Работы этих ученых являются фундаментальными при создании новых технологических операций обработок исходного расплава с целью получения материала с повышенными механическими характеристиками.

За период эксплуатации чугуна (с 1950 г.) известно большое количество способов его обработки магнием и магнийсодержащими лигатурами. Универсального способа получения высокопрочного чугуна, в равной мере удовлетворяющего специфические производственные условия, не существует, так как номенклатура выпускаемой продукции производственных мощностей России настолько многообразна, что невозможно одним способом получить столь широкий спектр деталей с определенно предъявляемыми требованиями.

Получение чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ) и технологическая подготовка исходного расплава состоят из следующих операций:

- десульфурация;
- сфероидизирующее модифицирование;
- графитизирующее модифицирование (инокулирующее), которое проводится с целью максимального стимулирования графитизации эвтектики при затвердевании, измельчения микроструктуры, улучшения характеристик выпускаемой продукции.

Совершенствование технологических операций десульфураторной и сфероидизирующей обработки исходного расплава для улучшения механических характеристик с применением энерго- и ресурсосберегающих технологий является актуальной научно-технической проблемой.

Целью работы является создание и практическое освоение твердожидкофазной обработки сплава с целью получения высокопрочного чугуна с

шаровидной формой графита, для деталей ответственного назначения, позволяющей повысить механические характеристики чугунных отливок.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- выявление химически активных элементов и установление их процентного содержания, способного при совместном использовании удалять серу из исходного расплава и изменять пластинчатый графит на шаровидный;
- установление дополнительных элементов, увеличивающих усвоение модифицирующих элементов, и нахождение технологических приемов, снижающих расход десульфурствующих добавок;
- разработка на основе результатов исследования энерго- и ресурсосберегающей рафинирующе-модифицирующей технологии получения высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита;
- исследование продолжительности модифицирующего эффекта и механизмов формирования шаровидного графита в зависимости от способа введения модифицирующих элементов, установление факторов, увеличивающих его влияние на механические характеристики;
- разработка технологических приемов по использованию рафинирующе-модифицирующего способа в производственных условиях для отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом с толщиной стенки 15...40 мм и выше, а массой 50...10140кг, позволяющих повысить механические характеристики получаемых деталей;
- практическое внедрение рафинирующе-модифицирующего способа в действующее производство.

Объект исследования – литые заготовки из высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита, используемые в доменном производстве и при разработке пробных сухопутных носителей для артиллерийских установок АК-230, АК-230М.

Предмет исследования – процесс формирования шаровидного графита в отливках и их механические характеристики в зависимости от микроструктуры.

Научная новизна

1. Проведено исследование, научно и практически аргументирован процесс одновременного десульфурирования и модифицирования серого чугуна с целью улучшения механических характеристик и изменения пластинчатой формы графита на шаровидную. Установлено, что упрочнение исходного чугуна и получение шаровидной формы графита с содержанием серы 0,01...0,50% достигается твердо-жидкофазной обработкой при послойной укладке следующих компонентов:

- модификатор: суммарное содержание редкоземельных металлов 0,5...1,0%; алюминия до 1,2%; кремния 45,0...50,0%; кальция 0,3...0,5%; магния 5,5...6,5%;
- шлак магнитоактивный: углерода не менее 2,5%; кремния не менее 0,5%; оксида кремния 20...35%; фосфора не более 0,1%; серы не более 0,9%; оксида

кальция 10...30%; оксида магния 1,5...5%; оксида алюминия 2...7%; оксида марганца 1,5...5%;

- лигатура: суммарное содержание редкоземельных металлов 30,0...40,0%; алюминия 2,0...5,0%; кремния 30,0...50,0%;

- чугун дробленый со шлакообразующими включениями фракций до 10мм: углерода не менее 3,0%; кремния не менее 0,50%; марганца не более 1,20%; фосфора не более 0,14%; серы не более 0,07%.

2. Теоретически установлено и экспериментально доказано, что при твердожидкофазной обработке фракционный состав шлаковых композитов, находящийся в пределах 1...10мм, позволяет увеличить продолжительность модифицирующего эффекта более 50%, при одновременном энерго- и ресурсосбережении.

3. По результатам исследования установлены температурные зависимости прогрева ковша и компонентов, позволяющие установить, что увеличение температуры обеспечивает появление на поверхности модификатора бесконечно малого жидкого слоя, когда ядро еще остается твердым. Поверхностное натяжение отражающее взаимодействие «твердое-жидкое» изменяющее энергию системы позволяет систематизировать и прогнозировать нахождение шаровидной формы графита, которая доходит до 31 минуты.

Практическая значимость работы:

1. Разработана технология обработки высокопрочного чугуна, позволяющая получить ряд новых экспериментальных и практических результатов в области создания и использования сплавов из чугуна с шаровидной формой графита с повышенными эксплуатационными свойствами вследствие твердожидкофазной обработки исходного чугуна при получении деталей ответственного назначения.

2. Разработана технология комплексной обработки серого чугуна магнийсодержащими присадками, позволяющая повышать механические характеристики выпускаемой продукции при одновременной утилизации магнитоактивных шлаков, создающих угрозу для экологической обстановки.

3. Обоснованы и экспериментально подтверждены закономерности, повышающие механические характеристики, ввиду продолжительного модифицирующего эффекта при одновременной рафинирующе-модифицирующей обработке исходного чугуна.

4. Разработаны и внедрены в производство энерго- и ресурсосберегающие технологические схемы получения изделий из чугуна с шаровидной формой графита, имеющие преимущественно ферритную или перлитную структуру при толщине стенки 15...40мм и выше.

Реализация результатов работы

Результаты работы опробованы и внедрены в производственный процесс ПАО «КМЗ» (г. Тула) с общим снижением себестоимости на отливках: «холодильные плиты для доменных печей» 1 447 560 руб.; «пробный сухопутный стенд для артиллерийских установок АК-230, АК-230М» 3 294 руб.; «мульды для разливочных машин» 428 323 руб.

Также результаты проведенного исследования внедрены в производство: ОАО НИИМЭТ (г. Калуга) с повышением стойкости получаемых деталей в 2,5 раза; ЗАО «Электромаш» (г. Ижевск) с годовым экономическим эффектом 482 256 руб.

Методология и методы исследования

Работа выполнена с использованием современных методов контроля химического состава металла, механических свойств отливок, металлографического структурного анализа.

Задачи исследования диссертационной работы направлены на выявление закономерностей влияния температурных параметров плавки и заливки, фракционного и химического составов модифицирующих комплексов, способов металлургической обработки расплавов на формирование микроструктуры, механические показатели отливок из высокопрочного чугуна.

На защиту выносятся следующие положения:

-технология обработки исходного расплава рафинирующе-модифицирующими присадками, содержащими промышленные отходы доменного производства, установление оптимального для получения шаровидного графита количественного и фракционного составов компонентов;

-результаты исследования влияния шлаковых композитов на увеличение продолжительности модифицирующего эффекта;

-технология получения отливок «холодильные плиты для доменных печей» с применением песчано-глинистых и холодно-твердеющих смесей с использованием запатентованной рафинирующе-модифицирующей операции обработки исходного расплава;

-результаты технологических решений получения отливок, работающих при повышенных демпфирующих и термоциклических нагрузках, с использованием запатентованной рафинирующе-модифицирующей операции обработки исходного расплава, позволяющих получать ферритную или перлитную структуру.

Степень достоверности и апробации результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах: Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции в образовании и науке» (Россия, Тамбов, 28 ноября 2014 г.), Международная научная конференция «Технические науки: интеграция науки и практики» (Россия, Москва, 26-28 ноября 2014 г.), II итоговая Международная научно-практическая конференция «Интеграция мировых научных процессов как основа общественного прогресса» (Россия, Казань, 30 декабря 2014 г.), Международная научная конференция «Наука современности – 2015» (Россия, Москва, 29-30 января 2015 г.), Международная научно-практическая конференция «Теоретические и прикладные вопросы науки и образования» (Россия, Тамбов, 31 января 2015 г.), Международный научный е-симпозиум «Актуальные вопросы технических наук» (Россия, Москва, 27-28 марта 2015 г.), на ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава Тульского государственного универси-

тета (Тула, 2012-2015 г.) и на научном семинаре кафедры «Сварка, литье и технологии конструкционных материалов» Тульского государственного университета (Тула, 2015 г.).

Публикации

По результатам исследования опубликовано 20 работ, в том числе 5 работ в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, при этом 1 работа, входящая в библиографическую и реферативную базу данных Scopus, а также 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора

В диссертационную работу вошли результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных автором. Ему принадлежат планирование диссертационного исследования, построение технологических операций, начиная от проектирования модельной оснастки и заканчивая механической обработкой полученных отливок. Результатом проведенного исследования является рафинирующе-модифицирующий способ обработки исходного расплава, позволяющий совместить десульфурацию и инокулирование. Вследствие анализа полученных результатов автором были сформулированы основные выводы. Автор принимал участие в апробации результатов и при построении технологического процесса по внедрению в производство.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует пункту 3 – «Исследование влияния обычных, нано-модифицирующих, электрических, магнитных, механических и других видов обработки на свойства расплавов, отливок и литейных форм», а также пункту 11 – «Ресурсосбережение в литейном производстве» паспорта специальности 05.16.04 – Литейное производство.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников из 110 наименований и включает 142 страницы машинописного текста, содержит 52 рисунка, 27 таблиц и 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации работы, о структуре и об объеме диссертации.

В первом разделе представлен анализ отечественной и зарубежной литературы по теме исследования, посвященного получению высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита путем обработки различными магнийсодержащими присадками.

Анализ отечественной и зарубежной литературы по данной теме исследования, посвященный получению высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита, показал, что основным элементом, препятствующим образованию шаровидного графита, является сера.

Отмечено, что в работах отечественных авторов одними из самых распространенных химически активных элементов, входящих в модифицирующий комплекс, являются: Mg, ЦЗМ, РЗМ, Ca, Si, Al.

Анализ проведенного обзора позволил установить, что, несмотря на большое количество научных работ указанных авторов, посвященных обработке чугуна с целью улучшения механических характеристик, малоизученным вопросом остается совмещение операций рафинирования и модифицирования исходного расплава с целью получения шаровидной формы графита.

Второй раздел посвящен изучению влияния щелочноземельных и редкоземельных элементов на упрочнение исходного расплава и на десульфурierende способности некоторых из них.

Из анализа состояния вопроса установлено, основной задачей рафинирующе-модифицирующего комплекса является десульфурация и модифицирование исходного расплава, а одним из путей решения повышения эффективности обработки чугуна - использование присадки активных элементов не в одианарных сплавах (типа SiCa), а в двойных (SiCaРЗМ) или многокомпонентных. При этом для получения требуемых результатов возможно различное использование комбинаций модификатора I и II рода, а также и РЗМ. Совместное использование этих элементов в одном комплексе присадок, изменяющих морфологию графита, позволяет усилить действие друг друга, при определенном уменьшении концентрации.

Определение раскислителей для рафинирующе-модифицирующих комплексов основано на анализе физико-химических свойств элементов и экономической составляющей. В качестве основных параметров нужно учитывать: выбор компонента, на основе которого пластинчатый графит способен поменять свою форму до шаровидного; энтальпию образования оксидов; температуру плавления; плотность. Решением данного вопроса являются:

1. Выбор из ряда сфероидизаторов элемента, более продуктивно работающего с элементами-раскислителями (Al, Ca).
2. Температура плавления продуктов взаимодействия должна быть больше температуры кристаллизации жидкого чугуна ($t_{пл} > 1300^\circ\text{C}$).
3. Образующиеся продукты раскисления должны иметь плотность меньше, чем расплав, чтобы легко удалять из расплава при всплывании их на зеркало металла.
4. Рафинирующе-модифицирующий комплекс должен иметь приемлемый для производства технико-экономический показатель.

В третьем разделе описана методика проведения эксперимента, оборудование, способ одновременной обработки рафинирующими и модифицирующими элементами.

Исследование производилось на базе публичного акционерного общества "Косогорский металлургический завод" (ПАО "КМЗ"), в частности в литейном цехе и центральной заводской лаборатории, где имеется широкий выбор оборудования для исследования и контроля выпускаемой продукции.

Для получения расплава чугуна использовались индукционные тигельные печи, основанные на принципе передачи энергии индукцией от первичной цепи ко вторичному объему ИЧТ-6 и ИСТ-2,0.

Определение состава чугуна осуществлялось на спектрометре оптическом эмиссионном Test-Master. Принцип исследования основан на методе эмиссионного оптического спектрального анализа с возбуждением пробы с помощью искры или дуги. В режиме «Дуга» полуколичественный анализ - быстрая сортировка. В режиме «Искра» количественный анализ, включая анализ углерода.

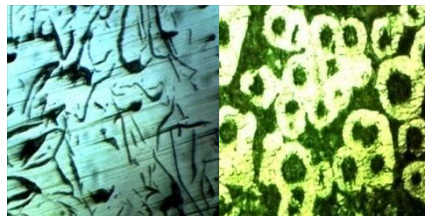
Испытания на механические свойства осуществляли в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Для испытаний использовали универсальную разрывную машину.

Измерение твёрдости (по шкале Бринелля) производилось согласно ГОСТ 9012-59. Металлографические исследования проводили горизонтальным металлографическим микроскопом МИМ-8М, оснащённым цифровой фотокамерой DCM500.

В процессе исследования при контроле химических элементов было замечено, что в результате расплавления шихтовых материалов наблюдался некоторый разброс химического состава по расположенности в зависимости от отбора металла.

В связи с этим пробы для спектрального анализа получали путем кратковременного погружения пробоотборника в центр расплава.

Модифицирование заключается во введении в расплав чугуна небольшого количества добавок-модификаторов, которые способствуют изменению пластинчатого графита в исходном чугуне (рисунок 1.а) до шаровидной формы (рисунок 1.б).



а

б

Рисунок 1 - Микроструктура чугуна: с пластинчатой формой графита; с шаровидной формой графита (x500)

Для осуществления процесса модифицирования, согласно теоретическим данным и проведенным исследованиям, в модифицирующий комплекс должны входить: Si, Mg, Al, PЗМ и небольшая часть ЦЗМ в виде Са или его окислов.

Одним из основных показателей выпускаемой продукции является экономическая эффективность получаемых деталей. Поэтому одним из основных путей решения является уменьшение количества ввода дорогостоящих материалов за счет более дешевых. При этом, если эти материалы ранее считались отходами, одновременно утилизируясь, не создавая серьезной угрозы для экологической обстановки окружающей среды.

Установление добавок, повышающих рентабельность выпускаемых отливок, уменьшающих пирозффект и увеличивающих степень усвоения модифи-

цирующего комплекса, позволило определить два компонента, которые удовлетворяют этим факторам. Ими являются отходы доменного производства: шлак магнитоактивный, чугун дробленый со шлакообразующими.

Изучение влияния щелочноземельных и редкоземельных элементов на упрочнение исходного расплава и на десульфуризирующие способности позволил установить элементы, которые должны входить в модифицирующий комплекс (таблица 1).

Определив процентное содержание всех элементов, в зависимости от содержания серы в исходном расплаве, рассчитывалось процентное количество вводимых элементов, приведенных в таблице 2. Расчетное количество вводимого десульфуратора было выявлено практическим путем.

Модифицирующий комплекс дополняется шлакоактивными добавками, которые позволяют уменьшить в два раза расход дорогостоящих добавок, что значительно понизит себестоимость шихтовых материалов и в дальнейшем благоприятно скажется на рентабельности выпускаемой продукции.

Для осуществления процесса модифицирования исходный чугун значительно перегревали до температуры 1480...1520°C, так как при подаче расплава она значительно падала до 1400...1430°C. Наполнение ковша осуществляли по направлению строго в центр ковша, для лучшего расхождения всех компонентов.

Для осуществления работы рафинирующе-модифицирующего комплекса, определив оптимальное процентное количество компонентов, в заранее прогретый ковш до температуры 750...800°C производили укладку их ровными слоями (рисунок 2).

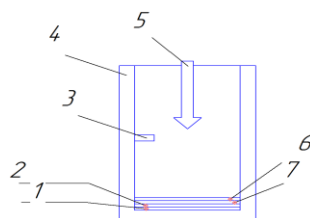


Рисунок 2 - Принцип укладки и заливки компонентов: 1 - модификатор;
2 - шлак магнитоактивный; 3 - перегородка; 4 - ковш;
5 - направление наполнения ковша расплавом исходного чугуна;
6 - чугун дробленый со шлакообразующими добавками;
7 - лигатура ФС30РЗМ30

1. Первый ровный слой - модификатор - для снижения скорости всплытия, за счет расплавления последующих покрывных слоев и обволакивания шлакоактивными элементами. Внешне он представляет собой мелкодисперсные чипсы. Перед укладкой модификатор дробится до размера 5...20 мм.

Таблица 1 - Состав компонентов модифицирующего комплекса

№ п/н	Марка	Массовая доля, %										
		Сумма РЗМ		Al		Si		Ca		Mg		Fe
		по ТУ	факт	по ТУ	факт	по ТУ	факт	по ТУ	факт	по ТУ	факт	
1	ФСМг-501-S	0,5...1,0	0,65	До 1,2	0,64	45,0...50,0	46,1	0,3...0,5	0,44	5,5...6,5	6,1	Ост
2	Шлак магнитоативный	C, не менее		Si, не менее	SiO ₂	P, не более	S, не более	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	
		2,5		0,5	20...35	0,1	0,9	10...30	1,5...5	2...7	1,5...5	
3	ФС30РЗМ30	30,0...40,0	35,3	2,0...5,0	3,42	30,0...50,0	41,0	-	-	-	-	
	ФС30РЗМ30	30,0...40,0	35,3	2,0...5,0	3,42	30,0...50,0	41,0	-	-	-	-	
4	Чугун дробленый со шлакообразующими добавками	C не менее		Si не менее		Mn не более		P не более		S не более		
		3,0		0,50		1,20		0,14		0,07		

Таблица 2 - Количество вводимых компонентов в зависимости от содержания серы в исходном чугуне

Содержание S, %	Количество ввода РЗМ, % от массы		Шлак манито-активный по соотн. 50 % от РЗМ	Магний - содержащий модификатор, % от массы	Чугун дробленый со шлакообразующими добавками, % от массы	Гр	Ф	П	Ц
	было	стало							
0,01...0,20	1	0,5	0,5	1	0,5	ШГ100	30	70	
0,20...0,30	1,2	0,6	0,6	1	0,5	ШГ100	35	65	
0,30...0,40	1,5	0,75	0,75	1	0,5	ШГ100	10	85	5
0,40...0,50	1,6	0,8	0,8	1	0,5	ШГ100	30	70	
0,50...0,60	1,7	0,85	0,85	1	0,5	ШГ90ВГ10	40	50	5
0,60...0,70	1,9	0,95	0,95	1	0,5	ШГ90ВГ10	60	30	Следы
0,70...0,80	2	1	1	1	0,5	ШГ30ВГ70	70	25	

2. Второй слой - шлак магнитоактивный, который является отходом доменного производства, образующийся в результате дробления чугуна, застывшего в чугунных летках и подверженного магнитной сепарации. Он является покрывным слоем модификатора, препятствующим его быстрому растворению и, следовательно, продлению «модифицирующего эффекта» - перехода от шаровидной формы графита к вермикулярной. Распределение данного компонента осуществляется равномерно по верху ранее уложенных элементов

3. Третий слой - лигатура ФС30РЗМ30. Ее фракционный состав полностью соответствует техническим условиям, обеспечивающим рафинирование расплава, необходимого для данного способа модифицирования. Она также укладывается ровным слоем по верху ранее уложенных компонентов.

4. Четвертый слой - чугун дробленый со шлакообразующими добавками, полученный в результате дробления застывшего чугуна в чугунных летках на дробильном комплексе и подверженный магнитной сепарации. Согласно ТУ 14-128-Д-5-06 его допустимая фракция 0...20 мм, но при использовании фракции 10...20 мм наблюдалось падение температуры до 1350°C, и процесс модифицирования протекал не полностью, ввиду чего образование шаровидного графита достигало максимум 75%. В связи с этим чугун дробленый со шлакообразующими добавками предварительно отбирался до фракции 1...10 мм. Этот слой также, как и второй, является покрывным, и его основная функция - удержание на дне ковша модифицирующих элементов.

Поэтапное рассмотрение процесса модифицирования выглядит следующим образом (рисунок 3):

- подготовка исходного чугуна для осуществления процесса модифицирования (рисунок 3, а);

- рафинирование путем ввода десульфуризирующей добавки в виде лигатуры. Образование начальных центров кристаллизации и измельчение графитовых включений, способствующих зарождению шаровидных включений (рисунок 3, б);

- модифицирование магнийсодержащим модификатором, спеченным в процессе слива шлакоактивным компонентом, в результате изменяющим до шаровидной формы графит (рисунок 3, в).

В результате исследования сформулированы следующие выводы:

- установлено, что одновременная обработка десульфуратором и модификатором позволяет получить высокопрочный чугун с шаровидной формой графита. Способ взаимодополняющей обработки со специальными покрывными слоями позволяет улучшить условия труда ввиду практически полного пропадания пироэффекта;

- в зависимости от содержания серы шлакоактивные добавки позволяют уменьшить расход лигатуры, положительно отражаясь на экономике получаемой продукции, при одновременной утилизации ранее неиспользованных компонентов.

В результате исследования сформулированы следующие выводы:

- установлено, что одновременная обработка десульфуратором и модификатором позволяет получить высокопрочный чугун с шаровидной формой графита. Способ взаимодополняющей обработки со специальными покрывными слоями позволяет улучшить условия труда ввиду практически полного пропадания пироэффекта;

- в зависимости от содержания серы шлакоактивные добавки позволяют уменьшить расход лигатуры, положительно отражаясь на экономике получаемой продукции, при одновременной утилизации ранее неиспользованных компонентов.

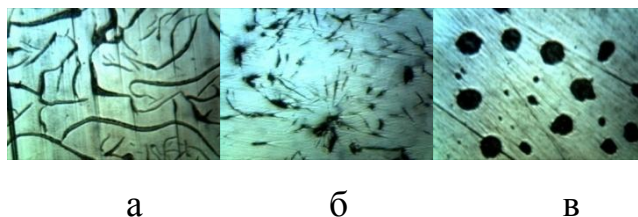


Рисунок 3 - Поэтапное изменение шаровидного графита (x500):

а - исходный чугун, полученный в печи; б - чугун, обработанный лигатурой ФС30РЗМ30; в - высокопрочный чугун, полученный в результате одновременно взаимодополняющего ввода модифицирующего комплекса

Четвертый раздел посвящен исследованию продолжительности модифицирующего эффекта и формирования шаровидного графита в зависимости от способа введения модифицирующих элементов, установлению факторов, увеличивающих его влияние на механические характеристики.

Теоретическая подготовка экспериментов заключалась в построении технологических схем исследования модифицирующего эффекта при двойном модифицировании и при рафинирующе-модифицирующей обработке исходного расплава при разных температурных режимах прогрева ковша и исходного чугуна.

Механические характеристики чугуна, полученного при двойном модифицировании, соответствуют маркам ВЧ40...50; средняя твердость по Бринеллю – 219 НВ. Изучение микроструктуры полученных образцов позволило установить, как протекает поминутное изменение графита от пластинчатого до шаровидного с последующим переходом в вермикулярный. Доказано, что глобулярный графит находится в пределах 5...10 мин, затем происходит обратный переход неустойчивого, неравновесного состояния в исходное.

Установление продолжительности модифицирующего эффекта при рафинирующе-модифицирующей обработке исходного расплава позволило определить, что при сливе расплава исходного чугуна при температуре 1480°C в прогретый до 750°C ковш механические характеристики полученного чугуна соответствуют маркам ВЧ40...55; средняя твердость по Бринеллю – 206 НВ. Установлено, как протекает поминутное изменение графита от пластинчатого до шаровидного с последующим переходом в вермикулярный. Доказано, что глобулярный графит находится в пределах 1...20 мин, затем происходит обратный переход неустойчивого, неравновесного состояния в исходное.

Исследование продолжительности модифицирующего эффекта при рафинирующе-модифицирующей обработке исходного расплава позволило установить, что при сливе расплава исходного чугуна при температуре 1520°C в прогретый ковш (температура прогрева нижней части ковша 950°C) механические характеристики полученного чугуна соответствуют маркам ВЧ40...60; средняя твердость по Бринеллю – 261,8 НВ. Установлено, как протекает поминутное изменение графита от пластинчатого до шаровидного с последующим переходом в вермикулярный. Доказано, что глобулярный графит находится в пределах 3...31 мин, затем происходит обратный переход неустойчивого, неравновесного состояния в исходное.

Результаты экспериментальных работ в целом подтверждают то, что соблюдение некоторых технологических температурных приемов за счет шлакоактивных элементов удается повысить: механические характеристики; усвоение модифицирующих элементов; продление модифицирующего эффекта практически в два раза. Данный факт свидетельствует о том, что после укладки модификатора на дно прогретого ковша, после присыпания шлаком магнитоактивным, переход из твердого состояния в жидкое при увеличении температуры начинается с появления на поверхности бесконечно малого жидкого слоя, когда его ядро еще остается твердым (рисунок 4). Подобное оплавление сфероидизатора ввиду разного распределения температуры прогрева ковша обусловлено поверхностным натяжением, отражающим взаимодействие «твердое-жидкое» и изменяющим энергию системы.

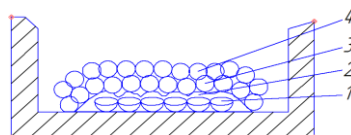


Рисунок 4 – Оплавление и обволакивание шлакоактивными элементами модификатора: 1 - модификатор; 2 - шлак магнитоактивный; 3 - лигатура; 4 - чугун дробленый со шлакообразующими добавками

В пятом разделе представлено практическое внедрение и применение способа получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом путем рафинирующе-модифицирующей обработки исходного расплава чугуна.

Внедрение данного способа позволило установить, что рафинирующе-модифицирующая технология обеспечивает получение отливок с толщиной стенки более 40мм согласно ГОСТ 7293-85 со всеми предъявляемыми к ним требованиями. Исследование технологичности метода доказало, что шаровидная форма графита правильной формы наблюдается в пределах 80...98% в отливках «холодильная плита для доменной печи» массой от 3 до 10,140 т.

При дальнейшем внедрении рафинирующе-модифицирующей технологии было установлено, что при использовании данного способа не только происходит изменение морфологии пластинчатого графита, но и предоставляется возможность варьирования металлической матрицы.

В структуре отливок «пробный сухопутный стенд для артиллерийских установок АК-230 и АК-230М» массой 3,5 т была получена преимущественно

перлитная структура. Механические испытания за счет преимущественно перлитной структуры показали $\sigma_B - 670$ МПа. Микроструктура отливок соответствует: диаметру включений графита - ШГд45; форме включений графита – ШГф4; распределению графита - ШГр2; количеству включений графита - ШГ6; типу матрицы - П70 (Ф30).

Внедрение данной технологии при получении отливок «мульды для разливочных машин» массой 50кг и толщиной стенки менее 40мм показало, что, путем изменения химического состава исходного чугуна и применения некоторых технологических приемов можно получать детали с преимущественно ферритной основой. Предел кратковременной прочности был $\sigma_B - 470$ МПа, что подтверждает марку ВЧ45. Микроструктура отливок соответствует: классификациям по структуре, форме, размеру графита: ШГф4 (шаровидная неправильная); ШГд45 (диаметр включений); ШГр1(равномерное); ШГ6 (%-е количество включений). По типу матриц: П20(Ф80).

Данная технологическая схема получения высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита совместно с ОАО «НИИ Материалов электронной техники» (г. Калуга) позволила провести НИОКР по оптимизации материала изложницы для разлива аморфных сплавов, применяемых для производства железных нанокристаллических лент АМАГ200, АМАГ201, АМАГ225. Лучшие характеристики получены при применении чугуна ВЧ60. Полученные изложницы показали большую термическую стойкость, лучшую химическую стойкость к аморфизаторам Si, V, Nb при температурах 1200...1600°С. Количество рабочих циклов увеличилось в 2,2...2,8 раз. При разнице в стоимости чугуна СЧ15 и ВЧ60 в 1,6 раза, стойкость изложницы из ВЧ60 превосходит, в среднем, в 2,5 раза СЧ15, что доказывает экономическую целесообразность использования изложницы из чугуна ВЧ60.

Промышленное опробование деталей, полученных при рафинирующе-модифицирующей технологии из высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита на ЗАО «Электромаш» (г. Ижевск), позволяет получать отливки «Палетта». В результате внедрения деталей, полученных по данной технологии, удалось повысить механические характеристики и продолжительность их использования в производстве.

Результаты исследования рафинирующе-модифицирующего способа обработки исходного расплава чугуна защищены патентом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты исследования расширяют представления о технологическом процессе при получении высокопрочного чугуна. Установлено, что упрочнение исходного чугуна и получение шаровидной формы графита при содержании серы 0,01...0,50% достигается при использовании рафинирующе-модифицирующей технологии с применением: десульфуратора - РЗМ 30,0...40,0 %, алюминия 2,0...5,0 %, кремния 30,0...50,0%; модификатора - РЗМ 0,5...1,0 %, алюминия до 1,2 %, кремния 45,0...50,0 %, кальция 0,3...0,5 %, магния 5,5...6,5%.

2. Установлено, что для полного усвоения магния в расплаве необходимо, чтобы его парообразные пузырьки, образующиеся из твердых частиц лигатуры при контакте с расплавом, успевали полностью аннигилировать за время своего образования и всплывания в жидком металле, а модифицирующий комплекс за счет шлаковых компонентов обволакивался химически активными элементами, уменьшая испарение модификатора и продлевая «модифицирующий эффект» шаровидной формы графита. Доказано, что при использовании этих компонентов происходит увеличение усвоения модификатора до 80%, так как переход из твердого состояния в жидкое при увеличении температуры начинается с появления на поверхности бесконечно малого жидкого слоя, когда его ядро еще остается твердым.

3. Разработан способ получения высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита из исходного, имеющий особенность в том, что модифицирование осуществляют при содержании серы 0,01...0,50% со значительным перегревом расплава до 1480...1520°C. Модификатор и лигатуру кладут на дно ковша, прогретого до 750...800°C, послойно: 1- слой модификатора; 2 - присыпка в виде шлака магнитоактивного; 3 – лигатура; 4 - слой присыпки в виде чугуна, дробленого со шлакообразующими добавками. Наполнение ковша расплавом осуществляют в четко отведенные временные рамки с последующей выдержкой, зависящей от массы отливки. Доказано, что при обработке десульфорирующе-модифицирующими присадками происходит уменьшение количества вводимой лигатуры, что благоприятно сказывается на экономике получаемой продукции при одновременной утилизации шлакоактивных компонентов, образующихся в доменном производстве.

4. Доказано, что наиболее продолжительным модифицирующим эффектом обладает способ рафинирующе-модифицирующей технологии. Согласно данной технологической схеме можно получать высокопрочный чугун марок ВЧ40...60 с механическими характеристиками согласно ГОСТ. Доказано, что модифицирующий эффект шаровидной формы графита находится в пределах 3...31 мин, затем происходит обратный переход неустойчивого, неравновесного состояния в исходное. Установлено, что при рафинирующе-модифицирующей обработке исходного расплава основными факторами, влияющими на продолжительность модифицирующего эффекта, являются температуры слива и прогрева ковша, при повышении которых увеличивается время нахождения шаровидного графита в промодифицированном чугуне.

5. Установлено, что использование разработанного способа ввода модификатора и лигатуры позволяет получить шаровидный графит (80...98%) в отливках массой от 50 кг до 10,140 т. Определено, что при повышении механических характеристик получаемых деталей экономический эффект ресурсо- и по энергосберегающей технологии за счет использования шлаковых композитов составил: «холодильные плиты для доменных печей» 1 447 560 руб.; «пробный сухопутный стенд для артиллерийских установок АК-230, АК-230М» 3 294 руб.; «мульды для разливочных машин» 428 323 руб.

6. Данная технологическая схема получения высокопрочного чугуна с шаровидной формой внедрена в действующее производство: ОАО «НИИ Материалов электронной техники» (г. Калуга) при оптимизации материала изложницы для разлива аморфных сплавов, применяемых в производстве железных нанокристаллических лент с повышением стойкости изложницы из ВЧ60 в среднем в 2,5 раза; ЗАО «Электромаш» (г. Ижевск) позволяет получать отливки «Палетта» с годовым экономическим эффектом 482 256 руб.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства
образования и науки Российской Федерации

1. Зенкин, Р.Н. Разработка пробного сухопутного стенда для артиллерийских установок АК-230 и АК230М из высокопрочного чугуна [Текст] / Р.Н. Зенкин, Н.Н. Зенкин, А.И. Вальтер // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2015. - Т. 58. - №7. - С. 491-495.

2. Зенкин, Р.Н. Изменение микроструктуры чугуна с шаровидным графитом после различных методов термической обработки [Текст] / Р.Н. Зенкин, А.И. Вальтер, А.А. Протопопов // Научно-технический и производственный журнал «Заготовительные производства в машиностроении». - М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2016. - №1. - С. 3-6.

3. Зенкин, Р.Н. О влиянии продолжительности модифицирующего эффекта на механические характеристики высокопрочного чугуна [Текст] / Р.Н. Зенкин / Литейное производство. - 2016. - №11. - С. 2-6.

4. Зенкин, Р.Н. О влиянии фракционного состава модификатора на увеличении эффекта модифицирования ЧШГ [Текст] / Р.Н. Зенкин, А.И. Вальтер // Литейное производство. - 2017. - №7. - С. 2-5.

5. Зенкин, Р.Н. Изменение первично-литой микроструктуры высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита с помощью закалки и отпуска [Текст] / Р.Н. Зенкин // Научно-технический и производственный журнал «Заготовительные производства в машиностроении». - М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2017. - №7. - С. 334-335.

**Научные статьи, опубликованные в материалах международных, все-
российских и межрегиональных конференций**

6. Зенкин, Р.Н., Влияние углерода на механические свойства высокопрочного чугуна [Текст] / Р.Н. Зенкин, А.И. Вальтер // Сборник научных и научно-методических работ кафедры: «Сварка, литье и технологии конструкционных материалов». - Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. - С. 85-95.

7. Зенкин, Р.Н. Закалка высокопрочного чугуна [Текст] / Р.Н. Зенкин // Сборник научных и научно-методических работ кафедры: «Сварка, литье и технологии конструкционных материалов». - Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. - С. 91-95.

8. Зенкин, Р.Н. Холодильники из чугуна с шаровидным графитом [Текст] / Р.Н. Зенкин // V Молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов /

Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Е.А Ядыкина. В 2 ч. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. - Ч. 1. - С. 80-82.

9. Зенкин, Р.Н. Вторичное модифицирование высокопрочного чугуна [Текст] / Р.Н. Зенкин // VI Молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов / Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Е.А Ядыкина. В 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Ч. 1. С. 121-124.

10. Зенкин, Р.Н. Получение высокопрочного чугуна с шаровидным графитом модифицированием расплава в открытом ковше [Текст] / Р.Н. Зенкин // VII молодежная научно - практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов / Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Е.А. Ядыкина. В 3 ч. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - Ч. 1. - С.116-117.

11. Зенкин, Р.Н. Получение высокопрочного чугуна [Текст] / Р.Н. Зенкин // VII Молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов / Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Е.А Ядыкина. В 3 ч. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - Ч. 1. - С.117-118.

12. Зенкин, Р.Н. Изучение микроструктуры высокопрочного чугуна при различных методах термообработки [Текст] / Р.Н. Зенкин, М.М. Уткин, А.И. Вальтер // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 174-179.

13. Зенкин, Р.Н. Механизм кристаллизации высокопрочного чугуна [Текст] / Р.Н. Зенкин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6. Ч. 1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 192-200.

14. Зенкин, Р.Н. Механизм и разновидности модифицирования высокопрочного чугуна [Текст] / Р.Н. Зенкин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. - С. 6-15.

15. Зенкин, Р.Н. Производство отливок из высокопрочного чугуна с использованием металлизированных окатышей [Текст] / Р.Н. Зенкин, А.И. Вальтер // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 7. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. - С. 141-147.

16. Зенкин, Р.Н. Модификаторы и технологии внепечной обработки высокопрочного чугуна [Текст] / Р.Н. Зенкин, А.И. Вальтер // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11. Ч.1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. - С. 30-41.

17. Зенкин, Р.Н. Оценка параметров ввода мелкодисперсных кремнийсодержащих материалов в расплав чугуна на стадии разлива [Текст] / Р.Н. Зенкин, А.И. Вальтер // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11. Ч.1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. - С. 62-66.

18. Зенкин, Р.Н. Математическое моделирование процесса расплавления магнийсодержащего модификатора при модифицировании высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита [Текст] / Р.Н. Зенкин, Н.Н. Зенкин, А.И. Вальтер // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. - Нижний Новгород, 2015. - №4(111). - С. 171-177.

19. Зенкин, Р.Н., Физико-химические процессы в железоуглеродистых сплавах [Текст] / Р.Н. Зенкин, А.И. Вальтер, А.А. Протопопов, Е.Г. Евдокимов, Е.А. Протопопов, Ю.В. Чапкова: монография. - Тула: ТулГУ, 2016 – 302 с.

20. Зенкин, Р.Н. Об использовании противопригарных покрытий для форм из холодно-твердеющих смесей при получении чугуновых отливок [Текст] / Р.Н. Зенкин // Литейное производство. - 2017. - №1. - С. 11-14

Патенты на изобретения

21. Патент №2586730. Российская Федерация. Способ получения высокопрочного чугуна / Р.Н. Зенкин, Н.Н. Зенкин, заявитель и патентообладатель Зенкин Р.Н. - №2015110457/02; заявл.25.03.2015; опубл. 10.06.2016. Бюл. №16. – 10 с.