

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы

(наименование)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Инжиниринг перспективных материалов и диагностика поведения
материалов в изделиях

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Комплексный подход к снижению уровня дефектности
отливок из высокопрочного чугуна»

Обучающийся Н.С. Алексеев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный д.ф.-м.н., доцент, Н.Н. Грызунова

руководитель

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Введение.....	3
1 Теоретический анализ проблемы исследования	7
1.1 Модифицирование расплава чугуна.....	15
1.2 Модификаторы на основе магния и их влияние на свойства чугуна.....	17
1.3 Способы модифицирования чугуна.....	19
1.3.1 Ковшовое модифицирование.....	20
1.3.2 Внутриформенное модифицирование	23
1.3.3 Модифицирование на жёлобе.....	24
1.3.4 Модифицирование порошковой проволокой	25
1.4 Прогрессивные технологии обработки чугуна.....	27
2 Материалы и методы исследования	33
2.1 Методы исследования.....	33
2.1.1 Подготовка материалов для модифицирования чугуна.....	33
2.1.2 Комплексный подход к подготовке шихтовых материалов и расплава.....	36
2.2 Методика введения модификатора «Заливка сверху».....	40
2.3 Методика проведения спектрального анализа проб.....	41
2.4 Микроструктурный анализ чугуна в отливках.....	44
2.5 Механические испытания отливок из чугуна марки Gh-75-50-03.....	50
3 Результаты исследования структуры и механических свойств чугуна в отливках вала коленчатого.....	56
3.1 Результаты исследования структуры чугуна в отливках вала коленчатого.....	56
3.2 Результаты исследования механических свойств чугуна в отливках вала коленчатого.....	65
3.3 Анализ результатов исследования структуры и механических свойств чугуна в отливках вала коленчатого.....	75
Заключение.....	78
Список используемых источников.....	79

Введение

Заготовительное производство является основой для изготовления отливок деталей и узлов, которые затем используются в автомобильной промышленности.

Важным направлением развития заготовительного производства является разработка и внедрение новых способов управления качеством изготавливаемых отливок, которые позволяют обнаруживать дефекты литья на ранних стадиях производственного процесса, сокращая таким образом затраты на устранение дефектов и повышая качество готовой продукции. Также необходимо проводить научные исследования и разработку новых технологий литья, которые позволят производить отливки в соответствии с требуемыми параметрами, с минимальной долей дефектной продукции и минимальными затратами.

Исследованиями в области чугунолитейного производства занимались многие учёные, из большого числа определено выделить можно таких, как:

– Н.И. Беляев - советский учёный, занимавшийся исследованиями в области металлургии. Основная научная публикация — это «Макроструктура стали в связи с кристаллизацией» опубликованная в 1910 году это фундаментальная работа, принёсшая автору широкую известность. В этой публикации были заложены основы для изучения макроструктуры металлов, что впоследствии нашло применение и в чугунолитейном производстве. Его работы заложили основу для развития металлографии и совершенствования технологий литья как стальных, так и чугунных изделий [1].

– Б.Б. Гуляев - российский учёный, изучавший процессы кристаллизации и структуру чугунов. Научные интересы Б.Б. Гуляева охватывали широкий спектр вопросов: физико-химические основы создания сплавов; кристаллизация металлов и сплавов; структура и свойства металлических материалов; технология литья; упрочнение металлов. Его работы внесли значительный вклад в развитие теории и практики создания

новых металлических материалов, особенно в области чугунов и сплавов с вермикулярным графитом. Основные научные труды:

1. «Физико-химические основы синтеза сплавов» опубликованная в 1980 году это фундаментальный труд, посвящённый теоретическим основам создания новых сплавов [2].;

2. «Синтез сплавов: основные принципы: выбор компонентов» опубликованная в 1984 году это монография, в которой изложены принципы разработки новых сплавов [3];

3. «Структура и свойства сплавов: (некоторые вопросы металловедения и прочности)» опубликованная в 1993 году это коллективная монография под редакцией А.М. Паршина и И.М. Неклюдова, где Б.Б. Гуляев выступил одним из авторов [4].

– А.А. Рыжиков - советский учёный, в области литейного производства. Некоторые научные публикации А. А. Рыжикова по чугунам:

1. «Модифицирование чугуна жидкой чугуномагниево-лигатурой» (совместно с С. И. Рябуховым) [5].

2. «Улучшение свойств чугуна с шаровидным графитом за счет модифицирования ферросилицием и комплексного модифицирования» (совместно с А. С. Кузнецовым) [6].

3. «Применение комплексных модификаторов при изготовлении тонкостенных отливок из чугуна с шаровидным графитом» (совместно с А. С. Кузнецовым) [7].

В современном чугунолитейном производстве для получения отливок с требуемыми характеристиками применяется целый комплекс материалов и технологий. Это необходимо, поскольку исходные расплавы чугуна могут существенно различаться по своим свойствам. Для достижения необходимых характеристик отливок используются различные модифицирующие добавки.

Исследованиями по влиянию модификаторов на свойства чугунных отливок занимались многие учёные, включая российских учёных В. А. Роде, А. И. Вейника, А. А. Рыкова, а также зарубежных учёных, таких как Дж. Х.

Холл (J. H. Hall), Дж. А. Дик (J. A. Dick) и другие. [30] Они проводили эксперименты с различными модификаторами и условиями обработки чугуна, чтобы определить оптимальные параметры для получения определенных характеристик отливок.

Однако, в настоящее время, в условиях постоянно растущих требований к качеству и сроку службы автокомплектующих, проблемы дефектности отливок чугунолитейного производства остаются актуальными.

Таким образом, основная задача, которую необходимо решить, заключается в развитии и совершенствовании технологии производства чугунных отливок с использованием современных основных и вспомогательных материалов, которые позволили бы в зависимости от предъявляемых требований достигать заданных свойств и характеристик для снижения уровня дефектности продукции. Выполнение поставленной задачи предполагает обобщение и систематизацию информации о процессах модифицирования чугунов, которые являются одними из наиболее значимых в технологии получения литья. Осуществление этих мер позволит предприятиям обеспечить средства, необходимые для инициирования процесса модернизации.

Цель работы: выявить влияние технологического процесса получения чугунных отливок, включающего модифицирование и термическую обработку, на структуру и свойства чугуна в отливках и предложить пути его оптимизации.

Задачи, которые требуют решения в процессе выполнения работы:

- провести аналитический обзор методов модифицирования и влияние различных материалов на свойства чугунных отливок;
- изучить существующие методы модифицирования чугуна и модификаторы. Выбрать (с целью минимизации дефектности отливок) наиболее перспективные;

- провести анализ технологического процесса производства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом и предложить возможные изменения его параметров;
- исследовать структуру и механические свойства чугуна в литых отливках на примере вала коленчатого;
- провести анализ результатов исследования структуры и механических свойств чугуна в отливках вала коленчатого и сформулировать предложения по снижению уровня дефектности отливок.

Объектами исследования являются отливки из высокопрочного чугуна марки Gh75.

Предметами исследования являются свойства отливок и технологический процесс производства чугуна с различными модификаторами, термическая обработка заготовок.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в определении наиболее эффективной технологии модифицирования и термообработки чугуна марки Gh75.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов для выбора наиболее эффективной технологии получения чугуна, включающей модифицирование и термообработку, в различных областях промышленности. Это позволит повысить качество и надёжность выпускаемой продукции, а также снизить ее стоимость за счёт уменьшения затрат.

Апробация результатов исследования проводилась на конференции в Открытой школе – конференции стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы-2024».

Диссертационное исследование изложено на 84 страницах, состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемых источников. Содержит 25 рисунков, 13 таблиц и 51 источник.

1 Теоретический анализ проблемы исследования

В современных условиях развития Российского автопрома важным является развитие и совершенствование технологий производств, в частности чугунолитейного производства, для создания конкурентоспособной и качественной продукции.

«Чугуном принято называть железоуглеродистые сплавы, содержащие углерод при нормальных условиях кристаллизации выше предела растворимости в аустините и эвтектику в структуре. В соответствие с диаграммой состояния железоуглеродистых сплавов чугуном являются сплавы, содержащие углерода более 2%. Эвтектика в структуре этих сплавов в зависимости от условий её образования может быть карбидной или графитной» [16, с. 5].

Исследованиями в области чугунолитейного производства и металлургии занимались многие учёные, из большого числа выделим работы, которые внесли большой вклад в развитие и помогли улучшить качество производимых отливок, а именно:

– Н.И. Беляев - советский учёный, занимавшийся исследованиями в области металлургии. Основная научная публикация — это «Макроструктура стали в связи с кристаллизацией» [2]. «Н. И. Беляев подробно анализирует процесс кристаллизации стали при её затвердевании в зависимости от различных условий разливки, химического состава металла, формы изложницы и других факторов. Он приходит к выводу, что «макроструктура кристаллов и, следовательно, стали есть следствие неоднородности твёрдого раствора и потому есть общее типичное явление для всех сортов стали» [3]. Далее учёный подчёркивает, что «макроструктура есть устойчивая форма строения стали», что кристаллы существуют в любом металле - литом, кованом, обработанном закалкой, отжигом и т. д. Однако различные способы обработки металла вносят некоторые изменения в макроструктуру. При ковке и прокатке, например, кристаллы деформируются, их частицы

механически перемещаются, а это влечёт за собой соответствующие изменения макроструктуры. Термическая обработка вызывает местные изменения в строении соседних частиц и объёмов, образующих макроструктуру кристаллов стали» [29].

– Б.Б. Гуляев - российский учёный, изучавший процессы кристаллизации и структуру чугунов. Научная публикация — «Структура и свойства сплавов: (некоторые вопросы металловедения и прочности)» опубликованная в 1993 году это коллективная монография под редакцией А.М. Паршина и И.М. Неклюдова, где Б.Б. Гуляев выступил одним из авторов.[8]. В работе рассматриваются ключевые аспекты взаимосвязи между структурой и свойствами металлических сплавов. Особое внимание уделяется фундаментальным вопросам материаловедения, включая механизмы формирования кристаллической структуры и фазовые превращения в процессе термической обработки [9].

Авторы подробно анализируют влияние структурных составляющих на физико-механические свойства материалов. В частности, детально изучаются процессы кристаллизации, которые играют определяющую роль в формировании конечной структуры сплавов. Работа представляет собой комплексное исследование, объединяющее теоретические основы материаловедения с практическими аспектами формирования структуры и свойств металлических материалов. Полученные результаты имеют важное значение для развития теории материаловедения и создания новых материалов с улучшенными характеристиками. Значимость работы заключается в возможности применения полученных данных при разработке технологических процессов производства отливок.

– А.А. Рыжиков - советский учёный, в области литейного производства. Некоторые научные публикации А. А. Рыжикова по чугунам:

1. «Модифицирование чугуна жидкой чугуномагниево-лигатурой» (совместно с С. И. Рябуховым) [26]. «В работе исследуется процесс модифицирования чугуна с использованием жидкой чугуно-магниево-

лигатуры. Основное внимание уделяется взаимодействию между жидкой лигатурой и немодифицированным чугуном.

Применяемая методика исследования включает в этапы:

- Получение жидкой чугуномагниевого лигатуры при температуре 1300-1350°C в ковше-автоклаве объемом 8 тонн;
- Создание избыточного давления воздуха около 0,35 Мпа;
- Добавление ферросилиция (0,25-0,40% от массы чугуна).

Основные характеристики использованной лигатуры – это содержание в составе магния от 0,16% до 0,32% и содержание серы от 0,010 до 0,024%.

Процесс модифицирования происходил путем перелива лигатуры в разогретый ковш и одновременном наполнение ковша немодифицированным горячим чугуном из вагранки. Содержание серы в немодифицированном чугуне составляло в пределах 0,060-0,108%, а массовое соотношение между немодифицированным чугуном и лигатурой в пределах 0,8-1,9.

Основные полученные результаты работы:

- Среднеарифметическая степень усвоения магния чугуном из лигатуры составляет $85,2 \pm 7,5\%$;
- Установлена зависимость коэффициента эффективной диффузии серы от температуры;
- Выявлено, что скорость гомогенной реакции десульфурации чугуна ограничивается массопереносом магния.

Полученные результаты привели к выводам, что при переходе магния в раствор его обессеривающее действие существенно снижается (в 18 раз), разработана технология конвективного перемешивания с усвоением магния в пределах $82,5 \pm 7,5\%$ и получены аналитические зависимости для оценки влияния температуры на коэффициенты эффективной диффузии серы.

Данная работа представляет собой комплексное исследование процесса модифицирования чугуна, включающее как теоретические аспекты (термодинамические условия, коэффициенты диффузии), так и практические разработки (технология конвективного перемешивания) [26].»

«Чугу́н — сплав железа с углеродом (и другими элементами), в котором содержание углерода — не менее 2,14 % (точка предельной растворимости углерода в аустените на диаграмме состояний), а сплавы с содержанием углерода менее 2,14 % называются сталью. Углерод придаёт сплавам железа твёрдость, снижая пластичность и вязкость. Углерод в чугуне может содержаться в виде цементита и графита. В зависимости от формы графита и количества цементита выделяют белый, серый, ковкий и высокопрочный чугуны. Чугуны содержат постоянные примеси (Si, Mn, S, P), а в некоторых случаях — также легирующие элементы (Cr, Ni, V, Al и другие). Как правило, чугун хрупок. Плотность чугуна - 7.874 г/см³. [24]»

Чугун подразделяется на несколько категорий в зависимости от количественного включения углерода и других химических элементов. Серый чугун, например, имеет графитовые включения в виде пластин и волокон, которые придают ему хорошие литейные свойства и делают его идеальным для изготовления деталей сложной формы. В свою очередь, высокопрочный чугун, содержит шаровидные включения графита, что придаёт ему высокую прочность и ударную вязкость. «Такие чугуны изготавливают с помощью добавления в расплав серого чугуна Mg, который способствует образованию шаровидной формы графита» [13].

«Белый (передельный) чугун — вид чугуна, в котором углерод находится в связанном состоянии в виде цементита, в изломе имеет белый цвет и металлический блеск. В структуре такого чугуна отсутствуют видимые включения графита.

Отливки белого чугуна обладают износостойкостью, жаростойкостью и коррозионной стойкостью. Прочность снижается, а твёрдость возрастает с увеличением содержания углерода и карбидов.

Наивысшую твёрдость имеет белый чугун с мартенситной структурой. Особо высокой твёрдостью HB 800-850 обладает чугун с содержанием 0,7-1,8% бора.

Белый чугун является весьма ценным материалом для деталей, работающих в условиях износа при очень высоких удельных давлениях и преимущественно без смазки.

Характерные особенности легированного белого чугуна определили области его использования в качестве нержавеющей и магнитного чугуна, а также чугуна с высоким электросопротивлением.

Однако преимущественно белый чугун впоследствии переделывается в сталь (80%) и другие виды чугуна, поэтому носит название переделного.

Серый (литейный) чугун — сплав железа с графитом, который присутствует в виде пластин или волокон. [15]»

«Серый чугун характеризуется высокими литейными свойствами (низкая температура кристаллизации, высокая жидкотекучесть, малая усадка) и служит основным материалом для литья. Широко применяется в машиностроении для отливки станин станков и механизмов, поршней, цилиндров. [15]»

«Кроме углерода, серый чугун содержит в себе другие элементы. Важнейшие из них — кремний и марганец. В большинстве марок серого чугуна содержание углерода лежит в пределах 2,4-3,8%, кремния 1,0-4,0% и марганца до 1,4%. [15]»

«Ковкий чугун — мягкий и вязкий чугун, получаемый из белого отливкой и дальнейшей термической обработкой. Используется графитизирующий отжиг — длительный отжиг, в результате которого происходит распад цементита с образованием графита. [15]»

«Ковкий чугун, как и серый, состоит из сталистой основы и содержит углерод в виде графита, однако в форме хлопьев, которые получают при отжиге (углерод отжига) и изолированы друг от друга, в результате чего металлическая основа менее разобщена и чугун обладает вязкостью и пластичностью» [12].

«По составу белый чугун, подвергающийся отжигу на ковкий чугун, является доэвтектическим и имеет структуру ледебурит-цементит

(вторичный)-перлит. Для получения структуры феррит-углерод отжига в процессе отжига должен быть разложен цементит ледебурита, вторичный цементит и цементит эвтектоидный, то есть входящий в перлит. Разложение цементита ледебурита и цементита вторичного (частично) происходит на первой стадии графитизации, которую проводят при температуре выше критической (950-1000 °C); разложение эвтектоидного цементита происходит на второй стадии графитизации, которую проводят путём выдержки при температуре ниже критической (740-720 °C), или при медленном охлаждении в интервале критических температур (760-720 °C) [20]».

«Высокопрочный (модифицированный) чугун — чугун, имеющий графитные включения сфероидальной формы, который имеет меньшее отношение поверхности к объёму, что определяет наибольшую сплошность металлической основы и прочность чугуна. Структура металлической основы чугунов с шаровидным (сфероидальным) графитом такая же, как и в сером чугуне. В зависимости от химического состава, скорости охлаждения (толщины стенки отливки) могут быть получены ферритный, феррито-перлитный или перлитный высокопрочный чугун. [14]»

В свою очередь, высокопрочный чугун, содержит шаровидные включения графита, что придаёт ему высокую прочность и ударную вязкость. «Такие чугуны изготавливают с помощью добавления в расплав серого чугуна Mg, который способствует образованию шаровидной формы графита» [17].

В работе Псыркова Н.В. «Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как новый конструкционный материал.» [22], говорится, что «Начало производства бейнитных чугунов с шаровидным графитом относится к середине 60х годов XX века. Главной причиной повышенного внимания ряда фирм к ним является значительное снижение энергозатрат при производстве деталей типа зубчатых колес, шатунов, распределительных валов, поворотных цапф передней оси подвески, элементов трения торможения, меньшая склонность к образованию раковин

(по сравнению со сталью), уменьшение припусков на мехобработку, снижение массы отливок на ~ 10 %, а также малое изменение размеров при термической обработке. [18, 31, 4]»

Однако, в процессе литья в отливках появляются металлургические дефекты, которые являются одной из важных причин неудовлетворительных свойств полученных отливок.

В работе Новикова А.А., Дробышевского П.С., Тюрина С.А., Чумака Д.С. «Механические и эксплуатационные свойства высокопрочного чугуна марки ВЧТГ» представлены результаты исследований по изготовлению специального высокопрочного чугуна (марки ВЧТГ) с высокими механическими свойствами. Улучшения механических свойств высокопрочного чугуна с шаровидным графитом ВЧТГ, авторы работы добились за счет изменения структурного состояния, которое регулировалось путем соответствующей термической обработки.

В другой работе Янкевича С.Н., Хроля И.Н., Ковалько М.С., Полидовца И.И. «Использование высокопрочных чугунов с аусферритной структурой для системы возвратнопоступательного перемещения поршней ДВС и усовершенствование параметров ее работы» утверждается, что «оптимальным сочетанием прочностных и пластических свойств обладают образцы из высокопрочных чугунов, подвергнутые изотермической выдержке при 350 в течение 20 мин и содержащие 2,9–3,1 мас. % С; 3,2–3,5 мас. % Si; 0,28–0,31 мас. % Mn; 0,7 мас. % Cu; 0,35 мас. % Mo и 0,025 мас. %.» [32]. «Рассмотрено влияние различных способов охлаждения при проведении изотермической закалки чугунов: в спрейерной камере и струйным охлаждением как альтернативе традиционной закалке в расплаве солей. Полученные данные указывают, что при струйно-воздушной изотермической закалке происходит полное и равномерное формирование структуры чугуна по сечению, обеспечивая при этом уровень предела прочности при растяжении до 950 МПа, твердости до 360–370 НВ с сохранением относительного удлинения при растяжении до 8 % [32].»

В работе Гурьева М.А., Иванова С. Г., Романенко В. В., Аугсткална А. И., Зенина М. Н., Черных Е. В., Гурьева А. М. «Влияние термической обработки на физико-механические свойства высокопрочного чугуна ВЧ 50» проведены исследования влияния термической обработки на эволюцию структуры и физико-механические свойства высокопрочных чугунов марки ВЧ 50. Авторы Гурьев М.А., Иванов С.Г., Романенко В.В., Аугсткалн А.И., Зенин М.Н., Черных Е.В., Гурьев А.М. показали, что «нарушение технологии модификации и дальнейшей термической обработки отливки приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик чугуна. Проведение повторной термической обработки по правильному режиму позволило улучшить микроструктуру и нивелировать эти недостатки. После повторной термической обработки в виде отжига при температуре 700 °С в течение 4 часов с последующим охлаждением до 400 °С вместе с печью, далее – на воздухе, позволило увеличить долю сфероидизированных частиц графита с 32,7 до 65 об. %. Отжиг проводили с целью повышения прочностных свойств материала, а также пластичности и ударной вязкости [10].»

Исследования в области влияния модификаторов на чугун проводились в 1990-е и 2000-е годы и продолжаются по сей день. Учёные из разных стран мира проводят эксперименты, разрабатывают новые методы модификации чугунных сплавов и исследуют возможности применения полученных материалов в разнообразных секторах экономики:

Исследованиями по влиянию модификаторов на свойства чугунных отливок занимались многие учёные, включая российских учёных В. А. Роде, А. И. Вейника, А. А. Рыкова, а также зарубежных учёных, таких как Дж. Х. Холл (J. H. Hall), Дж. А. Дик (J. A. Dick) и другие. Они проводили эксперименты с различными модификаторами и условиями обработки чугуна, чтобы определить оптимальные параметры для получения определенных характеристик отливок.

Модификаторы – это вещества, добавляемые в чугун для изменения его свойств. Они могут влиять на структуру и свойства сплава различными

способами. Наиболее часто используемыми модификаторами являются магний, церий, силикокальций и другие редкоземельные металлы. Все эти материалы содержащие элементы в различных соотношениях вводимой пропорции изменяют форму и распределение графитовых включений, меняя прочность, твёрдость и износостойкость чугуна [1, 4, 13].

Магний, например, является одним из наиболее часто используемых модификаторов, так как он способствует образованию сфероидального графита в высокопрочном чугуне. Церий и кальций также влияют на форму графитовых включений и могут использоваться для улучшения литейных свойств чугуна. Редкоземельные металлы, такие как тербий и диспрозий, могут значительно увеличить прочность и износостойкость чугуна благодаря их способности образовывать интерметаллические соединения с железом.

Таким образом, влияния различных модифицирующих материалов на качество чугунных отливок показывает, что добавление определенных веществ может существенно изменять свойства этого сплава, делая его более прочным, износостойким, устойчивым к коррозии или обладающим другими полезными характеристиками. Это позволяет использовать чугун в самых разнообразных секторах экономики, в частности для производства автокомпонентов.

1.1 Модифицирование расплава чугуна

Модифицирование означает изменение структуры и свойств литейного чугуна путем управления процессом затвердевания отливки. Это достигается за счет минимизации переохлаждения и увеличения числа точек графита при его кристаллизации в расплаве. Модификаторы, вводимые непосредственно перед разливкой, обеспечивают наличие процесса графитизации во время охлаждения отливок. Традиционно использовались модификаторы, изготавливаемые на базе ферросилиция, силикокальция или графита. Сейчас самым популярным модификатором является ферросилиций, содержащий

небольшие количества различных элементов, таких как алюминий, барий, кальций, стронций, празеодим и цирконий [43]. Различные модификаторы могут оказывать значительное влияние на свойства чугуна, изменяя такие характеристики как твёрдости, прочностные, износостойкости, пластичности, коррозионной стойкость и другие характеристики. Однако, избыток модификаторов способен вызвать неблагоприятные результаты, таким как образование трещин или снижение пластичности. Поэтому важно правильно подобрать количество и тип модификатора для каждого конкретного случая.

Цель модифицирования состоит в обеспечении процесса кристаллизации, чтобы он высвободился в виде графита, а не цементита (карбида железа Fe_3C). Для этого исключается возможность переохлаждения ниже температуры перехода расплава в ледебурит, в результате чего образуются карбидные структуры. Механизм кристаллизации чугуна в обычных условиях приводит к формированию отбеленных структур, которые нежелательны в отливках, так как затрудняют механическую обработку и требуют дополнительной термической обработки, что приводит к повышению затрат и вероятности брака.

Модификация, направленная на графитизацию, изменяет процесс затвердевания и структуру отливок. Изучение реакций кристаллизации доэвтектического расплава чугуна (углеродный эквивалент менее 4,3%) помогает понять эффект модификации. Первая фаза, которая кристаллизуется в чугуне – это первичный аустенит, который затем насыщается растворившимся углеродом. Кристаллизация, которая происходит при достижении максимального содержания более 4,5% в расплаве углеродного эквивалента, называется финальной или эвтектической кристаллизацией. Однако в реальных условиях равновесная реакция кристаллизации встречается в исключительных случаях [5].

Механизм модификации заключается во включении процесса кристаллизации графита в структуру чугуна, что стимулирует формирование

и рост включений графита при незначительном переохлаждении чугуна. В результате этого процесса формируется графит типа “А” в отливках из серого чугуна и мелкие глобулы графита в отливках из белого чугуна

1.2 Модификаторы на основе магния и их влияние на свойства чугуна

Магний – самый популярный сфероидизирующий элемент, и он обычно вводится в расплав в составе многокомпонентного сплава (модификатора). Эти сплавы содержат небольшое количество различных элементов, позволяющих снизить интенсивность реакции, способствовать сфероидизации графита, нейтрализовать эффект примесных элементов, отрицательно воздействующих на морфологию графита, и контролировать структуру металлической матрицы. Наиболее часто используемый сплав для сфероидизирующей обработки чугуна - ферросилиций, содержащий 3-12 % магния. Магний и его сплавы имеют низкую температуру испарения и, следовательно, их ввод в металл необходимо производить под строгим контролем [36].

Обработка расплава магнием служит методом изменения его структуры с целью обеспечения роста графита в виде сферических частиц вместо пластин, данное воздействие помогает повысить характеристики и свойства полученных отливок. Этот процесс сфероидизации расплава можно сравнить с его десульфурацией и раскислением, где элементы с высокими характеристиками воздействия схожими с кислородом и серой вводятся в расплав. После удаления растворенных серы и кислорода из расплава, кристаллизация графита происходит в форме сфер согласно его кристаллографической природе.

За многие годы развития технологии производства высокочастотных материалов начиная с начала 1950х, было создано и усовершенствовано множество различных процессов обработки. Некоторые из этих процессов

включали в себя вдувание порошков в расплав через специальные трубы (фурмы) с последующим перемешиванием расплава в специальных ёмкостях (ковшах), однако на сегодняшний день большинство из этих процессов больше не используются. Сейчас наиболее распространённые процессы включают заливку расплава сверху с использованием различных типов модификаторов, таких как ферросиликомагний (ФСМг), в ковшах различных конструкций. Чтобы повысить эффективность усвоения магния, были разработаны различные конструкции ковшей, включая те, которые используют специальные крышки.

Еще одна группа процессов обработки высокочастотных материалов включает в себя способы непрерывной обработки расплава. Это включает в себя так называемый “in-mould” процесс и процесс модифицирования в потоке, которые отличаются тем, что чугун обрабатывается непрерывно в процессе его прохождения через модификатор. ФСМг (ферросиликомагний) помещается в специально разработанный резервуар (процесс модифицирования в потоке) или реакционную камеру формы для литья, которая является частью системы литья (“in-mould” процесс) [48].

И наконец, последним способом обработки, который недавно присоединился к основной группе, является процесс обработки расплава с помощью проволоки с наполнителем. Этот метод стал популярен в течение последних десяти лет и представляет собой тип процесса, в котором материал, содержащий магний (металлический магний или сплав), помещается в полость стальной трубки, которая затем погружается в расплавленный металл. При контакте с раскалённым металлом, проволока плавится, и реакция между магнием и расплавом продолжается в течение всего времени, необходимого для введения проволоки нужной длины.

Основными модификаторами на основе магния являются:

- силикокальций (CaSi) — это соединение кальция и кремния, которое активно используется в качестве добавки для улучшения характеристик и свойств получаемых отливок;

- алюминиево-кальциево-магниево-магний (Al-Ca-Mg) - они также могут использоваться в качестве модификаторов, так как обладают высокой активностью и обеспечивают измельчение структуры чугуна;
- силикомагний (MgSi) - этот модификатор даёт возможность изготовления отливок с повышенными прочностными и износостойкими характеристиками;
- цирконий-магний (Zr-Mg) сплавы - обладают высокой эффективностью в улучшении характеристик и свойств получаемых отливок, благодаря их способности образовывать мелкозернистую структуру.

1.3 Способы модифицирования чугуна

В целом, использование модификаторов на основе магния в чугуне позволяет улучшить его механические характеристики, такие как прочность, износостойкость, усталостная прочность и ударная вязкость. Это делает чугун более пригодным для использования в различных промышленных отраслях, с высокими требованиями к механическим свойствам. Существует несколько способов ввода модификаторов в чугун, и выбор конкретного способа зависит от условий производства, требований к качеству металла и наличия модификаторов. В зависимости от этих факторов могут быть использованы различные методы модифицирования, например, внутри форменное модифицирование, внутри жёлобное, внутри ковшевое или с помощью модифицирующей проволоки. Применяемые способы сфероидизирующего воздействия на расплав чугуна подразделяют на несколько методов:

- модифицирование на заливочной линии заключается во введении модификатора непосредственно в полость формы перед заливкой. Этот метод обычно используется для получения крупных отливок, где

необходимо обеспечить равномерное распределение модификатора по всему объёму;

– модифицирование в специальном устройстве для проведения реакций подразумевает размещение формы внутри специальной камеры, в которую затем вводится модификатор. Камера обеспечивает равномерное перемешивание модификатора с расплавленным чугуном, что позволяет получить более высокое качество металла [25];

– модифицирование в ковше заключается в добавлении модификатора в ёмкость ковша непосредственно перед наполнением ковша расплавом чугуна для дальнейшей транспортировки на разливку по формам. Этот метод удобен тем, что модификатор можно добавить прямо перед началом процесса литья, что обеспечивает более точное дозирование и контроль за качеством металла;

– модифицирование с использованием проволоки подразумевает использование специальной проволоки, которая содержит модификатор и при прохождении через расплавленный чугун обеспечивает его равномерное распределение. Этот метод особенно удобен для обработки больших объёмов металла и производства отливок в соответствии с требуемыми параметрами и с минимальной долей дефектной продукции.

1.3.1 Ковшовое модифицирование

Процесс производства высокопрочного чугуна с использованием модификаторов наиболее легко реализуется в стационарных ковшах в процессе заполнения чугуна и модификации. Стационарные ковши сохраняют постоянное положение в течение всего процесса. В таких ковшах достигается лучшее усреднение магния (30-60%) в расплаве чугуна, когда модификатор вводится по сэндвич-процессу. Этот метод предполагает размещение модификатора на дне ковша и его пригрузку сталью, чугуном, дробью или стружкой [27]. Существует множество вариаций сэндвич-процесса, и модификатор, может быть, пригружен различными материалами.

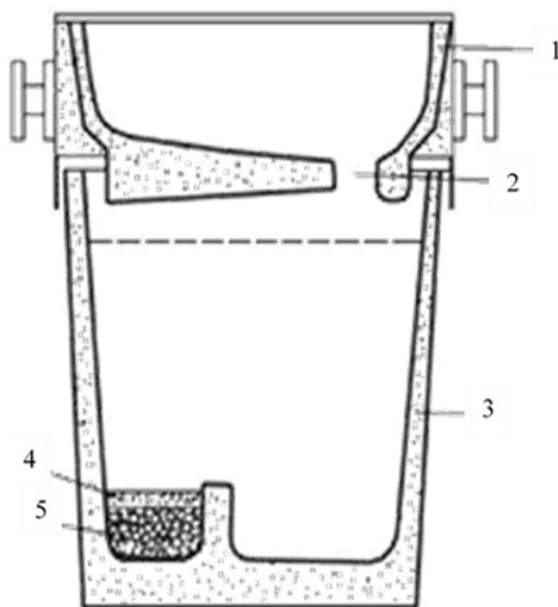
Такой подход позволяет эффективно использовать модификаторы и достигать высоких показателей усвоения магния.

Суть процесса заключается в подготовке и разделении ковша для его использования в металлургическом производстве. Для этого на дне ковша устанавливается перегородка, которая разделяет ковш на несколько зон: реакгентную и металлоприемную. В реакгентной камере на дно укладывается слой металлического материала высотой один-два сантиметра. Это делается с целью предотвращения зашлаковывания камеры, то есть образования шлаковых осадков, которые могут негативно сказаться на качестве металла. После этого на слой металлического материала засыпается определенное количество сфероидизирующего и графитизирующего модификаторов. Эти добавки обычно используются для улучшения свойств металла, в особенности для придания ему сфероидальной (шаровидной) структуры и улучшения его графитизации [28]. Процесс размещения перегородки и добавок на дне ковша позволяет оптимизировать условия и полного усвоения модификатора, что уменьшает преждевременное сгорание магния и повышает качество полученных отливок.

Одним из способов реализации данной технологии может быть использование специальной системы набора и заливки металла, которая обеспечивает высокую скорость заливки и защиту от несвоевременного заполнения расплавом реакционной камеры. Примером такой системы может быть использование специальных насадок на литейном ковше или специального устройства для подачи металла в ковш. Дополнительные меры включают разработку и использование укрывных материалов на реакционную камеру, которые обладают высокой степенью устойчивости к размыванию и сгоранию. Также может потребоваться использование специальных методов контроля и регулирования процесса залива металла, чтобы минимизировать риск попадания струи на укрывной материал. Важно также обеспечить строгое соблюдение всех требований и инструкций по технологии модифицирования, включая правильный выбор модификатора,

его дозировку и методы внесения в металл. Это позволит достичь стабильного и эффективного модифицирующего эффекта, предотвращая сгорание и размывание модификатора.

Усвоение магния в расплаве чугуна становится на 20-30% эффективнее при использовании сэндвич-процесса в сочетании со специальной крышкой, закреплённой в верхней части ковша и выполняющей действия носка для разлива металла. Данный процесс был разработан в Швеции, вследствие своей простоты, сокращению выбросов дыма и стабильным результатам модификации, используется (с улучшениями) во многих странах. При плотном прилегании крышки к ковшу и наличии чугуна в пространстве внутри крышки во время наполнения ковша процесс модификации проходит практически без пиротехнических эффектов (рисунок 1).



1 - крышка, 2 - отверстие для выпуска расплава, 3 – разливочный ковш, 4 – металлическая стружка, 5 – модифицирующий материал

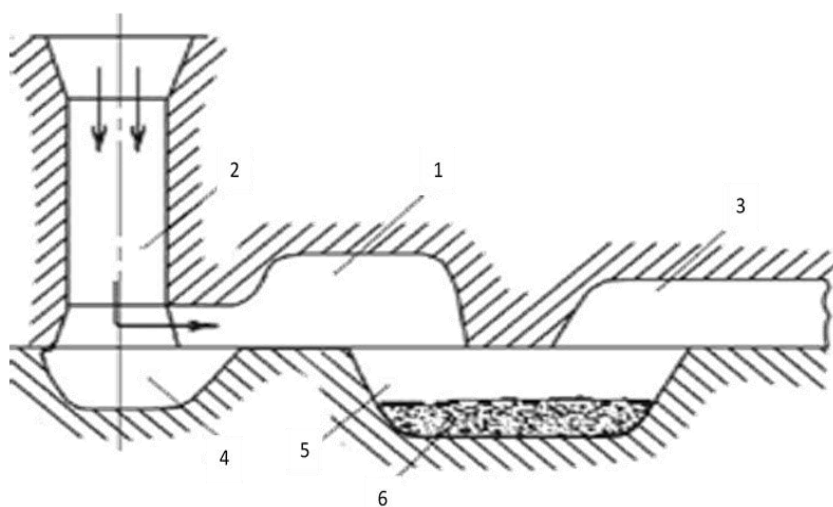
Рисунок 1 – Схема раздельного ковша с крышкой

Регулируя размер сечения отверстия для расплава, можно контролировать продолжительность наполнения ковша расплавом чугуна в зависимости от его объёма. Перегородка на дне ковша, которая отделяет первую порцию заливаемого чугуна от модификатора, также способствует

увеличению поглощения магния. Реакция модификации начинается после того, как выпускное отверстие в крышке перекрывается слоем чугуна внутри крышки.

1.3.2 Внутриформенное модифицирование

Модификация чугуна в форме (процесс Inmold) включает в себя использование специальной реакционной камеры в системе литья, в которой размещается модификатор. Размер камеры определяется по специальной формуле. Преимущества этого метода включают высокую степень абсорбции магния (65-90%), однородную структуру, отсутствие дыма и пиротехнических эффектов, и возможность индивидуального подхода к обработке каждой отливки (рисунок 2). Это также снижает расход модификатора.



- 1 – шлакозадержатель (устанавливаются пеночерамические фильтры); 2 – заливная чаша; 3 – литниковый канал; 4 – отстойник-прибыль; 5 – смесительный отсек; 6 – модификатор

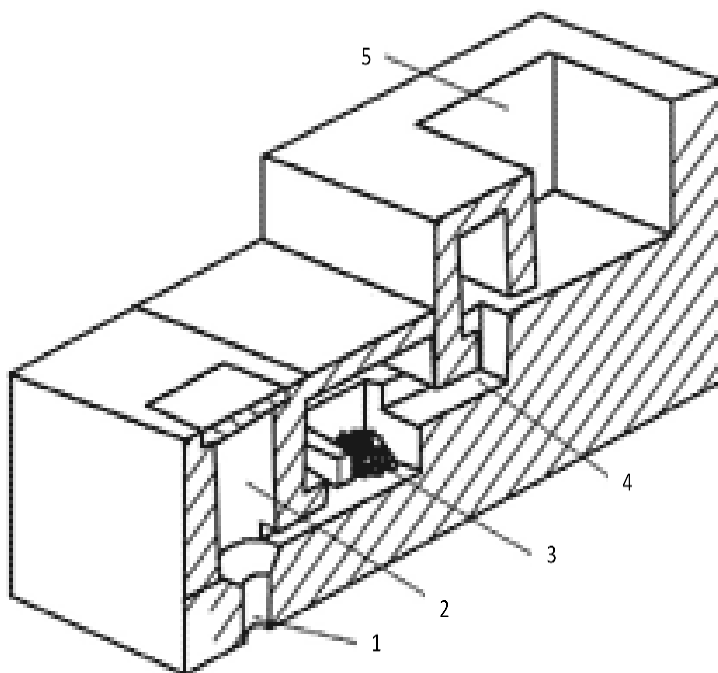
Рисунок 2 – Процесс модифицирования расплава при заливке в внутри формы (In-mold-процессе)

Стоит отметить, что качественный чугун с включениями шаровидного графита требует строгого соблюдения соотношений между заливкой расплава температурой и скоростью, составом, количеством и размером

модификатора, и наличием качественных исходных материалов, а также контроля на каждом этапе процесса. К сожалению, увеличение размера литниковой системы снижает общий выход готовой продукции.

1.3.3 Модифицирование на жёлобе

Внутри жёлобное модифицирование - метод модификации чугуна, основанный на использовании расплава чугуна с заниженным включением элемента серы (не превышающим 0,015%). Расплав чугуна перемещается сквозь многосекционный жёлоб, в который добавляется требуемый вид и порция сфероидизирующего модификатора. Этот способ модифицирования применим в основном малых частей расплава чугуна ёмкостью около 1 тонны. Вторичная модификация проводится в разливочном ковше (рисунок 3).



1 – литниковый выход; 2 – накопитель; 3 – смесительный отсек с модификатором; 4 – каналы; 5 – приёмная горловина.

Рисунок. 3 – Схема внутри жёлобного модифицирования расплава (Flotret-process)

Этот способ модификации обеспечивает высокую эффективность усвоения магния (до 80%), практически полное исключение пироэффекта и

дымообразования, а также минимальное падение температуры по сравнению с модификацией в ковше.

1.3.4 Модифицирование порошковой проволокой

Обработка чугуна модифицирующей проволокой — это процесс изменения свойств чугуна путём использования специальной проволоки, содержащей добавки и легирующие элементы. Эта проволока добавляется в расплавленный чугун для изменения его состава и свойств. Один из таких методов - метод трёх компонентов, в котором в модифицируемый чугун добавляют смесь из трёх компонентов: кальция, магния и церия или иногда лантана. Такая смесь обладает высокой растворимостью в чугуне и при обработке оказывает комплексный эффект на его свойства [49].

Одна из наиболее распространённых методов модификации чугуна проволокой — это метод инокуляции (рисунок 4). В этом методе проволока, содержащая легирующие элементы, добавляется в расплавленный чугун для улучшения его кристаллической структуры. Это позволяет улучшить структуру чугуна, связанную с механическими воздействиями, такими как прочность и устойчивость к износу.

Другой метод – метод проволоочной модификации, основанный на внесении в металл проволоки с модифицирующей присадкой. Проволока может быть изготовлена из сплавов, содержащих магний, или быть покрытой слоем магниевых сплавов. При нагревании проволоочная присадка плавится и вступает в реакцию с металлом, обеспечивая желаемые изменения его структуры и свойств.

Также существуют методы модификации чугуна с использованием аналогичной проволоочной присадки, однако вместо проволоки используется стреляющая зарядка, которая вводится в металл под высоким давлением.

Одним из современных методов обработки чугуна является метод индукционного модифицирования, при котором модифицирующая присадка помещается внутри индукционной течеобразующей катушки. Под

воздействием электромагнитного поля присадка нагревается до плавления и мгновенно попадает в металл с высокой скоростью.

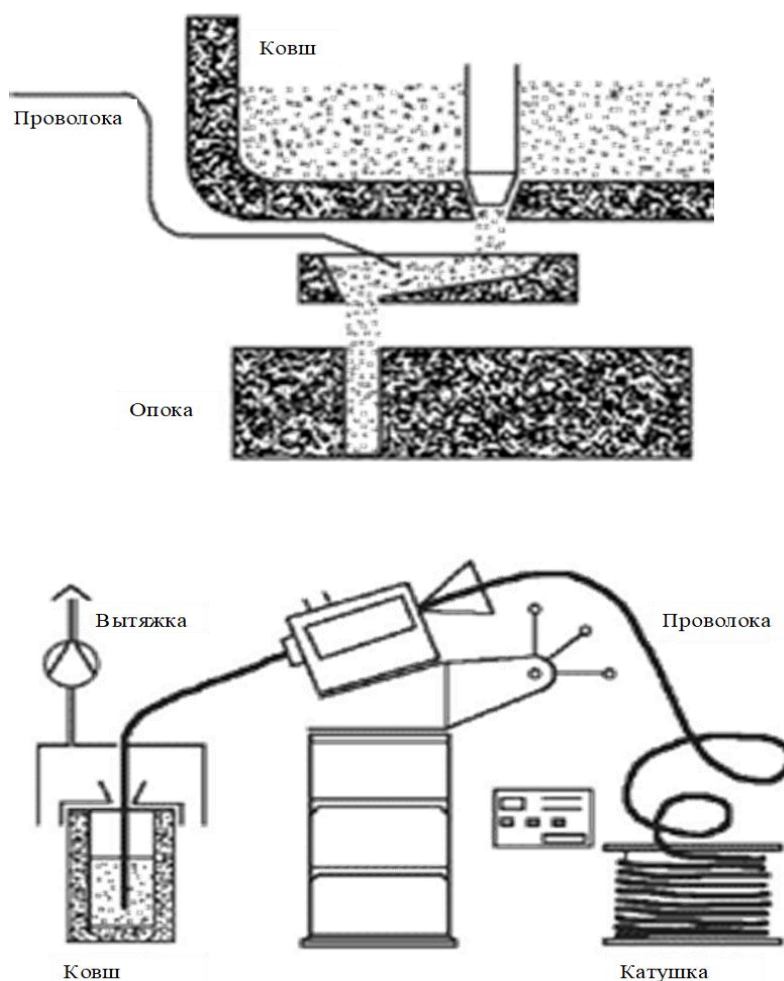


Рисунок 4 – Схема модифицирования методом порошковой проволокой

«В общем, существует несколько различных способов воздействия на расплав чугуна с магниевым включёнными присадками, любой из способов имеет свои плюсы и используется от требований, предъявляемых производства и требуемых характеристик металла.» [44]

1.4 Прогрессивные технологии обработки чугуна

Комплексные присадки и лигатуры используются для обработки чугунолитейных сплавов, особенно магнийсодержащие. Они включают в себя множество различных элементов, которые выполняют различные

функции. Эти элементы включают в себя модифицирование, легирование, микролегирование, десульфурацию и раскисление. В действительности, групповые добавки не являются просто модификаторами, они также являются самостоятельными сложнолегированными сплавами.

«Одной из передовых технологий обработки чугуна является быстро развивающаяся технология использования брикетированных лёгких псевдолигатур и наноматериалов. В качестве исходных материалов для внутри форменного модифицирования используются порошки магния, ФС75, СК5Ба5, железа, графита, флюорита, стальной дробы (с фракцией материала от одного до четырёх миллиметров) [14].»

Программы утилизации пылевидной формы остатков, образующихся в процессе производства модификаторов на основе железо-кремния (ФС75 и ФСМг7) с добавлением порошка магния, предусматривают их преобразование в брикеты. Это позволяет эффективно использовать мелкодисперсные отходы размером до 1 мм и получить дополнительные экономические выгоды.

Легковесные дроблёные модификаторы, содержащие магний и редкоземельные металлы (РЗМ), применяются при размещении данных материалов непосредственно в форму для модифицирования отливок из высокопрочного расплава чугуна. В результате использования таких модификаторов улучшаются структура чугуна, связанная с механическими воздействиями, такими как прочность, ударная вязкость и пластичность. Это способствует расширению области применения чугуна и повышению конкурентоспособности продукции на рынке.

«Использование метода плазмохимического взрыва для получения нанопорошков алюминия оксида (Al_2O_3), карбида кремния (SiC) и борида бора (BN) частицами не превышающие 100 нм привело к значительному измельчению зерен в материале чугуна и повышению свойств полученных заготовок. Изучено воздействие пылевидных псевдолегирований алюминий-титан-магний (Al-Ti-Mg) на различных видах чугунов при их модификации

через вливание расплава или внутри формовочного способа. Экспериментально подтверждено, что новый модификатор обладает высокой способностью вносить изменения в структуру чугунных отливок [19].»

Инновационный метод создания общепринятых модификаторов типов никеле-магниевого и ферро-никеле-магниевого заключается в использовании процесса кристаллизации расплавленного модификатора под слоем флюса во вращающейся центробежной форме [21]. Данный метод позволяет получить исключительно чистый и плотный продукт, который в определенных условиях может обладать мелкокристаллической структурой. На данный процесс был получен патент, и продукт производится по этой технологии в соответствии с отдельными техническими условиями.

В настоящее время, учёным удалось установить, что железоуглеродистые расплавы имеют особую структуру, которая формируется благодаря фуллеренам – новому виду аллотропной формы углерода. Фуллерены представляют собой фрактальные кластеры, которые являются основными единицами наноструктурного формирования расплава. Стоит отметить, что такие фрактальные структуры формируются путём объединения кластеров с размерами от 2 до 10 нанометров. Каждый из таких кластеров состоит из нескольких десятков или тысяч атомов [51].

Примером подобной структуры может служить фуллерен, который представляет собой наночастицу углерода. Такие частицы были выделены из железоуглеродных расплавов и тщательно изучены. Они представляют собой особую форму углерода, которая отличается от других форм своей структурой.

Одним из важнейших свойств фуллерена, влияющим на наше понимание структуры на диаграмме железо-углерода показывает существование чёткой физической границы раздела между молекулой фуллерена и окружающим расплавом [23]. Эта уникальная особенность углеродных наноматериалов на основе фуллеренов может стать

определяющим фактором для радикального преобразования существующих подходов к усовершенствованию технологий.

В частности, в контексте металлургической науки и производства железоуглеродистых сплавов возникает возможность более эффективно модифицировать и контролировать свойства расплава путем введения в него фуллерен-содержащих наноматериалов. Это может привести к созданию новых сплавов с уникальными характеристиками и расширению границ применения уже существующих [50].

Более того, изучение межфазных границ между фуллеренами и расплавами может способствовать развитию фундаментальных знаний о структуре и свойствах углеродных систем, что, в свою очередь, может привести к открытию новых возможностей для применения углеродных наноматериалов в всевозможных отраслях производства.

Становится возможным целенаправленное воздействие на поверхность раздела фаз, что приводит к формированию необходимых центров кристаллизации при обработке металла фосфором, сурьмой, висмутом и кислородом с серой. Как известно, эти элементы обладают свойствами поверхностно-активных веществ в железоуглеродистых системах, что позволяет им активно взаимодействовать со структурой расплава с целью получения графита с определенными характеристиками.

Кроме того, степень воздействия поверхностно-активных элементов не зависит от температуры расплава. Их эффективность сохраняется на протяжении всего процесса, от плавления сплава до выпуска расплава.

Использование поверхностно-активных элементов позволяет осуществлять воздействие на строение, кристаллизацию, железоуглеродистых сплавов на молекулярном уровне. Это воздействие включает изменение фуллереновых структур и углеродных наночастиц. Результатом этих исследований является разработка инновационной технологии наномодификации железоуглеродистых расплавов. Главной особенностью этой технологии является возможность эффективной

модификации низкотемпературных железоуглеродистых расплавов, температура плавления которых ниже 1300°C [46]. Эта технология особенно актуальна для обработки чугунов в больших объёмах.

Методика наномодификации материалов является экологически безопасной, так как позволяет контролировать процессы формирования кристаллов и графитовых структур без использования вредных химических веществ и без создания токсичных отходов. Данная технология не подразумевает легирование (добавление примесей для изменения свойств материала), раскисление (удаление кислорода из материала), дегазацию (удаление газов из материала), десульфирование (удаление серы из материала) и прочие процессы, характерные для комплексных добавок и многокомпонентных сплавов на основе магния [47].

«Технология наномодификации железоуглеродистых расплавов включает использование нового типа модификаторов, которые избирательно воздействуют на наноструктуру расплавленного чугуна. Эти модификаторы представляют процесс реакционно-химических синтезирования, включая полиароматические элементы и их твёрдые растворы с другими элементами. Состав модификаторов включает полиароматические элементы групп Va и VIa периодической таблицы Менделеева, а также другие элементы, такие как алюминий, медь, сурьма, олово и т.д. [11].»

Наномодифицирование в чугунолитейном производстве позволяет выполнять технические и экономические задачи:

- Повышение характеристик расплава: наномодифицирование позволяет повысить прочность и твёрдость чугуна, что делает его более долговечным и устойчивым к механическим нагрузкам.

- Улучшение теплопроводности и термической стабильности чугуна: добавление наночастиц может повысить теплопроводность материала, что позволяет более равномерно распределять и отводить тепло, улучшая термическую стабильность обрабатываемого материала.

– Улучшение коррозионной стойкости: наномодифицирование позволяет создать защитную плёнку на поверхности чугуна, которая предотвращает его коррозию и повреждение в химически активных средах.

– Снижение энергозатрат: использование наночастиц позволяет снизить температуру плавления и время обработки чугуна, что экономит энергию и сокращает производственные затраты.

– Улучшение точности и качества отливок: наночастицы улучшают свойства расплавленного металла, позволяя получить более точные и качественные отливки с минимальным количеством дефектов и пористости.

– Снижение стоимости производства: благодаря наномодифицированию можно снизить затраты на сырьё, увеличить производственные показатели и сократить количество бракованных изделий, что способствует общему снижению стоимости производства.

Наномодифицирование железоуглеродистых расплавов обладает множеством преимуществ, в том числе повышение качества механических свойств отливок, повышение производительности и экономию энергии. Кроме того, эта технология является экологически чистой, так как не использует вредных химических добавок.

Выводы по разделу 1

В результате проведенного анализа литературных данных можно сделать выводы:

На изменение свойств чугунов влияет изменение его микроструктуры. Металлическая основа чугунов может иметь три основных структурных состояния: ферритную (Ф); ферритно-перлитную (Ф+П); перлитную (П).

При этом наблюдается закономерность чем больше перлитной составляющей в структуре чугуна, тем выше его прочность, но ниже пластичность. Чугун на перлитной основе обладает максимальной прочностью, а чугун на ферритной основе демонстрирует наилучшие показатели пластичности. Так же значительное влияние на свойства чугуна оказывает форма графитных включений: пластинчатый графит наиболее

сильно снижает прочность и пластичность, шаровидный графит минимизирует отрицательное влияние.

Графитные включения выполняют несколько важных функций: обеспечивают пониженную твердость, способствуют хорошей обрабатываемости резанием, придают высокие антифрикционные свойства, снижают коэффициент трения, способствуют гашению вибраций.

Таким образом, изменение микроструктуры чугуна, включая как состояние металлической основы, так и форму графитных включений, является определяющим фактором формирования его механических и эксплуатационных свойств.

Установлено, что формирование микроструктуры сплавов определяется совокупностью следующих факторов:

- режимы термической обработки, включающие процессы закалки, отпуска и нормализации, которые оказывают существенное влияние на структурное состояние материала;
- модифицирование расплава специальными присадками, способствующее изменению морфологии и дисперсности структурных составляющих;
- точность соблюдения технологических параметров производственного процесса, обеспечивающая получение требуемых характеристик материала.

Данные факторы в совокупности определяют формирование оптимальной микроструктуры, обеспечивающей необходимые эксплуатационные свойства готовых изделий.

Таким образом, различные модификаторы и технологические процессы могут быть использованы для оптимизации свойств чугуна для конкретных применений.

2 Материалы и методы исследования

Чугун считается одним из преимущественно общераспространённых материалов в машиностроении благодаря своим прочностным характеристикам, износостойкости и сравнительно невысокой стоимостью. Однако свойства чугунных отливок могут значительно варьироваться в зависимости от условий производства и используемых материалов.

В последние годы наблюдается рост интереса к исследованию свойств чугуна и методов их анализа [43]. Это обусловлено необходимостью улучшению свойств изделий и конкурентоспособности на рынке.

В данном разделе изложена методика подготовки шихтовых материалов для плавки. Описаны режимы плавления на электродуговых печах типа LBSH-48, способ введения модификатора в расплав чугуна, применяемый в данной работе.

2.1 Технологическое совершенствование чугуна

2.1.1 Выбор материалов для модифицирования чугуна

В работе исследовались марки высокопрочного чугуна Gh-75-50-03 для изготовления отливок «Вала коленчатого». Изучалось воздействие модифицирующих материалов на характеристики чугунных отливок.

«Gh75-50-03 – высокопрочный чугун с шаровидным графитом на перлитной основе (феррита 8%), степень сфероидизации графита не менее 90%; требования по механическим свойствам: HB5/750 250-300, $\sigma_B \geq 736$ МПа, относительное удлинение не менее 3%. Содержание углерода – от 3,1 до 3,5%, кремния – от 2,0 до 2,8%, марганца – от 0,5 до 1,0%, меди – от 0,55 до 0,80%, магния – от 0,035 до 0,060%, хрома – до 0,2%, фосфора – до 0,08%, серы – до 0,012% [5]»

Эти характеристики делают сплав Gh75-50-03, подходящим для использования в различных областях, где требуются высокие механические свойства и хорошая обрабатываемость. Стандарт: ГОСТ 28394-89 [36].

В данной работе для обработки расплава чугуна использовались два модификатора: Vermiloy 526 и Сферомаг 631-1.

Модификатор Vermiloy 526 использовался в количестве 3 кг., фракции 4,0-20,0мм и модификатор Сферомаг 631-1 в количестве 14 кг., фракцией 4,0 – 20,0мм на массу расплава (1100 ± 20) кг.

Модификатор «Vermiloy 526» от предприятия «НПП Групп» разработан специально для обеспечения стабильности получения требуемой структуры Gh75-50-03, что является ключевым фактором для достижения высоких механических свойств этого материала. На рисунке 5 изображён «Vermiloy 526» и фактическая фракция модификатора.



Рисунок 5 – Модификатор «Vermiloy 526» от компании «НПП Групп»

«Vermiloy 526» содержит комбинацию активных элементов, включая магний. Это достигается благодаря особому составу и технологии производства модификатора, которые обеспечивают высокую степень

усвоения магния в чугунах при температурах от 1250°C. В таблице 1 представлен химический состав модификатора.

«Применение «Vermiloy 526» в процессе модифицирования чугуна в открытых ковшах сопровождается незначительным пироэффектом и слабым дымовыделением, что свидетельствует о высокой степени его усвоения. Расход модификатора составляет примерно 1% от массы жидкого чугуна, что делает его использование экономически выгодным» [44].

Таблица 1 – Химический состав «VERMILOY 526» по ТУ 0820-046-72684889-2017 [44]

Массовая доля основных элементов, %						
Элементы	Ca	Mg	Al	TRE	Si	Fe
Содержание	2,12	5,70	0,81	5,70	47,5	Ост.

«Сферомаг 631-1» — это модификатор для чугуна, предназначенный для улучшения свойств заготовок с перлитной и перлитоферритной структурой. Он используется в ковшевом способе модифицирования по операции “сэндвич-процесс” и используется в автомобилестроении и литейных производствах для изготовления широкой номенклатуры отливок с высокими требованиями. На рисунке 6 показан «Сферомаг 631-1» и физическое состояние модификатора.

Этот модификатор содержит магний, кальций и редкоземельные металлы (РЗМ), что обеспечивает получение отливок с высокими механическими свойствами (таблица 2).

«Система маркировки сфероидизирующих модификаторов серии Сферомаг отражает среднее процентное содержание в них последовательно магния, кальция, РЗМ, алюминия и кремния» [44].



Рисунок 6 – Модификатор «Сферомаг 631-1» от компании «НПП Групп»

Таблица 2 – Усреднённый химический состав Сферомаг 631-1 по ТУ 0820-046-72684889-2017 [44]

Массовая доля основных элементов, %						
Элементы	Mg	Ca	TRE	Al	Si	Fe
Содержание	7,4	3,22	0,96	0,91	47,1	Ост.

2.1.2. Комплексный подход к подготовке шихтовых материалов и расплава

При подготовке шихтовых материалов была изменена основная шихтозавалка составляющих материалов, а также загрузка этих материалов (таблица 3). Это изменение было сделано с целью оптимизации процесса приготовления расплава и улучшения его качества.

В ходе проведения исследования выплавку подготовленной шихты производили в печах типа LBSH-48.

Загрузка шихтозавалки в электродуговые печи осуществлялась в определённой последовательности: сначала на дно первой загрузочной бадьи помещается измельчённый графит, затем комковая негашёная известь, после чего загружаются стальные составляющие. Остальные компоненты шихты могут добавлены в любом порядке. На рисунке. 7 представлена подготовленная шихта.

Таблица 3 – Количество шихтовых материалов для подготовки расплава

п/п	Наименование компонентов шихты	Весовая составляющая компонентов основной шихтозавалки, кг	Весовая составляющая, предложенная для исследования кг	Нормативный документ
1	Возврат собственного производства высокопрочного чугуна	20000	20000	-
2	Стальные пакеты 8А	24000	18000	ТТМ 2.58.1160
3	Чугун передельный	0	6000	ГОСТ 805-95
4	Ферросилиций (ФС-45)	0	200	ГОСТ 141593
5	Графит измельчённый	1000	850	ТУ 1916-054-002 008 51
6	Известь комковая негашёная	400	400	ГОСТ 9179-2018



Рисунок 7 – Подготовленная шихта для загрузки в печь

В ходе исследования было обнаружено, что при стандартном процессе загрузки шихты: на дно первой загрузочной бадьи вводилось графит измельчённый [45], известь комковая негашёная [40], затем стальные пакеты 8А, остальные компоненты шихты вводились в любом порядке. В результате такой загрузки в электродуговую плавильную печь типа LBSH-48 происходило спекание и зашлаковывание материалов на подине печи. Для решения этой проблемы было предложено изменить порядок загрузки:

известь негашённую и графит измельчённый стали дозировать и подавать в бадью сверху (на металлические составляющие) всех остальных компонентов шихты. Это позволило улучшить процесс воздействия на расплав металла (таблица 3).

После расплавления шихтовых материалов в электродуговой печи типа LBSH48, подготовленный расплав переливается в раздаточные печи типа LFD-20. Во избежание интенсивного угара углерода и окисления жидкого чугуна после скачивания шлака на печи типа LFD-20, на поверхность чистого зеркала жидкого расплава ввести куски электродного боя массой 12 кг.

Во избежание ликвации химических элементов, производили выдержку расплава чугуна в течении 20 минут в печи ожидания типа LFD-20 после перелива жидкого чугуна из плавильной печи типа LBSH-48.

Содержание химических элементов в расплаве чугуна определяется путём взятия проб из печи и ковша. Отбор пробы расплава чугуна для спектрального анализа заливается в кокиль для отливки образцов. Для обеспечения однородной отбеленной структуры пробы для спектрального анализа температура кокиля перед заливкой расплава охлаждается сжатым воздухом до температуры окружающей среды и при достижении готовности пробы к анализу, потемнение в литниковой воронке, представленной на рисунке 8.

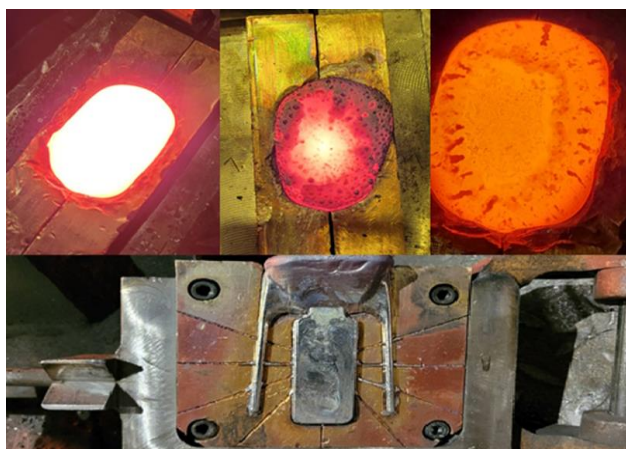


Рисунок 8 – Отбор пробы расплава чугуна для спектрального анализа, залитый в кокиль

Химический состав чугуна перед выдачей на автоматическую формовочную линию перед заливкой в формы при основной технологии соответствовал требованиям таблицы 4. В рамках исследования предложено изменить химический состав чугуна марки Gh75-50-03 для отливок «Вал коленчатый» указанный в таблице 5.

Таблица 4 – Требуемый химический состав чугуна марки Gh75-50-03 для отливок «Вал коленчатый»

Массовая доля содержания элементов, %								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Sn
3,6-3,8	1,4-1,5	0,2-0,5	≥ 0,040	≥ 0,012	≥ 0,07	≥ 1,5	0,20-0,50	0,01-0,04

Таблица 5 – Предложенный в рамках исследования химический состав чугуна марки Gh75-50-03 для отливок «Вал коленчатый»

Массовая доля содержания элементов, %								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Sn
3,60-3,70	1,90-2,00	0,50-0,70	≥ 0,040	≥ 0,015	≥ 0,1	≥ 1,5	0,70-0,85	0,08-0,10

На основе требуемого и предложенного в рамках исследования химического состава чугуна марки Gh75-50-03 для отливок «Вал коленчатый» по таблицам 4 и 5 можно сделать следующие выводы:

- Содержание углерода (C) в предложенном составе (3,60-3,70%) несколько сузит диапазон по сравнению с базовым (3,6-3,8%) указывает на стремление к более точному контролю данного параметра.
- Содержание кремния (Si) увеличено с диапазона 1,4-1,5% до 1,90-2,00% свидетельствует о значительном повышении графитизирующего элемента для улучшения структуры чугуна.
- Содержание марганца (Mn) существенно увеличено: диапазон расширен с 0,2-0,5% до 0,50-0,70%. Это направлено на усиление перлитообразующего эффекта и улучшение механических свойств.

- Фосфор (P) и сера (S) имеют минимальные изменения в допустимых пределах: P: $\geq 0,040\%$, S: увеличен минимальный порог с $\geq 0,012\%$ до $\geq 0,015\%$ (без изменений).

- Хром (Cr) увеличен с $\geq 0,07\%$ до $\geq 0,1\%$, что положительно влияет на износостойкость материала.

- Медь (Cu) значительно увеличена: диапазон расширен с 0,20-0,50% до 0,70-0,85%, что способствует улучшению прочностных характеристик.

- Олово (Sn) увеличено с 0,01-0,04% до 0,08-0,10%, влияет на модифицирующие свойства чугуна и улучшения механических характеристик.

Предложенные в рамках исследования изменения химического состава направлены на улучшение механических свойств и структуры чугуна для марки Gh75-50-03 для отливок «Вал коленчатый». Особенно значительны изменения в содержании кремния, марганца и меди, что может указывать на стремление к получению более стабильной и прочной структуры материала. При этом основные параметры (содержание никеля, хрома) остаются на прежнем уровне, что говорит о сохранении базовых характеристик материала при улучшении его свойств.

2.2 Методика введения модификатора «Заливка сверху»

Методика «Заливка сверху» (рисунок 9) заключается во введении модификатора на противоположный сифону угол днища открытого ковша (ёмкостью 1100 кг) с разогретым футеровочным материалом, имеющим ярко красно-жёлтый или малиновый оттенок, таким образом, чтобы струя расплава чугуна из печи накрывала его сверху без размывания. Вводим подготовленную навеску, комплексных модификаторов Vermiloy 526 в количестве 3,0 кг поверх него укладывается Сферомаг 631-1 в количестве 14,0 кг, в противоположную сторону от сливного носка и подаваемой струи

из раздаточной печи. Перед наполнением ковша расплавом жидкого чугуна выполняем несколько ключевых моментов:

- ковш чист и готов к приёму расплава;
- нет остатков другого расплава;
- введённый модификатор расположен согласно схеме изображённый на рисунке и находится с противоположной стороны сливного носка это позволит предотвратить попадание струи расплава на модификатор.

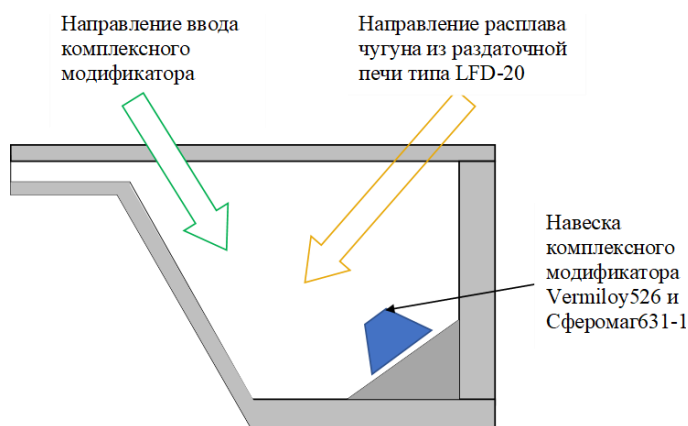


Рисунок 9 – Схема ведения модифицирования «Заливка сверху»

После введения модификатора (без промедления) заполняется ковш расплавом жидкого чугуна без прерывания струи в течении 40-50 с, чтобы обеспечить равномерное распределение модификатора в объёме расплава, как показано на рисунке 9.

2.3 Методика проведения спектрального анализа проб

Методика проведения определения содержания элементов в чугуне на приборе экспресс-анализатор металлов и сплавов OBLF QSN 750-II включает следующие шаги:

Проба расплава чугуна после заливки её в кокиль с печи и ковша после модифицирования подготавливается на шлифовальном станке в несколько приемов. Перед началом шлифования очищается поверхность образца от

загрязнений и оксидных пленок с помощью щетки, наждачной бумаги. Первичная, грубая шлифовка, производится на плоскошлифовальном станке модели РВ-175 на глубину от 0,5 до 0,8 мм (визуально глубину шлифовки задает питатель пробы) [42].

Чистая шлифовка производится на шлифовальном станке модели Н-350-2 на шлифовальной шкурке типа «Корунд 36» до получения параллельных рисок без сетки. При этом контролируется процесс шлифования, чтобы избежать перегрева образца и изменения его структуры. После завершения шлифования проверяется качество поверхности образца. Поверхность исследуемых образцов должна быть гладкой, без видимых невооружённым глазом царапин, трещин и прочих дефектов. Это требование обусловлено необходимостью обеспечения точности и достоверности результатов исследования [42]. На рисунке 10а представлены образцы с гладкой поверхностью, что соответствует требованиям к проведению исследования.

Перед проведением анализа проверяется стабильность работы оборудования на воспроизводимость стандартных образцов, при необходимости выполняется рекалибровка спектрометра (проводится два или более параллельных измерений, в зависимости от полученной сходимости между измерениями). На рисунке 10б изображены эталонные образцы, предназначенные для проведения процедуры повторной рекалибровки спектрометра.



а) подготовленные образцы

б) стандартные образцы

Рисунок 10 – Подготовленные образцы проб для спектрального анализа

Подготовленный образец помещается в экспресс-анализатор металлов и сплавов OBLF QSN 750-II, показан на рисунке 11, где происходит возбуждение атомов образца с помощью искры. Это приводит к испусканию света, который затем разделяется на спектр с помощью дифракционной решетки. Спектр анализируется с помощью фотоумножителей, которые регистрируют интенсивность света на определенных длинах волн. Эти данные используются для определения содержания элементов в образце.

Анализируется проба чугуна в двух параллельных измерениях, при необходимости в трех, четырех и пяти, выбираются результаты наиболее близкие друг к другу по концентрации элементов и усредняются полученные результаты всех основных элементов. Для более точного определения содержания углерода в образце пробы анализ на содержание углерода проводится на газоанализаторах Лесо CS-400 и CS-744, представленные на рисунке 12.



Рисунок 11 – Экспресс-анализатор металлов и сплавов OBLF QSN 750II

Полученные данные обрабатываются с помощью программного обеспечения анализатора, которое строит градуированные зависимости на основе анализа стандартных образцов. Это позволяет определить содержание элементов в исследуемом образце. Результаты анализа отображаются на

экране анализатора и сохраняются в памяти прибора и персональном компьютере.



Рисунок 12 – Газоанализаторы Leco CS-400 и CS-744

Содержание химических элементов в расплаве чугуна с шаровидным графитом должен быть в соответствии с таблицей 4. Степень эвтектичности чугуна $S_{\text{э}}$ должна быть не более 1,02 и определяется по формуле

$$S_{\text{э}} = \frac{C_{\text{общ.}}}{4,26 - 0,31 * (S_{ik} + S_{im})}, \quad (1)$$

где $C_{\text{общ.}}$ – общее содержание углерода в ковшевой пробе;

4,26 – эвтектическое содержание углерода по диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов;

0,31 – эмпирический коэффициент;

S_{ik} – содержание кремния в чугуне ковшевой пробе;

S_{im} – содержание кремния в чугуне отливки, вносимого модификатором (фактически ~0,27%).

2.4 Микроструктурный анализ чугуна марки Gh-75-50-03 в отливках «Вал коленчатый»

Оценка микроструктуры играет ключевую роль в анализе материалов, позволяя получить ценную информацию о их свойствах и характеристиках.

Этот процесс включает в себя подготовку образцов, включая шлифование, полирование и травление, которые критически важны для получения качественных результатов.

После процесса литья производится отбор заготовок из отливки с использованием отрезного ленточного станка. Этот процесс осуществляется в строгом соответствии со схемой отбора, которая определяет форму и размеры будущей заготовки. Места отбора образцов и схематическое изображение показаны на рисунке 13. Под местом отбора заготовки подразумевается область, выделенная цветом на схеме, что гарантирует соответствие заготовки заданным параметрам.

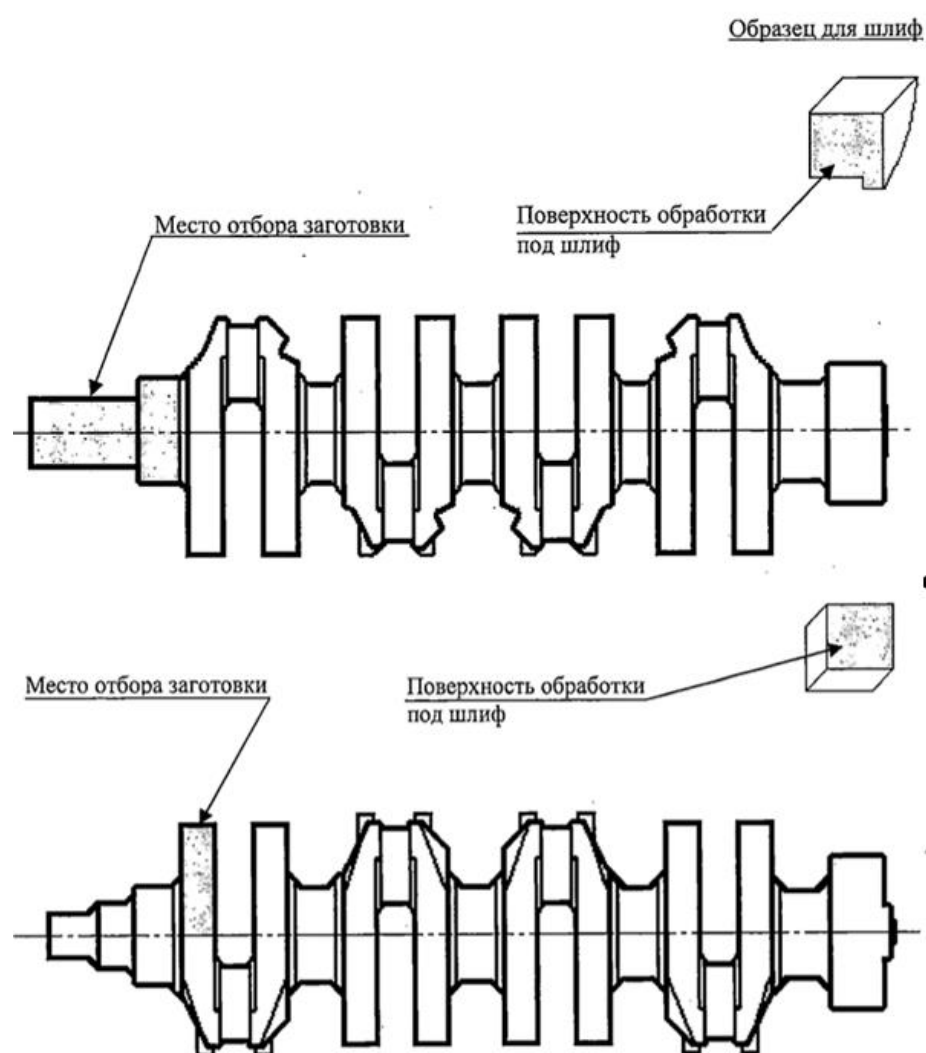


Рисунок 13 – Отливка «Вал коленчатый» с местами отбора заготовок для исследования

Поверхность вырезанных образцов подвергается шлифовке на двухдисковом шлифовальном станке, изображённом на рисунке 14, с использованием водостойкой шкурки модели 388 1Б. Процесс шлифования повторяется 750 ± 50 об/мин. Каждый раз образец размещается таким образом, чтобы направление рисок на рабочей поверхности шлифа было перпендикулярно направлению движения диска, что позволяет полностью удалить риски с применением шлифовальной шкурки с последовательно уменьшающимся размером зерна. Скорость вращения дисков устанавливается в диапазоне, оставшиеся после предыдущего этапа шлифования. Во избежание перегрева образца при шлифовке на каждый диск подаётся холодная водопроводная вода.



Рисунок 14 – Станок шлифовальный и полировальный модели 388 1Б

При переходе от одного вида шлифовальной шкурки к другому, образец тщательно промывается водой, чтобы удалить остатки абразива с рабочей поверхности. Сразу после промывки образец просушивается фильтровальной бумагой, которую слегка прижимают к рабочей поверхности образца.

После подготовки образца переходят к его механическому полированию. Этот процесс выполняется на полировальном станке модели

388 1Б, где образец прижимается к вращающемуся диску. Диск покрывают мягкой тканью, такой как сукно или драп. Важно, чтобы ткань была хорошо натянута на диск и не имела складок.

Для полирования используется специальная полировочная жидкость, представляющая собой смесь абразивного материала с водой. В одном литре воды растворяют от 150 грамм абразивного порошка, и смесь настаивается в течение одного часа. Затем полировочную жидкость процеживают через марлю, чтобы избежать повреждения полированной поверхности образца частицами абразивного порошка.

В процессе полировки образцов важно контролировать силу нажатия на образец, поскольку слишком сильное давление может привести к нежелательному эффекту «выкрашивания» графита и искажению результатов испытаний. Особенно это актуально для мягких материалов, требующих меньшего давления.

Во время полировки образец необходимо вращать вокруг своей оси или по траектории восьмёрки, чтобы избежать создания предпочтительного направления полировки и предотвратить образование «кометных хвостов» — включений графита, ориентированных в одном направлении.

Для предотвращения коррозии шлифов чугунов в контакте с водой на финальной стадии полировки рекомендуется использовать спирт для увлажнения полировального материала. Окончательная обработка поверхности шлифа осуществляется также с использованием спирта, без применения абразивных материалов. Важно использовать чистый этиловый спирт для изготовления шлифа, поскольку другие виды спиртов, такие как денатурат, керосин или бензин, могут оставлять пятна на поверхности шлифа из-за неполного испарения. После полировки шлиф следует просушить фильтровальной бумагой, слегка прижимая её к поверхности, чтобы избежать появления новых рисков. «Поверхность шлифа должна быть зеркально гладкой, без рисков от операций шлифования и полировки, а также без окислов и других загрязнений. Для исследования металлической основы

шлиф обрабатываем реактивом» [37]. Приготовленным в соответствии с методикой и специальном месте приготовления реактивов, показанном на рисунке 15. Предварительную перед травлением и конечную обработку образца после травления проводят чистым этиловым спиртом. Предварительная обработка шлифа в спирте способствует равномерному взаимодействию реактива с поверхностью шлифа.



Рисунок 15 – Место приготовления и хранения реактивов

Травление шлифов производится путём смачивания поверхности несколькими каплями реактива из капельницы с клювиком. Для химического травления применяем 2,5% раствор азотной кислоты (2.5 мл азотной кислоты на 100мл этилового спирта). Травление проводится от одной до нескольких секунд до получения светлой матовой поверхности, после чего шлиф просушивается, промокая рабочую поверхность фильтровальной бумагой. Подготовленные образцы заготовок для определения структуры показаны на рисунке 16.



Рисунок 16 – Подготовленные образцы заготовок

Подготовленные образцы заготовок исследуются по графиту и металлической основе просматривая шлиф под металлографическим микроскопом модели «ЕРІТІР-2», представленным на рисунке 17, при увеличении в 100 раз. Для более точного рассмотрения какого-либо компонента структуры используем увеличение в 200 или 400 раз. «Оценку структуры проводим визуальным сопоставлением структуры видимой в микроскопе с изображением структуры соответствующим шкалам: форма – 2А ГОСТ 3443; распределение – 2Б ГОСТ 3443» [37].

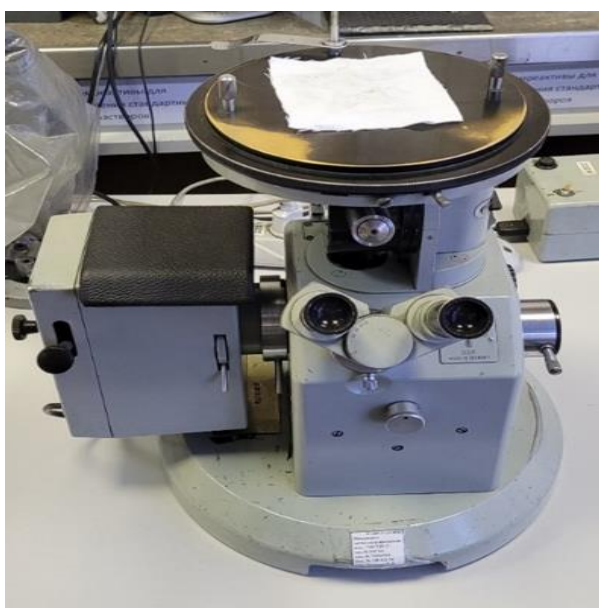


Рисунок 17 – Металлографический микроскопом модели «ЕРІТІР-2»

Для определения структуры исследуется те участки шлифа, которые располагаются на участке не менее 1,5 мм от края образца (одно поле зрения в микроскопе). Участок шлифа от кромки на глубину до 1,5 мм оценивается на наличие цементита. Исследовав структуру по всей рабочей поверхности шлифа за результат испытания принимается среднеарифметическое значение, учитывая все определения на рабочей поверхности шлифа. «В зависимости от количества перлита и феррита в процентах (перлит + феррит=100%), металлическую основу оцениваем визуально по таблице 5 ГОСТ 3443 и шкале 6 В ряд 3 по всей рабочей поверхности шлифа» [37].

«В зависимости от количества цементита или цементита ледебурита структуру оцениваем визуально по таблице 9 и шкале 10А обязательного приложения 3 ГОСТ 3443. При наличии в структуре включений цементита в количестве менее 1% (одно – два включения в двух – трех полях зрения) их следует оценивать как “следы”».[37]

При определении структуры металлической основы оценивается количество феррита (перлита), содержание цементита ледебурита в соответствии с таблицей 6.

Таблица 6 – Требования к микроструктуре чугуна марки Gh75-50-03 в отливках «Вал коленчатый»

Графит		Металлическая основа	
DIN EN ISO 945 – 1	ГОСТ 3443	ISO/TR 945 – 3:2016	ГОСТ 3443
V1 + V ≥ 90%	ШГф5 + ШГф4 > 90%	Перлит. феррит ≤ 8%, цементит – следы (≤ 1%)	П92(Ф8) – П (Ф0), Ц 1

2.5 Механические испытания отливок из чугуна марки Gh-75-50-03

«Для отливок «Вал коленчатый» определяется предел прочности при растяжении и относительном удлинении по форме образца, который соответствует образцу «тип IV» чертёж 4 приложение 2 по ГОСТ 1497» [34] (рисунок 18). После выполнения обработки образцов исследуется рабочая

поверхность на отсутствие неметаллических включений, раковин, трещин, механических повреждений и рисок.

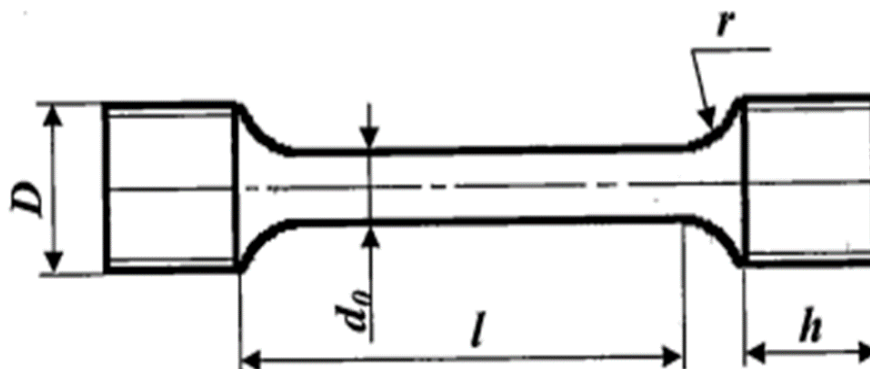


Рисунок 18 – Форма образца №№3 и 4

Начальные диаметры образцов приведены в части показателя 3 и 4 таблице 7, что соответствует размерам в части показателей 7 и 8 таблицы приложения 2 по ГОСТ 1497.

«Начальный диаметр образца измеряем микрометром МК25 (микрометр гладкий для измерения наружных размеров изделий) в трех точках – в средней части и на границах рабочей длины в соответствии с табл. 3 по ГОСТ 6507 «Микрометры. Технические условия» предел допускаемой погрешности микрометра данного типа равен $\pm 4,0 \text{ мкм}$ » [38].

Таблица 7 – Размеры образцов (в миллиметрах)

Номер образца	d_0	l	D	r	h
3	$5,0 \pm 0,10$	27,5 – 35,0	M10 × 1,5	$1,5^{-10}$	$10 + 3,0$
4	$4,0 \pm 0,10$	22,0 – 28,0	M10 × 1,5	$1,5^{-10}$	$10 + 3,0$
Примечание – для r предельное отклонение по ЕСДП СТ СЭВ h7; поле допуска основных валов в мкм					

Начальный диаметр образца d_0 измеряется в каждой точке в двух взаимно перпендикулярных направлениях, за результат определения берется

среднее значение двух измерений. Допускается разность наибольшего и наименьшего диаметра по длине рабочей части образца не более 0,03мм.

Величину начальной расчетной длины l на образце отмечается путем нанесения меток штангенциркулем ШЦ-II-160-0,1 по окрашенной поверхности образца. При этом справа должна быть головка образца без центрирующего отверстия. В соответствии с таблицей 3 ГОСТ 166 предел допускаемой погрешности штангенциркуля составляет $\pm 0,1$ мм [35].

После проведения измерений образец устанавливается в захваты испытательной машины Amsler 20SZBDA, показанной на рисунке 19 и подаётся предварительная нагрузка при помощи поворота ручки на себя до упора и включаем машину. «Образец подвергается растяжению под действием плавно возрастающего усилия до разрушения» [34].

Согласно 4.7.1 по ГОСТ 1497 «при определении временного сопротивления скорость деформирования не должна превышать 0,5 от начальной расчетной длины образца выраженной в мм/мин» [34]. Предел прочности σ_s , МПа(кгс/мм²) вычисляем по формуле:

$$\sigma_s = \frac{P_{max}}{F_0}, \quad (2)$$

Относительное удлинение образца после разрыва δ , % вычисляем по формуле:

$$\delta = \frac{(l_k - l_0)100}{l_0} \quad (3)$$



Рисунок 19 – Машина испытательная Amsler 20SZBDA

Для определения конечной длины l_k разрушенные части образца плотно складываются так, чтобы их оси образовали прямую линию и закрепляют образец на пластинке с пластилином. При этом головка образца без центрирующего отверстия располагается справа. Измеряется штангенциркулем расстояние между метками, ограничивающими расчётную длину, по верхним точкам – точкам начала отметки начальной расчётной длины.

Механические свойства чугуна в отливках «Вала коленчатого» определяется в соответствии с таблицей 8 на образце в соответствии с рисунком 20.

Таблица 8 – Механические свойства чугуна марки Gh75-50-03

Наименование показателя	Значение
Временное сопротивление при растяжении σ_b , МПа(кгс/мм ²), не менее	736
Относительное удлинение δ , %, не менее	3
Твердость по Бринеллю, HB	250 – 300

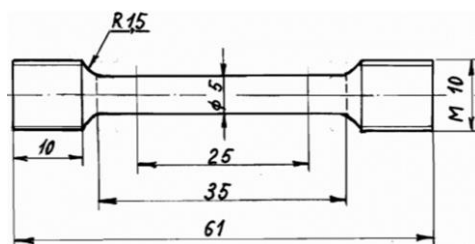


Рисунок 20 – Размеры головок и переходных частей исследуемых образцов

Для определения твёрдости материала отливки «Вал коленчатый» было проведено испытание образцов на твердомере ТБ 5004 изображённым на рисунке 21. Исследование включало в себя несколько этапов. Сначала были выбраны параметры испытания: диаметр шарика, величина нагрузки и время нагружения в соответствии с таблицей. Затем был установлен индентор на опорный столик [41]. Далее с помощью наборов грузов была подобрана необходимая нагрузка. Испытуемый образец был размещён на опорном столике таким образом, чтобы центр отпечатка находился на расстоянии не менее 2,5 диаметров шарика от края образца. После этого образец был подведён к индентору с помощью маховика, и был включён тормоз. Далее была нажата кнопка «Пуск» для нагружения основной нагрузкой в течение 3–6 секунд. Через 1–3 секунды после остановки большой стрелки индикатора основная нагрузка была снята. Число твёрдости было считано с точностью до половины цены деления шкалы. Испытания были повторены не менее 3–5 раз с расстоянием между отпечатками не менее 3 мм.



Рисунок 21 – Твердомер ТБ 5004

Выводы по разделу 2

Проведённый комплекс исследований позволил сформировать целостную методологическую базу для проведения исследовательской части работы.

Разработанная методика подготовки материалов для модифицирования чугуна обеспечивает получение качественного расплава с заданными характеристиками. Особое внимание уделено комплексной подготовке шихтовых материалов, что является ключевым фактором успешного модифицирования.

Методика введения модификатора способом “Заливка сверху” показала свою эффективность и воспроизводимость при проведении экспериментов. Данный метод позволяет достичь равномерного распределения модификатора в расплаве и получить требуемую структуру чугуна.

Методика микроструктурного анализа чугуна в отливках «Вала коленчатого» обеспечила получение достоверных данных о морфологии графитных включений и состоянии металлической матрицы, что имеет решающее значение для оценки качества отливок.

Проведение механических испытаний отливок из чугуна марки Gh-75-50-03 позволило получить количественные характеристики механических свойств материала, необходимые для оценки эффективности применённых технологических решений.

Таким образом, разработанный комплекс методов исследования является научно обоснованным и технически реализуемым, что позволяет проводить достоверные исследования свойств чугуна и оценивать эффективность применяемых технологических решений. Представленные методики обеспечивают получение объективных и воспроизводимых результатов, необходимых для достижения поставленных в работе целей.

3 Результаты исследования структуры и механических свойств чугуна марки Gh-75-50-03 в отливках «Вала коленчатого»

3.1 Результаты исследования структуры чугуна в отливках «Вала коленчатого»

В рамках проведенных исследований была выполнена комплексная работа по изучению влияния технологических параметров на формирование структуры чугуна в отливках коленчатых валов. Экспериментальные исследования проводились в период с 17.09.2024 по 29.10.2024 и включали серию заливок с различными соотношениями сфероидизирующих и графитизирующих модификаторов.

Основная цель исследования заключалась в изучении влияния параметров технологического процесса на формирование оптимальной структуры чугуна в отливках «Вала коленчатого».

В ходе экспериментальных работ были достигнуты следующие результаты:

- Определено оптимальное соотношение модификаторов при ковшевом модифицировании, обеспечивающее получение требуемой структуры чугуна;
- Проведена корректировка параметров модифицирования:
 - снижение количества модификатора Сферромаг 631 с 18,6 кг до 14 кг;
 - добавление модификатора Vermiloy 526 в количестве 3,0 кг.
- Достигнуто соответствие структуры чугуна нормализованной, с содержанием феррита не более 8%, что является необходимым условием для обеспечения требуемых механических свойств материала.

В результате проведенных работ были успешно залиты отливки «Вала коленчатого» всех модификаций с получением требуемой структуры материала.

Результаты исследований структуры чугуна в отливках коленчатого вала, представленные в таблице 9, демонстрируют соответствие полученной микроструктуры требованиям марки Gh75-50-03.

Таблица 9 – Результаты исследования структуры чугуна в отливках вала коленчатого

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Микроструктура			
				Металлическая основа, %			Графит нешаров., %
				Перлит	Феррит	Цементит	
17.09	F	1007	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
16.09	F	1007	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
16.09	F	1007	Коленвал 21177	99	1	< 1	< 10
17.09	B	1010	Коленвал 11182	99	1	0	< 10
18.09	F	1012	Коленвал 11183	94	6	< 1	< 10
18.09	F	1011	Коленвал 21213	98	2	< 1	< 10
17.09	F	1011	Коленвал 11182	98	2	0	< 10
18.09	F	1012	Коленвал 11182	98	2	< 1	< 10
19.09	B	1018	Коленвал 11183	97	3	< 1	< 10
19.09	B	1018	Коленвал 21213	93	7	< 1	< 10
20.09	B	1020	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
20.09	B	1020	Коленвал 11183	99	1	0	< 10
20.09	B	1022	Коленвал 11183	93	7	< 1	< 10
20.09	B	1022	Коленвал 21213	98	2	0	< 10
20.09	B	1024	Коленвал 21177	99	1	0	< 10
21.09	B	1024	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
21.09	B	1024	Коленвал 11183	99	1	0	< 10
21.09	B	1028	Коленвал 11182	94	6	< 1	< 10

Продолжение таблицы 9

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Микроструктура			
				Металлическая основа, %			Графит нешаров., %
21.09	F	1027	Коленвал 11182	98	2	< 1	< 10
21.09	B	1026	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
21.09	B	1026	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
21.09	B	1028	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
21.09	F	1027	Коленвал 21177	99	1	0	< 10
23.09	E	1034	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
23.09	E	1034	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
23.09	E	1034	Коленвал 11183	99	1	0	< 10
23.09	B	1035	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
23.09	B	1035	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
24.09	F	1037	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
24.09	F	1040	Коленвал 21177	99	1	< 1	< 10
24.09	F	1037	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
25.09	E	1042	Коленвал 21213	99	1	0	< 10
25.09	E	1042	Коленвал 11182	98	2	0	< 10
25.09	F	1041	Коленвал 21177	97	3	< 1	< 10
25.09	F	1041	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
25.09	D	1043	Коленвал 11183	99	1	0	< 10
25.09	D	1043	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
25.09	F	1044	Коленвал 11182	99	1	0	< 10
25.09	F	1044	Коленвал 21213	99	1	0	< 10
26.09	F	1047	Коленвал 11183	99	1	0	< 10

Продолжение таблицы 9

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Микроструктура			
				Металлическая основа, %			Графит нешаров., %
				Перлит	Феррит	Цементит	
26.09	F	1048	Коленвал 21213	98	2	< 1	< 10
26.09	F	1048	Коленвал 11182	99	1	0	< 10
27.09	F	1050	Коленвал 21177	99	1	< 1	< 10
27.09	F	1052	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
27.09	F	1050	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
27.09	F	1052	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
27.09	F	1054	Коленвал 21177	99	1	< 1	< 10
27.09	F	1054	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
28.09	E	1056	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
28.09	D	1059	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
28.09	D	1059	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
28.09	C	1059	Коленвал 21177	99	1	< 1	< 10
28.09	F	1056	Коленвал 11183	99	1	0	< 10
29.09	D	1061	Коленвал 11182	99	1	0	< 10
29.09	D	1061	Коленвал 21213	99	1	0	< 10
30.09	E	1064	Коленвал 21213	99	1	0	< 10
30.09	E	1064	Коленвал 11182	99	1	0	< 10
01.10	D	1068	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
01.10	D	1068	Коленвал 21177	99	1	< 1	< 10
01.10	D	1068	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
01.10	A	1069	Коленвал 21213	98	2	< 1	< 10
01.10	C	1072	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10

Продолжение таблицы 9

01.10	C	1072	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
02.10	C	1074	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
02.10	C	1074	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
02.10	F	1073	Коленвал 11183	98	2	< 1	< 10
02.10	F	1073	Коленвал 21177	98	2	< 1	< 10
02.10	F	1076	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
02.10	F	1076	Коленвал 21213	97	3	< 1	< 10
03.10	F	1078	Коленвал 11183	99	1	0	< 10
03.10	D	1080	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
03.10	F	1079	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
03.10	F	1079	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
04.10	F	1082	Коленвал 11183	95	5	< 1	< 10
04.10	C	1083	Коленвал 11182	95	5	< 1	< 10
04.10	C	1083	Коленвал 11183	98	2	< 1	< 10
04.10	D	1084	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
04.10	D	1084	Коленвал 11182	98	2	< 1	< 10
04.10	F	1085	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
04.10	C	1083	Коленвал 21177	98	2	< 1	< 10
05.10	F	1088	Коленвал 11182	96	4	< 1	< 10
04.10	F	1082	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
05.10	F	1088	Коленвал 11183	93	7	< 1	< 10
05.10	C	1089	Коленвал 21213	98	2	< 1	< 10
06.10	C	1089	Коленвал 21177	98	2	< 1	< 10
07.10	B	1095	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10

Продолжение таблицы 9

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Микроструктура			
				Металлическая основа, %			Графит нешаров., %
				Перлит	Феррит	Цементит	
07.10	В	1098	Коленвал 21177	97	3	0	< 10
07.10	В	1098	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
08.10	F	1099	Коленвал 11183	99	1	< 1	< 10
08.10	С	1100	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
08.10	С	1100	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
08.10	F	1099	Коленвал 11182	95	5	< 1	< 10
08.10	Е	1101	Коленвал 11183	94	6	< 1	< 10
09.10	D	1103	Коленвал 11182	97	3	< 1	< 10
09.10	D	1104	Коленвал 21213	97	3	< 1	< 10
09.10	D	1104	Коленвал 11182	92	8	< 1	< 10
10.10	F	1107	Коленвал 21213	93	7	< 1	< 10
10.10	С	1108	Коленвал 21177	94	6	< 1	< 10
10.10	С	1108	Коленвал 21213	93	7	< 1	< 10
10.10	D	1110	Коленвал 11182	92	8	0	< 10
11.10	A	1112	Коленвал 21177	93	7	0	< 10
11.10	A	1112	Коленвал 11182	96	4	< 1	< 10
12.10	D	1118	Коленвал 11183	92	8	0	< 10
12.10	D	1118	Коленвал 11182	92	8	0	< 10
13.10	D	1119	Коленвал 11182	94	6	< 1	< 10
14.10	В	1124	Коленвал 11183	94	6	< 1	< 10
14.10	В	1124	Коленвал 11182	95	5	< 1	< 10
14.10	D	1125	Коленвал 21213	97	3	< 1	< 10

Продолжение таблицы 9

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Микроструктура			
				Металлическая основа, %			Графит нешаров., %
				Перлит	Феррит	Цементит	
15.10	D	1125	Коленвал 11183	96	4	< 1	< 10
15.10	D	1125	Коленвал 11182	93	7	0	< 10
15.10	F	1127	Коленвал 21213	92	8	< 1	< 10
16.10	B	1128	Коленвал 11182	98	2	0	< 10
16.10	B	1128	Коленвал 11183	97	3	< 1	< 10
16.10	D	1129	Коленвал 11182	99	1	< 1	< 10
16.10	D	1129	Коленвал 11183	99	1	0	< 10
17.10	F	1133	Коленвал 21213	95	5	< 1	< 10
17.10	F	1133	Коленвал 21177	93	7	< 1	< 10
17.10	F	1135	Коленвал 11182	98	2	< 1	< 10
17.10	F	1137	Коленвал 11183	95	5	< 1	< 10
17.10	F	1135	Коленвал 11183	95	5	< 1	< 10
17.10	F	1137	Коленвал 21213	97	3	< 1	< 10
18.10	F	1142	Коленвал 21213	95	5	< 1	< 10
19.10	A	1145	Коленвал 21213	97	3	< 1	< 10
19.10	D	1146	Коленвал 11182	97	3	< 1	< 10
20.10	F	1149	Коленвал 11182	97	3	< 1	< 10
20.10	F	1150	Коленвал 11183	96	4	< 1	< 10
22.10	F	1161	Коленвал 11183	97	3	< 1	< 10
22.10	F	1161	Коленвал 11183	97	3	< 1	< 10
23.10	D	1162	Коленвал 11182	97	3	< 1	< 10
23.10	D	1164	Коленвал 21213	93	7	< 1	< 10
23.10	D	1164	Коленвал 11182	92	8	< 1	< 10

Продолжение таблицы 9

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Микроструктура			
				Металлическая основа, %			Графит нешаров., %
				Перлит	Феррит	Цементит	
23.10	D	1164	Коленвал 11183	92	8	< 1	< 10
23.10	D	1164	Коленвал 21177	99	1	< 1	< 10
24.10	F	1167	Коленвал 11182	98	2	< 1	< 10
24.10	F	1167	Коленвал 21213	95	5	< 1	< 10
24.10	F	1167	Коленвал 11183	98	2	0	< 10
24.10	D	1168	Коленвал 11182	93	7	< 1	< 10
25.10	F	1172	Коленвал 11182	94	6	< 1	< 10
25.10	F	1173	Коленвал 21213	99	1	< 1	< 10
25.10	F	1179	Коленвал 11182	98	2	< 1	< 10
28.10	F	1183	Коленвал 21213	98	2	< 1	< 10
28.10	F	1183	Коленвал 11182	97	3	< 1	< 10
29.10	F	1186	Коленвал 11183	97	3	< 1	< 10
29.10	F	1186	Коленвал 11182	94	6	< 1	< 10
По СТО 00232934-35.24-2023 для марки Gh75-50-03				≥ 90	≤ 10	≤ 1	≤ 10

В таблице 10 представлены результаты исследования микроструктуры чугуна марки Gh75-50-03 в соответствии со стандартом СТО 00232934-35.24-2023, а также результаты, полученные при использовании основной технологии производства и комплексного технологического подхода к снижению уровня дефектности отливок из высокопрочного чугуна.

Анализ данных показывает, что соответствие всех исследуемых образцов требованиям стандарта по содержанию металлической основы (не менее 90%).

Таблица 10 – Сравнительный анализ микроструктурных характеристик чугуна марки Gh75-50-03

	Микроструктура			
	Металлическая основа, %			Графит нешаров., %
	Перлит	Феррит	Цементит	
СТО 00232934-35.24-2023 для марки Gh75-50-03	≥ 90	≤ 10	≤ 1	≤ 10
Результаты при основной технологии	90 – 94	6 – 10	≤ 1	≤ 10
Результаты исследования комплексного подхода	92 – 99	1 – 8	< 1	< 10

При применении комплексного подхода наблюдается улучшение показателей по сравнению с основной технологией, а именно увеличение доли металлической основы до 92-99%, снижение содержания феррита до 1-8%, сохранение низкого содержания цементита (<1%) и общее количество включений остается в допустимых пределах (<10%). Комплексный подход, предлагаемый в рамках исследования, обеспечивает более высокое качество микроструктуры материала. Наблюдается тенденция к улучшению фазового состава чугуна, а полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения комплексного подхода в производстве. Анализ микроструктуры отливок «Вал коленчатый» выявил значительное влияние комплексного модифицирования на распределение перлита в металлической основе материала. На гистограмме рисунке 22, наблюдается равномерное распределение перлита, что является важным показателем качества отливок. Оценка дефектности производства чугунного литья и поковок отливок «Вал коленчатый» показана в таблице 11 и демонстрирует снижение количества забракованных отливок по микроструктуре при применении комплексного подхода. Это подтверждает эффективность разработанной технологии модифицирования, направленной на улучшение как микроструктурных характеристик, так и качества готового изделия в целом.

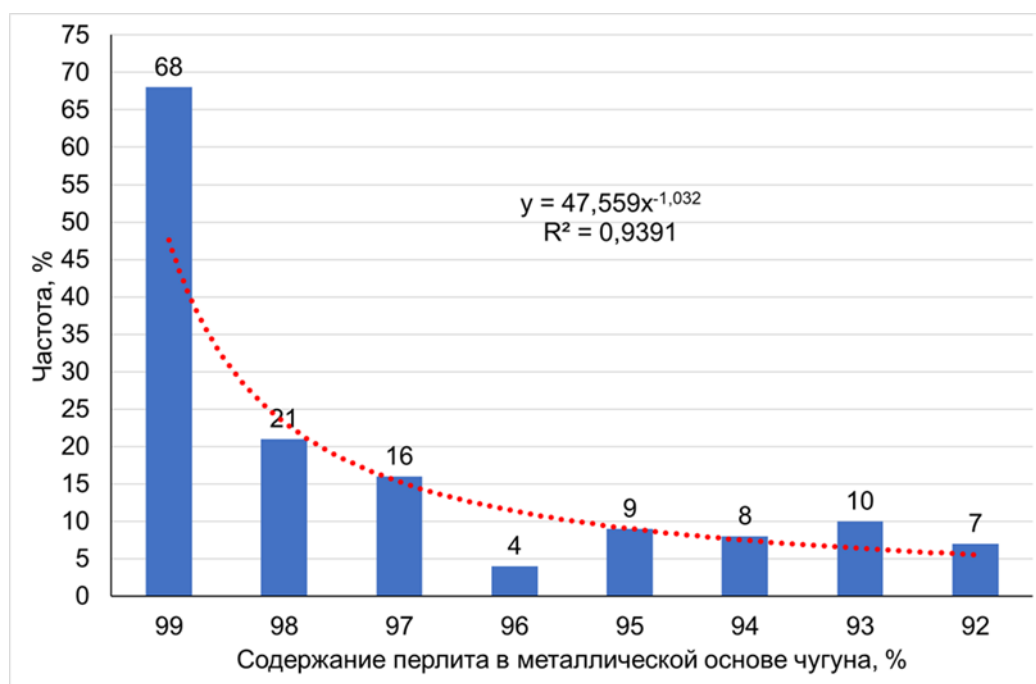


Рисунок 22 – Гистограмма распределения содержания перлита в металлической основе отливок «Вал коленчатый»

Таблица 11 – Уровень дефектности по наиболее значимым дефектам в производстве чугунного литья и поковок отливок «Вал коленчатый»

Наименование дефекта	Фактическое количество в шт. (2022г.)	Фактическое количество в шт. (2023г.)	Фактическое количество в шт. (2024г.)
Кол-во годных, шт.	410301	650127	780633
Брак, шт.	44524	57240	46490
Смещение	14289	18571	17543
Раковины	5216	4284	9181
Несоответствие микроструктуры	13758	15873	4424
Залив в черном браке	2105	7384	5730
Залив	1115	3269	5467
Раковина песчаная	3478	3095	2077
Недолив, спай в черном браке	2305	2500	1078
Раковина газовая	2108	1939	823
Прочие	150	325	167
Итого брак, %	10,85	8,75	5,62

Анализ данных по производству коленчатых валов показывает положительную динамику в снижении дефектности продукции. За два года процент брака сократился с 10,85% до 5,62%, что свидетельствует о значительном улучшении качества производства.

Наиболее критичным дефектом остается смещение, которое стабильно занимает первое место по количеству (14289-17543 шт.). Этот дефект указывает на проблемы в процессе формовки и сборки стержней, что требует комплексного подхода к решению: модернизации оснастки, улучшения контроля размеров форм и оптимизации технологических параметров литья.

Значительное улучшение наблюдается в показателях микроструктуры - снижение с 13758 до 4424 шт. Это результат оптимизации термической обработки и повышения качества исходного сырья.

При сохранении текущих тенденций и реализации комплексного подхода к управлению качеством можно ожидать дальнейшего снижения процента брака до уровня 3-4%, что соответствует требованиям современного машиностроительного производства.

3.2 Результаты исследования механических свойств чугуна в отливках «Вал коленчатый»

В ходе проведения комплексного исследования механических характеристик чугуна, использованного для изготовления отливок коленчатых валов, были получены количественные показатели, отражающие основные физико-механические свойства материала. Результаты проведённых испытаний представлены в таблицах 12, 13.

Таблица 12 – Результаты исследования механических свойств чугуна в отливках коленчатых валов

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Механические свойства			
				σ_b , кгс/мм ²	δ , %	НВ 5/750/10	
						Диапазон	Среднее
17.09	F	1007	Коленвал 11183	88	5,2	272-288	280
16.09	F	1007	Коленвал 11182	90	5,6	275-292	284
16.09	F	1007	Коленвал 21177	89	5,2	272-288	280

Продолжение таблицы 12

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Механические свойства			
				σ_b , кгс/мм ²	δ , %	HB 5/750/10	
						Диапазон	Среднее
17.09	В	1010	Коленвал 11182	92	5,2	282-298	290
18.09	F	1012	Коленвал 11183	80	6,0	252-262	257
18.09	F	1011	Коленвал 21213	88	6,4	272-285	279
17.09	F	1011	Коленвал 11182	87	6,8	269-278	274
18.09	F	1012	Коленвал 11182	88	4,0	269-285	277
19.09	В	1018	Коленвал 11183	82	6,0	252-269	261
19.09	В	1018	Коленвал 21213	84	5,6	252-260	256
20.09	В	1020	Коленвал 21213	84	5,6	282-298	290
20.09	В	1020	Коленвал 11183	85	6,0	272-288	280
20.09	В	1022	Коленвал 11183	78	5,6	260-269	265
20.09	В	1022	Коленвал 21213	87	6,0	282-298	290
20.09	В	1024	Коленвал 21177	91	5,2	272-288	280
21.09	В	1024	Коленвал 11182	89	5,6	272-282	277
21.09	В	1024	Коленвал 11183	88	5,2	263-278	271
21.09	В	1028	Коленвал 11182	77	4,8	252-266	259
21.09	F	1027	Коленвал 11182	87	5,2	272-288	280
21.09	В	1026	Коленвал 11183	88	6,4	266-282	274
21.09	В	1026	Коленвал 21213	88	6,0	272-285	279
21.09	В	1028	Коленвал 21213	88	7,2	278-292	285
21.09	F	1027	Коленвал 21177	92	6,0	272-288	280
23.09	Е	1034	Коленвал 11182	87	5,2	278-292	285
23.09	Е	1034	Коленвал 21213	85	5,2	266-275	271
23.09	Е	1034	Коленвал 11183	86	4,0	272-288	280

Продолжение таблицы 12

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Механические свойства			
				σ_b , кгс/мм ²	δ , %	HB 5/750/10	
						Диапазон	Среднее
23.09	B	1035	Коленвал 21213	91	5,2	282-298	290
23.09	B	1035	Коленвал 11183	89	5,6	272-288	280
24.09	F	1037	Коленвал 11182	84	5,6	272-288	280
24.09	F	1040	Коленвал 21177	91	4,4	269-285	277
24.09	F	1037	Коленвал 11183	89	4,8	266-285	276
25.09	E	1042	Коленвал 21213	89	6,0	272-298	285
25.09	E	1042	Коленвал 11182	90	6,8	272-288	280
25.09	F	1041	Коленвал 21177	83	4,8	269-282	276
25.09	F	1041	Коленвал 11183	86	5,2	266-278	272
25.09	D	1043	Коленвал 11183	90	5,2	278-292	285
25.09	D	1043	Коленвал 11182	88	5,6	275-288	282
25.09	F	1044	Коленвал 11182	89	6,0	272-288	280
25.09	F	1044	Коленвал 21213	90	5,6	266-282	274
26.09	F	1047	Коленвал 11183	92	6,0	275-292	284
26.09	F	1048	Коленвал 21213	90	5,6	266-275	271
26.09	F	1048	Коленвал 11182	88	6,0	272-288	280
27.09	F	1050	Коленвал 21177	92	5,2	282-295	289
27.09	F	1052	Коленвал 11182	92	5,2	269-288	279
27.09	F	1050	Коленвал 11183	89	5,6	266-278	272
27.09	F	1052	Коленвал 11183	89	5,2	266-275	271
27.09	F	1054	Коленвал 21177	84	4,0	269-285	277
27.09	F	1054	Коленвал 21213	85	5,2	278-295	287
28.09	E	1056	Коленвал 11182	92	5,6	282-298	290

Продолжение таблицы 12

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Механические свойства			
				σ_b , кгс/мм ²	δ , %	HB 5/750/10	
						Диапазон	Среднее
28.09	D	1059	Коленвал 21213	90	6,0	282-298	290
28.09	D	1059	Коленвал 11182	93	5,2	292-298	295
28.09	C	1059	Коленвал 21177	91	5,6	272-288	280
28.09	F	1056	Коленвал 11183	90	6,8	278-295	287
29.09	D	1061	Коленвал 11182	90	5,6	275-288	282
29.09	D	1061	Коленвал 21213	91	6,0	279-295	287
30.09	E	1064	Коленвал 21213	89	6,0	282-298	290
30.09	E	1064	Коленвал 11182	89	4,8	272-288	280
01.10	D	1068	Коленвал 11182	94	6,0	272-288	280
01.10	D	1068	Коленвал 21177	96	5,6	266-282	274
01.10	D	1068	Коленвал 11183	92	5,6	278-295	287
01.10	A	1069	Коленвал 21213	95	5,2	269-285	277
01.10	C	1072	Коленвал 11182	89	5,6	272-288	280
01.10	C	1072	Коленвал 21213	92	5,2	282-295	289
02.10	C	1074	Коленвал 11182	88	4,8	272-288	280
02.10	C	1074	Коленвал 21213	89	5,6	269-285	277
02.10	F	1073	Коленвал 11183	90	5,6	278-292	285
02.10	F	1073	Коленвал 21177	92	5,6	266-282	274
02.10	F	1076	Коленвал 11183	94	4,8	272-288	280
02.10	F	1076	Коленвал 21213	92	5,2	285-298	292
03.10	F	1078	Коленвал 11183	92	6,0	278-295	287
03.10	D	1080	Коленвал 11182	83	6,0	263-278	271
03.10	F	1079	Коленвал 11183	86	4,0	282-298	290

Продолжение таблицы 12

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Механические свойства			
				σ_b , кгс/мм ²	δ , %	HB 5/750/10	
						Диапазон	Среднее
03.10	F	1079	Коленвал 11182	87	5,2	272-288	280
04.10	F	1082	Коленвал 11182	82	4,0	255-278	267
04.10	C	1083	Коленвал 11182	79	4,8	266-282	274
04.10	C	1083	Коленвал 11183	93	5,2	272-282	277
04.10	D	1084	Коленвал 11183	91	6,0	272-282	277
04.10	D	1084	Коленвал 11182	77	6,4	272-288	280
04.10	F	1085	Коленвал 21213	90	4,8	282-298	290
04.10	C	1083	Коленвал 21177	94	4,8	272-288	280
05.10	F	1088	Коленвал 11182	83	4,4	257-272	265
04.10	F	1082	Коленвал 21213	95	5,2	282-298	290
05.10	F	1088	Коленвал 11183	80	6,4	255-266	261
05.10	C	1089	Коленвал 21213	90	5,2	272-288	280
06.10	C	1089	Коленвал 21177	92	5,6	275-295	285
07.10	B	1095	Коленвал 11182	94	5,6	272-288	280
07.10	B	1098	Коленвал 21177	87	5,2	272-288	280
07.10	B	1098	Коленвал 11183	92	6,0	272-298	285
08.10	F	1099	Коленвал 11183	89	4,0	282-298	290
08.10	C	1100	Коленвал 11182	93	5,2	272-288	280
08.10	C	1100	Коленвал 21213	91	4,8	282-298	290
08.10	F	1099	Коленвал 11182	80	4,8	266-282	274
08.10	E	1101	Коленвал 11183	81	4,8	252-269	261
09.10	D	1103	Коленвал 11182	83	5,2	255-269	262
09.10	D	1104	Коленвал 21213	78	4,0	272-285	279

Продолжение таблицы 12

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Механические свойства			
				σ_b , кгс/мм ²	δ , %	HB 5/750/10	
						Диапазон	Среднее
09.10	D	1104	Коленвал 11182	80	5,6	263-275	269
10.10	F	1107	Коленвал 21213	80	4,8	272-288	280
10.10	C	1108	Коленвал 21177	79	4,8	260-269	265
10.10	C	1108	Коленвал 21213	77	4,0	263-278	271
10.10	D	1110	Коленвал 11182	87	6,8	272-288	280
11.10	A	1112	Коленвал 21177	83	6,8	263-278	271
11.10	A	1112	Коленвал 11182	81	4,8	255-269	262
12.10	D	1118	Коленвал 11183	81	4,8	252-266	259
12.10	D	1118	Коленвал 11182	79	4,4	252-263	258
13.10	D	1119	Коленвал 11182	85	5,2	252-260	256
14.10	B	1124	Коленвал 11183	77	4,4	263-278	271
14.10	B	1124	Коленвал 11182	78	5,6	255-269	262
14.10	D	1125	Коленвал 21213	80	4,8	272-278	275
15.10	D	1125	Коленвал 11183	79	4,4	257-269	263
15.10	D	1125	Коленвал 11182	77	5,6	260-269	265
15.10	F	1127	Коленвал 21213	78	7,6	272-288	280
16.10	B	1128	Коленвал 11182	82	5,2	252-266	259
16.10	B	1128	Коленвал 11183	80	4,0	252-263	258
16.10	D	1129	Коленвал 11182	93	6,0	272-288	280
16.10	D	1129	Коленвал 11183	91	5,6	275-292	284
17.10	F	1133	Коленвал 21213	77	4,4	282-298	290
17.10	F	1133	Коленвал 21177	76	5,2	272-288	280
17.10	F	1135	Коленвал 11182	82	8,0	260-282	271

Продолжение таблицы 12

Дата	Печь	Плавка	Отливка	Механические свойства			
				σ_b , кгс/мм ²	δ , %	HB 5/750/10	
						Диапазон	Среднее
17.10	F	1137	Коленвал 11183	85	4,0	260-278	269
17.10	F	1135	Коленвал 11183	84	4,0	266-282	274
17.10	F	1137	Коленвал 21213	84	4,0	272-285	279
18.10	F	1142	Коленвал 21213	76	4,4	252-263	258
19.10	A	1145	Коленвал 21213	78	5,6	250-255	253
19.10	D	1146	Коленвал 11182	82	6,0	260-282	271
20.10	F	1149	Коленвал 11182	80	5,2	263-285	274
20.10	F	1150	Коленвал 11183	79	4,0	263-278	271
22.10	F	1161	Коленвал 11183	81	6,4	272-285	279
23.10	D	1162	Коленвал 11182	81	6,8	263-278	271
23.10	D	1164	Коленвал 11182	78	6,4	272-285	279
23.10	D	1164	Коленвал 11183	77	6,0	252-266	259
23.10	D	1164	Коленвал 21177	82	5,2	282-298	290
24.10	F	1167	Коленвал 11182	85	6,8	266-275	271
24.10	F	1167	Коленвал 11183	86	5,6	272-288	280
24.10	D	1168	Коленвал 11182	82	5,2	260-275	268
25.10	F	1172	Коленвал 11182	86	6,0	255-263	259
25.10	F	1179	Коленвал 11182	77	6,0	252-263	258
28.10	F	1183	Коленвал 21213	81	5,2	272-278	275
28.10	F	1183	Коленвал 11182	80	5,6	269-278	274
29.10	F	1186	Коленвал 11183	84	5,6	255-269	262
29.10	F	1186	Коленвал 11182	78	6,8	260-269	265
По СТО 00232934-35.24-2023 для марки Gh75-50-03				≥ 75	≥ 3	250-300	

Таблица 13 – Сравнительный анализ механических свойств чугуна марки Gh75-50-03в отливках «Вал коленчатый»

	Механические свойства					
	σ_B , кгс/мм ²		δ , %		НВ 5/750/10	
	Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее
СТО 00232934-35.24-2023 для марки Gh75-50-03	≥ 75	–	≥ 3	–	250 – 300	275
Результаты при основной технологии	75 – 82	79	3 – 4,8	4,0	250 – 275	262
Результаты исследования комплексного подхода	77 – 96	85,3	4,0 – 7,6	5,6	250 – 298	280

Проведенные исследования демонстрируют существенное превосходство комплексного подхода в обеспечении улучшенных механических свойств материала по сравнению с традиционной технологией производства.

Временное сопротивление при реализации комплексного подхода демонстрирует прирост 6,3 кгс/мм² (8%) относительно базового технологического процесса. Относительное удлинение увеличивается на 1,6% (40%), что свидетельствует о значительном повышении пластических характеристик материала. Твердость по Бринеллю возрастает на 18 единиц (6,8%), что указывает на улучшение прочностных характеристик исследуемого материала.

Полученные экспериментальные данные подтверждают высокую эффективность комплексного подхода к производству. Особенно примечательным является существенное улучшение пластических свойств материала, что подтверждается значительным увеличением относительного удлинения.

Все полученные показатели механических свойств при использовании комплексного подхода не только соответствуют установленным требованиям СТО, но и демонстрируют существенное превосходство над результатами,

достигаемыми при применении основной технологии производства отливок марки чугуна Gh75-50-03.

Для наглядного представления распределения механических характеристик были построены гистограммы, отражающие статистические параметры исследуемых показателей. На рисунках 23-25 представлены графики распределения значений: предела прочности (временного сопротивления), относительного удлинения и средней твердости по Бринеллю.

Данные гистограммы позволяют провести детальный анализ вариабельности механических характеристик чугуна в отливках коленчатых валов и оценить стабильность получаемых результатов при использовании комплексного подхода.

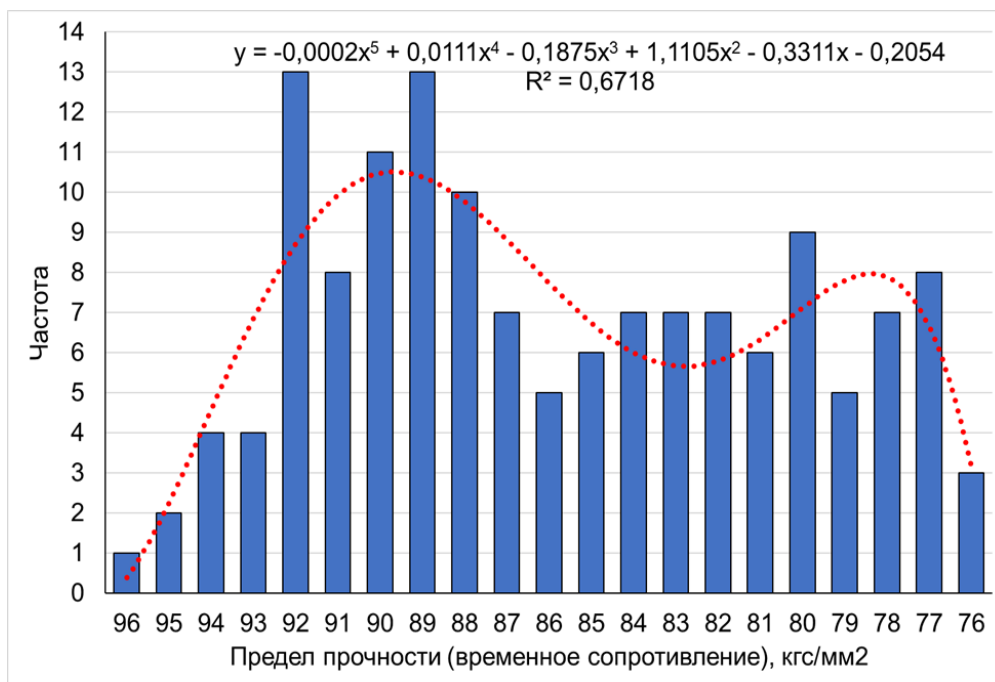


Рисунок 23 – Гистограмма распределения значений предела прочности (временного сопротивления) чугуна в отливках коленчатых валов

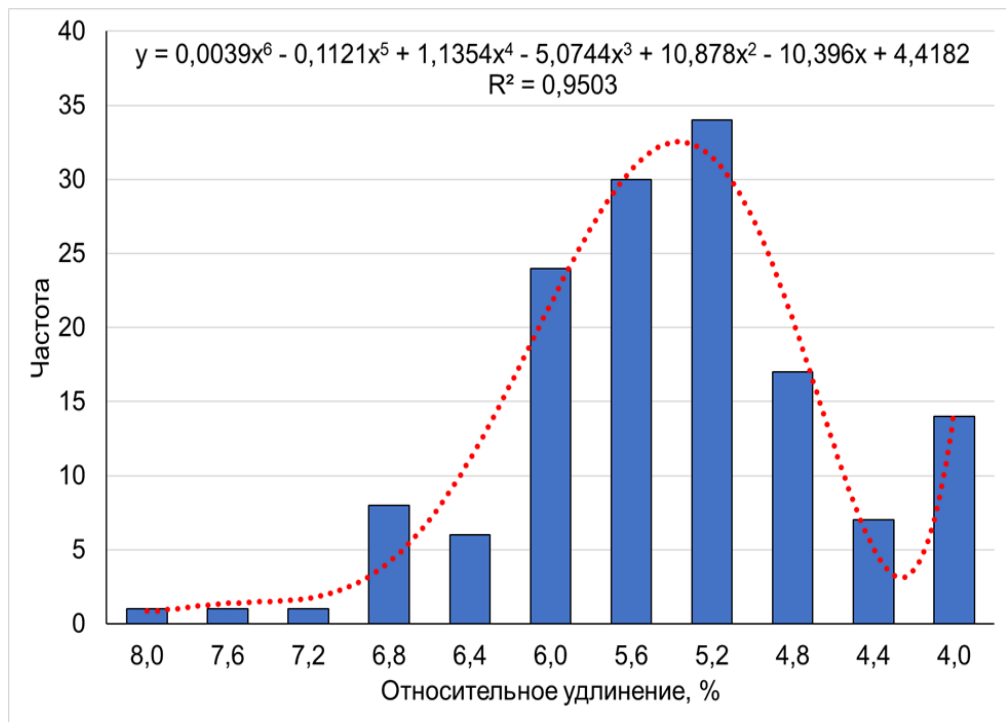


Рисунок 24 – Гистограмма распределения значений относительного удлинения чугуна в отливках коленчатых валов

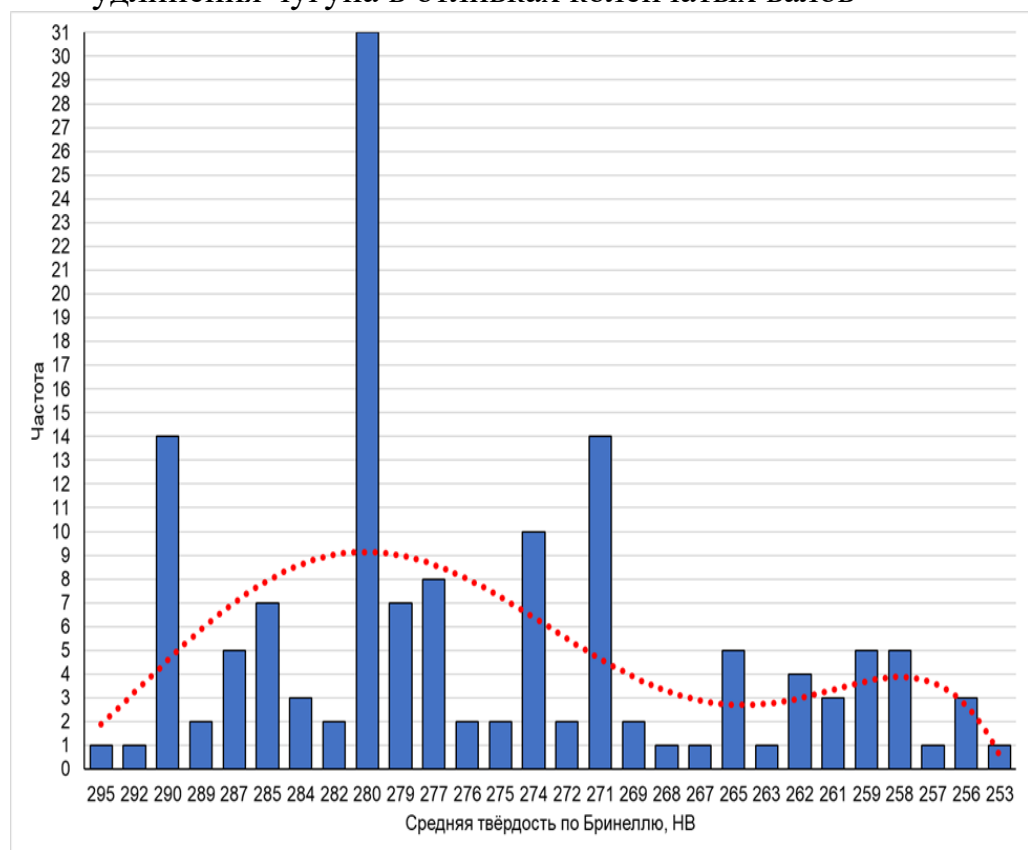


Рисунок 25 – Гистограмма распределения значений средней твёрдости по Бринеллю чугуна в отливках коленчатых валов

3.3 Анализ результатов исследования структуры и механических свойств чугуна в отливках вала коленчатого

– Результаты исследования структуры и механических свойств чугуна в отливках вала коленчатого показали их полное соответствие требованиям НД – СТО 00232934-35.24-2023 для марки Gh75-50-03 по микроструктуре и механическим свойствам.

– Статистическое распределение содержания перлита в металлической основе отливок коленчатых валов с высокой степенью точности аппроксимируется показательной функцией вида $y = \frac{A}{x^B}$. Картина распределения такова, что максимальное содержание перлита (99%) содержится в микроструктуре наибольшего количества отливок, а минимально допустимое (92%) – в микроструктуре наименьшего количества отливок.

– Статистическое распределение временного сопротивления (предела прочности) в чугуне отливок коленчатых валов классифицируется как бимодальное асимметричное, где 1-я мода соответствует значениям, получаемым после упрочняющей термической обработки (нормализации), а 2-я мода – значениям, получаемым в литом состоянии.

– Статистическое распределение относительного удлинения в чугуне отливок коленчатых валов классифицируется как асимметричное со смещением моды в область более низких значений (5,2%) фактического диапазона (4-8%).

– Статистическое распределение средней твёрдости по Бринеллю чугуна отливок коленчатых валов также как и статистическое распределение временного сопротивления (предела прочности) классифицируется как бимодальное асимметричное и характеризуются взаимной идентичностью. В распределении также 1-я мода соответствует значениям, получаемым после

упрочняющей термической обработки (нормализации), а 2-я мода – значениям, получаемым в литом состоянии.

Выводы по разделу 3

В результате проведённых исследований структуры чугуна в отливках коленчатых валов можно сделать следующие выводы:

- Оптимизированы параметры модифицирования чугуна, включающие снижение количества модификатора Сферромаг 631 до 14 кг и добавление модификатора Vermiloy 526 в количестве 3,0 кг, что обеспечило получение требуемой структуры материала.

- Достигнуто соответствие структуры чугуна, нормализованной с содержанием феррита не более 8%, что является необходимым условием для обеспечения требуемых механических свойств.

- Результаты микроструктурного анализа (таблица 10) показали полное соответствие полученной микроструктуры требованиям марки Gh75-50-03 по всем показателям:

- содержание перлита не менее 92%;
- содержание феррита не более 8%;
- содержание цементита не более 1%;
- графит нешаровидной формы не более 10%.

- Статистический анализ показал, что максимальное содержание перлита (99%) наблюдается в микроструктуре наибольшего количества отливок, что подтверждает эффективность применённой технологии модифицирования.

Анализ механических свойств чугуна в отливках коленчатых валов позволил сделать следующие выводы:

- Механические свойства чугуна полностью соответствуют требованиям нормативной документации для марки Gh75-50-03:

- предел прочности (σ_b) находится в диапазоне 77-92 кгс/мм²;
- относительное удлинение (δ) составляет 4-6,8%;
- твёрдость по Бринеллю (HB) находится в диапазоне 252-298.

– Статистический анализ механических свойств показал:

- бимодальное асимметричное распределение временного сопротивления;
- асимметричное распределение относительного удлинения со смещением в область более низких значений;
- бимодальное распределение твёрдости по Бринеллю, коррелирующее с распределением предела прочности.

Установлено, что первая мода в распределении механических свойств соответствует значениям после нормализационной термической обработки, а вторая мода - значениям в литом состоянии.

Таким образом, проведённые исследования структуры и механических свойств чугуна в отливках коленчатых валов показали высокую эффективность разработанной технологии модифицирования и полное соответствие полученных результатов требованиям нормативной документации для марки Gh75-50-03.

Заключение

Из всех наиболее широко применяемых способов модифицирования высокопрочного чугуна был выбран способ «заливка сверху», в наибольшей степени подходящий под массовое производство отливок с использованием такого ФСМг-модификатора как Сферомаг 631-1 с соотношением главных, определяющих качество модифицирования, элементов магний/кальций/РЗМ = 6/3/1. Системный подход, основанный на применении методик проведения спектрального анализа проб, микроструктурного анализа чугуна в отливках и механических испытаний отливок из чугуна позволил всесторонне исследовать структурно-механические показатели высокопрочного чугуна в отливках (на примере отливок коленчатых валов). Применение в действующем производстве модификатора Сферомаг 631-1 по схеме ковшевого сфероидизирующего модифицирования «заливка сверху» позволило обеспечить достижение требуемых показателей структуры и свойств высокопрочного чугуна (на примере отливок коленчатых валов). Применённый статистический анализ результатов исследований показал распределение содержания перлита в металлической основе отливок коленчатых валов аппроксимируется показательной функцией, при этом распределения таково, что максимальное содержание перлита (99%) содержится в наибольшем количества отливок, а минимально допустимое (92%) – в наименьшем количества отливок. Статистическое распределение временного сопротивления и средней твёрдости по Бринеллю чугуна отливок коленчатых валов полностью коррелируют между собой и характеризуются как бимодальное асимметричное, где 1-я мода соответствует значениям, получаемым после упрочняющей термической обработки (нормализации), а 2-я мода – значениям, получаемым в литом состоянии, при этом статистическое распределение относительного удлинения в чугуне отливок коленчатых валов имеет отличие, заключающееся смещением моды в область более низких значений (5,2%) фактического диапазона (4-8%).

Список используемых источников

1. Беляев А.М. Теория и практика модифицирования литейных сплавов. – СПб.: Политехника, 2004.
2. Беляев Н.И. Макроструктура стали в связи с кристаллизацией / Н.И. Беляев, инж.-техн. – Санкт-Петербург: тип. М. Фроловой, 1910. – 18 с., [6] л. ил.: табл.; 28.
3. Беляев, Н.И. Макроструктура стали в связи с кристаллизацией // Русские ученые-металловеды. – С. 323
4. Беликов А.И. Отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / А.И. Беликов, Л.А. Жуков, Д.Н. Маццарелли. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
5. Болдырев Д.А. Исследование комплексного влияния технологических параметров модифицирования конструкционных чугунов на показатели их структуры и свойств / Д.А. Болдырев // Металлургия и материаловедение. – 2010. – 227 с.
6. Гуляев Б.Б. Физико-химические основы синтеза сплавов / Б.Б. Гуляев, – Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1980. – 191, [1] с.: ил.; 21 см.
7. Гуляев Б.Б. Синтез сплавов: (основные принципы: выбор компонентов) / Б.Б. Гуляев, – Москва: Металлургия, 1984. – 160 с.: ил.; 22 см.
8. Гуляев Б.Б. Структура и свойства сплавов: (некоторые вопросы металловедения и прочности) / Б.Б. Гуляев, Н.В. Камышанченко, И.М. Неклюдов [и др.]; под ред. А.М. Паршина, И.М. Неклюдова. – Москва: Металлургия, 1993. – 317 с.: ил., табл.; 20 см.
9. Гуляев Б.Б. Структура и свойства чугунов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010.
10. Гурьев М.А. Влияние термической обработки на физико-механические свойства высокопрочного чугуна ВЧ 50 / М.А. Гурьев, С.Г. Иванов, В.В. Романенко, А.И. Аугсткалн, М.Н. Зенин, Е.В. Черных, А.М.

Гурьев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2024. – Т. 21. – № 1. – С. 122–130.

11. Давыдов С.В. Технология наномодифицирования доменных и ваграночных чугунов / С.В. Давыдов // Заготовительное производство. – 2005. – №2. – С.3-9.

12. Давыдов, С.В. Тенденции развития модификаторов для чугунов и стали / С.В. Давыдов, А.Г. Панов // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). – 2007. – №1. – С.3. – URL: https://www.mashin.ru/files/zag1_1-56.pdf c.3.

13. Карабасов Ю.С. Металлургия и время / Ю.С. Карабасов, П.И. Черноусов, Н.А. Короточенко, О.В. Голубев // Фундамент индустриальной цивилизации. Возрождение и Новое время. – 2011. – Т.2. – С. 216-220.

14. Крушенко, Г.Г. Повышение качества чугунных отливок с помощью нанопорошков / Г.Г. Крушенко, И.С. Ямских, А.А. Бонченков, А.С. Мишин // Металлургия машиностроения. – 2002. – № 2(9). – С.20-21.

15. Кузьмин, Б.А. Металлургия. Металловедение и конструкционные материалы / Б.А. Кузьмин [и др.]. – М.: Высшая школа, 1977. – 190 с.

16. Ланда А.Ф. Основы получения чугуна повышенного качества. Состав, структура, термообработка // Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, Москва, 1960, - 240 с.

17. Лернер, Ю.С. Технология получения высокопрочного чугуна за рубежом / Ю.С. Лернер, Е.А. Таран, Ю.И. Сенкевич, Л.Е. Соловьёв // Литейное производство. – 1981. – №6. – С. 8-10.

18. Микрюков, В.М. Применение бейнитного высокопрочного чугуна / В.М. Микрюков, О.А. Сазонов // Металлург / под ред. Н. Александрова [и др.]. – М., 2004. – С. 260-262.

19. Обуденов, А. Русские нанопорошки / А. Обуденов // Российский электронный наножурнал: Популярные нанотехнологии. – 2009. – URL: <http://popnano.ru/analit>.

20. Попенко, Н.И. Материаловедение. Лабораторный практикум / Н.И. Попенко, А.В. Железнякова. – М.: МОНРФ, НИУ «МИЭТ», 2012.
21. Попель, С.И. Модификаторы и их влияние на структуру и свойства чугуна / С.И. Попель, В.В. Панов, К.В. Вихтева // Инновационные технологии в машиностроении: Материалы II Международной научно-практической конференции / Под ред. А.В. Андриенко. – 2014. – С. 308-314.
22. Псырков, Н.В. Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как новый конструкционный материал / Н.В. Псырков // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3 (20)—4 (21). – С. 213-218.
23. Раевский, Г.И. Технологии литейного производства. – М.: Машгиз, 1956.
24. Ржешотарский, А.А. Ковкий чугун / А.А. Ржешотарский, Д.И. Менделеев // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: в 86 т. (82 т. и 4 доп.). – СПб., 1890-1907.
25. Роде, В.А. Модифицирование чугунов / В.А. Роде, А.И. Вейник, А.А. Рыков. – М.: Металлургия, 1981.
26. Рябухов, С.И. Модифицирование чугуна жидкой чугуномагниевой лигатурой / С.И. Рябухов, А.А. Рыжиков // Новое в литейном производстве / Горьк. политехн. ин-т. – Горький, 1959. – Т.15, Вып.6. – С.5-15.
27. Рыжиков, А.А. Улучшение свойств чугуна с шаровидным графитом за счет модифицирования ферросилицием и комплексного модифицирования / А.А. Рыжиков, А.С. Кузнецов, А.В. Костин // Прогрессивные технологические процессы в литейном производстве. – Минск, 1965. – С.14-16.
28. Рыжиков, А.А. Применение комплексных модификаторов при изготовлении тонкостенных отливок из чугуна с шаровидным графитом / А.А. Рыжиков, А.С. Кузнецов // Современные прогрессивные технологические процессы изготовления чугунных отливок. – Л., 1965. – С.62-69.

29. Федоров, А.С. Творцы науки о металле / А.С. Федоров. – Москва: Наука, 1980. – 218 с.
30. Холл, Дж.Х. Обработка чугуна / Дж.Х. Холл, Дж.А. Дик. – М.: Машиностроение, 1978.
31. Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей / Н.Н. Александров [и др.]. – М.: Металлург, 2004. – 419 с.
32. Янкевич, С.Н. Использование высокопрочных чугунов с аусферритной структурой для системы возвратно-поступательного перемещения поршней ДВС и усовершенствование параметров ее работы / С.Н. Янкевич, И.Н. Хроль, М.С. Ковалько, И.И. Полидовец // Литье и металлургия. – 2023. – №3. – С. 79-85.
33. ГОСТ 141593 Ферросилиций. – Введ. 1994-06-02. – М.: Стандартинформ, 1994. – 12 с.
34. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1986-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 48 с.
35. ГОСТ 166-89 Штангенциркули. Технические условия. – Введ. 1991-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 28 с.
36. ГОСТ 28394-89 Чугун с вермикулярным графитом для отливок. Марки ГОСТ. – Введ. 1989-12-21. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 28 с.
37. ГОСТ 3443-87 Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – Введ. 1988-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 24 с.
38. ГОСТ 6507 Микрометры. Технические условия. – Введ. 1991-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 32 с.
39. ГОСТ 805-95 Чугун перекристаллизованный. – Введ. 1999-04-07. – М.: Стандартинформ, 1995. – 11 с.
40. ГОСТ 9179-2018 Межгосударственный стандарт известняковая строительная. Технические условия. – Введ. 2018-10-02. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.

41. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Введ. 2019-09-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 36 с.
42. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. – Введ. 2002-11-01. – М.: Стандартинформ, 2002. – 32 с.
43. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. В 3-х т. / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рохштадта. – 4-е изд., перераб. и доп. – Т.1. Методы испытаний и исследования. В 2-х кн. Кн.1. – М.: Металлургия, 1991. – 304 с.
44. ТУ 0820-046-72684889-2017 ООО «НПП Технология».
45. ТУ 1916-054-002 008 51 ЗАО «Технографит».
46. Способы модифицирования чугуна // Литейный консилиум Online. – URL: <https://litkons.com/info/cast-iron/sposoby-modifitsiro-vaniya/chuguna>
47. Skaland, T. Production of Ductile Iron – Comparison of Alternative Magnesium Treatment Methods for Ductile Cast Iron/ T. Skaland // Elkem ASA Research. – Paper Submitted to the 4th Asia. – 2017. – URL: <https://otlivka.info/wp-content/uploads/2017/04/file42.pdf>.
48. Altan A.K., Prasad M., Eagar T.W. Fundamentals of Die Casting / A.K. Altan, M. Prasad, T.W. Eagar. – Cambridge: MIT Press, 2023. – С. 96
49. Davis J.R. ASM Handbook: Casting / J.R. Davis. – Materials Park, OH: ASM International, 2024. – С. 450.
50. Herman H., Hu S.J. Advanced Casting Processes and Technologies / H. Herman, S.J. Hu. – New York: CRC Press, 2024. – С. 350.
51. McGuire M.J. The Metallurgy of Ductile Iron / M.J. McGuire. – Warrendale, PA: AFS, 2023. – С. 242.