

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

Институт машиностроения

(Наименование института полностью)

Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

(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 «Технология изготовления и исследования высокоуглеродистого
серого чугуна для тормозных дисков»

Обучающийся

С.В. Иванов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

д.т.н., доцент Д.А. Болдырев

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2024

Содержание

Введение.....	3
1 Теоретический анализ проблемы исследования	5
2 Процесс выплавки металла	9
2.1 Выбор плавильного оборудования.....	9
2.2 Материалы для выплавки чугуна. Разработка химического состава	12
2.3 Модифицирование	22
2.4 Формовка и заливка тормозных дисков.....	23
2.5 Стержни из холодно твердеющих смесей	30
2.6. Металлографический анализ.....	37
2.6.1. Подготовка пробы	37
2.6.2. Анализ микроструктуры.....	41
2.7. Спектральный анализ.....	45
2.7.1. Подготовка пробы.....	45
2.7.2. Определение химического состава чугуна спектральным методом	46
2.7.3. Анализ стержневой смеси	48
2.7.4. Анализ формовочной смеси.....	49
2.7.5 Определение предела прочности на растяжении.....	59
2.7.6 Измерение твёрдости	60
3 Результаты работы	61
Заключение	72
Список используемой литературы и используемых источников.....	73

Введение

На протяжении многих десятилетий проводятся исследования по разработке, апробации и испытаниям новых конструкций деталей и материалов в узлах тормозной системы автомобилей. Ведущие мировые компании в области разработки тормозных систем патентуют и представляют на международных автомобильных форумах новые, наиболее совершенные варианты тормозных систем автомобиля, изготовленные из различных материалов с разными показателями ресурсных и физических свойств.

Несмотря на то, что конструкция дисковых тормозов была запатентована ещё в 1902 году, такой тип узла деталей для торможения остаётся актуальным и на сегодняшний день и используется на большинстве производимых автомобилей.

В наше время появились различные материалы для производства тормозных дисков. Мировой лидер в производстве тормозных систем, компания Brembo, провела ряд исследований в области применения материалов для тормозных дисков.

Тормозные диски из углерод-керамического материала показали высокие эксплуатационные характеристики такие как высокую коррозионную стойкость и минимальный износ диска, при этом низкая плотность материала в сравнении с традиционно применяемым чугуном $2,3 \text{ кг/дм}^3$, меньше трети по сравнению с плотностью чугуна, позволяет снижать массу тормозного диска и облегчать конструкцию тормозной системы.

Ещё более лёгким материалом с плотностью $1,7 \text{ кг/дм}^3$ является материал углерод-углеродный. Такое название он получил, так как при его изготовлении вводится углерод производный от метана в углеродную основу, за счёт чего обеспечивается прочность углеродной матрицы. Данный материал имеет коэффициент трения до 0,7 при достижении оптимальной температуры, что почти вдвое больше в сравнении с другими материалами.

Разработаны комбинированные конструкции тормозных дисков,

состоящих из алюминиевой ступичной части диска и рабочей части, выполненной из чугуна, позволяющей облегчать конструкцию и сохранять прочностные свойства диска в рабочей части.

Несмотря на очевидные преимущества новых материалов для тормозных дисков, их применение остаётся весьма ограниченным из-за сложности в изготовлении и высокой себестоимости.

Тормозные диски, используемые на большинстве современных легковых автомобилей, изготавливаются из одного из наиболее распространённых машиностроительных материалов - серого чугуна (чугуна с пластинчатой формой графита) с преимущественно перлитной металлической основой.

«Чугуном принято называть железоуглеродистые сплавы, содержащие углерод при нормальных условиях кристаллизации выше предела растворимости в аустините и эвтектику в структуре. В соответствии 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» [1, с. 5].

Для производства автомобильных дисков применяется чугун, получаемый методом литья с графитной эвтектикой, структура которого состоит из графитовых пластинок и металлической, преимущественно перлитной структурой. Данный сплав обладает хорошими литейными свойствами, легко обрабатывается резанием, имеет низкую себестоимость изготовления и может быть вторично переплавлен при утилизации отработанных тормозных дисков.

Главным преимуществом выбора данного материала для тормозных дисков является хороший отвод тепла в зоне трения тормозного диска и колодки, высокие фрикционные свойства и способность гасить колебания, возникающие при торможении.

1 Теоретический анализ проблемы исследования

Анализируя материал чугуновых дисков различных производителей, становится очевидным, что специалисты отечественного и западного автомобилестроения имеют разный подход в выборе марки серого чугуна для тормозных дисков.

Самым массовым отечественным автомобилем являются автомобили марки Lada. На АВТОВАЗе материалом для производства тормозных дисков, многие годы остаётся серый чугун марки Gh 190 (минимальный предел прочности при растяжении 260 МПа), являющийся по механическим свойствам близким к отечественной марке СЧ 25 по ГОСТ 1412-85 [2]. Производство данного сплава было освоено на АВТОВАЗе при запуске производства легковых автомобилей в СССР и с тех пор материал чугуна не претерпевал изменений. Материал вместе с технологией производства был передан Волжскому автомобильному заводу итальянской компанией FIAT, изготавливавшей из данного сплава основные детали из серого чугуна для собственных автомобилей.

Сплав не является специализированным для тормозных дисков и благодаря своей универсальности из него также изготавливаются многие детали автомобиля Lada, такие как Диск сцепления, Маховик, Групповая отливка крышек подшипника коленчатого вала и т.д. Единственным отличием для тормозного диска является строгое исключение феррита и цементита в микроструктуре чугуна в зоне трения тормозного диска, что благоприятно влияет на фрикционные свойства чугуна и предотвращает тормозной диск от преждевременного износа. Отечественные компании, изготавливающие тормозные диски для главного конвейера АВТОВАЗа и на вторичный рынок продажи автозапчастей, изготавливают тормозные диски, соответствующие требованиям к марке СЧ 25 или близкой к ней по собственным техническим условиям и условиям марки Gh 190, устанавливаемой на автомобили марки Lada. Таким образом, можно утверждать, что самым распространённым

массовым серым чугуном для тормозных дисков в Российской Федерации, является чугун марок СЧ 25, Gh190 (СЧ 26).

В автомобилях Европейских компаний присутствует иная философия в выборе марки сплава серого чугуна для тормозных дисков. Стандартные тормозные диски изготавливаются из чугуна марки GG 20 по классификации немецкого стандарта DIN (минимальный предел прочности при растяжении 200 МПа, твёрдость 140-250НВ).

На моделях «Audi», «BMW» и «Mercedes-Benz» применяются диски из чугуна GG-15 (минимальный предел прочности при растяжении 200 МПа, твёрдость 130–240 НВ) [3].

На автомобилях марок «Renault» применяется чугун марки FCL 150 Renault-Nissan.

Иностранные марки с индексом 20 (200) соответствуют марке СЧ 20 и с индексом 15 (150) СЧ 15 соответственно, однако, в отличие от отечественных марок имеют более жёсткие требования по содержанию углерода, кремния и размерам графитовых включений.

Для того чтобы разобраться какие из сплавов наиболее приемлемые для тормозных дисков легковых автомобилей, стоит обратиться к исследованиям, проведённым ранее.

«Одним из способов улучшения теплопередачи является повышение ее теплопроводности и коэффициент диффузии. Он описывает коэффициент диффузии тепла во время переходного процесса, а также является фундаментальным параметром конструкции тормоза. Коэффициент диффузии может быть использован для расчета теплопроводности, которая является неотъемлемым показателем того, насколько хорошо материал передает тепло.

Тормозные диски с улучшенной электропроводностью обеспечивают увеличение термической усталостной прочности “Джимбо и др. (1990)”, что позволяет увеличить их срок службы, то есть если серый оттенок способствует железу проводить тепло может быть увеличена без ущерба для образования охлаждения, другая цель, по которым можно улучшить характеристики дисков.

Основные факторы, влияющие на нагрев перенос в чугунах – это распределение, размер и морфология графитовой фазы, поскольку графитовые пластинки обладают гораздо более высокой теплопроводностью, чем металлическая основа. Чугун нагревается, электропроводность пропорциональна соотношению площади поверхности и соответствующего объема.

Таким образом, чугуны с шаровидным графитом являются худшими проводниками, чем вермикулярный графит, который, в свою очередь, хуже, чем материалы с пластинчатым.

В 1983 году “Okamoto et al. (1983)” сообщили, что у чугуна электропроводность пропорциональна форме графитовых чешуек (или графитовых конкреций). В 1990 году Джимбо и др. (1990)” описали преимущества использования чугуна с высокой теплопроводностью в тормозных системах дисков. Однако изменение характеристик трения, таких как значение коэффициента трения и количество частиц, образующихся при трении, определяется как функция микроструктуры серого чугуна, этот вопрос мало обсуждался в литературе. Мало внимания уделялось соответствию между относительным количеством фаз в сером чугунах и характеристиками трения. В 1999, “Necht et al. (1999)” наблюдали, что на теплопроводность серого чугуна влияет незначительное изменение химического состава и выявило линейную зависимость между коэффициентом диффузии и углеродным эквивалентом (или максимальной длиной хлопьев графита). Линейная зависимость была ожидаемой, потому что увеличение количества углерода или углеродного эквивалента является самым быстрым способом для улучшения сцепления серого чугуна с поверхностью. Увеличение на 25% диффузионной способности тормозных дисков с повышением на 0,40% по стандарту ЕС “Ямада и Курикума, (1998)”. “Necht et al. (1999)” также заметили, что в серых чугунах коэффициент диффузии снижается с повышением температуры до 500°C. Выше этой температуры наблюдается разница в коэффициенте диффузии сплавов с аналогичными значениями при 500°C снижается. Эти данные свидетельствуют о том, что высокие преимущества диффузионной способности и

теплопроводности могут быть достигнуты за счет управления процессом литья тормозных материалов диски из серого чугуна с более длинными графитовыми чешуйками. Скорость затвердевания влияет на морфологию графитовых чешуек, поэтому они отличаются конфигурация литейных форм, такая как количество стержней, тип формовочной смеси и технологический процесс или новый дизайн компонентов может изменить, пусть совсем немного, морфологию графитовых чешуек.

Зная, как морфология графита влияет на теплопередачу, можно проанализировать, как изменение технологического процесса при литье дисков может изменить их технические характеристики, потому что, как это было показано ранее, важным трехмерным свойством теплопередачи является графит соотношение поверхностной площади к объему. Также известно, что чем больше длина чешуек, тем выше диффузионная и проводимость “Хехт и др. (1999)” [4]. Таким образом установлено, что заэвтектический серый чугун с высоким углеродным эквивалентом является более предпочтительным материалом для изготовления тормозных дисков нежели доэвтектический серый чугун.

Целью работы является разработка технологического процесса изготовления отечественной марки высокоуглеродистого заэвтектического чугуна для производства тормозных дисков в условиях чугунолитейного производства АО «АВТОВАЗ».

Актуальность работы заключается в создании литейной технологии получения отливок из серого чугуна с повышенным углеродным эквивалентом, теплофизическими свойствами и износостойкостью.

В рамках проведения работы ставятся следующие задачи:

- изучить мировой опыт применения различных марок серого чугуна для производства тормозных дисков;

- разработать технологический процесс выплавки высокоуглеродистого серого чугуна в индукционных электропечах в чугунолитейном производстве АО «АВТОВАЗ»;

- разработать технологический процесс изготовления стержней по технологии ХТС (холодно-твердеющие смеси) в чугунолитейном производстве АО «АВТОВАЗ»;

- разработать технологию приготовления формовочной смеси для песчано-глинистых форм в чугунолитейном производстве АО «АВТОВАЗ»;

- провести лабораторные исследования химического состава, структуры и механических свойств высокоуглеродистого серого чугуна.

Предметом исследования являлись тормозные вентилируемые и не вентилируемые тормозные высокоуглеродистые чугунные диски.

Практическая значимость заключается в возможности производства и применения отечественного специализированного высокоуглеродистого чугуна для тормозных дисков, не уступающего по характеристикам зарубежным аналогам.

Научной новизной является разработка нового технологического процесса под задачи получения новой отечественной марки высокоуглеродистого серого чугуна для тормозных дисков, включающего в себя выбор исходных материалов для литейного производства и изучение условий для стабильного воспроизводимого результата в условиях реального производства.

2 Процесс выплавки металла

2.1 Выбор плавильного оборудования

Способы плавления, зависящие от особенностей строения и физико-химических свойств фазовых составляющих вещества перед плавлением и образующихся из них при плавлении структурных составляющих расплава. В результате плавления в веществах всех типов происходит позиционное разупорядочение. Во многих молекулярных кристаллах с несферическими структурными единицами, а также в кристаллах с многоатомными ионами

наблюдается ориентационное разупорядочение. Отдельные типы веществ характеризуются и другими механизмами плавления, которые можно описать с помощью параметров структуры и упорядоченности твёрдой и жидкой фаз [5].

Существует два мнения относительно чугуна в жидком состоянии [6]. Жидкий чугун рассматривается как истинный раствор и отдельное присутствие в жидком металле графита в твёрдой фазе, оказывающего влияние на графитизацию.

Традиционно чугун выплавляется в коксовых, газовых или коксогазовых вагранках, использующих для плавки топливо в виде литейного каменноугольного кокса, термоантрацита, мазута или природного газа. Основным недостатком данного процесса плавки чугуна с точки зрения получения высокоуглеродистого серого чугуна, является насыщения расплава жидкого металла вредной примесью в виде серы, повышающей красноломкость металла при содержании свыше 0,15% (что неприемлемо для тормозного диска из-за его нагрева в зоне работы с тормозной колодкой), а также неравномерное распределение углерода, что не удовлетворяет цели диссертации.

Условия плавки в электропечах совершенно отличаются в том отношении, что расплавленный металл, полученный первоначально, остаётся длительное время в контакте с твёрдыми компонентами шихты до тех пор, пока процесс плавления полностью не завершится и температура металла не будет поднята до требуемой степени перегрева. Кроме того, в некоторых типах электрических плавильных печей (низкочастотных тигельных) осуществляется массирование перемешивание ванн, а в некоторых других (электродуговых печах прямого нагрева) достигаются очень высокие температура местного перегрева. Все эти факторы в значительной мере способствуют растворению графита в расплаве и следовательно, обеспечению переохлаждения путём удаления зародышей графита из расплава.

Для корректировки состава металла в ванну зачастую добавляется твёрдый графит, но по мере его растворения он производит только временный модифицирующий эффект в зависимости от времени его введения в ванну.

Перегрев в электропечи, то есть доведение расплава до высокой температуры выпуска металла, ведёт к очень быстрому растворению твёрдого графита. Продолжительный перегрев приводит к коагуляции и ликвации под действием плавающих зародышей силикатов. Следовательно, при температурах перегрева процесс электроплавки имеет тенденцию к обеспечению очень высокой степени переохлаждения и как результат – высокой величины первоначального отбела в расплавленном металле.

В силу этих факторов и из-за длительного времени растворения целесообразнее осуществлять контроль за степенью переохлаждения в расплаве в процессе самой плавки, а также путём подбора и перемешивания компонентов шихты. Бесконтрольный перегрев и удлинение периода растворения углерода может исключить работу по подбору содержания графитизированного углерода в материалах шихты.

Выбор в качестве плавильного оборудования дуговой электросталеплавильной печи с основной или кислой футеровкой имеет ряд преимуществ таких как высокий коэффициент действия и достаточно хороший выход годного жидкого металла. В области работы электрической дуги создаются высокие температуры позволяющие использовать в качестве шихты тугоплавкие металлы, восстанавливать окислы и отделять металл от шлаков. К основному же недостатку данного типа печи, который делает непригодным выбор данного оборудования под задачу диссертации стоит отнести большой угар элементов, в том числе и углерода из-за неравномерности температуры металла и не позволяет рассматривать данный тип оборудования в качестве плавильного агрегата для металла тормозного диска. Высокий перегрев может вызвать интенсивное переохлаждение, так как особую важность приобретает правильный подбор материалов шихты с определённым содержанием графита и технологии плавки, исключаящей чрезмерный перегрев.

В индукционных печах факторы перегрева поддаются более селективному контролю, так что имеется возможность преодолевать отклонения в составе шихты таким образом, чтобы обеспечить более высокую

степень переохлаждения.

Чугун электродуговой плавки содержит азота больше, а индукционной меньше. В зависимости от формы состояния N оказывает на структуру и свойства различное влияние. Так, при образовании фаз внедрения он увеличивает прочность G_v и твёрдость HB и повышает стабильность карбидов; нитридные же его формы могут служить центрами графитизации, и их влияние на графитизацию прямо противоположно. Современная техника анализа позволяет выявлять как общее содержание азота в чугуне, так и отдельно количество азота, содержащегося в стойких нитридах [Гиршович, стр. 23].

Но, помимо этого, азот является причиной появления в отливках газовых раковин. Необходимо учитывать, что на поверхности тормозного диска и особенно в зоне трения не допустимы какие-либо дефекты литейного металлургического характера, так как они могут являться концентраторами напряжения и привести к образованию и росту трещин, поэтому выбором для реализации поставленной задачи служит индукционная плавильная печь с кислой футеровкой.

2.2 Материалы для выплавки чугуна. Разработка химического состава

В качестве шихтовых материалов при выплавке чугуна применяется синтетическая и полусинтетическая шихтозавалка.

Синтетический шихтой принято называть переплав стальных отходов с введением в жидкий металл карбюризаторов (науглераживателей), ферросплавов и легирующих материалов. Данный тип состава шихты является нежелательным, так как при таком процессе формирования исходных сырьевых материалов наблюдается неполное частичное усвоение углерода и неравномерное распределение графитовых пластинок в структуре сплава.

Для выплавки тормозных дисков из высокоуглеродистого серого чугуна будет применена полусинтетическая шихта, то есть состоящая из стальной и

чугунной составляющей с минимальным введением ферросплавов, карбюризаторов (науглераживателей), легирующих материалов.

Исходной стальной составляющей могут являться низколегированные конструкционные стали, стальной лом, состоящий из отходов кузнечного и прессового производства, трансформаторная сталь и обрезки и небольших кусочки стали от механической, чеканной или штамповочных операций. Таким образом обеспечивается стальная подложка основой которой является железо, в котором наиболее благоприятно будут растворяться остальные составляющие шихты. В таком металле изначально содержится небольшое количество вредных примесей в виде серы и фосфора, а также минимальное количество газов таких как водород и азот, препятствующих равномерной графитизации чугуна и образующих в готовых изделиях газовые раковины.

При охлаждении расплава, имеющего эвтектический состав 4,3 общего содержания углерода, затвердевание происходит в точках образования зародышей. Из каждой точки идёт постепенный рост эвтектических фаз аустенита и графита вплоть до формирования эвтектических ячеек. По мере роста таких ячеек примеси, постоянно присутствующие в расплавленном чугуне, выталкиваются на периферию и в конечном итоге концентрируются по границам сформировавшихся эвтектических ячеек. Это хорошо видно при травлении образцов металла при металлографическом исследовании микроструктуры чугуна в лаборатории. Примеси корродируют с различной скоростью, давая тем самым возможность визуального определения числа и размера эвтектических ячеек.

Форма зародыша не установлена экспериментально. К.П. Бунин [7] выдвинул предположение, что зародыш представляет собой пластинку, образованную из слоёв плоских макромолекул.

«В настоящее время строение чугунных расплавов ещё до конца не раскрыто, однако не вызывает сомнений его микрогетерогенность, сложность и изменчивость его структур в термовременных условиях чугунолитейного производства в зависимости от исходной структуры шихтовых компонентов

(прежде всего, углеродных и углеродсодержащих) и энергетических, физических, химических и физико-химических воздействий на расплав» [8].

При охлаждении доэвтектического сплава, как только температура достигнет ликвидуса, затвердевание начинается в виде выделения кристаллов аустенита. С увеличением содержания углерода в жидкой фазе продолжается рост кристаллов аустенита: при достижении содержания углерода в расплаве 4,3%, начинается выделение графита за счёт его роста из эвтектических ячеек, которые как раз и формируются на данной стадии.

При нормальных условиях графит не переохлаждается благодаря наличию центров кристаллизации. Выделение графита начинается сразу же как только температура достигнет соответствующей точки на линии эвтектики и рост пластинок графита продолжается по мере падения температуры.

При отсутствии центров кристаллизации или быстрого охлаждения расплава переохлаждение может начаться до того, как множество кристаллов графита самопроизвольно сформируются. И может произойти затвердевание эвтектики так, что происходит быстрая одновременная кристаллизация как графита, так и аустенита, что даёт определённую эвтектическую структуру. В результате всего этого образуется переохлаждённый или эвтектический графит, наличие которого можно легко распознать в структуре серого чугуна.

Удаление центров кристаллизации окажет более сильное влияние на усиление переохлаждения эвтектики, чем на усиление переохлаждения первичных кристаллов аустенита.

В любом доэвтектическом чугуне, когда расплав достигает нормальной линии эвтектики, при которой должен появиться графит, рост кристаллов аустенита продолжится без образования графита. В результате этого кристаллы первичного аустенита полнее формируются в более переохлаждённых расплавах. Время, при котором образуется графит относительно аустенита будет определять тип и размер графита, образующегося при затвердевании.

Расплавленный чугун может содержать некоторые неметаллические

включения, которые могут служить в качестве центров зарождения кристаллизации. К ним стоит отнести всевозможные соединения карбидов, углерод, оксидов, сульфидов и силикатов. Нерастворившийся углерод может поступить из исходного графита, содержащегося в материалах шихты. Это объясняется тем, что графит очень жаростоек и очень медленно растворяется в расплаве в зависимости от температуры расплава и его времени выдержки при заданной температуре. Оксиды также поступают вместе с материалами шихты, либо образуются в результате окисления железа, кремния или марганца во время процесса плавки. В расплаве могут образоваться и другие частицы, такие как оксид алюминия или оксид титана, которые имеют высокую температуру плавления. При кристаллизации металла данные соединения локально понижают температуру в области нахождения данного соединения и приводят к образованию междендритного графита.

Удаление центров кристаллизации из расплава окажет более сильное влияние на переохлаждение эвтектики, чем на усиление переохлаждения первоначальных кристаллов аустенита. Таким образом, в любом доэвтектическом чугуна, когда расплав достигает нормальной линии эвтектики, при которой должен появляться графит, рост кристаллов аустенита продолжается без образования графита. В результате этого кристаллы первичного аустенита полнее формируются в переохлаждённых расплавах. Время, за которое образуется графит относительно роста кристаллов аустенита, будет влиять на образование формы и типа графита.

Так как центры кристаллизации оказывают такое существенное влияние на выделение графита из расплава, стоит изучить вопрос образования типов зародышей, встречающихся в расплавленном чугуна.

Для решения данной задачи необходимо рассмотреть источники поступления графита.

Помимо стальной составляющей, основой шихты также служит переплав чугуна в виде чушек. Чушковые чугуны по степени очистки и химическому составу разделяются на литейные, передельные, рафинированные, модулярные

и т.д. Учитывая стоимость данных чугунов для решения поставленной в диссертации задачи необходимо сделать выбор между наиболее доступными для массового производства тормозных дисков - литейными и передельными чугунами.

Данные чугуны легкоплавки, выполнены в виде чушек и удобны для использования в шихте. На данных чугунах не допускаются остатки шлака и коррозии. Шлак при переплавке не будет расплавлен и таким образом снижается количество выхода годного чугуна. Коррозия же при дальнейшей переплавке приводит к образованию водорода в жидком металле, который, в свою очередь, может приводить к образованию газовых раковин.

Передельный чугун обычно используется для дальнейшей переделки в сталь и чаще всего используется в производстве чугунных фасонных отливок. Данный чугун получают методом рудовосстановительного процесса из руды. В чугунолитейных цехах используются марки чугунов ПЛ1, ПЛ2 по ГОСТ 805-95 [9]. Содержание углерода в таком чугуне от 4 до 4,5%.

Литейный чугун в отличие от передельного получают методом выплавки в доменной печи. В данном чугуне углерод находится в свободном виде и имеет в своём составе кремний до 3,75%, что соответственно положительно сказывается на процессе формирования пластинчатого графита требуемой формы и несёт в себе положительную наследственность для чугунного сплава. Соответственно при выборе чугуна для получения заэвтектического серого чугуна для тормозных дисков является более предпочтительным в использовании.

Помимо применения чушковых чугунов для выплавки расплава для производства фасонных отливок, углерод поступает в чугунный сплав также за счёт применения графитсодержащего материала (науглераживателя).

К науглераживателям (карбюризаторам) предъявляются требования по содержанию зольности и летучих, влаги, содержанию углерода и серы. Исходным сырьём для изготовления науглераживателя является:

- антрацит;

- термоантрацит;
- древесный уголь;
- каменноугольный кокс;
- сланцевый кокс;
- естественный графит;
- электродный бой;
- отходы графитосодержащих материалов электродных и нефтеперерабатывающих производств.

Исходя из результатов исследований, проведённых группой исследователей под руководством Шумихина В.С. [10] сделан вывод, что усвоение углерода в чугунном расплаве тем выше, чем ниже содержание зольности и выше содержание углерода в исходном материале.

Для определения наиболее приемлемого варианта применения науглераживателя необходимо провести опытные заливки с определением наиболее оптимального науглераживателя (карбюризатора).

Другим источником поступления углерода и кремния в чугунный расплав будет являться металлургический карбид кремния.

Исходными компонентами для производства карбида кремния являются кварцевый песок и нефтяной кокс, размещаемые в отдельном корпусе на участке складирования. Далее по технологии также на специальном участке, располагаемом в отдельном корпусе, компоненты проходят операцию смешивания в необходимом стехиометрическом соотношении с применением весовых дозаторов. На следующем этапе готовая смесь компонентов поступает в цех изготовления карбида кремния.

Карбид кремния производится в самоходных печах сопротивления, расположенных на железнодорожных платформах, (теплопередача осуществляется через графитовый слой, выложенный между стенками печи и смесью реагирующих компонентов) загрузочной массой 110 тонн путём разогрева до температуры 1600-2500°C и выдержкой до двух суток. В конечном продукте присутствуют все виды фазовых переходов карбида кремния, то есть

одновременно металлургический, кристаллический и зелёный шлифовальный карбид кремния без чётких переходов одного в другой. Другими словами, между получаемыми разновидностями карбида кремния отсутствуют границы диффузионных зон, по которым можно однозначно их идентифицировать. После окончания операции синтеза самоходная печь отгоняется на участок отстаивания для остывания, а затем перемещается в цех дробления и сортировки. Данная операция является наиболее ответственной, так как именно при ней обеспечивается качества продукта за счёт разделения полученного карбида кремния по видам. Оно производится визуально по цвету и величине кристаллов, что требует большого опыта и квалификации персонала. После первичного раскалывания единого спечённого брикета карбида кремния вручную горными кирками, его крупные куски проходят дробление сначала на щековых, а затем на валковых дробилках до нужной фракции. На следующих этапах дроблённый карбид кремния подвергается операциям отсева по необходимым потребителям фракциям, взвешивания и упаковки в мягкую тару (бумажные пакеты по 25 килограмм и тканевые биг-беги по одной тонне).

Таким образом, основные затраты на производство данного материала составляют затраты на электроэнергию и дешёвое сырьё в виде кварцитового песка. Конечная стоимость данного материала существенно ниже стоимости применяемых в чугунолитейном производстве графита измельчённого, ферросилиция или кремния кристаллического. На основании этого металлургический карбид кремния является более предпочтительным материалом при выплавке тормозных дисков из заэвтектического серого чугуна.

Карбид кремния применяется фракцией от 0 до 10 миллиметров. содержание влаги должно быть не более 10%. Содержание основного вещества от 84 до 88%.

При добавке карбида кремния в железоуглеродистый сплав расплавленной шихты на микроскопическом уровне по границе раздела карбид кремния/сплав наблюдаются в одном из скоплений обогащения (концентрации)

в форме затяжных насыщенных кремнием и перенасыщенных углеродом зон с образованием элементарного графита, который действует при затвердевании сплава как зародышеобразователи. Этот графит отличается по количеству, длительности возникновения и долговечности от образованного графита из графитосодержащего материала и ферросилиция.

Карбид кремния не плавится, а медленно растворяется. Из-за этого, в течение длительного промежутка времени, образуется элементарный графит. Одновременно, графит «консервируется», образуясь вокруг растворяющихся частиц карбида кремния зонами, насыщенными кремнием и углеродом. Карбид кремния содержит не только кремний, но и углерод, который увеличивает общее количество зародышей графита и длительное время сохраняет «живучесть» зародышей. Объясняется это тем, что углерод и кремний тесно связаны между собой в кристаллической решётке. Диффундирование карбида кремния в расплав происходит эндотермически, а не экзотермически как в случае использования ферросилиция. Из-за этого выравнивание диффузии между зонами и сплавом замедляется, графит стабилизируется дольше.

Металлургический карбид кремния содержит высокий процент SiO_2 , который, служит изоляционной прокладкой на части поверхности SiC и противодействует растворению SiC (точка плавления 1712°C). Длительность образования и существования графита из-за этого могут еще раз быть подвергнуты влиянию и продлены.

Доказательством замедляющего действия оболочек SiO_2 является наблюдение, что уже ограниченное количество щелочных добавок, достаточно, чтобы ускорить растворение металлургического Карбида кремния с образованием низкоплавкого щелочного силиката.

При низкой температуре SiO_2 устойчив в чугунном сплаве, контактирует со сплавом чугуна и растворяет Карбид кремния (SiC) только на тех поверхностях, которые свободны от изолирующей оболочки SiO_2 . При высокой температуре растворенный в сплаве углерод вступает в процесс растворения

оболочки SiO_2 SiC . Эта реакция тормозится высокой концентрацией Кремния в пограничной области растворяющихся частиц SiC .

Высокое содержание SiO_2 соответствует низкому содержанию SiC . Низкое содержание SiC показало лучший модифицирующий эффект.

Для применения карбида кремния в шихте произведен расчет шихтозавалки, где количество вводимого карбида кремния (SiC) определялось требуемым содержанием основных элементов, углерода (C) и кремния (Si), в получаемом сплаве. Для расчета шихты было взято следующее содержание элементов в карбиде кремния: $[\text{C}] = 27 \%$, $[\text{Si}] = 63 \%$ исходя из их молекулярной массы и общей чистоты SiC 92% (самой высокой марки карбида кремния, производимой в Российской Федерации). При этом в силу большего содержания кремния определяло методику расчета шихты по полному исключению применения ферросилиция из шихты, количество вводимого графита определялось по остаточному принципу.

Использование карбида кремния при выплавке расплава согласно разработанных шихтозавалок показало, что SiC является эффективным заменителем применяемых материалов для доводки расплава по содержанию химических элементов: ФС45-3 (ферросилиций) и графита измельченного. При этом карбид кремния позволяет полностью заменить ферросилиций и частично графит измельченный.

В связи с отказом поставщика от поставки SiC в мелкой фасовке (20-25 кг.) в процессе промышленного производства расплавов возникли сложности по загрузке весового карбида кремния и весового графита в загрузочную бадью в требуемом количестве при наличии только одного приемного бункера для сыпучих материалов на весовом комплексе «Филипс». Для решения данного вопроса в цехе 11/1 были изготовлены и запущены в работу 2-а приемных бункера для сыпучих материалов для блока дуговых печей и для блока индукционных печей, что решило проблему загрузки SiC . Загрузка карбида кремния производилась в начале плавления в первую загрузочную бадью на стальную составляющую шихты.

Марганец в виде ферромарганца и хром в виде феррохрома вводятся в жидкий металл для повышения твёрдости, предела прочности при растяжении и предела прочности на изгиб, повышения износостойкости за счёт создания более перлитной структуры, но при этом марганец и хром негативно действуют на формирование графита и могут придавать негативную форму графиту и изменять его длину. Данные элементы эффективно препятствуют образованию феррита в металлической основе за счёт увеличения скорости охлаждения металла при недостаточном содержании зародышей графита. Поэтому введение их в жидкий металл будет установлено опытным путём.

В сером чугуна марганец в соединении с серой образуют сульфиды марганца, которые, в свою очередь, повышают износостойкость тормозного диска и улучшают его обрабатываемость при лезвийной механической обработки.

«Увеличение содержания в чугуне Gh190 серы с 0,02% до 0,12% (чугун Gh190 (S0,12)) вызвало повышение уровня износостойкости при лабораторных триботехнических испытаниях до 2-х раз. Это обусловлено ростом в микроструктуре чугуна Gh190 мелкодисперсных включений сульфида марганца MnS, работающих как твёрдая смазка [11].

Дальнейшее повышение концентрации серы в чугуне Gh190 до 0,13% - (Gh190 (S0,12)) приводит к снижению контактной прочности и износостойкости материала по сравнению с Gh190 (S0,12), что обусловлено процессом укрупнения сульфидов марганца свыше размеров графитных включений, что установлено путём металлографического и микрорентгеноспектрального анализа. Повышение содержания серы свыше 0,14% вызывает некоторое снижение прочности» [12].

При содержании в чугуне фосфора свыше 0,20% приводит к повышению его жидкотекучести и некоторому увеличению σ_b , но резко снижает a_n (ударную вязкость) и повышает порог хладноломкости.

Медь и олово эффективно препятствуют образованию феррита, повышают прочность твёрдость и перлитную составляющую металлической основы.

2.3 Модифицирование

«Под модифицированием понимается процесс активного регулирования первичной кристаллизации или (и) изменения степени дисперсности кристаллизующихся фаз путём введения в расплав малых добавок отдельных элементов или их соединений» [13].

Механизм модифицирования заключается либо в образовании поверхностной плёнки на вынужденных зародышах (I род). Другой вариант заключается в образовании вынужденных зародышей (II род) [14].

Чугуны различаются по своей структуре в зависимости от состава, скорости охлаждения и степени переохлаждения или зарождения центров кристаллизации в расплаве. Поскольку все эти факторы являются сильнодействующими сами по себе, это значит, что учёт одного из них не может быть определяющим в получении чугуна заданной структуры. В практике производства чугуна для обеспечения физических свойств проводится подбор состава, величины отбела клиновой пробы и скорости охлаждения. Модифицирование позволяет стабилизировать процесс роста графита в чугуне из зародышей и получить однородную структуру чугуна в массивных и не массивных сечениях отливки.

Наиболее известные модификаторы для модифицирования серого чугуна изготавливаются на основе ферросилиция или силикокальция. Также в состав модификатора вводятся материалы, состоящие из щелочноземельных металлов, таких как кальций и барий или же редкоземельных элементов, таких как стронций. В практике применения модификаторов также встречается применение модификаторов, содержащих цирконий для нейтрализации азота в чугуне. Оценка эффективности модифицирования проводится заливкой

технологических клиновых проб.

Для модифицирования деталей тормозной системы наилучшие результаты были получены при модифицировании серого чугуна на основе 75% ферросилиция [15]. Наличие кальция и бария в составе модификатора также выполняют роль графитизирующих элементов, а также предотвращают дефекты усадочного характера.

2.4 Формовка и заливка тормозных дисков

Для обеспечения требуемых геометрических параметров тормозного диска необходима подготовка и уплотнение песчано-глинистой формы, повторяющей профиль диска. Для этого в производственных условиях АО «АВТОВАЗ» применяется формовочная линия Spomatic.

Все операции на линии за исключением обдува полуформы низа, простановки стержней, засыпки втулок опок после простановки полуформы верха и заливки форм выполняются в автоматическом режиме.

Формовочная линия работает следующим образом: при движении опока низа попадает на рольганг со щёткой, где производится зачистка ладов опок, которая затем поступает в формовочную машину. Изготовленная полуформа передаётся по рольгангу в кантователь и затем кантуется на 180°. Через рольганг форма поступает на простановщик, который устанавливает её на предварительно очищенные щётками от остатков формовочной смеси площадки конвейера. При дальнейшем движении формы на конвейере проводятся ручные операции: обдув нижней полуформы, простановка фильтров, простановка стержней, второй обдув полуформы. Готовая полуформа верха поступает в спариватель, который устанавливает верхнюю полуформу на нижнюю. Втулки опок засыпаются формовочной смесью (для исключения попадания брызг расплавленного чугуна на нормализованные элементы опок. Собранный форма движется в зону заливки. Далее проводится

заливка жидкого металла по формам при помощи специальной заливочной машины, управляемой оператором. По окончании заливки форма поступает в зону охлаждения. Пройдя зону охлаждения, форма подаётся в распаровщик, который снимает верхнюю полуформу и передаёт её в технологическую ветвь изготовления верхней полуформы. Нижняя полуформа остаётся на конвейере и по замкнутому циклу возвращается на новую формовку. Одновременно, установленная ранее установленная на стол полуформа подаётся на выбивное устройство. В выбивном устройстве производится выталкивание куста отливки и очистка стенок опоки от формовочной смеси плитой прошивателя.

Формовочная смесь должна обладать определёнными физическими свойствами для получения удовлетворительного отпечатка в песчано-глинистой смеси, а также не должна приводит к появлению таких литейных дефектов как «песчаная раковина», «нарост», «обжим». Для удовлетворения данных требований контролируют следующие показатели:

- прочность формовочной смеси при сжатии - свойство смеси сохранять свои свойства и не разрушаться при механическом воздействии;
- влажность формовочной смеси - количество воды, находящейся в смеси относительно её массы;
- газопроницаемость формовочной смеси – свойство смеси пропускать через воздух, газы;
- уплотняемость формовочной смеси – свойство смеси уменьшать объём после механического воздействия;
- потери при прокаливании формовочной смеси – объём газов, которые образовались в смеси при прокаливании за один час;
- общая глинистая составляющая формовочной смеси – микрочастицы до 0,02 мм от материалов входящих в состав формовочной смеси;
- модуль мелкости песка в формовочной смеси – размер частиц кварцевых песчинок;
- влажность отработанной формовочной смеси - количество воды, находящейся в смеси относительно её массы в оборотной формовочной смеси;

- прочность в зоне конденсации влаги – показывает эффективность активного бентонита в составе формовочной смеси;

- конденсация влаги формовочной смеси - количество активного бентонита в смеси после завершения процесса гомогенизации.

Заливка жидкого металла по формам производится специальными заливочными металлическими ковшами с набивной кислой футеровкой SiO_2 .

Литейный ковш представляет собой сосуд-кожух, выполненный из листового проката и футерованной изнутри набивной огнеупорной массой. После набивки ковша футеровка спекается по особым режимам. После спекания футеровки, в тот период пока заливочный ковш не используется, он помещается под газовую горелку для сохранения постоянно разогретого состояния. Перед началом разливки металла по формам, с зеркала жидкого металла снимают шлак, образовавшийся после модифицирования. Затем выполняют измерение жидкого металла термопарой погружения по ГОСТ Р 8.585-2001 [16]. Измерение температуры проводят посредством погружения сменного блока термопары в ковш, погружая полностью в металл стеклянную колбу термопары (сменного блока). Во избежание разбрызгивания металла от горения картонной гильзы запрещается полностью погружать в металл защитное покрытие сменного блока. На месте замера температуры необходимо иметь запас термопар (сменных блоков) для последующего использования. При отклонении температуры жидкого чугуна в ковше от требований, заливщик обязан провести замену термопары (сменного блока) и выполнить повторный замер. В случае повторного отклонения значений температуры от требований, ковш разливают по специально подготовленным изложницам, покрытым антипригарным покрытием для дальнейшего извлечения слитого металла.

После измерения температуры ковш помещается на рольганг и передвигается на специальное заливочное устройство, после чего жидкий металл разливается по формам. При заливке заливочная чаша держится максимально полной для создания давления, которое будет вытеснять газы из

жидкого металла. Не допускается прерывание струи при заливке и доливке металла по формам для исключения дефектов в виде спая и неслитины.

От качества формовочной смеси зависит точность геометрии и качество поверхности тормозного диска. Теплофизические свойства формовочной смеси влияют на скорость кристаллизации металла и скорость его охлаждения.

Подготовка формовочной смеси проводится в автоматическом режиме. При подготовке применяется песок формовочный кварцевый обогащенный Балашейского ГОК марки 1K₂O₂02, Песок формовочный кварцевый сухой Чапурниковского ГОК марки 3K₂O₃016 по ГОСТ 2138-91 [17]., Бентопорошок активированный Хакасского месторождения марки П₁Т₁А, Глинопорошок бентонитовый «Бентакарб-ВС».

Отбор проб формовочной смеси для проверки ее технологических характеристик проводится в лаборатории. Определяемые параметры и требования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики формовочной смеси

Наименование характеристики	Границы регулирования характеристик
Прочность при сжати, кгс/см ²	1,60±0,30
Влажность формовочной смеси, %	3,60±0,30
Газопроницаемость, ед.	140±50
Потери при прокаливании, %	4,00±1,00
Общая глинистая составляющая, %	13,0±4,0
Модуль мелкости (ММ), ед.	58,0-70,0
Температура отработанной смеси, °С	< 42
Влажность отработанной смеси, %	1,50±0,50
Прочность в зоне конденсации влаги, N/см ²	не менее 0,22

Формовочная смесь приготавливается в центробежных смесителях фирмы «SpeedMuller» модель 100В, затем разгружается в бункера формовочных машин. Дозирование материалов в смеситель устанавливается земледелом по таймеру:

- количество подачи концентрата 2,5 (+0,2) кг/с, где цена одного деления составляет 2 с;

- количество подачи бентонита 2,5 (+0,2) кг/с, где цена одного деления составляет 2 с;

- количество воды для каждого замеса (0,7-0,8) л/с.

Уровень (количество) отработанной (оборотной) формовочной смеси в накопительных бункерах регулируется автоматически датчиками уровня с выводом информации на щит управления и должен составлять:

- минимальный – 2,5 м от верхнего смотрового люка бункера, что соответствует 70 % заполнения бункера;

- максимальный – 1,5 м от верхнего смотрового люка бункера, что соответствует 100 % заполнения бункера.

С целью поддержания оптимального уровня оборотной смеси в бункерах в пределах (1,5-2,5) метра от смотрового люка бункера, автоматически подается свежий песок в смеситель с дозировкой (5,0+0,2) кг/с (10,0+0,2) кг/с, где цена одного деления составляет 2 с.

При составлении рецептов в мультиконтроллер SMC вводятся следующие параметры:

- продолжительность цикла смешивания (с);

- дозировка бентонита, концентрата (кг);

- количество воды на замес (литры);

- значение прочности сжатия (уплотняемости) и допуск (+ в процентах).

Отработанная формовочная смесь из бункера горячей отработанной смеси, расположенного под полигональным ситом, поступает в охладитель типа SKA 1950, где производится автоматическое охлаждение и увлажнение смеси в зависимости от ее температуры и остаточной влажности.

Охлажденная смесь через весовой дозатор SAM-W 14 подается в турбинный смеситель SAM 14/140. В весовом бункере производится постоянное определение веса формовочной смеси и сравнение его с заданным весом в мультиконтроллере SMC. При достижении заданного значения поступление новых порций смеси блокируется, и формовочная смесь с разрешения мультиконтроллера разгружается в смеситель.

Дозирование добавок до заданных значений на АФЛ GF производится в автоматическом режиме через весовой бункер SAM-P 14. После завершения дозирования добавок и получения разрешения от мультиконтроллера содержимое бункера SAM-P 14 также разгружается в турбинный смеситель SAM 14/140.

После передачи всех компонентов для приготовления формовочной смеси в турбинном смесителе SAM 14/140 производится смешивание (гомогенизация) в течение от 10 с до 15 с и извлекается порция формовочной смеси для изготовления образца и производится измерение уплотняемости смеси. По результатам сравнения фактического и заданного значений уплотняемости производится добавление воды. После повторного смешивания производится отбор формовочной смеси для определения прочности сжатия (уплотняемости) и измерение прочности формы. При получении значений в пределах, заложенных в мультиконтроллер смесь разгружается в бункер готовой формовочной смеси.

Если значение уплотняемости ниже заложенного в мультиконтроллер показателя, то производится дополнительная подача воды в смеситель и перемешивание до получения значений, заложенных в мультиконтроллере. Если значение уплотняемости выше заложенного в мультиконтроллере показателя, смесь бракуется и возвращается в цикл отработанной (оборотной) смеси.

В случае попадания бракованной формовочной смеси в бункера формовочных машин или при простое формовочной линии свыше 45 минут, формовочная смесь в работе не используется и сбрасывается из бункеров на

уборочные конвейера формовочных машин и в систему возврата отработанной (оборотной) смеси.

Для повышения прочности на сжатие увеличить, а для снижения прочности уменьшить количество ввода бентосодержащих материалов из расчета $(2,5 \pm 0,3)$ кг на каждые $0,1 \text{ кг/см}^2$. Для стабилизации прочности на сжатие необходимо постоянно поддерживать максимальный уровень отработанной смеси в бункерах.

Для увеличения влажности формовочной смеси необходимо увеличить, а для снижения влажности уменьшить количество вводимой воды на 2 с на каждые 0,1 % влажности.

При снижении газопроницаемости на формовочных линиях рекомендуется проверить эффективность работы вытяжных установок смесеприготовительной системы. Для увеличения газопроницаемости увеличить дозировку свежего формовочного песка более крупной фракции. Для уменьшения газопроницаемости закачать песок Чапурниковского карьера, но не более одного бункера в смену, или закачивать смешанный песок. При отсутствии Чапурниковского песка для уменьшения газопроницаемости производить отключение обеспыливания смесителей на срок не более одних суток.

При уменьшении потерь при прокаливании формовочной смеси на формовочных линиях увеличить, а при увеличении потерь при прокаливании уменьшить количество вводимого концентрата в бегуны или перейти на другое процентное соотношение концентрата. Для регулирования и корректировки ППП стоит использовать ручной ввод противопопригарной добавки в бегуны. Для стабилизации ППП требуется поддерживать максимальный уровень отработанной формовочной смеси в бункерах.

При повышении глинистой составляющей на формовочной линии увеличить, а при понижении уменьшить дозировку свежего формовочного песка, а также проверить эффективность работы систем аэрации отработанной смеси и формовочной смеси в смесителе. Для стабилизации глинистой

составляющей поддерживать максимальный уровень отработанной смеси в бункерах. При высокой глинистой рекомендуется произвести сброс до 1/3 горелой смеси с одновременным увеличением подачи свежего песка.

При повышении значения модуля мелкости формовочной смеси закачать формовочный песок с крупной фракцией, при снижении значения модуля мелкости закачать формовочный песок с мелкой фракцией.

При снижении значения прочности в зоне конденсации влаги на АФЛ увеличить подачу бентопорошка на замес до стабилизации показателя прочности в зоне конденсации влаги в границах регулирования.

2.5 Стержни из холодно твердеющих смесей

Стержни предназначены для формирования внутренних углублений, пазов, полостей, отверстий, получаемых методом литья для снижения механической обработки, а в некоторых случаях и полной её исключения.

Существуют множество процессов изготовления стержней: технология изготовления стержней по горячим стержневым ящикам (hot process), холодным ящикам (cold box process), плакированным смесям. Все эти методы применяется в массовом производстве при изготовлении стержней больших партий. В нашем случае, для получения пробных деталей тормозных дисков наиболее целесообразно выполнить изготовление стержней по технологии ХТС (холодно твердеющие смеси).

Для этого изготовлена стержневая оснастка и стержни произведены вручную.

Смеси изготавливаются в смешивающих бегунах периодического действия модели 114. Приготовление определенных марок смесей должно быть закреплено за определенными смешивающими бегунами. При переходе от одной марки смеси к другой необходимо очистить от остатков предыдущей партии смеси, с помощью скребка. Очистку производить при остановленных

бегунах. От остатков быстросохнувших смесей на основе жидкого стекла бегуны очищать отработанной смесью, изготавливая наполнительную смесь (НС). При работе с жидким стеклом необходимо надевать защитные очки, во время наполнения раздаточных емкостей и дозаторов необходимо соблюдать меры предосторожности и избегать попадания жидкого стекла в глаза и на открытые участки кожи. В случае попадания жидкого стекла в глаза, немедленно их промыть большим количеством воды.

В качестве материалов для изготовления стержней применяется песок формовочный $1K_2O_3O_3$ или $1K_2O_2O_2$, глина формовочная огнеупорная М1 по ГОСТ 3226-93 [18], цирконовый концентрат, стекло жидкое натриевое для литейного производства по ГОСТ 13078-2021 [19], крепитель, технические жидкости лигносульфонаты, вода хозяйственно-питьевая по ГОСТ Р 51232-98 [20] и опилки древесные.

Все материалы, кроме древесных опилок и воды, должны быть идентифицированы и подвергаться входному контролю на соответствие требованиям стандартов, технических условий, технических требований.

Для приготовления стержневых смесей на основе жидкого стекла, применяется жидкое стекло с рабочим силикатным модулем М от 2,3 до 2,6 и плотностью ρ от 1,47 до 1,52 г/см³.

Приемка и хранение жидкого стекла осуществляется в специальной емкости объемом 10 м³. Поступающие партии жидкого стекла принимаются в чистую емкость. При наличии остатка предыдущей партии допускается смешивание с вновь поступившей (в произвольных пропорциях) с последующим постоянным перемешиванием сжатым воздухом по всему объему и определением физико-механических параметров смешанных партий жидкого стекла.

Древесные опилки используются от поперечного распиливания древесины, просеянные через сито с ячейками сетки не более (8 × 8) мм.

Дозировка песка и глины производится с помощью порционных дозаторов типа ДПЛ-400, ДПЛ-120, установленных над бегунами. Дозаторы

песка должны быть настроены на (300 ± 10) кг, дозаторы глины на $(30 \pm 1,0)$ кг.

Дозировка жидкого стекла, лигносульфонатов технических, литейного крепителя «КО» и воды производится мерным дозатором, установленным на бегунах. Мерный дозатор вместимостью 60 литров имеет указатель уровня в виде градуировки с ценой деления $(10 \pm 0,3)$ литра.

Дозировка глины менее 30 кг на замес, цирконового концентрата (КЦЗ), древесных опилок производится вручную с помощью ведра (ГОСТ 20558).

Насыпной вес материалов указан в таблице 2 (заполнение ведра производится по уровню бортов).

Таблица 2 – Насыпной вес материалов

Наименование материала	Ведро объемом 10 литров, кг	Ведро объемом 12 литров, кг
Глина	$6,6 \pm 0,2$	$8,0 \pm 0,2$
Цирконовый концентрат	$25,0 \pm 2,0$	$30 \pm 2,5$
Древесные опилки	$1,2 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$

Смеси, которые проходят отверждения в оснастке без нагрева с введение жидкого катализатора обладают коротким временем живучести смеси. В качестве катализатора применяется как правило ортофосфорная и бензосульфокислота. Физика отверждения происходит за счёт введения кислоты и сдвигается рН системы в сторону кислой области, что ускоряет реакцию поликонденсационных процессов между отдельными конгломератами. Основная зависимость в смесях ХТС сформирована из скорости охлаждения и живучести смеси. На основании этого процесс её приготовления должен быть максимально коротким.

Обозначения стержневых смесей и рекомендации по применению приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Назначение и применение стержневых смесей

Обозначение смеси	Назначение стержневых смесей
1С	Стержневая, легко выбиваемая, для мелких, средних и крупных стержней, стального, чугунного и цветного литья
3С	Стержневая для средних и крупных стержней стального, чугунного и цветного литья при изготовлении отливок, склонных к горячим трещинам
ОБС-1	Быстросохнущая для средних и мелких стержней на стальное, чугунное и цветное литье и изготовление литниковых воронок
ОБС-2	Быстросохнущая для средних и мелких стержней на стальное, чугунное, цветное литье и изготовление литниковых воронок
№ 17	Стержневая для облицовки участков поверхности отливок, склонных к образованию пригара
№ 18	Стержневая для изготовления противопригарных стержней стального, чугунного и цветного литья

Состав и физико-механические свойства стержневых смесей должны соответствовать требованиям, приведенным в таблице 4 и 5.

Таблица 4 – Состав стержневых смесей

Обозначение смеси	Концентрат цирконовый КЦЗ		Глина формовочная М1		Лигносульфонаты ЛСТ			Крепитель КО		
	%	кг	%	кг	%	кг	л	%	кг	л
1С	-	-	5,0	60±2	3,2	38,4	30±2	2,3	27	30±1
3С	-	-	5,8	60-80	6,4	76,8	60±5	-	-	-
ОБС-1	-	-	2,5	10-50	-	-	-	-	-	-
ОБС-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ 17	100	500±3	1,8	21-23	-	-	-	-	-	-
№ 18	100	300±2	2,7	6,0-9,0	4,29	12,8	10±1	3,0	9,0	10±1

Продолжение таблицы 4

Обозначение смеси	Песок формовочный 1K ₂ O ₃ 03		Опилки древесные		Вода		Стекло жидкое		
	%	кг	%	кг	%	Кг	%	кг	л
1С	100	1200±10	-	-	0,16	2±0,5	-	-	-
3С	100	1200±10	5,0	60±2	5,0	60±2	-	-	-
ОБС-1	100	1200±10	-	-	-	-	9,4	112,5	75±1
ОБС-2	100	1200±10	-	-	-	-	9,4	112,5	75±1
№ 17	-	-	-	-	-	-	7,5	37,5	23- 37
№ 18	-	-	-	-	-	1±0,5	-	-	-

Таблица 5 – Физико-механические свойства смесей

Обозначение смеси	Влажность, %	Газопроницаемость, ед, не менее	Предел прочности во влажном состоянии, кг/см ²	Предел прочности в сухом состоянии, кг/см ² не менее	Осыпаемость, % не более
1С	3,3 - 3,9	50	0,11 - 0,16	8,0	0,3
3С	6,0 - 7,0	60	0,28 - 0,35	2,0	0,5
ОБС-1	3,0 - 3,5	100	0,05 - 0,10	2,0	0,3
ОБС-2	3,0 - 3,5	100	-	2,0	0,2
№ 17	3,0 - 3,5	-	0,20 - 0,30	-	-
№ 18	3,1 - 3,8	-	0,10 - 0,15	-	-

В жидкостекольных смесях ОБС-1 и ОБС-2 допускается влажность на рабочем месте (в бункере на стержневом участке) до 2,8 %.

В смеси 1С на основе крепителя КО предел прочности во влажном состоянии на рабочем месте допускается до 0,20 кг/см².

В летний период (как правило, с 15 мая до 15 сентября), когда температура воздуха в цехе превышает 25 °С влажность смесей при выпуске из бегунов, допускается увеличить на 0,2 процента.

В смеси 3С предел прочности во влажном состоянии на рабочем месте допускается до 0,40 кг/см², а влажность до 5,5 %.

В смеси 1С на основе крепителя КО влажность на рабочем месте допускается до 2,7 %.

Стержневые смеси приготавливаются в смешивающих бегунах периодического действия моделей 114. Для приготовления смесей 1С и №18 сначала загрузить в бегуны песок и глину, перемешать от 1 до 2 минут. Добавить крепитель КО, перемешать от 15 до 20 минут. Затем добавить лигносульфонаты и воду, вести перемешивание смеси 1С от 5 до 10 минут, смеси № 18 – от 5 до 8 минут. Для приготовления смеси 3С в бегуны загрузить песок, глину, древесные опилки и перемешать от 1 до 1,5 минут. Добавить лигносульфонаты, перемешать от 2 до 3 минут. Затем добавить воду и перемешивать еще от 6 до 8 минут. Для приготовления быстросохнущих жидкостекольных смесей ОБС-1, ОБС-2 и № 17 загрузить сухие компоненты, для ОБС-1 и № 17 – песок и глину, для ОБС-2 – песок и перемешать 1 минуту. Загрузить жидкое стекло и перемешивать еще в течение от 4 до 5 минут.

При приготовлении смесей 1С, №18 допускается дозировку лигносульфонатов технических и воды производить в одной емкости. Для стабилизации физико-механических свойств смеси 1С и 3С после их изготовления выгрузить в дисковые питатели - ДП-11 и ДП-12 соответственно.

В зависимости от вида крепителя, входящего в состав смеси, стержневые смеси сохраняют свои технологические свойства в течение определенного времени. Продолжительность хранения стержневых смесей не должна превышать сроков, приведенных в таблице 6.

Таблица 6 – Сроки хранения смесей

Наименование смеси	Срок хранения смеси, час, не более
1С	72
№ 17, №18	8 – 15
3С	36 – 48
ОБС-1, ОБС-2	8

Смеси, 1С и 3С хранившиеся более сроков указанных в таблице 6, перед употреблением проверить в лаборатории.

Для обеспечения высокого качества, необходимо производить постоянный контроль стержневых смесей перед выпуском из бегунов по влажности, газопроницаемости, пределам прочности во влажном и сухом состоянии, на осыпаемость.

Таблица 7 – Периодичность контроля стержневых смесей

Обозначение смеси	Частота испытания				
	Влажность	Газопроницаемость	сыр.	сух.	Осыпаемость
1С	Каждый замес	Каждый замес	Каждый замес	Каждый замес	Один замес в смену
№17, №18	Каждый замес	-	Каждый замес	-	-
ОБС-1	Каждый замес	Каждый замес	Каждый замес	Каждый замес	Один замес в смену
ОБС-2	Каждый замес	Каждый замес	-	Каждый замес	Один замес в смену
3С	Каждый замес	Каждый замес	Каждый замес	Каждый замес	Один замес в смену

Выводы по разделу

Данный раздел посвящён анализу способов производства серого чугуна, включающим в себя оборудование, материалы и основные приёмы разработки технологического процесса на примере реальных производственных условий чугунолитейного производства АО «АВТОВАЗ».

2.6. Металлографический анализ

2.6.1. Подготовка пробы

Для исследования микроструктуры отбирались образцы с каждого гнезда каждой отливки модельной оснастки. Вырезка образцов проводилась на специальном ленточнопильном станке с применением охлаждения для надёжного сохранения литой структуры материала чугуна.

Учитывая неравномерное охлаждение металла в форме из-за разницы в подводе питания литниково-питающей системы, вырезка образцов проводилась как со стороны питателя, так и с поворотом на 90° относительно питания отливки (рисунок 1).

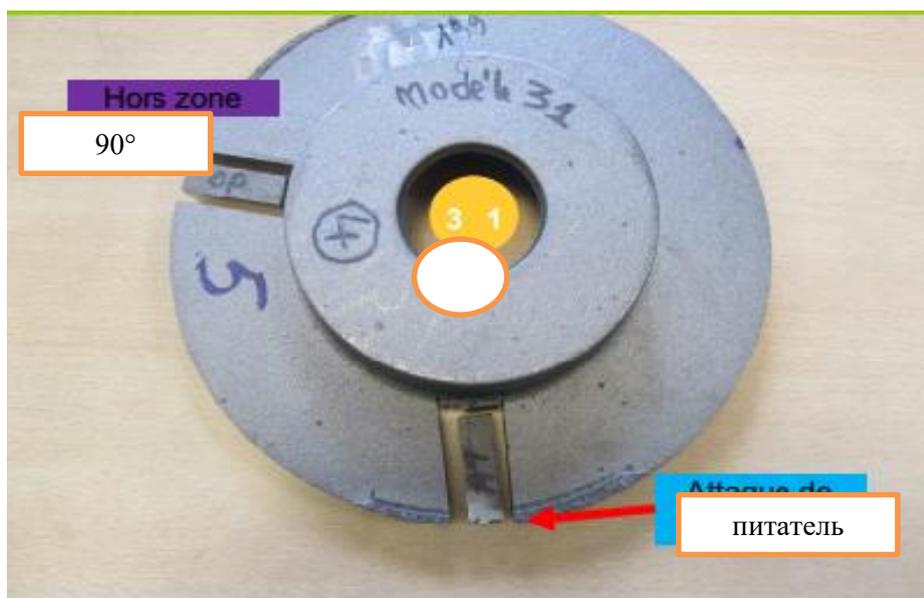


Рисунок 1 – Схема вырезки образцов металла для исследования

После вырезки образцов металл для исследования фрезеровался и шлифовался на грубой шкурке с зернистостью Р 36 до получения параллельных рисок на исследуемой части будущего шлифа. Монтаж вырезанных образцов проводился методом заливки в эпоксидную смолу на запрессовочном станке Laborol 30. Давление при запрессовке зависит от

диаметра шлифа и типа материала, в который запрессовывается образец. Температура запрессовки не должна превышать температуры, при которой могут происходить структурные изменения в исследуемом чугуна. Если к состоянию кромки предъявляются особые требования, то возможно нанесение на образцы твёрдых покрытий (например гальванических или ионно-плазменных), а затем запрессовка или заливку в пластмассу. Для предотвращения «завала» (потери плоскостности) кромки образца при шлифовке и полировке допускается также заливка или запрессовка образца, состыковав его интересующей кромкой с другим опорным образцом.

Для запрессовки необходим образец после грубой шлифовки размером не более 30мм. Предметный столик для запрессовки образца необходимо обработать специальной присадкой во избежание налипания пластмассы на образец. Образец для запрессовки помещается на предметный столик. Воронка для засыпки пластика помещается в приёмное отверстие и засыпается пластификатор. После чего отверстие герметично закрывается. Производится запуск машины и происходит нагрев/спекание пластика. Время спекания 7 минут. Показания передаются на световое табло. По окончании спекания шлиф извлекается из машины и идентифицируется.

Поверхность вырезанных и запрессованных образцов обрабатывают шлифованием на шлифовальной шкурке с различной зернистостью. Шлифовку производят либо вручную на неподвижной плоской плите, покрытой абразивной бумагой, либо на вращающемся диске с абразивным материалом определённой зернистости. На диск подаётся проточная вода, которая уносит частички срезанного металла и оторвавшиеся от бумаги частички абразива, а также действует как охлаждающая среда, предотвращая нагрев поверхности образца. В процессе шлифования необходимо проводить от двух до пяти переходов, причём каждая смена шлифовальной шкурки сопровождается изменением направления шлифования на 90° и тщательной промывкой поверхности шлифа.

Механическое полирование производится на станках с быстровращающимися дисками, обтянутыми мягкой материей (например – замша, фетр, шерстяное или бильярдное сукно) с применением полировочной смеси (суспензия на основе карбида кремния зелёного, суспензий окиси алюминия, окиси хрома или алмазной пасты), либо органическими растворителями, либо водой и органическими растворителями. На последней стадии полирования используются пасты с размером зерна 1 мкм.

Образец прижимается к диску с определённой силой: чем мягче полируемый материал, тем меньше должна быть сила прижима (длительность полирования при этом увеличивается). Слишком сильное нажатие может привести к вдавливанию частиц полирующего вещества в поверхность образца.

Образец в процессе полирования поворачивается вокруг собственной оси или вращается по траектории «восьмёрки», чтобы не создавалось предпочтительное направление полировки и не образовывались на шлифе так называемые «кометные хвосты».

Шлифы чугунов могут корродировать в контакте с водой из-за высокого содержания кремния в металле, поэтому на заключительном этапе полирования необходимо пользоваться сукном, пропитанным спиртом. На заключительном этапе необходимо проводить полировку без применения абразивных паст или суспензий.

Для шлифования и полирования залитых в пластик образцов тормозных дисков будет использоваться полировально-шлифовальный станок Laborol 50. Перед началом работы на вращающийся столик устанавливается шлифовальный диск с наждачной бумагой зернистостью Р 320. Отводится рукоятка блокировки в положение «открыть», подводится устройство Laboforce 50 и опускается вниз. Фиксируется пружинный корпус в нижнем положении с помощью рукоятки в положении «закрывать». Кольцо быстросъёмного механизма оттягивается и поднимается пружинный механизм. Размещается запрессованный образец в отверстие пластины и

фиксируется прижимным механизмом в нижнем положении. Выставляется усилие на образец 10 Н и открывается кран подачи воды. После этого при помощи пульта управления в автоматическом режиме начинает вращаться полировальный столик при неподвижном фиксаторе образцов. После шлифовки шлифовальный диск с наждачной бумагой заменяется на диск с натянутым шерстяным сукном и проводится полировка образцов с нанесением алмазной суспензии на сукно вручную.

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.

При травлении полированный образец погружают в холодный или подогретый реактив на определённое время, либо наносят реактив на его поверхность.

Для чёткого выявления структурных составляющих необходимо несколько раз «переполлировать» поверхность шлифа несколько раз с «подтравкой» соответствующим реактивом.

Конечная спиртовая обработка обезвоживает шлиф, промытый в дистиллированной или водопроводной воде для удаления травителя, и вместе с тем препятствует коррозии (водяным пятнам). Использование денатуратного спирта и керосина или бензина не рекомендуется, так как они не полностью испаряются и могут стать причиной выявления пятнистой структуры.

Производить сушку травленных образцов следует путём промокания фильтровальной бумаги или потоком горячего воздуха, особенно если необходимо сохранять механически легко повреждаемую плёнку осадка травления. Шлифы образцов из мягкого материала необходимо сушить струёй воздуха, а не бумагой, во избежание образования царапин. При избирательном травлении требуется сушка только воздухом.

Электролитическое травление осуществляется при воздействии реагентов с приложением электрического тока. Этот метод для травления чугунов не имеет преимуществ в сравнении с химическим травлением.

Для травления тормозных дисков из заэвтектического серого чугуна наиболее предпочтительным реагентом будет являться раствор 2,5% азотной кислоты, смешанной с этиловым спиртом.

Протравленные шлифы, особенно те, которые трудно обработать и травить, до проведения исследования хранятся в стеклянных эксикаторах. Для интенсивного просушивания шлифа в эксикатор помещается силикагель.

2.6.2. Анализ микроструктуры

Отечественной методикой для анализа структуры чугунов является ГОСТ 3443-87 [21].

Согласно требованиям ГОСТ 3443-87 оценка графита проводится на нетравленном шлифе, а металлической основы (матрицы) на травленном.

Анализ проводится методом сравнения изображений полученных структур с эталонами.

Такой подход для выполнения задач диссертации не может быть приоритетным, так как не исключает риски ошибок и неточности.

Согласно пункта 3.4 ГОСТ 3443-87: «для более точной оценки микроструктуры следует применять линейный, точечный или планиметрический методы количественной металлографии, а также специальные автоматические установки Квантимет, Эпиквант и др.» (ссылка на ГОСТ).

Для анализа будет применяться микроскоп Olympus X 52 с программным обеспечением Siams 800.

В состав микроскопа входят микроскопическая видеокамера для фиксации изображений, вычислительная станция для сканирования и анализа изображений и программное обеспечение.

Перед проведением анализа имеется возможность для ручного удаления царапин и частичек грязи, который могут попасть на анализируемый объект.

В анализаторе имеются модули, которые позволяют корректировать неравномерность освещения и распознавания царапин и не учитывать при анализе изображений. Анализируемое изображение сравнивается с эталонными изображениями стандартов и после анализа выдаётся отчёт, содержащий информацию о типе, размере, распределении, форме графита, а также информацию о процентном содержании фаз в металлической основе чугуна.

Что немаловажно, анализатор выполняет измерения длины графита и благодаря этому является наиболее предпочтительным инструментом для реализации задач диссертации. Та или иная форма графита окрашивается в разные цвета и таким образом создаётся объективная картина, показывающая зародыши графита, а также как происходило его формирование и рост в процессе кристаллизации.

В процессе отработки технологического процесса проведены исследования тормозных дисков и создан в анализаторе алгоритм, позволяющий выполнять оценку размеров и количество графита в том или ином поле зрения. Пример отчёта приведен в таблицах 8, 9 и на рисунках 2, 3.

Таблица 8 – Оценка графита

Критерий	Оценка
Проанализированная площадь, кв.мм	
Общее количество частиц графита	
Общее количество частиц графита на 1 кв.мм	
Общая доля частиц графита, %	
Средний размер, мкм	
Количество	
Количество на 1 кв.мм	
Доля, %	
Средний размер, мкм	
Количество	
Количество на 1 кв.мм	
Доля, %	

Продолжение таблицы 8

Критерий	Оценка
Средний размер, мкм	
Количество	
Количество на 1 кв.мм	
Доля, %	
Средний размер, мкм	
Количество	
Количество на 1 кв.мм	
Доля, %	
Средний размер, мкм	
V. GRAPHITE	
Количество	
Количество на 1 кв.мм	
Доля, %	
Средний размер, мкм	
Количество	
Количество на 1 кв.мм	
Доля, %	
Средний размер, мкм	

Таблица 9 – Распределение по размерным группам

Тип графита	Размерная группа							
	8	7	6	5	4	3	2	1
I. graphite	1.45 %	28.00 %	32.36 %	18.18 %	19.64 %	0.36 %	0.00 %	0.00 %
II. graphite	0.00 %	0.00 %	0.00 %	3.03 %	59.09 %	34.85 %	3.03 %	0.00 %
III. graphite	22.11 %	30.97 %	27.59 %	15.78 %	3.54 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

Продолжение таблицы 9

Тип графита	Размерная группа							
	8	7	6	5	4	3	2	1
IV. graphite	20.00 %	24.00 %	34.00 %	17.00 %	5.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
V. graphite	56.63 %	31.93 %	9.94 %	1.51 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
VI. graphite	84.97 %	15.03 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

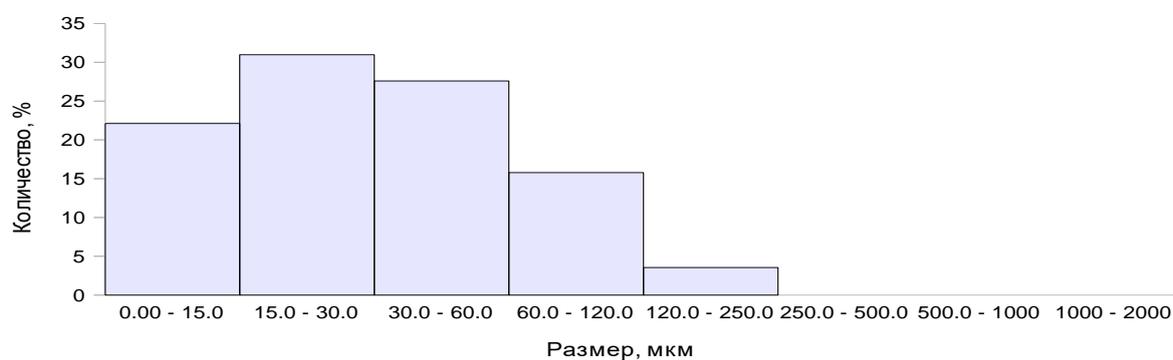


Рисунок 2 - Статистика. Весь графит. Распределение по размерам

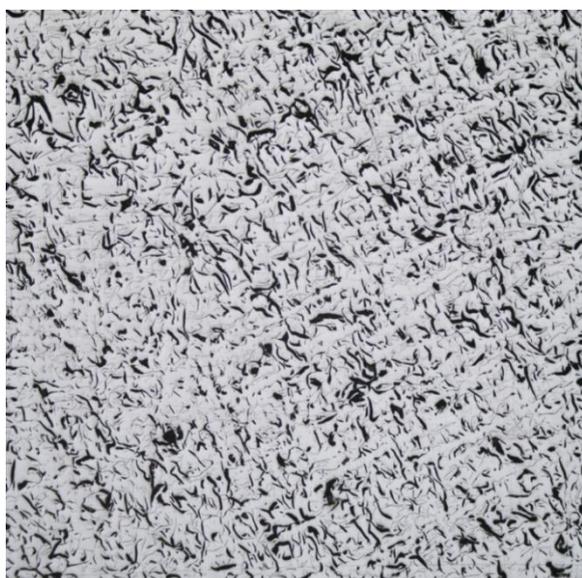


Рисунок 1. Изображение 2020-10-14_10-53-52.svs, исходное

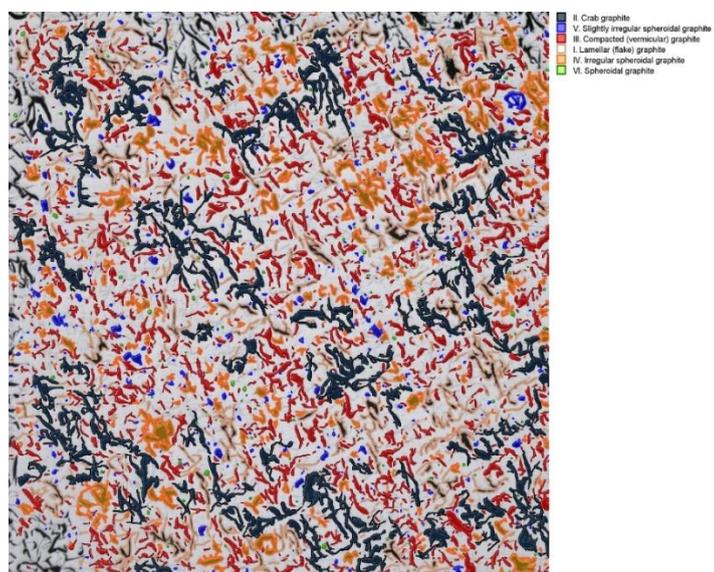


Рисунок 2. Изображение 2020-10-14_10-53-52.svs, с маркерами

Рисунок 3 – Распределение графита в металлической основе до сканирования (а); распределение графита в металлической основе после сканирования (б)

2.7. Спектральный анализ

2.7.1. Подготовка пробы

Заливку пробы металла для определения химического состава проводят ложкой, покрытой антипригарным покрытием в металлический кокиль для обеспечения однородной отбелённой структуры. Для обеспечения однородной отбелённой структуры пробы для спектрального анализа, температура кокиля должна быть равна температуре воздушной среды производственной зоны, для чего при необходимости кокиль следует обдуть сжатым воздухом. Проба в кокиле должна находиться до потемнения чугуна в литниковой воронке. Дальнейшее охлаждение пробы допускается проводить сжатым воздухом. Запрещается охлаждать пробу водой. При выявлении литейных дефектов на пробе, операцию по заливке пробы повторяют.

Подготовка проб начинается с заточки заусенцев по линии разъёма на пробе, извлечённой из кокиля на наждаке при помощи абразивного круга. Затем пробу устанавливают на магнитный столик и при помощи шпинделя с установленными на нём абразивными сегментами проводят грубую шлифовку на глубину 0,5-0,8мм. Шлифовку выполняют с применением СОЖ во избежание механической закалки пробы и прижогов. После грубой шлифовки монтируют пробу на специальное магнитное приспособление и проводят чистовую шлифовку на шкурке с зернистостью Р 36. Важным требованием является получение на пробе параллельных рисок без сеток. После окончания шлифовки с пробы удаляют грязь, идентифицируют и передают для проведения спектрального анализа на спектроанализаторе.

Определение содержания углерода и серы проводят непосредственно с отливки из рабочей части тормозного диска.

Отбор проб начинается с удаления литейной корки на фрезерном станке с рабочей части диска в зоне работы с тормозной колодкой на глубину не менее 1,5мм. Затем дисковой фрезой D 63...80 mm, толщина 1,8...2,2 нарезают

пластинки толщиной 0,5 мм.

Обороты не более 125 об/мин, подача ручная, не допускается нагрев образца. Стружка, полученная при вырезке пластинок, из анализа исключается. Не допускается попадание корковой части с перегородки и торцов образца.

Ножницами по металлу режут металлические полоски шириной 1,5...2 мм. Крошки менее 1 мм в анализ не берутся.

2.7.2. Определение химического состава чугуна спектральным методом

Отечественной методикой для определения содержания углерода и серы в чугуне является ГОСТ 22536.1-88 [22]. Согласно требованиям данного стандарта: метод основан на сжигании навески стали или чугуна в токе кислорода при 1250-1350°С последующем поглощением диоксида углерода раствором гидроксида калия (натрия). Массовую долю углерода определяют по разности первоначального объёма газа и объёма газа полученного после поглощения диоксида углерода раствором гидроксида калия (натрия).

Анализ содержания углерода и серы проводился на газовом анализаторе Лесо CS 400 методом сжигания подготовленной навески материала и выводом полученных результатов на световое табло прибора. При анализе применяется аргон газообразный и жидкий первого и высшего сорта, предварительно прошедший очистку в газовых магниевых печах. Перед началом работы проверяется исправность оборудования, давление кислорода в системе подачи на прибор по манометру, наличие стандартных образцов СО, наличие свидетельств о СО. Отобранную навеску металла сжигают в керамическом тигле.

Для контроля стабильности работы весов, входящих в комплект анализаторов, необходимо проводить промежуточные межкалибровочные поверки не реже, чем один раз в месяц. Если при анализе контрольного СО, измеренные значения массовых элементов отличаются более чем установленная погрешность, необходимо для учёта дрейфа градуировочных характеристик провести рекалибровку приборов калибровочными СО или

корректировать дрейф, введением поправок в результат измерений.

Спектральный анализ проводится на спектроанализаторе фирмы OBLF модель QSN 750II. Спектроанализатор предназначен для анализа сплавов на основе железа. Возможен анализ одновременно до 29 элементов. Для оценки правильной оценки результатов показаний прибора применяются стандартные образцы соответствующие требованиям ГОСТ 8.315-2019 [23]. Перед началом работы проводится очистка конденсаторной линзы батистом, смоченным в техническом спирте. Далее хлопчатобумажной тканью или фланелью протирается столик и штатив прибора. Анализ проводится в автоматическом режиме. Данные передаются в базу данных программного обеспечения прибора.

Измерения на пробах и образцах проводятся не менее двух раз (параллельные определения). Окончательный результат по анализируемым образцам выдаётся как среднее арифметическое значения из полученных двух измерений. В случаях, когда расхождения между параллельными измерениями превышают допустимые пределы, приведённые в ГОСТ 27611-88 [24], необходимо провести ещё два параллельных измерения и результат определить как среднее арифметическое из четырёх параллельных измерений, если расхождения между ними не превышают допустимые пределы для четырёх параллельных измерений, в противном случае, результат определяется как среднее арифметическое двух медианных значений.

Измерения проводятся на стандартных контрольных образцах перед началом работы и далее по мере необходимости, но не реже чем через один час, для контроля стабильности работы спектрального прибора.

Перед началом работы проверяют исправность оборудования, наличие аргона в системе подачи на прибор по манометру и температуру помещения, так как данное требование установлено требованиями паспорта прибора. Проверяют наличие и заточку стандартных образцов и наличие на них свидетельств.

Порядок проведения спектрального анализа по количественному

определению содержания кремния, марганца, фосфора, хрома, никеля, меди и олова в чугуна приведён в таблице

2.7.3. Анализ стержневой смеси

Пробы стержневой смеси отбирают в ведро с крышкой в количестве не менее 0,8 кг, ориентируясь на уровень, нанесенный на ведро. Каждое ведро для отбора проб промаркировано по названию стержневой смеси.

Проба стержневой смеси анализируется на газопроницаемость и разрушающее напряжение при сжатии образцов, отвержденных в течение 6 мин при температуре $(220\pm 5)^\circ\text{C}$ и охлажденных в течение 1, 5, 90 мин.

Для определения разрушающего напряжения при сжатии изготавливают 4 образца на набивочном аппарате (тип PRA). Перед проведением испытаний необходимо проверить точность показаний аппарата с помощью установочной меры.

На основе предварительных испытаний (взвешивание – набивка) подбирают на весах (тип ВЛКТ-500 или Adventure) массу смеси (160 ± 5) г, необходимую для изготовления образца высотой $(50,0\pm 0,3)$ мм и диаметром $(50,000\pm 0,025)$ мм. Пользуются такой массой смеси, при которой после ее уплотнения, красная метка допусков на штоке лежит внутри измерительной щели.

Взвешенную пробу с помощью волосяных кистей (марки КФ, КР диаметром от 16 до 20 мм) с лотка переносят в гильзу с подставкой. Для предупреждения прилипания смеси гильзу с подставкой и алюминиевую шайбу протирают ватой, смоченной специальной смазкой. Расход смазки на изготовление одного образца от 1,5 до 2,5 мл. Расход спирта на изготовление одного образца от 1,3 до 2,1 мл. Срок годности смазки 3 месяца со дня ее изготовления. В состав смазки входит спирт этиловый гидролизный по ГОСТ Р 55878-2013 [25], олеиновая кислота марки Б и В по ГОСТ 7580-91 [26], вода питьевая СанПиН 2.1.4.1074-01 [27].

Уплотнение смеси производится тремя ударами по одному и тремя ударами по другому основанию образца.

После уплотнения смеси в гильзу вставляется алюминиевая шайба. Затем гильзу с образцом и шайбой плавно насаживают на выталкиватель, выдавливая шайбу с образцом аккуратно, без толчков, ударов и вращения гильзы. Образцы вместе с шайбой без толчков и сотрясений осторожно устанавливают на металлическую подставку. На этой подставке образцы устанавливают на полку термошкафа, нагретого до температуры от 230 до 250 °С, чтобы после установки образцов в термошкаф, через (40±5) с в нем установилась температура (220±5) °С.

По истечении времени отверждения (6 мин±5 с) подставку с образцами извлекают из термошкафа. Два образца охлаждаются на шайбах на воздухе в течение от 1,5 - 2 ч, после чего испытывают их для определения разрушающего напряжения при сжатии образцов в холодном состоянии. На двух других образцах определяют разрушающее напряжение при сжатии образцов в горячем состоянии: через (1 мин±5 с) и (5 мин±5 с) выдержки образцов на воздухе с момента извлечения их из термошкафа. Образцы освобождают от алюминиевых шайб, не более чем за 15 с до испытания. Испытание проводится на аппарате для испытаний типа PFA или PFG с приставкой PND. Время отверждения образцов и время выдержки горячих образцов определяют по секундомеру.

При использовании приставки PND, указанные на внешней шкале манометра высокого давления цифры, умноженные на 20, дают предел прочности на сжатие в кгс/см².

2.7.4. Анализ формовочной смеси

Отбор проб производится в ведро с крышкой. Влажность формовочной смеси определяют по ГОСТ 23409.5-78 [28]. Пробу (20,00±0,01) г взвешивают на весах, равномерно распределяя ее на тарелке и вместе с тарелкой помещают в инфракрасный сушильный шкаф (тип РИТ).

Устанавливают таймер на время от 5 до 7 мин. После окончания сушки образец охлаждают, переносят с помощью кисти на тарелку весов, взвешивают и определяют влажность, % по расчетной таблице– для формовочной смеси и отработанной формовочной смеси, приведенных в таблицах 10, 11.

Таблица 10 – Расчетная таблица по определению влажности формовочной смеси

m, г	*Влажность,%	m, г	*Влажность,%	m, г	*Влажность,%
18,70	6,50	19,00	5,00	19,30	3,50
18,71	6,45	19,01	4,95	19,31	3,45
18,72	6,40	19,02	4,90	19,32	3,40
18,73	6,35	19,03	4,85	19,33	3,35
18,74	6,30	19,04	4,80	19,34	3,30
18,75	6,25	19,05	4,75	19,35	3,25
18,76	6,20	19,06	4,70	19,36	3,20
18,77	6,15	19,07	4,65	19,37	3,15
18,78	6,10	19,08	4,60	19,38	3,10
18,79	6,05	19,09	4,55	19,39	3,05
18,80	6,00	19,10	4,50	19,40	3,00
18,81	5,95	19,11	4,45	19,41	2,95
18,82	5,90	19,12	4,40	19,42	2,90
18,83	5,85	19,13	4,35	19,43	2,85
18,84	5,80	19,14	4,30	19,44	2,80
18,85	5,75	19,15	4,25	19,45	2,75
18,86	5,70	19,16	4,20	19,46	2,70
18,87	5,65	19,17	4,15	19,47	2,65
18,88	5,60	19,18	4,10	19,48	2,60
18,89	5,55	19,19	4,05	19,49	2,55
18,90	5,50	19,20	4,00	19,50	2,50
18,91	5,45	19,21	3,95	19,51	2,45
18,92	5,40	19,22	3,90	19,52	2,40
18,93	5,35	19,23	3,85	19,53	2,35
18,94	5,30	19,24	3,80	19,54	2,30
18,95	5,25	19,25	3,75	19,55	2,25
18,96	5,20	19,26	3,70	19,56	2,20

*Влажность = (20-m) x 5, %

Таблица 11 - Расчетная таблица по определению влажности отработанной смеси

m, г	*Влажность,%	m, г	*Влажность,%	m, г	*Влажность,%
19,40	3,00	19,61	1,95	19,82	0,90
19,41	2,95	19,62	1,90	19,83	0,85
19,42	2,90	19,63	1,85	19,84	0,80
19,43	2,85	19,64	1,80	19,85	0,75
19,44	2,80	19,65	1,75	19,86	0,70
19,45	2,75	19,66	1,70	19,87	0,65
19,46	2,70	19,67	1,65	19,88	0,60
19,47	2,65	19,68	1,60	19,89	0,55
19,48	2,60	19,69	1,55	19,90	0,50
19,49	2,55	19,70	1,50	19,91	0,45
19,50	2,50	19,71	1,45	19,92	0,40
19,51	2,45	19,72	1,40	19,93	0,35
19,52	2,40	19,73	1,35	19,94	0,30
19,53	2,35	19,74	1,30	19,95	0,25
19,54	2,30	19,75	1,25	19,96	0,20
19,55	2,25	19,76	1,20	19,97	0,15
19,56	2,20	19,77	1,15	19,98	0,10
19,57	2,15	19,78	1,10	19,99	0,05
19,58	2,10	19,79	1,05	20,00	0
19,59	2,05	19,80	1,00		
19,60	2,00	19,81	0,95		

*Влажность = $(20-m) \times 5, \%$

Отработанную пробу помещают в фарфоровый стаканчик, где она хранится до ее использования при определении потери при прокаливании и модуля мелкости, глинистой составляющей.

Изготовление стандартного образца для определения газопроницаемости, прочности при сжатии и прочности на разрыв в сырую.

На набивочном аппарате (тип PRA) изготавливают образцы высотой $(50,0 \pm 0,3)$ мм и диаметром $(50,000 \pm 0,025)$ мм.

Перед началом работы набивочный аппарат проверяют на точность показаний с помощью установочной меры.

На основе предварительных испытаний (взвешивание – набивка) определяют массу смеси (140 ± 6) г необходимую для изготовления данного

образца.

Пробу смеси взвешивают в лотке на весах, переносят в гильзу с подставкой при помощи волосяных кистей диаметром от 16 до 20 мм. Гильзу устанавливают на основание набивочного аппарата. С помощью левого рычага медленно опускают набивную штангу, приводя в контакт со смесью стержень с устройством давления. Посредством правого рычага производят три равномерных удара. Если высота образца не укладывается в указанные пределы ($50,0 \pm 0,3$) мм образец бракуют и вновь повторяют набивку. Пользуются таким количеством смеси, при котором после набивки красная метка допусков на штоке лежит внутри измерительной щели. Высоту образца контролируют с помощью линейки, нанесенной на штоке. Поворотом левого рычага поднимают набивочную штангу и снимают с аппарата гильзу с образцом.

Газопроницаемость формовочной смеси определяют по ГОСТ 23409.6 [29].

Подготавливают прибор (пермеаметр, тип PDU) для определения газопроницаемости:

- устанавливают кран в позицию «А» (всасывание) и медленно оттягивают колокол кверху, держа его за рукоятку, до появления точки, отмеченной на шкале цифрой 1000;

- переводят кран в позицию "Е" (выпуск воздуха) и осторожно отпускают рукоятку колокола.

- устанавливают гильзу с образцом на резиновую муфту пермеаметра и с силой прижимают ее таким образом, чтобы обеспечить герметичность;

- переводят кран в положение «В» (работа);

- по внешней шкале манометра считывают показания газопроницаемости и округляют до целого значения.

Прочность при сжатии определяют по ГОСТ 23409.7 [30].

Образец извлекают из гильзы с помощью выталкивателя и испытывают на приборе для определения прочности (тип LRU). Результаты испытаний,

снятые с прибора в МПа, переводят в кгс/см²: значение в МПа условно умножают на 10 и округляют до сотых.

Для определения потери при прокаливании используют пробы формовочной смеси после определения влажности.

Собранную смесь тщательно перемешивают. Две навески формовочной смеси массой по (25,00±0,01) г взвешивают в фарфоровом тигле, предварительно прокаленном при температуре (1000±50) °С до постоянной массы. Тигли с навеской помещают в обжиговую печь и прокаливают при температуре (900±50) °С в течение двух часов. После чего тигли с навеской охлаждают, образцы переносят с помощью кисти на тарелку весов и взвешивают. Рассчитывают среднее арифметическое значение и определяют П.П.П., % по расчетной таблице 12.

Таблица 12 – Расчетная таблица по определению потери при прокаливании формовочной смеси

m, г	*ППП, %	m, г	*ППП, %	m, г	*ППП, %
22,50	10,0	22,84	8,64	23,18	7,28
22,51	9,96	22,85	8,60	23,19	7,24
22,52	9,92	22,86	8,56	23,20	7,20
22,53	9,88	22,87	8,52	23,21	7,16
22,54	9,84	22,88	8,48	23,22	7,12
22,55	9,80	22,89	8,44	23,23	7,08
22,56	9,76	22,90	8,40	23,24	7,04
22,57	9,72	22,91	8,36	23,25	7,00
22,58	9,68	22,92	8,32	23,26	6,96
22,59	9,64	22,93	8,28	23,27	6,92
22,60	9,60	22,94	8,24	23,28	6,88
22,61	9,56	22,95	8,20	23,29	6,84
22,62	9,52	22,96	8,16	23,30	6,80
22,63	9,48	22,97	8,12	23,31	6,76
22,64	9,44	22,98	8,08	23,32	6,72
22,65	9,40	22,99	8,04	23,33	6,68
22,66	9,36	23,00	8,00	23,34	6,64
22,67	9,32	23,01	7,96	23,35	6,60
22,68	9,28	23,02	7,92	23,36	6,56
22,69	9,24	23,03	7,88	23,37	6,52

Продолжение таблицы 12

м, г	*ППП,%	м, г	*ППП,%	м, г	*ППП,%
22,70	9,20	23,04	7,84	23,38	6,48
22,71	9,16	23,05	7,80	23,39	6,44
22,72	9,12	23,06	7,76	23,40	6,40
22,73	9,08	23,07	7,72	23,41	6,36
22,74	9,04	23,08	7,68	23,42	6,32
22,75	9,00	23,09	7,64	23,43	6,28
22,76	8,96	23,10	7,60	23,44	6,24
22,77	8,92	23,11	7,56	23,45	6,20
22,78	8,88	23,12	7,52	23,46	6,16
22,79	8,84	23,13	7,48	23,47	6,12
22,80	8,80	23,14	7,44	23,48	6,08
22,81	8,76	23,15	7,40	23,49	6,04
22,82	8,72	23,16	7,36	23,50	6,00
22,83	8,68	23,17	7,32	23,51	5,96
23,52	5,92	23,85	4,60	24,20	3,20
23,53	5,88	23,86	4,56	24,21	3,16
23,54	5,84	23,87	4,52	24,22	3,12
23,55	5,80	23,88	4,48	24,23	3,08
23,56	5,76	23,89	4,44	24,24	3,04
23,57	5,72	23,90	4,40	24,25	3,00
23,58	5,68	23,91	4,36	24,26	2,96
23,59	5,64	23,92	4,32	24,27	2,92
23,60	5,60	23,93	4,28	24,28	2,88
23,61	5,56	23,94	4,24	24,29	2,84
23,62	5,54	23,95	4,20	24,30	2,80
23,63	5,48	23,96	4,16	24,31	2,76
23,64	5,44	23,97	4,12	24,32	2,72
23,65	5,40	23,98	4,08	24,33	2,68
23,66	5,36	23,99	4,04	24,34	2,64
23,67	5,32	24,00	4,00	24,35	2,60
23,68	5,28	24,01	3,96	24,36	2,56
23,69	5,24	24,02	3,62	24,37	2,52
23,70	5,20	24,03	3,88	24,38	2,48
23,71	5,16	24,04	3,84	24,39	2,44
23,72	5,12	24,05	3,80	24,40	2,40
23,73	5,08	24,06	3,76	24,41	2,36
23,74	5,04	24,07	3,72	24,42	2,32
23,75	5,00	24,08	3,68	24,43	2,28
23,76	4,96	24,09	3,64	24,44	2,24
23,77	4,92	24,10	3,60	24,45	2,20

Продолжение таблицы 12

m, г	*ППП, %	m, г	*ППП, %	m, г	*ППП, %
23,78	4,88	24,11	3,56	24,46	2,16
23,79	4,84	24,12	3,52	24,47	2,12
23,80	4,80	24,13	3,48	24,48	2,08
23,81	4,76	24,14	3,44	24,49	2,04
23,82	4,72	24,15	3,40	24,50	2,00
23,83	4,68	24,18	3,28	24,51	1,96
23,84	4,64	24,19	3,24	24,52	1,92

$$*ППП = (25-m) \times 4, \%$$

Для определения глинистой составляющей используют накопленные пробы формовочной смеси после определения в них влажности по п.6.3.3.

От высушенной смеси методом вычерпывания выделяют навеску массой (25,0±0,1) г и помещают в стеклянный стакан для кипячения вместимостью 1000 мл, доливают (237±1) мл воды, (12±1) мл 1 % раствора гидроокиси натрия и кипятят 5 мин, перемешивая стеклянной палочкой. Затем содержимому стакана дают отстояться при комнатной температуре в течение 10 мин.

Доливают в стакан воду до отметки 1000 мл, перемешивают стеклянной палочкой и дают отстояться в течение 10 мин.

По истечении этого времени воду сливают с помощью U-образной трубки. Снова доливают воду до отметки 1000 мл и дают отстояться 5 минут, повторяют отмучивание до тех пор, пока вода в стакане после 5 минутного отстаивания не станет прозрачной.

Стакан с осадком высушивают в сушильном шкафу при температуре от (105±5) °С до постоянного веса, в течение 2 часов. Высушенный осадок переносят на чашу весов и взвешивают.

Определяют глинистую составляющую по формуле 1:

$$X = (25 - m) / 25 \times 100 \%, \quad (1)$$

где m – масса навески смеси после удаления глинистой составляющей, г.

Определение модуля мелкости формовочной смеси производится после

определения в ней глинистой составляющей.

Определение предела прочности на разрыв в зоне конденсации влаги: изготавливают стандартный образец из формовочной смеси, при этом испытательное кольцо помещается в основание трамбовки, поверх него устанавливается трубчатый элемент. Осторожно извлекается готовый испытательный образец вместе с трубчатым элементом и испытательным кольцом.

Работу с прибором начинают по достижении температуры $(300 \pm 5) ^\circ\text{C}$. На приборе для испытаний на предел прочности на разрыв в зоне конденсации влаги, тип PNZ устанавливается стрелка манометра на «0». Трубчатый элемент переворачивается так, чтобы испытательное кольцо находилось в его верхней части, и с усилием устанавливается на направляющие салазки, прижав его к концевому упору штанги. При этом происходит срабатывание микропереключателя, и процедура испытания выполняется в автоматическом режиме.

Участок конденсации влаги на испытательном образце и, соответственно поверхность излома должны располагаться в точке разделения трубчатого элемента и кольца. Это зависит от времени разогрева образца, которое должно составлять от 28 до 30 с.

После разрушения испытательного образца трубчатый элемент и испытательное кольцо извлекаются из прибора и очищаются от остатков формовочной смеси.

Определение уплотняемости пробой формовочной смеси через приспособление для засыпания формовочной смеси заполняют гильзу, установленную на подставке. Излишки смеси срезают вровень с краем гильзы. Смесь в гильзе уплотняют тремя ударами набивочного аппарата (тип PRA), измеряют расстояние от поверхности уплотненного образца до края гильзы.

Уплотняемость (X) в процентах вычисляют по формуле 2:

$$X = (H - H_1) / H \times 100 \%, \quad (2)$$

где H - высота смеси до уплотнения, равная 100 мм;

H_1 - высота смеси после уплотнения, мм.

Определение содержания активного бентонита: готовят раствор метилена голубого: $(5,0 \pm 0,1)$ г метилена голубого растворить в 750 мл деминерализованной воды, нагретой до $60\text{ }^\circ\text{C}$, тщательно встряхивая смесь в колбе объемом 1000 мл. Охладить до $20\text{ }^\circ\text{C}$, после чего долить к полученному раствору деминерализованную воду до отметки 1000 мл и оставить на 24 часа. После этого процедить раствор через бумажный фильтр для удаления осадка. Необходимо хранить раствор в плотно закрытой посуде из темного (коричневого) стекла.

Оптимальное количество раствора – 5 л.

Определение количества раствора метилена голубого для 0,5 г опорного бентонита

Опорным является бентонит, применяемый в литейном производстве.

Просушить в сушильном шкафу $(10,0 \pm 0,1)$ г опорного бентонита при температуре $(110 \pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$ до стабилизации веса и отобрать $(0,50 \pm 0,01)$ г в стеклянный химический стакан емкостью 100 мл. Добавить (50 ± 1) мл деминерализованной воды и (5 ± 1) мл насыщенного раствора фосфата натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$). Сосуд с суспензией помещают на магнитную мешалку и осторожно доводят до кипения при непрерывном помешивании. После охлаждения до комнатной температуры, добавить (10 ± 1) мл 1н серной кислоты (H_2SO_4) и перемешивать стеклянной палочкой в течение 30 с. Поместить химический стакан под отверстие измерительной бюретки и добавить 15 мл раствора метилена голубого (если известна ориентировочная конечная точка, то начать можно с большего количества метилена голубого).

Перемешивать в течение 5 мин в холодном состоянии, затем палочкой поместить каплю взвеси на фильтровальную бумагу.

Жидкость расплывается на фильтровальной бумаге, а окрашенные в голубой цвет твердые частицы пристаю к бумаге в центре пятна. При постепенном добавлении раствора метилена голубого цвет пятна на бумаге

(ореол) меняется следующим образом:

Бесцветный - до тех пор, пока опорный бентонит не насыщен метиленом голубым;

Светло-голубой - когда опорный бентонит насыщен - конечная точка;

Синий - когда во взвеси существует избыток метилена голубого.

До достижения конечной точки раствор метилена голубого добавляется по 1 мл с последующим перемешиванием в течение 30 с и проверкой окраски пятна после каждой добавки. Последовательно расположить капли на фильтровальной бумаге, записав около них соответствующее количество миллилитров раствора метилена голубого. Когда конечная точка почти достигнута, взвесь дополнительно перемешивается 30 с, чтобы обеспечить полное поглощение метилена голубого бентонитом.

Поместить еще одну каплю взвеси на фильтровальную бумагу; если получен светло-голубой ореол, то конечная точка достигнута. Если он исчезает, добавить еще каплю раствора метилена голубого. Следует подождать высыхания фильтровальной бумаги, прежде чем давать оценку голубого ореола и потребления раствора метилена голубого.

Определение потребления раствора метилена голубого для 5,0 г формовочной смеси.

От пробы формовочной смеси методом вычерпывания выделяют навеску массой (500 ± 1) г и высушивают до постоянного веса при температуре $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ или используют пробу формовочной смеси после определения в ней влажности. Проводят анализ по той же схеме как для опорного бентонита.

Вычисление активного бентонита в формовочной смеси:

Потребление раствора метилена голубого на 0,5 г опорного бентонита соответствует содержанию 10 % связующего бентонита для 5,0 г испытательного образца (включающего 0,5 г бентонита и 4,5 г формовочной смеси). Это дает простую формулу 3 для определения активного бентонита (A) в формовочном песке, в %:

$$A = 10 \times Y/X, \quad (3)$$

где X - потребление раствора метилена голубого на 0,5 г опорного бентонита, мл;

$У$ - потребление раствора метилена голубого на 5,0 г формовочной смеси, мл.

2.7.5 Определение предела прочности на растяжении

Испытания по определению предела прочности при растяжении проводились по ГОСТ 1497-84 [31]. Перед началом проведения испытаний проводят осмотр образца на отсутствие визуальных литейных дефектов таких как раковины, несплошности металла, трещины, механические повреждения, инородные неметаллические включения.

Измеряют штангенциркулем ШЦ-I-125-0,1 начальный диаметр образца в наименьшем сечении в двух взаимно перпендикулярных направлениях. За результат измерения берут среднее арифметическое значений двух определений. Допускаемая разница между наибольшим и наименьшим определением должна быть не более 0,03 мм. Определяют начальную площадь поперечного сечения образца в его рабочей части. Вкручивают в нижний захват испытательной машины испытательный образец. Поднимают рычаг захвата испытательной машины совмещая центр головки испытательного образца с центром отверстия верхнего захвата испытательной машины. Затем вкручивают головку испытательного образца в верхний захват. Вращают рычаг испытательной машины против часов стрелки для подачи предварительной нагрузки. Вращая шкив, выставляют усилие разрывной машины на отметку три от нуля. Включают питание разрывной машины на растяжение. После разрушения испытательного образца выключают машину и выкручивают испытательный образец. Рассчитывают предел прочности при растяжении делением максимальной нагрузки на начальную площадь испытательного образца.

2.7.6 Измерение твёрдости

Измерение твёрдости чугуна проводилось методом измерения твёрдости по Бринеллю по ГОСТ 9012 [32]. В Европе измерения твёрдости по Бринеллю проводятся по стандартам:

- EN ISO 6506-1:2014: Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: test method [33]

- EN ISO 6506-2:2017: Metallic materials – Brinell hardness test – Part 2: verification and calibration of testing machine [34]

- EN ISO 6506-3:2014: Metallic materials – Brinell hardness test – Part 3: calibration of reference blocks [35]

- EN ISO 6506-4:2014: Metallic materials – Brinell hardness test – Part 4: Table of hardness values [36]

Метод основан на вдавливании стального шарика, вмонтированного в индентор в поверхность предварительно подготовленного металла. В работе используется стальной шарик диаметром 10 мм, время усилия 15 секунд.

Перед проведением измерения шлифуют поверхность образца при помощи водостойкой шкурки с зернистостью Р 180. Образец должен быть плоскопараллельным. Измерение твёрдости проводят на рабочей части тормозного диска в зоне его контакта с тормозной колодкой, при этом шарик должен располагаться перпендикулярно ребру жёсткости в зоне охлаждения диска.

Помещают испытательный образец на столик и проводят по три измерения перемещая образец от края диска к колоколу. При помощи отсчётного микроскопа МБП-2 проводят измерения диаметров отпечатков образцов в двух взаимно перпендикулярных измерениях.

Выводы по разделу

В разделе рассмотрены способы лабораторных исследований по определению микроструктуры чугуна, химического состава, анализа стержневой и формовочной смеси, определения предела прочности при растяжении и твёрдости.

3 Результаты работы

При выборе плавильного агрегата для реализации задачи, поставленной в работе, сделан выбор в пользу выплавки жидкого чугуна в индукционной плавильной печи по дуплекс-процессу с индукционной тигельной канальной печью закрытого барабанного типа для обеспечения миксирования жидкого металла. Применение комбинированного варианта печей (дуплекс), позволяет после перелива металла из плавильной печи в печь выдержки, выполнить ввод карбюризаторов для повышения содержания углерода в чугуне. Закрытая конструкция печи позволит исключить угар углерода, а выдержка металла перед его разливкой будет способствовать его усреднению и исключению ликвации металла.

При плавке металла в индукционной печи порция шихты загружается в огнеупорный тигель, а затем помещается в индуктор. Плавка осуществляется в среднечастотной печи с кислой футеровкой (SiO_2) производства фирмы АВВ (Германия), металлоёмкостью 16,7 тонн. В качестве установки электроснабжения применяется преобразователь 12000 кВт/номинальная частота 250 Гц. Переменный ток индуктора образует в садке вихретоковые потоки, повышающие температуру твёрдой шихты и приводящие к её расплавлению. Выбор кислой футеровки печи из кварцита (SiO_2) обусловлен возможностью устойчивости к шлакам и исключениям размывания футеровки. Применение данных материалов способствует работе футеровки с высокими температурами до 1800°C .

После выплавки чугуна жидкий металл по желобу, выложенному огнеупорным материалом, переливается двухконтурную канальную индукционную печь. Такой вариант процесса позволяет иметь готовый металл для его разливки по формам без риска угара углерода и кремния. Благодаря двухконтурной конструкции имеется возможность доводки и перемешивания материалов непосредственно в раздаточной печи. Любые открытые части металла необходимо присыпать зерновым графитом или электродным боем для

создания на поверхности зеркала жидкого чугуна углеродной плёнки, препятствующей угару металл и его окислению.

Для исследования проведены испытания двух науглераживателей (карбюризаторов) отечественного и иностранного производства. По действующей в чугунолитейном производстве АО «АВТОВАЗ» технологии для науглероживания применяется отечественный графит измельчённый, имеющий основную фракцию 0,09-2,5 мм. Недостатками применяемого графита измельчённого являются:

- нестабильность поставок по содержанию фракции менее 0,09 мм, часто с большим содержанием пылевидных частиц;
- значительные потери через неплотности загрузочной бадьи, вынос через вентиляцию и окисление в шлаке (особенно пылевидной фракции);
- низкая культура производства при работе и невозможность точного дозирования на всех этапах его использования вследствие поставки россыпью.

Корректирующее науглероживание (практически каждая вторая плавка) проводится как в плавильной печи (для чего требуется время на удаление шлака, подача графита вручную и его растворение, ожидание пробы – всего от 20 до 60 мин – в среднем около 30 мин), так и при выпуске плавки в печи ожидания. Представленный на испытания иностранный науглераживатель «Desulco 9012S» представляет собой обеспыленный гранулированный материал фракции 0,60-4,75 мм. По данным фирмы производителя «Superior Graphite» «Desulco 9012S» изготавливается из нефтяного кокса в процессе высокотемпературного рафинирования при температуре $> 2500^{\circ}\text{C}$, вследствие чего содержит минимум серы, золы, азота и др. элементов.

Химический состав «Desulco» (по паспорту продукта), в сравнении с нормами графита измельчённого, приведен в таблице 13. По данным поставщика, «Desulco», в сравнении с существующими науглераживателями снижает склонность к отбелу, на 10-20% увеличивает усвояемость по углероду.

Таблица 13 – Основные показатели науглероживателей

Показатель	«Desulco»	«Графит измельчённый» (для высшей категории)
Насыпная масса, кг/м ³ (г/см ³)	740 (0,74)	800 (0,8)
Массовая доля влаги, %	0,011 (макс. 0,03)	Не более 0,9
Массовая доля золы, %	0,16 (макс. 0,3)	Не более 0,9
Массовая доля серы, %	0,011 (макс. 0,03)	Не более 0,05
Массовая доля углерода, %	99,84 (мин. 99,7)	Не определяется
Массовая доля летучих веществ, %	0,20	Не определяется
Содержание азота, ppm*	23	Не определяется
Содержание водорода, ppm	3,3	Не определяется
Содержание кислорода, ppm	49	Не определяется

Производственные испытания «Desulco 9012S» проводились по действующей технологии выплавки чугуна в условиях плавильного цеха металлургического производства АО «АВТОВАЗ». Науглероживание «Desulco 9012S» велось как при выпуске расплава чугуна на жёлобе, а также на зеркале расплава чугуна в печах ожидания.

За период производственных испытаний при корректирующем науглероживании, в зависимости от способа науглероживания (на жёлоб или на зеркало расплава в печи) и массы металла в печи, «Desulco 9012S» усваивается в течение 40-70 мин, что для равноценных масс графита измельчённого составило бы несколько часов.

Значительным преимуществом «Desulco 9012S» является также его более раннее и полное усвоение, заканчивающееся уже при температуре 1450°C, что можно объяснить особенностями его кристаллической решётки и высокой пористостью гранул. В то же время усвоение графита измельчённого заканчивается при 1500-1550°C.

Науглероживатель «Desulco 9012S» в сравнении с графитом

измельчённым имеет лучшие технологические характеристики, что при переносе корректирующего науглероживания им из плавильной печи в печь ожидания, резко снижает его расход и продолжительность плавок на 10-30 мин, а также кроме получения дополнительного металла и повышения производительности плавильной печи, способствует снижению затрат на 1-3% на огнеупоры, электроды и электроэнергию.

Корректирующее науглероживание вести с применением быстроусваиваемого «Desulco 9012 S» массой 150-250 кг на плавку в печах ожидания и данный материал является более приемлемым при производстве тормозных дисков с высоким углеродным эквивалентом.

В результате сравнительных испытаний установлено, что для при применении полусинтетической шихтозавалки наиболее лучшие и устойчивые результаты сохранения зародышей графита получены при сочетании использования в качестве источников поступления графита материалы на основе литейного чугуна марок Л 4, карбида кремния металлургического. Для доводки содержания углерода наилучшие результаты получены при использовании науглераживателя в виде графита измельчённого и ферросилиция с содержанием кремния 45%.

Не допускается попадание в шихтозавалку посторонних, влажных, радиационных материалов, не предусмотренных технологическим процессом. Чугун в виде возврата собственного производства должен быть очищен от остатков формовочной смеси в галтовочном барабане.

Для выбранной индукционной печи шихта загружается в следующем порядке: кузнечные стальные отходы, карбид кремния, стальная высечка, чугун литейный, стальные пакеты и чугун в виде возврата собственного производства (элементы литниково-питающей системы с предыдущих отливок и отливки отошедшие по причине наличия литейных дефектов).

Ферросплавы, графит измельченный, в бадью загружают сверху через объёмный дозатор. Загрузку измельченного графита в индукционные печи производят после первой или второй завалки. Медь и олову вводят в жидкий

металл в ковше непосредственно перед заливкой.

Бадья с шихтой устанавливается на передвижную тележку в зоне работы весовых электронных устройств ВТП-15 и весов бункерных тензометрических ВБТ-10. Затем производится ее заполнение шихтовыми материалами с помощью мостового крана с электромагнитной шайбой. Масса загружаемой шихты указывается на световом табло. Результаты взвешивания автоматически вводятся в автоматизированное сетевое управление плавильной печи.

Заполненную шихтой бадью перемещают в плавильное отделение по рельсовому пути. При помощи мостового крана плавильного участка шихту загружают в плавильные печи. При этом величина болота (жидкого металла) должна быть не менее 30% от предыдущих плавов.

После первой завалки включают плавильную печь и ведут плавку согласно режимам автоматизированно. При достижении температуры металла от 1450 °С до 1480 °С заливают пробу жидкого металла для определения химического состава чугуна в лаборатории, после чего удаляют шлак из печи при помощи графитовой шлакосчищалки. Удаляемый шлак должен быть жидкоподвижным, после охлаждения в воде рассыпаться. При необходимости, новый шлак наводят негашеной известью, плавикошпатовым концентратом ФК65 и шамотным боем в соотношении 1,2 : 1,0 : 1,0.

Нагревают расплав чугуна до температуры от 1520 °С до 1540 °С и переливают его в печи ожидания по хорошо просушенному желобу, рабочая часть которого выложена огнеупорным кирпичом и обмазанная магнезитом.

После перелива металла в печь ожидания удаляют с зеркала расплава чугуна шлак, измеряют температуру жидкого расплава термопарой погружения. Выдачу расплава чугуна на линию заливки осуществляют не раньше, чем через 20 минут после перелива или через 30 минут после корректировки химического состава.

После перелива расплава чугуна в печи модели ожидания и снятия шлака с поверхности расплава в наполнительные воронки печей присыпают расплав графитом в зернах. Графит выполняет функцию буфера между ванной жидкого

металла и атмосферой. Зерновой графит не плавится, а создаёт на поверхности чугуна углеродную плёнку. Таким образом плёнка препятствует окислению жидкого металла, снижает скорость падения температуры жидкого металла и сохраняет длительное время зародыши графита тем самым повышая склонность жидкого металла к модифицированию.

При модифицировании были применены следующие схемы модифицирования:

- модифицирование вводом модификатора фракции от 1 до 6 мм в заливочный ковш при 1/3 его наполнения;

- модифицирование вводом модификатора фракции от 1 до 6 мм в заливочный ковш при 1/3 его наполнения и вторичное модифицирование вводом в заливочную чашу кускового ферросилиция с содержанием кремния 75%;

- модифицирование вводом модификатора фракции от 1 до 6 мм в заливочный ковш при 1/3 его наполнения и вторичное модифицирование при помощи ввода модификатора на струю жидкого металла фракцией от 0,2 до 0,7мм.

При этом температура металла в ковше не оказывала существенного влияния на форму графита. Эксперименты проводились при температуре металла в ковше от 1340 до 1460°C.

Полученная микроструктура типична для всех исследованных образцов и характеризуется равномерно распределённым графитом пластинчатой формы во всех исследованных отливках. Длина графита составила от 0,12 до 0,25мм, что является идентичным результатом в сравнении с французской маркой FCL 150. Количество завихрённого графита не превышало 10% и междендритного графита не более 5%. Фотографии полученной микроструктуры приведена на рисунках 4-11.



Рисунок 4 – Размер и распределение графита на тормозном диске 1.
Зона вырезки образца со стороны питателя

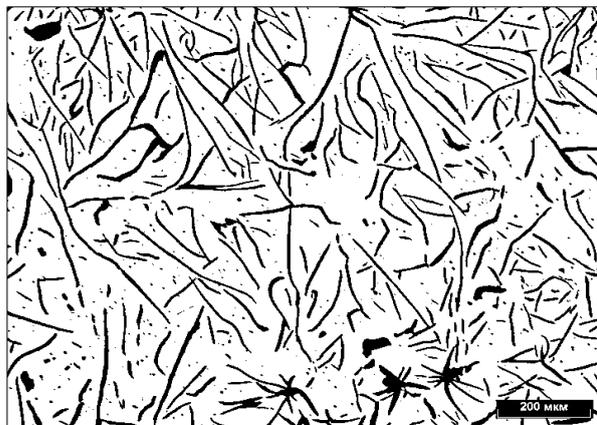


Рисунок 5 – Размер и распределение графита на тормозном диске 1.
Зона вырезки образца 90° относительно питателя

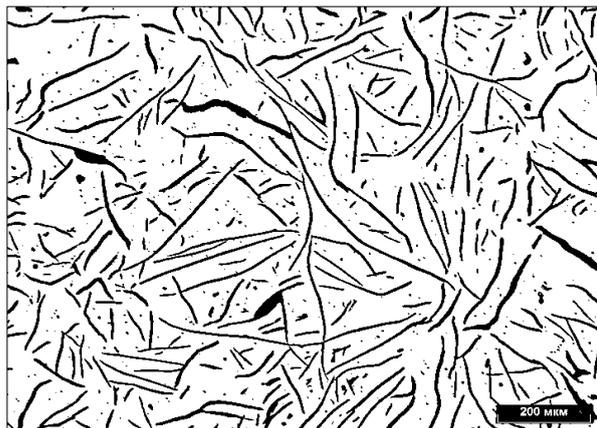


Рисунок 6 – Размер и распределение графита на тормозном диске 2.
Зона вырезки образца со стороны питателя

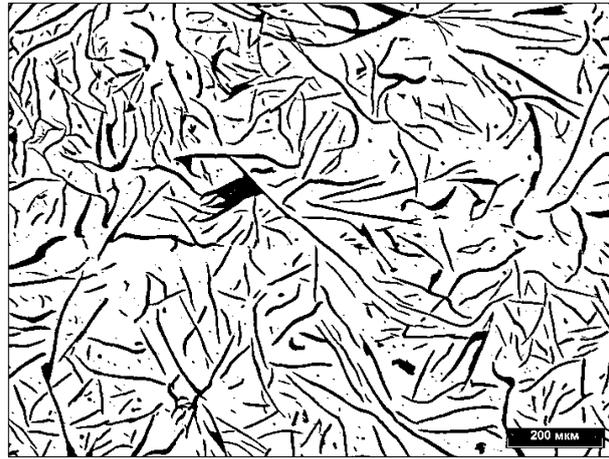


Рисунок 7 – Размер и распределение графита на тормозном диске 3.
Зона вырезки образца 90° относительно питателя



Рисунок 8 – Размер и распределение графита на тормозном диске 3.
Зона вырезки образца со стороны питателя



Рисунок 9 – Размер и распределение графита на тормозном диске 3.
Зона вырезки образца 90° относительно питателя

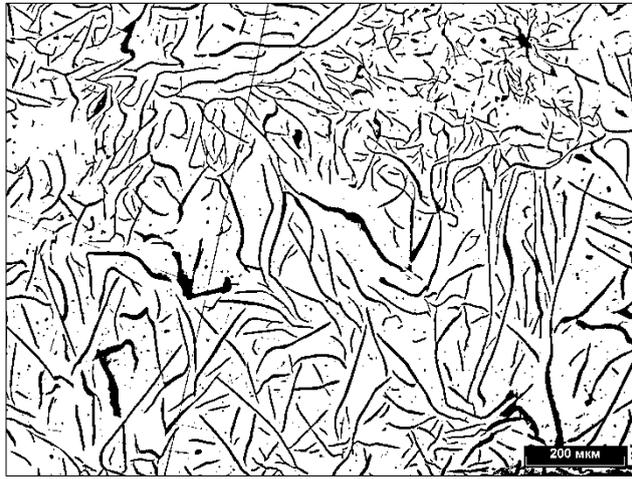


Рисунок 10 – Размер и распределение графита на тормозном диске 4.
Зона вырезки образца со стороны питателя



Рисунок 11 – Размер и распределение графита на тормозном диске 4.
Зона вырезки образца 90° относительно питателя

Разработка химического состава с подбором соотношения по легирующим элементам позволила приблизиться к прочностным свойствам аналогичным свойствам французской марки FCL 150. Полученные результаты максимальной прочности на разрыв приведены в таблице 14, твёрдости в таблице 15, химического состава в таблице 16.

Таблица 14 – Максимальная прочность на разрыв R_m , (МПа)

№ отливки	Образец	Измеренные значения	Среднее значение
1	1	159	166
	2	168	
	3	171	
2	1	164	167
	2	173	
	3	165	
3	1	160	165
	2	170	
	3	164	
4	1	161	168
	2	174	
	3	168	
Требования стандарта к марке FCL 150		> 150	

Таблица 15 – Твёрдость

№ отливки	Твердость HB 10/3000/10			
	Измеренные значения			Среднее значение
	1	2	3	
1	178	182	180	180
2	181	185	184	183
3	178	173	173	175
4	177	185	181	181
Требования стандарта к марке FCL 150				170-217

Таблица 16 – Химический состав

Из отливки	C	S	P	Si*	Mn	Cu	Sn	Mo
Требования	3,65- 3,85	< 0,15	< 0,10	2,10- 2,20	0,5- 0,9	< 0,60	< 0,1	< 0,1
Полученные значения	3,79	0,07	0,02	2,15	0,83	0,60	0,01	0,03
	Ni	Cr	Ceq					
Требования	< 0,20	< 0,35	4,10- 4,30					
Полученные значения / Obtained values	0,10	0,32	4,29					

Выводы по разделу

Проведённые работы экспериментальные заливки в реальных условиях чугунолитейного производства АО «АВТОВАЗ» позволили получить структурные и физико-механические свойства аналогичные французской марки FCL 150.

Заключение

- разработана технология выплавки чугуна в индукционных печах из полусинтетической шихтозавалки;
- показано преимущество использования материала – карбид кремния;
- показано преимущество использования материала - графит измельчённый;
- показано преимущество использования материала - литейный чушковый чугун для получения высокого углеродного эквивалента;
- разработан технологический процесс получения стержней по технологии ХТС (холодно-твердеющие смеси) в чугунолитейном производстве АО «АВТОВАЗ»;
- разработана технология получения формовочной смеси для песчано-глинистых форм в чугунолитейном производстве АО «АВТОВАЗ» на основе концентрата из бентонита и противопригарной угольной добавки;
- проведены лабораторные исследования химического состава высокоуглеродистого серого чугуна;
- проведены лабораторные исследования микроструктуры высокоуглеродистого серого чугуна;
- проведены лабораторные исследования по определению твёрдости высокоуглеродистого серого чугуна;
- проведены лабораторные исследования по определению предела прочности при растяжении высокоуглеродистого серого чугуна;
- проведены лабораторные исследования стержневой смеси для изготовления стержней методом ХТС;
- проведены лабораторные исследования формовочной смеси для заливки отливок тормозных дисков из высокоуглеродистого серого чугуна.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Ланда А.Ф. Основы получения чугуна повышенного качества. Состав, структура, термообработка // Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, Москва, 1960, - 240 с.
2. ГОСТ 1412-85 Чугун. Марки. Технические условия. Методы анализа // ИПК Издательство стандартов, Москва, 2004, 5 с. 3.
3. Журнал «Движок». Режим доступа: <https://dvizhok.su/parts/pochemu-solyarisu-ne-nuzhnyi-vyisokouglerodistyie-tormoznyie-diski>. (Дата обращения: 10.06.2024).
4. O. Maluf, M. Angeloni, M.T. Milan, D. Spinelli, W.W. Bose Filho DEVELOPMENT OF MATERIALS FOR AUTOMOTIVE DISC BRAKES // Article in Minerva. January 2004. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/237710289_Development_of_materials_for_automotive_disc_brakes]. (Дата обращения: 10.06.2024).
5. Уббелоде, А.Р. Расплавленное состояние вещества: [пер. с англ.]. – М.: Металлургия, 1982. – 376 с.
6. Кузнецов, Б.Л. Введение в литейное металловедение чугуна / Б.Л. Кузнецов. – М.: Машиностроение, 1995. – 168 с.
7. Бунин, К.П. Строение чугуна / К.П. Бунин, Ю.Н. Таран. – М.: Металлургия, 1972. – 160 с.
8. Панов А.Г., Мухаметзянова Г.Ф. О строении чугуновых расплавов // М: Металлургия Машиностроения. 2014, №5, С. 6-12.
9. ГОСТ 805-95 Чугун переклассифицированный. Технические условия // Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Минск, 2001, 5с.
10. Шумихин В.С. Синтетический чугун/Шумихин В.С., Лузан П.П., Желнис М.В. – Киев: Изд-во «Наукова думка». – 1971 - 157 с.
11. Д. А. Болдырев, А. А. Николаев, М. В. Харченко, С. П. Нефедьев Влияние микролегирующих добавок карбидообразующих элементов и серы на

комплекс свойств чугунных заготовок тормозных дисков // Московский государственный институт стали и сплавов (Технологический университет) (МИСиС), 2023, № 11 С. 90-96.

12. Болдырев Д. А. Повышение износостойкости пары «тормозной диск - колодка» автомобилей ВАЗ: взаимосвязь состава, структуры и эксплуатационных свойств материалов пары трения [Текст] / Д. А. Болдырев, М. М. Криштал, Н. Б. Цалина, М. А. Выбойщик // XV Международная конференция «Физика прочности и пластичности материалов»: Сборник тезисов. — Тольятти: ТГУ. - 2003.-Ч.3.-С. 41-42.

13. Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. М.: Metallurgia, 1987, С. 26.

14. Н.Г. Гиршович. Справочник по чугунному литью. /Под ред. д-ра техн.наук Н.Г. Гиршовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978.-758 с.

15. Болдырев Д.А., Сафронов Н.Н., Иванов С.В. Снижение дефектности усадочного характера в отливках тормозных барабанов из серого перлитного чугуна // Заготовительные производства в машиностроении, № 6 2015, С. 7-11.

16. ГОСТ Р 8.585-2001 Государственная система единства средств измерений. Термопары. Номинальные статистические характеристики преобразования // Стандартиформ, 2010, 77с.

17. ГОСТ 2138-91 Пески формовочные. Общие технические условия // Стандартиформ, 2005, 5с.

18. ГОСТ 3226-93 Глины формовочные огнеупорные. Общие технические условия // ИПК Издательство стандартов, Москва, 2001, 4с.

19. ГОСТ 13078-2021 Стекло натриевое жидкое. Технические условия // Российский институт стандартизации, Москва, 2021, 20с.

20. ГОСТ Р 51232-98 Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества // Госстандарт России, Москва, 2005, 13с.

21. ГОСТ 3443-87 Отливки из чугуна с различной формой графита.

Методы определения структуры // Стандартиформ, Москва, 2005, 42 с.

22. ГОСТ 22536.1-88 Сталь углеродистая и чугун нелигированный. Методы определения общего углерода и графита // Стандартиформ, Москва, 2006, 10с.

23. ГОСТ 8.315-2019 Стандартные образцы состава и свойства веществ и материалов. Основные положения // Стандартиформ, Москва, 2019, 32с.

24. ГОСТ 27611-88 Чугун. Метод фотоэлектрического спектрального анализа. – Введ. 1989-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2007.– 9 с.

25. ГОСТ Р 55878-2013 Спирт этиловый технический гидролизный ректифицированный. Технические условия // Стандартиформ, Москва, 2014, 17с.

26. ГОСТ 7580-91 Кислота олеиновая техническая. Технические условия // Комитет стандартизации и метрологии СССР, Москва, 7с.

27. СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода и водоснабжение населённых мест. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.

28. ГОСТ 23409.5-78 Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Метод определения влаги // М.: Издательство стандартов, 1986, 2с.

29. ГОСТ 23409.6-78 Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Метод определения газопроницаемости // М.: Издательство стандартов, 1986, 5с.

30. ГОСТ 23409.7-78 Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Метод определения прочности при сжатии, растяжении, изгибе и срезе // М.: Издательство стандартов, 1986, 6с.

31. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1986-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001.– 22 с.

32. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю. – Введ. 1960-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2007.– 39 с.

33. EN ISO 6506-1:2014: Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: test method. Publication date: 2014 – 10, Number of pages – 16.

34. EN ISO 6506-2:2017: Metallic materials – Brinell hardness test – Part 2: verification and calibration of testing machine. Publication date: 2017 – 10, Number of pages – 16.

35. EN ISO 6506-3:2014: Metallic materials – Brinell hardness test – Part 3: calibration of reference blocks. Publication date: 2014 – 10, Number of pages – 10.

36. EN ISO 6506-4:2014: Metallic materials – Brinell hardness test – Part 4: Table of hardness values. Publication date: 2014 – 10, Number of pages – 11.