

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы

(наименование)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Гибридные и комбинированные технологии обработки и
модификации перспективных материалов

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Гибридный высокопрочный чугун с шаровидным и
вермикулярным графитом

Обучающийся Н.К. Долоскова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель д.т.н., профессор, Д.А. Болдырев

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

Тольятти 2025

Содержание

Введение.....	3
1 Аналитический обзор.....	8
1.1 Классификация и эксплуатационные характеристики чугунов в автомобилестроении	8
1.2 Высокопрочный чугун с шаровидным графитом: применение, структура и технология получения	12
1.3 Чугун с вермикулярным графитом: применение, структура и технология получения.....	20
1.4 Гибридный высокопрочный чугун с шаровидным и вермикулярным графитом: характеристики и перспективы применения	25
2 Материалы, образцы и методы испытаний и исследований	30
2.1 Технология получения и модифицирования расплава для получения гибридного высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом	44
3 Применение гибридного высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом.....	52
4 Результаты исследований гибридного высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом и их анализ.....	57
4.1 Результаты химического анализа исследуемого материала и разработка требования к химическому составу.....	57
4.2 Результаты исследований механических свойств, структуры и общие требования к материалу.....	59
Заключение	70
Список используемой литературы и используемых источников.....	74

Введение

С середины двадцатого века, ученые активно изучают структуру и свойства чугуна, стремясь улучшить его механические характеристики. В 1980–1990–е годы начинают активно развиваться исследования в области создания гибридных металлических материалов, включая чугун. Исследования по определению влияния модификатора на состав структуру и свойства чугуна, являются основополагающими для получения гибридных материалов, которые позволяют добиться уникальных комбинаций структур и свойств. Сегодня исследования в области гибридных материалов активно ведутся во многих странах по всему миру. «Основоположниками тенденции по развитию и изготовлению чугуна являются страны средней Азии, в большей степени Китай, данный вывод можно сделать на основании найденных остатков плавильных печей, конструкции которых приближены к современным» [39]. Производство таких печей датируется примерно 12–13 веками. Исследования в области чугунов продолжают активно развиваться как в странах Средней Азии, так и в других регионах мира, сохраняя свою актуальность в современных условиях. Научные изыскания охватывают широкий спектр направлений, включая разработку новых марок чугунов, совершенствование технологий их производства и изучение структурно–фазовых превращений. Особое внимание уделяется гибридным материалам, сочетающим различные формы графитовых включений, что открывает перспективы для создания конструкционных материалов с уникальным сочетанием эксплуатационных характеристик. В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост публикационной активности по данной тематике, что свидетельствует о сохраняющемся научном и практическом интересе к этому классу сплавов.

На сегодняшний день, в рамках Российских производств проводятся глобальные разработки и переработки технологий для производства гибридных материалов. «Современные тенденции развития автомобилестроительной отрасли демонстрируют прямую зависимость между технологическим уровнем литейного производства и конкурентоспособностью выпускаемой продукции» [42–44]. Как свидетельствуют отраслевые исследования, доля чугуна в структуре автомобилестроения достигает 40% от общемирового объема производства отливок, что подчеркивает стратегическую важность данного сегмента металлургии. Особое значение приобретает вопрос модернизации литейного производства, поскольку именно этот фактор во многом определяет способность автомобильных компаний соответствовать растущим требованиям рынка по качеству, экологичности и стоимости выпускаемой продукции. В рамках АО «АВТОВАЗ» в свою очередь, не малую часть работ занимают разработки по модернизации технологий производства чугунов для получения уникальных эксплуатационных характеристик.

Основным процессом формирования в структуре чугунов графита шаровидной и вермикулярной форм является сфероидизирующая обработка расплава чугуна с помощью различных схем внепечного, ковшевого модифицирования. Стоит отметить, что данный процесс проводится для обеспечения образования в структуре чугуна шаровидной и вермикулярной формы графитовых включений. Открытие шаровидной формы графитовых включений носило исследовательский характер, однако являлось случайным открытием. Поскольку было открыто Американскими учеными при исследовании возможности замены хрома на магний, как карбидообразующий элемент в никельхромистом чугуне в 1940–х годах, а патент на производство высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) был подан в 1946 г.

Полученную вермикулярную форму графитовых включений, с помощью обработки азотом, некоторые ученые ранее считали вырожденной, однако в 1955 г. чугуны с вермикулярным графитом считались перспективным конструкционным материалом. Исследование отношения шаровидного графита к вермикулярному в структурах ВЧШГ и чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) может привести к разработке нового гибридного материала. Таким материалом является гибридный высокопрочный чугун с шаровидным и вермикулярным графитом. Данный материал может найти свое применение, как в легкой в автомобилестроительной области для изготовления средненагруженных деталей, так и в тяжелом автомобилестроении. Современные исследования в области материаловедения свидетельствуют о возрастающей необходимости пересмотра традиционного использования высокопрочного чугуна в промышленности. Данный материал, несмотря на свои прочностные характеристики, демонстрирует ряд экономических ограничений, требующих научно обоснованного подхода к замене для определенного ряда деталей.

Научная значимость (научная идея) настоящего исследования обусловлена необходимостью комплексного исследования особенностей структуры и свойств промежуточного гибридного высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом (ВЧШВГ) и его идентификация в линейке основных типов графитизированных конструкционных чугунов. Практическая ценность работы определяется перспективой внедрения данного материала в производство средненагруженных автомобильных деталей, что позволит оптимизировать технологические процессы и снизить себестоимость выпускаемой продукции. Особую актуальность приобретает разработка технологии производства и нормативной базы для данного перспективного материала, поскольку отсутствие стандартизированных требований к его

составу и свойствам в настоящее время ограничивает возможности промышленного применения. Проводимые исследования направлены на устранение данного технологического пробела, что создаст основу для расширения номенклатуры конструкционных материалов в автомобилестроении.

Настоящая работа посвящена изучению особого класса конструкционных материалов – высокопрочных чугунов с комбинированной структурой, содержащих одновременно включения шаровидного и вермикулярного графита, но не относящихся по структурным особенностям к ЧВГ и ВЧШГ. В фокусе исследования находится комплексный анализ физико-механических характеристик данного гибридного материала, его структурных особенностей и технологических параметров производства. Особое внимание уделяется взаимосвязи между морфологией графитовых включений и эксплуатационными свойствами получаемых отливок. Исследуемый материал представляет значительный интерес для машиностроительной отрасли благодаря уникальному сочетанию прочностных характеристик и технологических преимуществ.

Объектом исследования является непосредственно гибридный высокопрочный чугун с шаровидным и вермикулярным графитом.

Предметом исследования являются механические свойства, химический состав, структура гибридного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом.

Цель работы: провести комплексное исследование и стандартизацию гибридного высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом (ВЧШВГ) в АО «АВТОАВАЗ».

Задачи:

1. Осуществить комплексный анализ научных публикаций и патентной документации, посвящённых изучению структуры и свойств графитизированных чугунов, выявить недостатки основных типов графитизированных чугунов – ЧВГ и ВЧШГ, провести комплексный анализ структуры и свойств ВЧШВГ.

2. Выбрать методики исследований и разработать технологию получения ВЧШВГ.

3. Определить технологические и экономические предпосылки для разработки нормативной документации на чугун с комбинированной структурой графита, определить детали для возможного внедрения материала в производство.

4. Разработать и внедрить стандартные требования к гибриднему чугуну с шаровидным и вермикулярным графитом, включая параметры химического состава, структурные особенности, механические свойства и выявить особенности влияния структуры ВЧШВГ на его механические свойства, для последующего применения в производстве автомобильных компонентов.

1 Аналитический обзор

1.1 Классификация и эксплуатационные характеристики чугунов в автомобилестроении

Чугун является перспективным материалом в современном автомобилестроении. В настоящее время данный материал используется для изготовления множества высоконагруженных, средненагруженных и малонагруженных деталей, таких как: маховик, шкив коленчатого вала, крышка подшипника, звездочка распределительного вала и валика привода масляного насоса, коллектор выпускной, диск сцепления нажимной, шестерня ведомая масляного насоса, муфта подшипника и тд. Применяемость типа чугуна, серый, высокопрочный, ковкий или чугун с вермикулярным графитом зависит от множества требуемых характеристик для получаемых деталей. Например, в производстве такой детали как распределительный вал, применимо использование как серого чугуна (СЧ) марки СЧ21, так и высокопрочного чугуна (ВЧ) различных марок (ВЧ40, ВЧ45, ВЧ60, ВЧ70).

Применимость чугуна на АО «АВТОВАЗ» в средненагруженных деталях автомобиля (блоки цилиндров, кронштейны крепления задних тормозов, выпускной коллектор и многие другие) не малочисленная. Вышеперечисленные детали изготавливаются с помощью разлива жидкого металла в отливки и последующей кристаллизации. В зависимости от требуемых характеристик изготавливаемых деталей применяются чугуны разных типов. Классификация чугунов достаточно различна, существует классификация по форме графитовых включений, по структуре металлической основы, химическому составу и другие. Принимая во внимание классификацию чугунов и требуемые характеристики к вышеперечисленным

деталям для отливок, применяется высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) и чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ). Однако до конца 1980–х годов, когда данные материалы не были достаточно изучены и не введены в эксплуатацию, многие средненагруженные и высоконагруженные детали производились из ковкого чугуна с хлопьевидным графитом (КЧ). Применяемость КЧ в производстве средненагруженных деталей в 1990–х годах была снижена за счет внедрения в эксплуатацию ВЧ. Замена произведена и обусловлена экономической целесообразностью производства ВЧ в сравнении с КЧ, выраженная в снижении себестоимости и повышении рентабельности. Данный вывод сделан на основании сравнительного анализа процессов изготовления КЧ и ВЧ. «Временные затраты на технологический процесс получения КЧ составляют от 24 до 60 часов, что в рамках производства носит большие экономические потери» [37]. Такие временные затраты обосновываются длительным процессом отжига отливок из белого чугуна, т.е. нагревом до температуры распада аустенита и цементита на графит и аустенит, и длительным охлаждением до повторного образования цементита. Однако, несмотря на длительность процесса получения и затраты, КЧ применяется в тонкостенных отливках с толщиной стенки до 3 см, которые работают в условиях ударных и вибрационных нагрузок, вследствие его повышенных пластических характеристик. «При сравнении линейки марок КЧ (ГОСТ 1215–79) и ВЧШГ (ГОСТ 7293–85) очевидно, что хлопьевидный графит является несколько более сильным концентратором напряжений по сравнению с глобулярным графитом, в результате прочностные и пластические свойства КЧ ниже, чем у ВЧШГ [13, 14]. При этом технологически получение заготовок из КЧ является более дорогим процессом, чем получение отливок из ВЧШГ. Здесь энерго– и

трудоёмкость технологии получения КЧ существенно превалирует над материалоемкостью технологии получения ВЧШГ» [22,4].

В свою очередь ЧВГ в конце 1980–х годов внедрялся в производство взамен серого чугуна с пластинчатым графитом (СЧПГ) для новых деталей, с повышенными требованиями по механическим свойствам, а также для уже производимых отливок. Сравнительный анализ ГОСТов, КЧ (ГОСТ 1215–79), ВЧШГ (ГОСТ 7293–85) и ЧВГ (ГОСТ 28394–89), «показывает, что ЧВГ уступает КЧ и ВЧШГ по относительному удлинению, служащему наряду с временным сопротивлением не менее важной механической характеристикой для многих деталей машиностроения» [5,16].

Механические свойства чугунов определяются как видом графитовых включений, степенью их графитизации и однородностью, так и структурой и свойствами металлической основы [23,37]. «Графит – это аллотропная модификация углерода, в которой атомы углерода находятся в виде гексагональной слоистой кристаллической решетке с небольшой энергией связи между атомами в разных слоях» [1]. Морфология графитовых включений разнообразна. Такое разнообразие является следствием агрегации пластинок графита с помощью различных механизмов, которые контролируются разницей в химическом потенциале между атомами углерода в растворе и атомов в кристалле графита. Также морфология зависит от множества факторов, рисунок 1.



Рисунок 1 – «Схематическое отображении влияющих факторов на формообразование графита» [31]

Основные условия зародышеобразования графитовых включений:

- Переохлаждение системы. Данное условие является необходимым, обеспечивающим движущую силу для фазового превращения.
- Преодоление энергетического барьера, за счет наличия активационных колебаний для образования стабильных зародышей.

После первичной графитизирующей обработки проводится сфероидизирующая обработка расплава чугуна для получения шаровидной и вермикулярной форм графитовых включений, которая также имеет ряд условий по химическому составу расплава и термическим условиям обработки:

- Содержание серы в расплаве чугуна необходимо поддерживать на уровне, не превышающем 0,02%.
- Концентрация кислорода должна находится в диапазоне $(10...20) \cdot 10^{-5} \%$.
- Температурный режим перегрева расплава должен контролироваться и составлять не менее 1440°C.

Соблюдение вышеперечисленных условий обеспечивает необходимую подготовку расплава к последующему процессу сфероидизирующей обработки.

1.2 Высокопрочный чугун с шаровидным графитом: применение, структура и технология получения

Шаровидная форма графита влияет на физико–механические свойства ВЧ. Благодаря чему его механические свойства схожи со свойствами стали, для примера приведено сравнение некоторых марок в таблице 1, при этом имеют высокую жидкотекучесть и отсутствие склонности к образованию трещин, т.е. по данным параметрам имеет схожесть с литейными свойствами СЧ, таблица 2.

Таблица 1 – Сравнение механических свойств ВЧШГ и конструкционных сталей

Материал	Марка	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	НВ
Высокопрочный чугун	ВЧ50	500	320	7	160–240
	ВЧ60	600	370	3	190–270
	ВЧ80	800	480	2	260–360
Конструкционные стали	Ст3сп	370–480	245	25	120–130
	40Х	800–1000	600	10–12	200–240
	30ХГСА	900–1100	700	8–10	250–300

Таблица 2 – Сравнение литейных свойств ВЧШГ и СЧ

Характеристики	Серый чугун (ГОСТ 1412–85)	Высокопрочный чугун (ГОСТ 7293–85)
Температура плавления, °С	1150–1250	1200–1300
Жидкотекучесть, мм	600–800	500–700
Усадка, %	0,8–1,3	0,6–1,2

Для достижения прочностных и эксплуатационных характеристик в производствах может корректироваться технология изготовления расплава ВЧ

с шаровидным графитом в сторону ухудшения литейных и технологических показателей. Существует множество патентов на получения ВЧШГ, например, технология «Патент РФ №2134302, от 10.08.1999 г.» [34]. Рассматриваемое изобретение раскрывает усовершенствованную технологию получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, направленную на оптимизацию процесса модифицирования расплава. В качестве прототипа принят известный метод обработки чугуна лигатурой ФСМг–5 совместно с ферросилицием, который характеризуется существенными технологическими ограничениями. Основной недостаток существующих способов заключается в использовании модификатора с размером фракции свыше 1 мм, что приводит к значительным потерям при просеивании и повышению расхода дорогостоящих добавок. Техническая сущность предлагаемого решения базируется на применении пылевидной фракции лигатуры ФСМг–5 (<1 мм), что позволяет достичь двойного эффекта: утилизации отходов производства и повышения эффективности модифицирования. Ключевым аспектом изобретения является строгое соблюдение пропорционального соотношения между исходным содержанием серы в расплаве, количеством вводимого модификатора и стальных отходов, выполняющих функцию замедлителя реакции. Оптимальное соотношение компонентов установлено в диапазоне 1:(93–100):(100–107) соответственно. Экспериментально подтверждено, что применение тонкодисперсной фракции модификатора в сочетании с регулируемым введением стальных отходов позволяет стабилизировать процесс сфероидизации графита. При этом достигается снижение пироэффекта и дымовыделения, характерных для традиционных методов обработки. Важным технологическим условием является поддержание химического состава расплава в следующих пределах: 3.5–4.0% С, 1.0–1.5% Si, ≤0.030% S. Практическая реализация метода продемонстрировала его

эффективность при промышленном производстве отливок. Использование пылевидной фракции модификатора не только обеспечивает требуемую степень сфероидизации графита, но и способствует экономии дорогостоящих компонентов. При этом достигается стабильное содержание остаточного магния в металле, необходимое для формирования шаровидной формы графитовых включений без избыточного образования перлитной составляющей в металлической основе.

На основании вышеописанного патента, разработан «Патент РФ №2585912 от 10.06.2016 г.» [35]. Рассматриваемое изобретение раскрывает усовершенствованный способ получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ), направленный на повышение эффективности модифицирующей обработки расплава. В качестве прототипа принят известный метод, предполагающий использование пылевидной фракции модификатора ФСМг5 ($<1,5$ мм) в количестве 1,6–1,8% от массы металла. Однако данный подход имеет существенные ограничения, связанные с повышенными потерями при просеивании и нестабильностью результатов при использовании фракций менее 1 мм. Техническая сущность предложенного решения заключается в комбинированной обработке расплава, включающей два ключевых этапа. На первом этапе при заполнении ковша вводится подготовительная смесь, состоящая из карбоната кальция, карбоната бария и ферросилиция марки ФС75, каждый компонент в количестве 0,12–0,15% от массы металла. Данная обработка обеспечивает рафинирование, инокуляцию и графитизацию расплава, создавая оптимальные условия для последующего модифицирования. Второй этап предполагает обработку расплава порошковой проволокой с модификатором ФСМг–18 с использованием трайб–аппарата. Количество вводимого модификатора также составляет 0,12–0,15% от массы металла. Применение трайб–аппарата, оснащенного защитным зонтом,

позволяет минимизировать тепловые потери и предотвратить выплески металла, что повышает стабильность процесса. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенного метода. Установлено, что соблюдение указанных пропорций компонентов обеспечивает формирование преимущественно шаровидной формы графита без образования нежелательных вермикулярных включений. При этом достигается значительное улучшение механических свойств: предел прочности при растяжении увеличивается до 650 МПа по сравнению с 450 МПа при использовании традиционного метода. Критическое значение имеет точное дозирование компонентов. Превышение рекомендуемых количеств (свыше 0,15%) приводит к появлению остаточного цементита и неметаллических включений, снижающих качество отливок. Недостаточное количество модификаторов (менее 0,12%) вызывает ухудшение формы графита и образование вермикулярных включений, что недопустимо для высокопрочного чугуна, если превышает 20% от всего количества графита в структуре. Таким образом, предложенный способ сочетает высокую эффективность сфероидизирующей обработки с экономической целесообразностью за счет оптимизации расхода модификаторов. Решение особенно актуально для производства ответственных отливок, требующих стабильных механических характеристик и высокой надежности.

Принципиальное различие между решениями заключается в методологии воздействия на расплав. Первый патент реализует последовательную подготовку и модифицирование с применением специализированного оборудования (трайб-аппарат), что обеспечивает более высокие механические свойства (до 650 МПа). Второй патент предлагает экономически выгодную модификацию стандартного процесса ковшевой

обработки, где основной упор сделан на утилизацию отходов (пылевидная фракция ФСМг–5) и стабилизацию процесса за счет замедления реакции.

Максимальное количество вермикулярного графита в микроструктуре ВЧШГ не должно превышать 20% от общего количества графита, без наличия в микроструктуре пластинчатого графита. При наличии больше части вермикулярного графита не достигаются требования к механическим свойствам ВЧШГ по ГОСТ 7293–85 [18]. Данное требование имеет жесткий характер, при нарушении которого отливки из чугуна с большим содержанием вермикулярного графита считаются браком и не могут вводиться в производство для дальнейшего применения. Требование по количеству шаровидного и вермикулярного графита достигается путем введения в расплав чугуна определенного количества сфероидизирующего магнийсодержащего модификатора. Положение ВЧШГ по количеству шаровидного графита, для визуализации показано на рисунке 2.

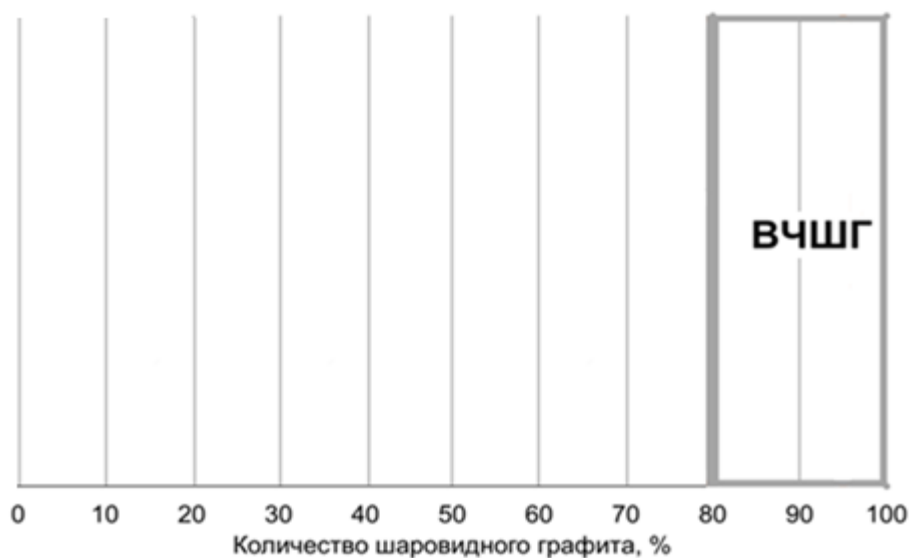


Рисунок 2 – Положение ВЧШГ по количеству шаровидного графита в микроструктуре по требованиям

На зарождение и форму сфероидального графита, который показан для примера на рисунке 3, оказывают значительное влияние примесные элементы, поскольку они образуют такие неметаллические соединения как сульфиды, оксиды, нитриды и другие.

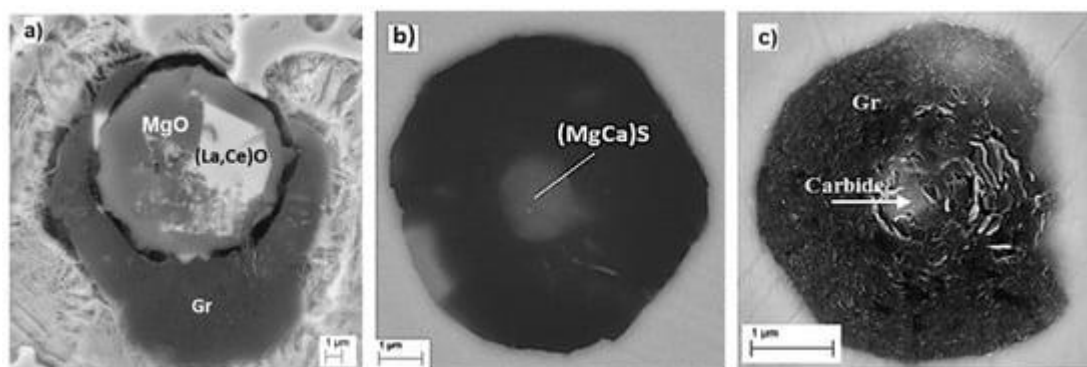


Рисунок 3 – Примеры зарождения сфероидального графита

Неметаллические включения в сталях, могут являться концентраторами напряжений, что при нагрузках на уже подготовленных деталях привести к разрушению. «В чугунах примесные элементы действуют в качестве центров кристаллизации графита, однако они должны удовлетворять специфические требования: высокую стабильность при повышенных температурах, низкую свободную энергию, хорошую кристаллографическую совместимость, тонкую дисперсность в расплаве и высокую поверхностную энергию между жидким агрегатным состоянием расплава и зародышем» [11]. Рост графитовых включений в сфероидальном виде объясняется в результате дисклинации тем, что изгиб пластинок графита может происходить за счет перемещений ступеней вокруг поверхности сфероидов, рисунок 4 [21].

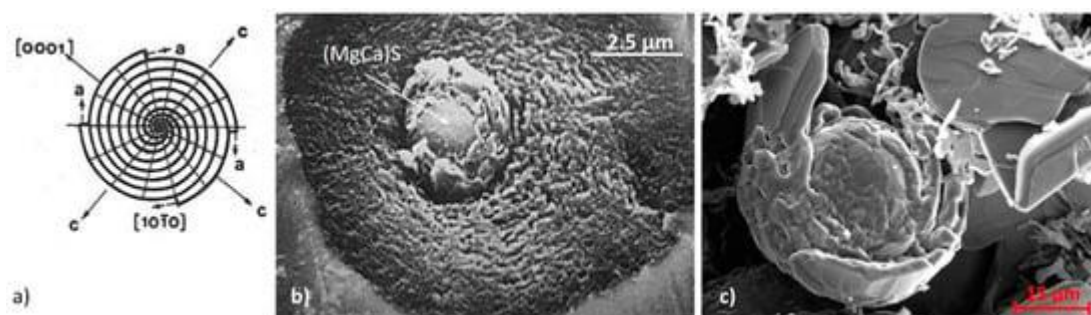


Рисунок 4 – Рост графита по сферической траектории

Этот механизм роста объясняет образование сфероидальных графитовых включений в высокочистых сплавах Fe–C–Si без добавок Mg или Ce. Такие вещества как Mg, Ce, O при повышенном переохлаждении границы графит/жидкость приведут к выбросу растворенных веществ Mg, Bi, Pb, Sn в жидкость. Напротив, в случае снижения переохлаждения поверхности упомянутой выше границы может происходить в результате низкой поверхностной энергией, которая в свою очередь возникла в результате адсорбции поверхностно активных элементов, таких как S, O.

Основным процессом для получения шаровидной формы графитовых включений является сфероидизирующее модифицирование. Под сфероидизирующим модифицированием расплава понимается введение в подготовленный расплав чугуна модификатора на основе магния, таким является модификатор марки ФСМг731, рисунок 5. Требования к химическому составу модификатора марки ФСМг7 приведены в таблице 3.



Рисунок 5 – Внешний вид магнийсодержащего модификатора марки ФСМг731

Таблица 3 – Требования к химическому составу сфероидизирующего модификатора марки ФСМг731

Марка модификатора	Содержание элементов, %					
	Mg	Si	Ca	РЗМ	Al	Fe
ФСМг731	6,5 – 7,5	44 – 48	2,9 – 3,3	0,8 – 1,2	0,4 – 1,0	ост.

Введение сфероидизирующего модификатора на основе магния влияет на процесс кристаллизации. В процессе кристаллизации происходит взаимодействие поверхностного слоя растущих частиц графита с магнием, который купирует рост графитовых включений в продольном направлении, в результате чего графит принимает шаровидную форму. Ферросиликомагниевого модификатора имеет лучшую усвояемость, предотвращает появление карбидов и имеет не большой пироэффект по сравнению с введением чистого магния или редкоземельных металлов (РЗМ), в свою очередь кремний в составе способствует предотвращению образования в структуре цементита (отбелу).

1.3 Чугун с вермикулярным графитом: применение, структура и технология получения

Рассмотрим вермикулярный графит, так же в некоторой зарубежной литературе его называют чугуном с червеобразным графитом. Вермикулярный графит образуется в начале эвтектической кристаллизации, после модифицирования расплава чугуна известными способами.

Запатентованных технологий также множество, как и для получения ВЧШГ, так одним из таких патентов является «Патент РФ № 2007466С1, от 15.02.1994 г.» [33]. Представленное изобретение предлагает инновационный подход к получению чугуна с вермикулярным графитом, решающий две ключевые проблемы традиционных технологий: высокую стоимость процесса и значительное экологическое воздействие. В отличие от известных методов, использующих дорогостоящие редкоземельные металлы (РЗМ) или сложные комбинации модификаторов, данный способ основан на утилизации промышленных отходов, что обеспечивает экономическую эффективность и снижение вредных выбросов. Технологическая сущность изобретения заключается в применении окомкованной смеси, состоящей из чугунной стружки, бегхаузой и угольной пыли, вводимой непосредственно в плавильную печь. Критически важным аспектом является строгое соблюдение параметров обработки: количество добавок должно составлять 5–50% от массы расплава, а их состав выдерживаться в определенных пропорциях (чугунная стружка 0.4–0.6 частей, угольная пыль 0.2–0.5 частей от массы бегхаузой пыли). Такая композиция обеспечивает необходимый баланс между восстановительными процессами (за счет угольной пыли) и модифицирующим воздействием (благодаря оксидным компонентам

бегхаузой пыли). Экспериментальные исследования подтвердили, что при соблюдении указанных условий в структуре чугуна формируется преимущественно вермикулярный графит без существенного образования свободного цементита. При этом достигается стабильность металлической матрицы, характеризующейся преобладанием перлитной структуры (около 90%) с незначительной ферритной составляющей. Особое значение имеет температурный режим обработки (1350–1400°C) и химический состав исходного расплава (3.1–3.6% C, 1.8–2.2% Si, ~0.1% S), которые создают оптимальные условия для протекания графитизации. Превышение верхнего предела добавок (свыше 50%) приводит к появлению цементита, тогда как недостаточное количество (менее 5%) не обеспечивает формирования требуемой вермикулярной структуры. Практическая реализация способа продемонстрировала его эффективность при промышленном производстве, где использование отходов позволило не только снизить себестоимость на 20–30%, но и значительно уменьшить пыле- и газовыделение по сравнению с традиционными методами модифицирования.

Применение РЗМ в производстве ЧВГ усложняет и удорожает процесс получения отливок. Вермикулярный графит является промежуточной стадией роста графита между пластинчатым и шаровидным графитом. Получение вермикулярной формы графита осуществляется путем немодифицирования расплава чугуна Mg. Также получение графитовых включений вермикулярной формы может достигаться другими методами, например модифицирования магнийсодержащими лигатурами, которые по своей сути являются способствующими образованию шаровидной формы с добавлением Ti и Al, которые являются антиглобуляризирующими и препятствуют образованию шаровидных форм графита. Не менее распространённым способом является обработка чугуна азотом, в первые с помощью данного метода в 1953 г. был

получен чугун с вермикулярным графитом. Из перечисленных путей производства данного вида чугуна чаще всего используют первый путь, так как он является экономически выгодным, однако он имеет некоторые недостатки, одним из которых является появление графитовых включений пластинчатой формы, при низком содержании Mg. Помимо данного недостатка присутствует еще один недостаток в следствии высокого содержания Mg, это риск образования шаровидного графита по количеству превышавшее требуемое. В требованиях к данному виду чугуна указано, что наличие в структуре шаровидного графита допускается не более 40%, положение ЧВГ по количеству шаровидного графита показано на рисунке 6. Сложная конструкция вермикулярного графита, в сочетании с закругленными концами и неровной структурой изогнутой поверхности, приводит к улучшенному сцеплению графита с металлической матрицей, в результате чего данный вид графита предотвращает возникновение трещин и их рост, рисунок 7.

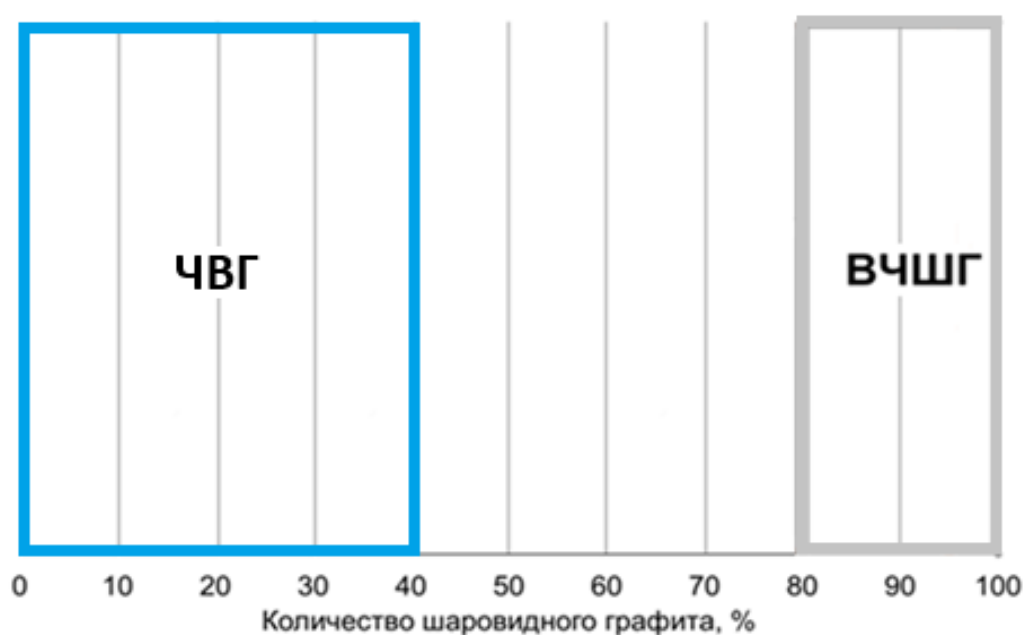


Рисунок 6 – Положение ЧВГ и ВЧШГ по количеству шаровидного графита в микроструктуре по требованиям

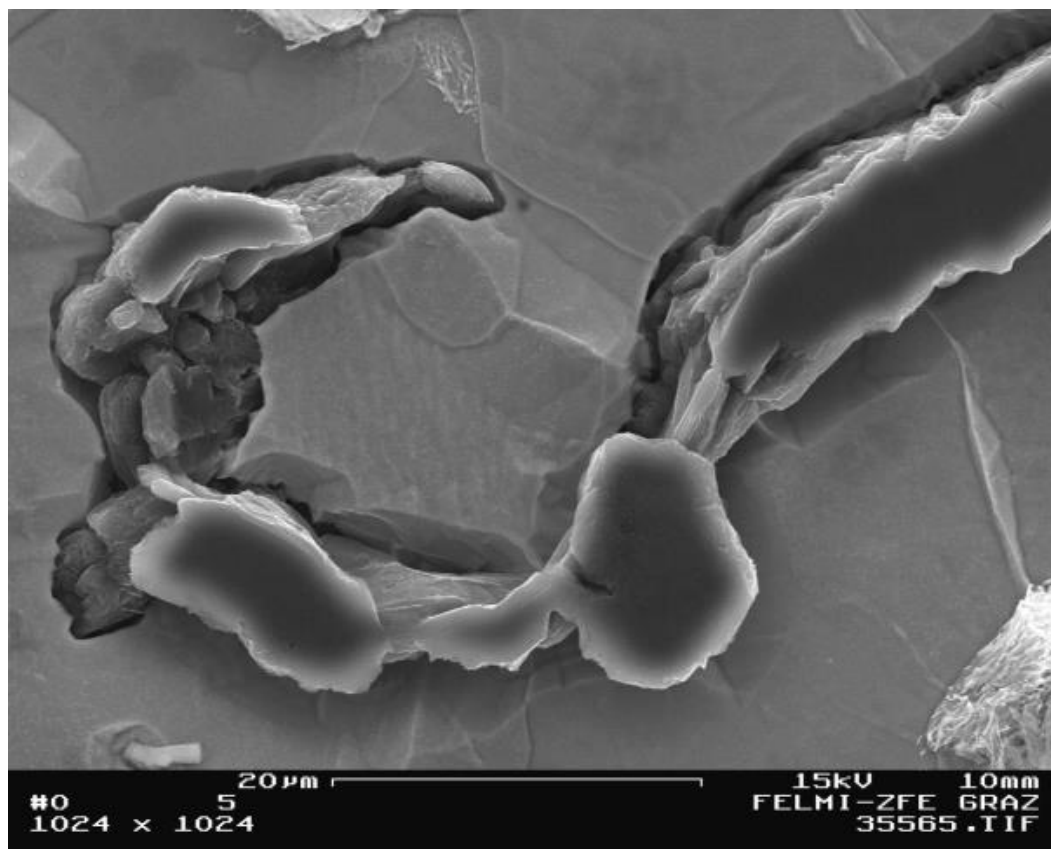


Рисунок 7 – Вермикулярное графитовое включение. Изображение получено с помощью сканирующего электронного микроскопа

Такие характеристики, как обрабатываемость резанием, теплофизические свойства и демпфирующая способность ЧВГ значительно выше, чем в ВЧШГ, за счет графитовых включений вермикулярной формы, таблица 4. В свою очередь ЧВГ сочетает в себе преимущества СЧПГ, такие как демпфирующую способность и обрабатываемость резанием и в некоторых случаях прочность ВЧШГ. Так же частицы такого графита имеют продольную неправильную ориентацию, аналогичную пластинчатому графиту, тем не менее, графитовые включения имеют больший диаметр, закругленные концы и укороченную длину. При исследованиях вермикулярных включений под обычным металлографическим просвечивающим микроскопом мы видим отдельные червеобразные двумерные графитовые включения, однако при

исследовании включений на сканирующем электронном микроскопе видно, что каждое включение связано внутри эвтектического зерна, рисунок 8.

Таблица 4 – Сравнение эксплуатационных характеристик ВЧШГ и ЧВГ

Характеристики	ВЧШГ (ВЧ50–ВЧ60)	ЧВГ (ЧВГ50–ЧВГ60)
Обрабатываемость резанием		
Скорость резания, м/мин	60 – 100	80 – 120
Стойкость инструмента	Класс износостойкости 2–3	Класс износостойкости 1–2
Шероховатость, Ra	3,2 – 3,6	1,6 – 3,2
Теплофизические свойства		
Теплопроводность, Вт/(м·К)	36 – 42	45 – 55
Теплоемкость, Дж/ (кг·К)	460 – 500	480 – 520
Коэффициент теплового расширения	$11,5 – 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$	$10,5 – 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
Демпфирующая способность		
Коэффициент поглощения вибраций	1,0 – 1,5	2,0 – 3,0

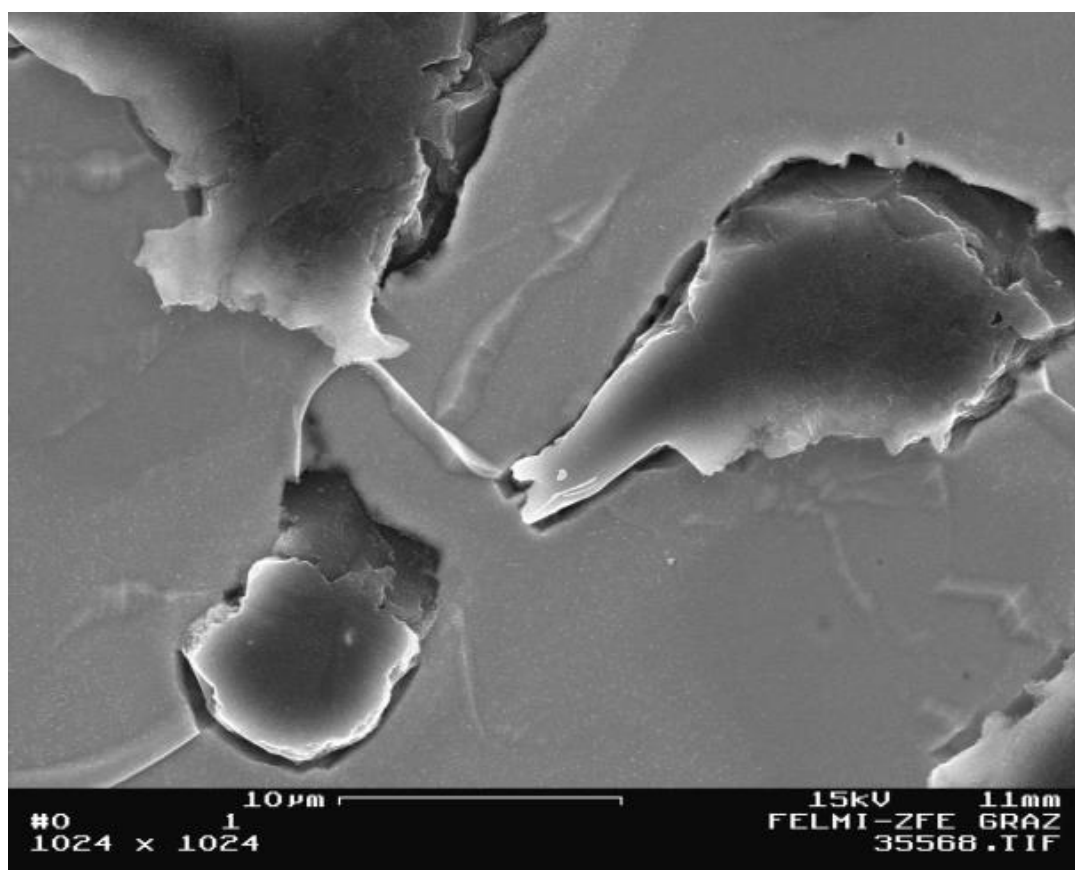


Рисунок 8 – Вермикулярное графитовое включение внутри эвтектического зерна. Изображение получено с помощью сканирующего электронного микроскопа

1.4 Гибридный высокопрочный чугун с шаровидным и вермикулярным графитом: характеристики и перспективы применения

Данный вид чугуна отличителен от других видов чугуном наличием в микроструктуре двух видов графитовых включений, а именно шаровидных и вермикулярных. Металлическая матрица может иметь ферритную, прелитно–ферритную и перлитную структуры. Механические свойства данного вида чугуна могут зависеть, как и от металлической матрицы, так и от соотношения вермикулярного графита к шаровидному. В таком случае, если металлическая матрица одинакова, то механические свойства будут зависеть только от соотношения графитовых включений и от концентрации напряжений при нагрузках, которые действуют непосредственно на них же.

Для производства рассматриваемого вида чугуна используют методику, как для получения ВЧШГ, с изменением количества сфероидизирующего модификатора, то есть немодифицирование расплава чугуна. Поскольку в данном виде чугуна допускается и даже может регулироваться соотношение сферического и вермикулярного графита, то данный метод с последующей инокуляцией полностью позволит контролировать соотношение шаровидного графита к вермикулярному. На рисунке 9, показана микроструктура такого вида графита, где наблюдаются как вермикулярные графитовые включения, которые имеют неправильную ориентацию и продольную форму, схожую с пластинчатым графитом, однако вермикулярные графитовые включения имеют больший диаметр и закругленные концы, так и сфероидальные включения присущие высокопрочному чугуну с шаровидным графитом.

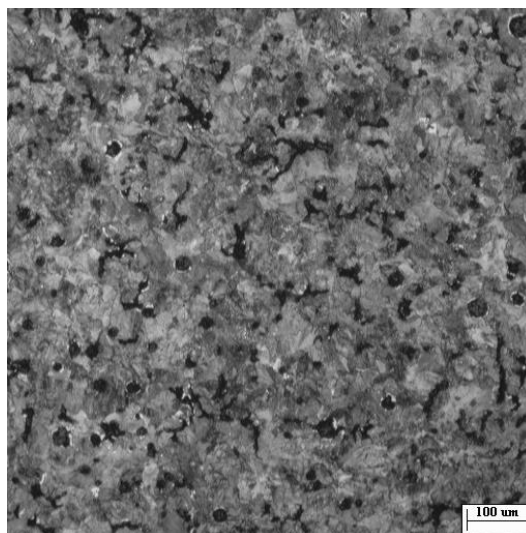


Рисунок 9 – Микроструктура гибридного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом

Вследствие чего чугун с шаровидным и вермикулярным графитом имеет преимущества свойств перед описанными в прошлых разделах видами чугунов. Данными преимуществами перед чугуном с вермикулярным графитом являются: в большей степени высокие механические свойства при испытаниях на растяжение–сжатие, трещиностойкость и показатели, в меньшей степени зависящие от толщины стенок литейных форм. «Преимущества над чугуном с шаровидным графитом: улучшенные жидкотекучесть, демпфирующие свойства, пониженные склонности к деформации, термоиндуцированные внутренние напряжения, модуль затвердевания и коэффициент теплового расширения» [3,6,7,8].

Как было указано в предыдущих разделах в стандартах, описывающих требования к ВЧШГ и ЧВГ, наличие одновременно двух видов графитов в структуре допускается в строгом соотношении, которое для ВЧШГ составляет 20/80% ШГ/ВГ, для ЧВГ 40/60 % ШГ/ВГ. В гибридном чугуне с шаровидным и вермикулярным графитом соотношение содержания графитовых включений может варьироваться в свободном диапазоне от 0 до 100 %. Указанное соотношение графитовых включений в данном материале представляет собой

ключевую особенность, определяющую механические свойства, эксплуатационные параметры и технологические параметры. «Ключевая особенность не является недостатком данной марки, однако накладывает определённые требования к стабильности технологического процесса её получения, а именно – операции сфероидизирующей ковшевой обработки расплава чугуна. В зависимости от требований к детали могут меняться не только соотношения графитных включений, но и металлическая матрица. Например, для изготовления будущих выпускных коллекторов требуется высокое количество феррита, который предотвратит расширение при высоких температурах» [22].

При поиске аналогичных материалов, данному чугуну, определено наличие подобного материала у отечественного производителя грузовой и специальной техники «УРАЛаз» г. Миасс, именуемый как ВЧ40–50 по технической документации предприятия [9,10]. Иностранные производители, например, Тоуо Денка Когую, профилируемый на производстве модифицирующих материалов для получения чугуна с компактными формами графита, производит модификаторы для получения ВЧШВГ, именуемый как «ВЧ/ЧВГ», из чего следует, что данный материал имеет широкое распространение, как в отечественном производстве, так и в Японии, что связано с его высокой адаптивностью к современным производственным требованиям [2]. Микроструктура материала и механические свойства аналогичного материала ВЧШВГ показаны на рисунке 10 и таблице 1.

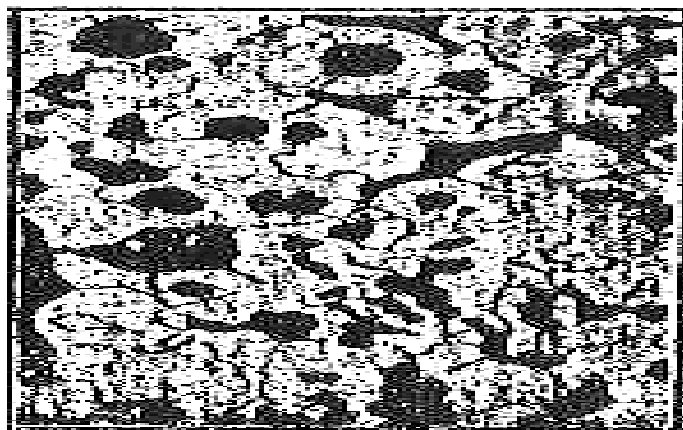


Рисунок 10 – Микроструктура аналогичного материала, производства Toyo Denka Kogyo

Таблица 5 – Механические свойства аналогичного материала, производства Toyo Denka Kogyo

Обозначение материала	ССГ, %	σ_b , МПа	δ , %	НВ
ВЧ/ЧВГ	59	445	7,6	156

Проведенный анализ современных исследований в области графитизированных чугунов позволил выявить ключевые тенденции развития данного класса материалов. Исторический обзор технологий производства демонстрирует последовательную эволюцию от традиционных серых и ковких чугунов к современным высокопрочным модификациям с контролируемой структурой графитовых включений.

Сравнительная характеристика механических и технологических свойств различных типов чугунов выявила существенные преимущества материалов с компактными формами графита. В частности, высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) сочетает прочностные характеристики, приближенные к конструкционным сталям, с хорошими литейными свойствами. При этом чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ) демонстрирует превосходство по таким параметрам, как обрабатываемость резанием, теплофизические свойства и демпфирующая способность.

Особый научный и практический интерес представляет гибридный чугуны с комбинированной структурой, содержащий как шаровидные, так и вермикулярные графитовые включения. Предположительно данный материал займет промежуточное положение между ВЧШГ и ЧВГ по комплексу эксплуатационных характеристик. Важно отметить, что варьирование соотношения форм графита позволяет целенаправленно регулировать механические и технологические свойства получаемых отливок.

Анализ технологических аспектов производства показал, что формирование гибридной структуры достигается путем оптимизации параметров модифицирования расплава. Критическое значение имеют такие факторы, как точность дозирования модификаторов, контроль химического состава. При этом установлено, что использование ферросиликомагниевого модификатора обеспечивает стабильные результаты при относительно низкой себестоимости процесса. Перспективы практического применения исследуемого материала в автомобилестроении связана с его способностью удовлетворять противоречивым требованиям к деталям различного назначения. В частности, гибридный чугун может эффективно использоваться для производства средненагруженных узлов, где необходимо сочетание достаточной прочности с хорошими демпфирующими свойствами и технологичностью.

Проведенные исследования создают научную основу для дальнейшей разработки и стандартизации новых марок графитизированных чугунов. Полученные результаты имеют существенное значение для совершенствования технологических процессов в отечественном машиностроении, что соответствует стратегическим задачам импортозамещения и повышения конкурентоспособности российских производителей.

2 Материалы, образцы и методы испытаний и исследований

Для исследования структуры и свойств графитизированных чугунов применяются стандартизированные методики и оборудование прошедшее сертификацию для получения достоверных результатов. В ходе исследований, проанализированные и усредненные результаты будут добавлены во внутренний стандарт АО «АВТОВАЗ», где прописываются марки графитизированных чугунов для отливок деталей автомобиля.

Перед процессом изготовления отливок для исследований каждая деталь проходит этап 3D моделирования. «Данный этап проводится с целью получения теоретических результатов по появлению в будущей детали концентраторов напряжений» [20]. На данном этапе принимается во внимание конструкционные параметры деталей и особенности материала. Поскольку рассматриваемый материал исследован не в полном объеме, полученные данные могут приниматься как рекомендация и носить рекомендательный характер.

В процессе изготовления расплава чугуна, малую часть расплава чугуна подвергают отбелу. Отбеленная часть расплава заливается в кокиль, после чего отправляется на спектральный анализ. «Процесс отбела для спектрального анализа является обязательным, так как данный вид анализа подразумевает выбивание маленьким по длительности электрическим импульсом части материала, сравнимого с размером зерна, следовательно данный импульс в не отбеленном образце может попасть как в феррит, так и в графитовые конкреции, что сделает спектральный анализ не достоверным» [24]. Для спектрального анализа будет использован спектроанализатор OBLF модель QSN 750 II. Основной функцией данного прибора является определение спектрального состава входного сигнала. «Принцип его работы

заключается в разделении светового потока на монохроматические компоненты с последующим измерением мощности каждой составляющей» [26]. В результате чего с помощью данного прибора можно определить содержание спектра в определенной области. Как показано на рисунке 11, работу спектроанализатора можно представить как получение вертикальных и горизонтальных волн на электронно–лучевом осциллографе. То есть при использовании данного вида оборудования можно измерить амплитуду спектральных волн в частной области, а также устранить шумовые сигнала и повысить эффективность исследования.

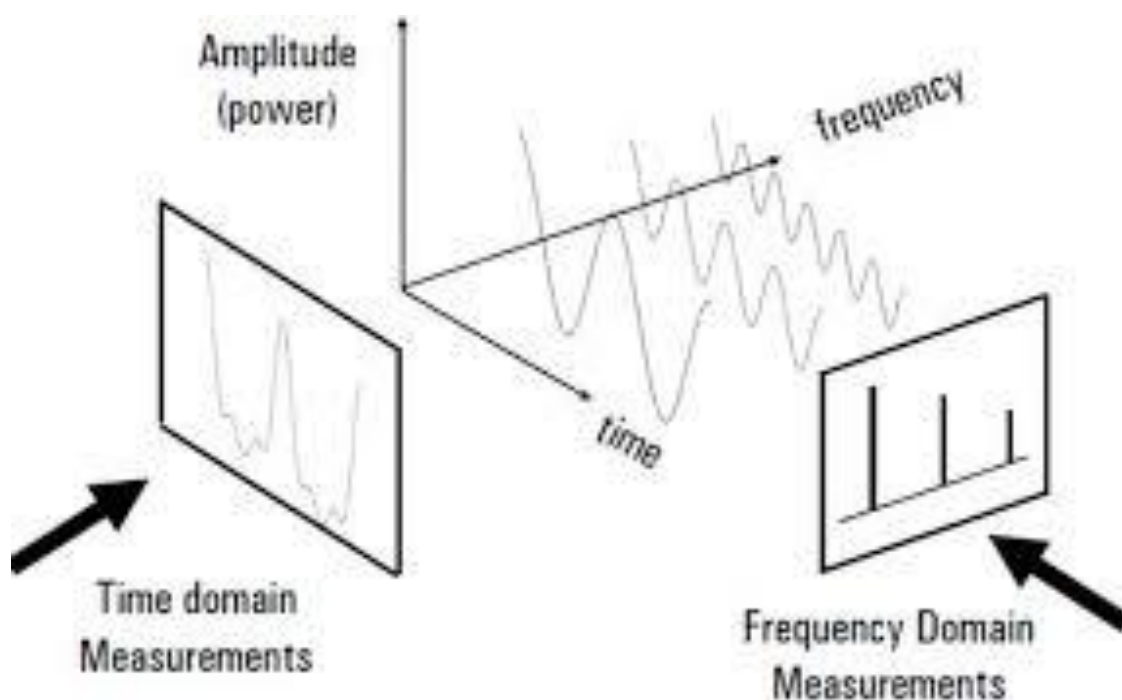


Рисунок 11 – Схема работы спектроанализатора [1]

После получения отливок, выборка образцов для проведения исследований микроструктуры производится следующим образом: по определенному количеству штук выбираются с начала партии, с середины партии и с конца партии. После чего методом разрушающего контроля проводятся исследования микроструктуры, где определяется соотношения

шаровидного графита к вермикулярному и металлическая основа. При данном виде анализа применяется ГОСТ 3443–87 [17] и оптический микроскоп ЕРІТТР–2. Оптический микроскоп представляет собой прибор, предназначенный для получения увеличенного изображения малого объекта с целью детального его изучения. Принцип работы оптического микроскопа основан на многократном преломлении и отклонении световых лучей, проходящих через исследуемый объект и систему оптических элементов микроскопа. Основными компонентами оптического микроскопа являются: источник света, конденсор, предметный столик, объектив, окуляр и тубус. Исходящий от источника света пучок лучей фокусируется конденсором на исследуемый образец, размещенный на предметном столике. В результате прохождения света через образец лучи преломляются и рассеиваются, неся информацию о структуре образца. Объектив микроскопа собирает рассеянные образцом лучи и формирует промежуточное увеличенное изображение. Данное изображение является перевернутым и уменьшенным по сравнению с образцом. Окуляр играет роль лупы, давая дальнейшее увеличение промежуточного изображения. В результате чего наблюдается увеличенное и прямое изображение образца. Качество изображения, получаемого с помощью оптического микроскопа, ограничивается дифракцией света, возникающей при прохождении света через объектив. Дифракция приводит к тому, что изображение мелких образцов оказывается размытым и нечетким. «Увеличение оптического микроскопа определяется как произведение увеличений объектива и окуляра» [32]. «Разрешение микроскопа, характеризующее его способность различать мелкие детали образца, зависит от длины волны используемого света и числовой способности объектива собирать свет» [38]. Чем короче длина волны света и выше числовая способность, тем выше разрешение микроскопа. Таким образом, оптический

микроскоп позволяет получать увеличенные изображения малых образцов, однако разрешение микроскопа ограничено дифракцией света. Выбор объектива с подходящим увеличением и числовой способностью собирать свет и противостоять дифракционному размытию позволяет оптимизировать качество получаемого изображения и выявить детали структуры исследуемого образца.

Пробоподготовка образцов перед металлографическим исследованием на оптическом микроскопе является критически важным этапом, непосредственно влияющим на достоверность и информативность получаемых результатов. Качество подготовки поверхности определяет не только четкость визуализации микроструктуры, но и корректность последующего анализа фазового состава, распределения графитовых включений и дефектов.

Первоначальный этап пробоподготовки включает тщательный выбор участка для исследования с учетом технологических особенностей отливки и зон потенциальных структурных неоднородностей. Отобранный образец подвергается механической обработке на отрезном станке с применением охлаждающей жидкости на основе водно-гликолевых эмульсий, что предотвращает локальный перегрев и структурные изменения в материале.

Для обеспечения стабильности образца при последующей обработке выполняется его запрессовка в термореактивную пластмассу (например, бакелит или эпоксидные смолы) с использованием гидравлического пресса при давлениях 15–20 МПа. Данная процедура минимизирует риск деформации краев и обеспечивает плоскостность поверхности.

Ключевой этап подготовки — последовательное шлифование абразивными материалами с постепенным уменьшением размера зерна (от 120 до 1200 grit). Этот процесс направлен на устранение макроскопических

неровностей и создание равномерной поверхности. Завершающая стадия — полировка алмазными суспензиями (1–3 мкм) или коллоидным кремнеземом, которая обеспечивает формирование зеркального состояния поверхности. Такая обработка исключает рассеивание светового потока при микроскопии и повышает контрастность изображения за счет устранения артефактов, связанных с механическими повреждениями.

Контроль качества подготовки осуществляется визуально при увеличении 50–100× для выявления царапин, сколов или остаточных загрязнений. Только при соблюдении всех указанных условий возможно корректное проведение микроструктурного анализа, включая оценку формы графитовых включений, количественную металлографию и идентификацию фазовых составляющих.

«Стандартизированные материалы имеют следующие показатели механических свойств: твердость материала, предел прочности при растяжении и относительное удлинение» [45]. Следовательно, для стандартизации гибридного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом мы должны определить все те же свойства на разных отливках из данного вида материала.

Твердость материала является важной характеристикой, определяющей его сопротивление пластической деформации. Для измерения твердости используются статические и динамические методы. Статические методы заключаются в вдавливания индентора в поверхность материала, к ним относятся методы определения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и Кнупа. Принцип действия твердомера основан на измерении глубины проникновения индентора в поверхность материала при приложении к нему определенной нагрузки. Твердость определяется как отношение нагрузки к площади отпечатка, оставленного индентором на поверхности материала.

Испытание на твердость проводится на специально подготовленной поверхности материала. В поверхность вдавливается индентор под действием заданной нагрузки. После снятия нагрузки измеряется диагональ или площадь отпечатка, оставленного индентором. Существует несколько типов твердомеров, различающихся по форме индентора и способу измерения глубины проникновения. Наиболее распространенными типами твердомеров являются:

- Твердомер по Виккерсу – используется индентор в форме четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136° ;
- Твердомер по Бринеллю – используется индентор в форме стального шарика;
- Твердомер по Роквеллу – используется индентор в форме конуса или шарика.

Твердомеры широко используются для определения твердости различных материалов, таких как металлы, пластмассы, керамика и композиты. Измерение твердости позволяет оценить механические свойства материала, его износостойкость, обрабатываемость и другие характеристики. Статические методы имеют некоторые ограничения, связанные с размером и формой отпечатка. Для получения достоверных результатов твердость должна измеряться на достаточно толстых образцах, а поверхность материала должна быть ровной и однородной. В противном случае результаты испытаний могут быть неточными.

Разрывная испытательная машина представляет собой устройство для проведения испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и другие виды механических испытаний материалов. Принцип работы разрывной испытательной машины основан на измерении силы, необходимой для

деформации или разрушения образца материала. Разрывная испытательная машина состоит из следующих основных частей: рама, захваты, нагружающее устройство, измерительная система и система управления. Рама обеспечивает жесткую основу для машины и служит опорой для других компонентов. Захваты в свою очередь удерживают образец материала и передают на него нагрузку. Нагружающее устройство – создает и контролирует нагрузку, прикладываемую к образцу. Измерительная система – измеряет деформацию или удлинение образца под действием нагрузки. Система управления – управляет работой машины и записывает данные испытаний.

Испытание на разрыв проводится на специально подготовленном образце материала. Образец закрепляется в захватах, и нагружающее устройство начинает прилагать к нему нагрузку с заданной скоростью. По мере деформации образца измерительная система регистрирует удлинение или деформацию. Нагрузочно–деформационная кривая, отображающая зависимость силы от деформации, записывается системой управления. Эта кривая позволяет определить такие механические свойства материала, как предел прочности, предел текучести, модуль упругости и другие характеристики. Разрывные испытательные машины различаются по типу нагружающего устройства и способу измерения деформации. Наиболее распространенными типами машин являются:

- Электромеханические машины – используют электродвигатель для создания нагрузки и датчик для измерения деформации;
- Гидравлические машины – используют гидравлическую систему для создания нагрузки и могут измерять как деформацию, так и удлинение образца;

– Электрогидравлические машины – сочетают характеристики электромеханических и гидравлических машин.

В данной работе применены следующие испытательная машина и твердомер, рисунки 12–14. Оценка и методика проведения проведена согласно следующих ГОСТов: ГОСТ 9012–59 [19] – определение твердости материала по Бринеллю, ГОСТ 1497–84 [15] – определение относительного удлинения и предела прочности.



Рисунок 12 – Твердомер ТШ 2–1 [12]



Рисунок 13 – Испытательная машина Amsler 20SZBDA [25]

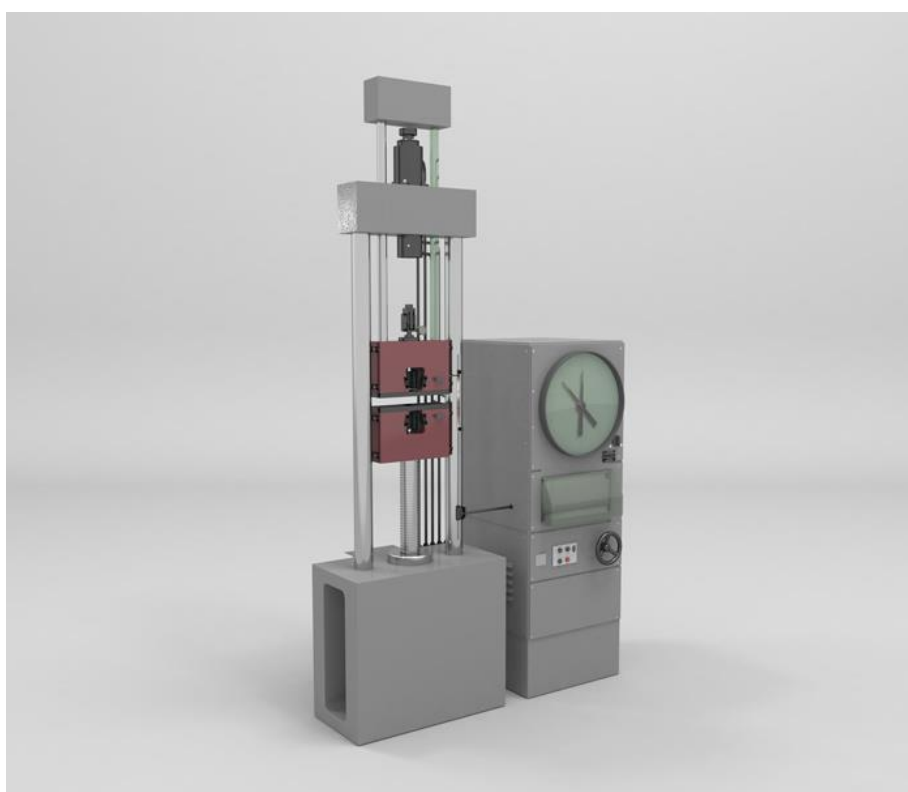


Рисунок 14 – Испытательная разрывная машина Р-20 [27]

После проведения испытаний материала отливки отправлены на механическую обработку, после чего подвергнуты испытаниям для деталей. Результаты по данному виду испытаний не будут включены в стандарт, так как они будут иметь различный результат в зависимости от назначения детали. Однако, результаты проанализированы для того, чтобы в будущем учесть соответствие требований для детали к испытываемому материалу.

В результате проведенных испытаний на средненагруженных деталях автомобиля из исследуемого материала будет проведен не разрушающий контроль, чтобы определить внутренние несплошности изделия. Данный вид контроля проводится на рентгеновском аппарате ЭКСТРАВОЛЬТ 225, рисунок 15. Однако, при проведении испытаний могут произойти внеплановые разрушения деталей, для которых данный материал может оказаться не подходящим или нарушена технология производства. Для того чтобы определить, заключается ли проблема в материале нужно будет провести фрактографический анализ изломов, так как проблема может оказаться не в материале. Данный вид анализа проводится на микроскопе Stemі 2000С рисунок 16, либо для более детальной картины разрушения на электронно–ионном микроскопе Scios 2 LoVac, рисунок 17.

Электронный микроскоп — это устройство, используемое для получения высокоувеличенных изображений очень мелких объектов (размером до нескольких ангстрем). Принцип работы электронного микроскопа основан на взаимодействии пучка электронов с веществом исследуемого объекта. Электронный микроскоп состоит из следующих основных компонентов:

- Электронная пушка – генерирует и фокусирует пучок электронов, направляемый на образец.

- Электронно–оптическая система – включает в себя конденсорные и объективные линзы, отклоняющие и фокусирующие пучок электронов для получения изображения объекта.

- Образец – исследуемый объект, размещенный на специальном столике.

- Детектор – регистрирует электроны, прошедшие через образец или рассеянные им.

- Система визуализации – отображает полученное изображение на экране или записывает его на носитель.

Когда пучок электронов проходит через образец, он взаимодействует с атомами и молекулами вещества. В результате этого взаимодействия электроны могут рассеиваться, поглощаться или возбуждаться. Рассеянные и возбужденные электроны регистрируются детектором, и на основе этой информации формируется изображение объекта. Существует два основных типа электронных микроскопов:

- Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) – пучок электронов проходит насквозь тонкого образца.

- Растровый электронный микроскоп (РЭМ) – пучок электронов сканирует поверхность образца, поочередно возбуждая участки поверхности и регистрируя рассеянные электроны.

Основное различие между ПЭМ и РЭМ заключается в способе взаимодействия электронного пучка с образцом:

- ПЭМ: «Пучок электронов проходит насквозь тонкого образца, в результате чего формируется изображение, основанное на поглощении и рассеянии электронов материалом образца» [40].

– РЭМ: «Пучок электронов сканирует поверхность образца, и изображение формируется путем регистрации вторичных и отраженных электронов, испускаемых поверхностью образца» [40].

Для данных видов электронных микроскопов так же отличается пробоподготовка образцов. Для просвечивания электронами образец должен быть очень тонким (обычно толщиной менее 100 нм). Для этого образец необходимо разрезать, отполировать и обработать специальными методами. Образцы для РЭМ могут быть более толстыми и не требуют такой тщательной подготовки. Однако для улучшения проводимости поверхность образца часто покрывают тонким слоем проводящего материала. Разрешение электронного микроскопа определяется длиной волны используемых электронов. Поскольку длина волны электронов меньше, чем длина волны света, электронные микроскопы имеют гораздо более высокое разрешение, чем световые микроскопы. ПЭМ обычно имеет более высокое разрешение, чем РЭМ, позволяя визуализировать мельчайшие детали структуры образца. Однако РЭМ имеет более высокую глубину резкости, благодаря чему можно получить четкие изображения с большей глубины образца.



Рисунок 15 – Стационарный рентгеновский аппарат ЭКСТРАВОЛЬТ 225 [36]



Рисунок 16 – Бинокулярный микроскоп Stemi 2000C [41]



Рисунок 17 – Электронно–ионный микроскоп Scios 2 LoVac [39]

В результате проведенных исследований и испытаний будут получены фактические результаты, при анализе которых будут выведены нормы для чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом для средненагруженных деталей.

2.1 Технология получения и модифицирования расплава для получения гибридного высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом

Способы введения сфероидизирующего модификатора в расплав разнообразны. «Все существующие способы сфероидизирующей обработки чугуна можно классифицировать следующим образом:

1. В плавильном агрегате: за счет шлаковой обработки, флюсовой обработки, специальной технологии внутрипечной обработки (ТШЭД).
2. В струе расплава при выпуске из печи: вводом модификатора на желобе печи, засыпкой модификатора в струю.
3. В ковше: открытого типа – процессом «сэндвич», специальной конструкции – посредством закладки модификатора в карман, открытого типа – погружением модификатора в колоколе, в герметизированном типа автоклава, типа конвертора.
4. Во вторичных плавильных агрегатах: копильнике, дозаторе, миксере, в печи выдержки.
5. С помощью специального промежуточного устройства: в ковшах – растворителях, автономных реакционных камерах, контакторах, в трубчатых устройствах.
6. В струе при заливке в форму: посредством "проволочного" модифицирования, продувкой газами и порошками, с помощью трубок.
7. В литейной форме («инмолд–процесс»): в литниковой чаше, в реакционной камере, в полости формы» [28–31].

Основными и наиболее распространенными технологиями сфероидизирующего модифицирования являются: «заливка сверху», «Сэндвич» процесс» и «ковш с карманом». Выбор способа зависит от

возможностей производства и желаемого результата модифицирования. Как упоминалось в предыдущих разделах основным сфероидизирующим модификатором для получения ВЧШГ и ЧВГ является ФСМг. Модифицирование легкими лигатурами расплава чугуна для получения ВЧШВГ имеет отличительные от получения ВЧШГ параметры. ВЧШВГ может изготавливаться по любой известной схеме ковшевого модифицирования, однако в рамках АО «АВТОВАЗ» применяется схема «заливка сверху», рисунки 18 – 20.

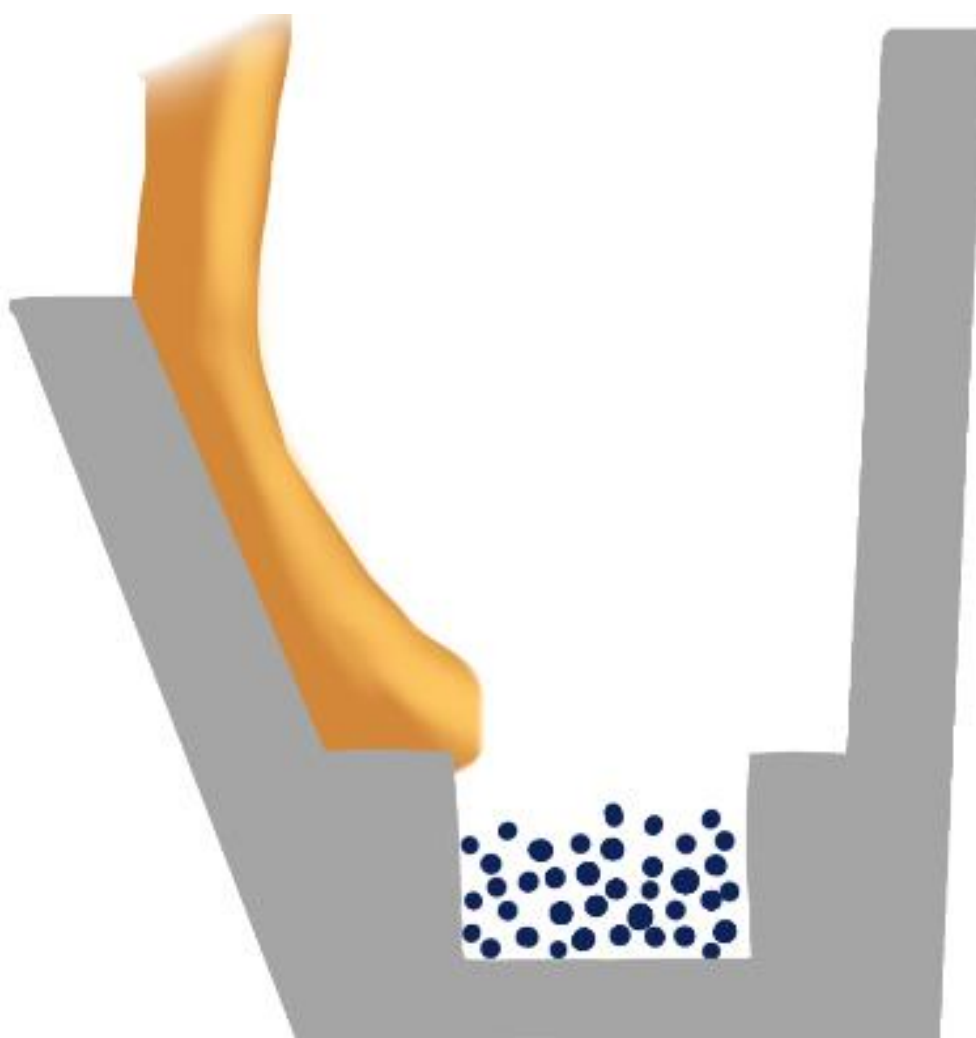


Рисунок 18 – Схема ковшевого модифицирования расплава чугуна сфероидизирующими модификаторами – «ковш с корманом»

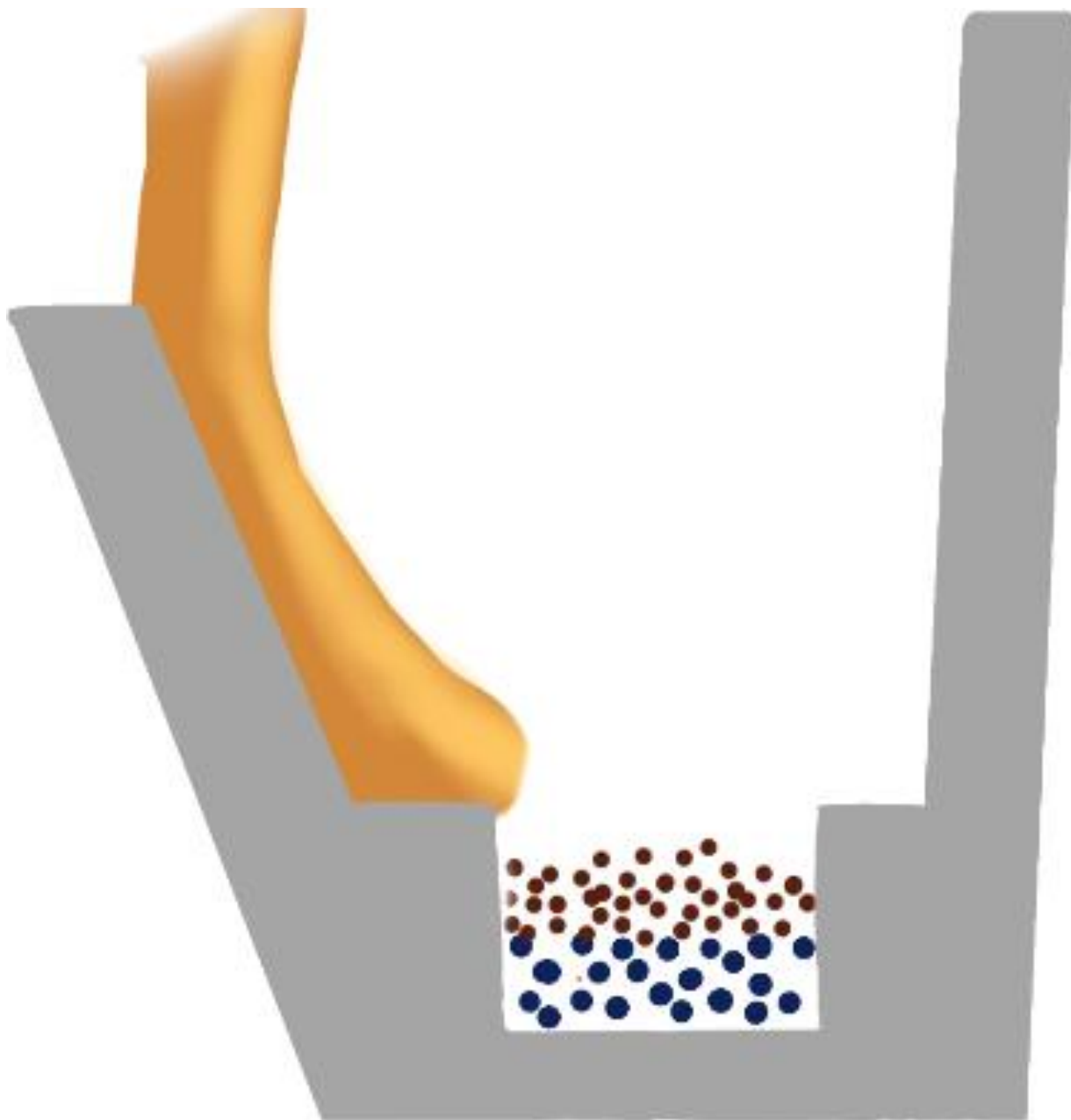


Рисунок 19 – Схема ковшевого модифицирования расплава чугуна сфероидизирующими модификаторами – «сэндвич-процесс»

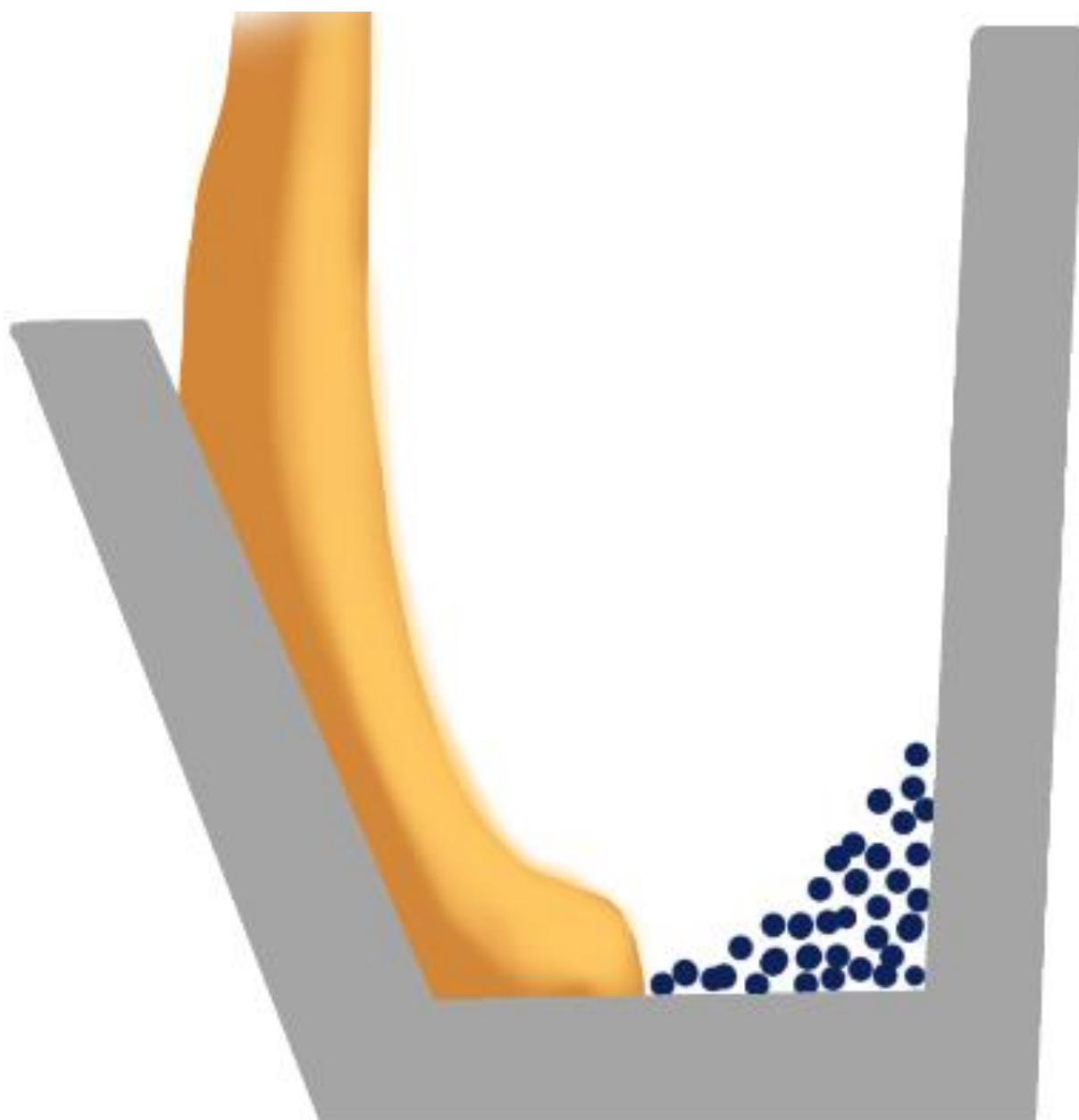


Рисунок 20 – Схема ковшевого модифицирования расплава чугуна сфероидизирующими модификаторами – «заливка сверху»

Технологический процесс ковшевого модифицирования «заливка сверху» является упрощенной версией, процесса модифицирования «Сэндвич–процесс». Технология способа модифицирования «Сэндвич–процесс» перспективен в рамках экономически–выгодного производства.

Технология изготовления расплава ВЧШВГ практически не отличается от технологии получения расплава ВЧШГ. «Главное отличие изготовление расплава ВЧШВГ от ВЧШГ заключается в недомодифицировании расплава чугуна» [5–7]. «Стабильность операции ковшевого модифицирования определяется в первую очередь количеством сфероидизирующего модификатора при неизменном способе его введения. Оно должно рассчитываться с таким технологическим запасом, учитывающим влияние любых негативных факторов, чтобы гарантировать получение только шаровидной и вермикулярной форм графита при исключении формирования его пластинчатой формы. Наиболее характерные из них:

- неправильное введение модификатора на днище ковша, например, рассыпание по всей площади днища, вызывающее его размыв струёй расплава чугуна из печи и преждевременное сгорание на поверхности;
- ускоренное (< 30 с/1 т расплава чугуна) или, наоборот, замедленное (> 60 с/1 т расплава чугуна) наполнение ковша расплавом из печи, приводящее к неполному усвоению модификатора чугуном, его быстрому всплыванию и бесполезному сгоранию на поверхности;
- сверхнормативная передержка расплава в ковше после окончания операции сфероидизирующей обработки до начала его разливки по литейным формам, приводящая к преждевременному угару растворённого магния и нехватке его содержания для формирования компактных форм графита в структуре чугуна отливок из последних залитых форм;

разливка расплава из ковша по литейным формам с превышением временного лимита (> 8 мин/1 т расплава чугуна), что не позволяет сформировать компактные формы графита в структуре чугуна отливок из последних залитых форм из-за недостаточного остаточного содержания в нём магния» [22].

Первым этапом изготовления опытных партий является приготовление расплава чугуна. Данный этап начинается с помещения в доменные печи предварительно подготовленную руду. Далее после того, как мы получили расплав чугуна, происходит процесс модифицирования. В данном случае модифицирование будет происходить с помощью метода «заливка сверху», с модификатором уложен в нижнем углу наклоненного модифицирующего ковша, что предотвратит нежелательное размывание модификатора. После этапа модифицирования ковш будет направлен на разливочную линию, где происходит заливка про модифицированного расплава чугуна по формам, рисунки 21, 22.

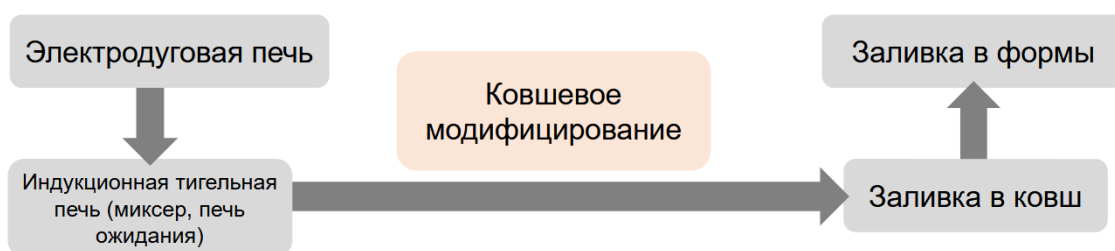


Рисунок 21 — Порядок проведения модифицирование расплава чугуна по схеме «заливка сверху»

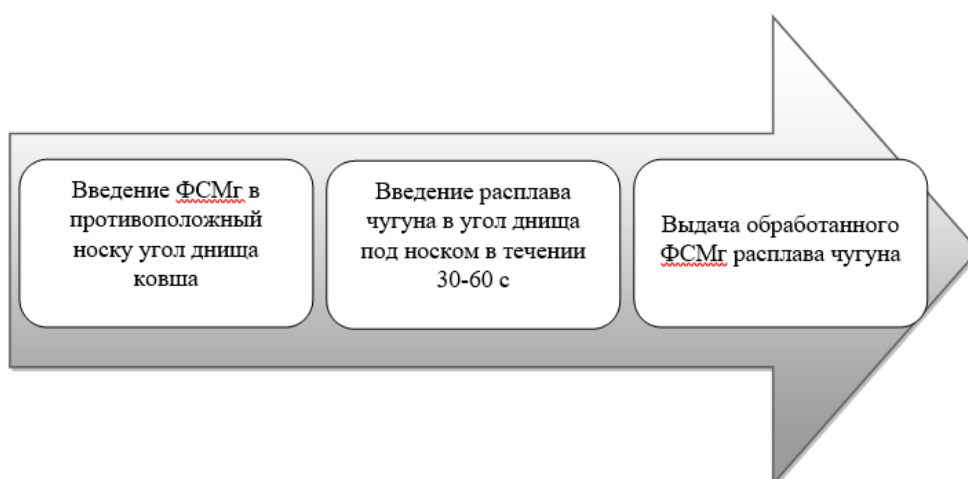


Рисунок 22 – Процесс ковшевого модифицирования «Заливка сверху»

В данном разделе рассмотрены материалы, методы испытаний и технологические процессы, применяемые для исследования структуры и свойств графитизированных чугунов, а также их модифицирования. Основное внимание уделено стандартизированным методикам, оборудованию и этапам производства.

Одним из аспектов исследований является применение спектрального анализа для определения химического состава расплава, где обязательным условием является предварительный отбел образца для исключения погрешностей, связанных с неоднородностью структуры. Использование спектроанализатора OBLF QSN 750 II позволяет точно определить спектральный состав материала, что критически важно для контроля качества.

Для анализа микроструктуры применяется оптический микроскоп ЕРІТТР–2, принцип работы которого основан на преломлении и отклонении световых лучей. Несмотря на ограничения, связанные с дифракцией света, данный метод обеспечивает достаточную детализацию для оценки соотношения шаровидного и вермикулярного графита, а также металлической основы. Механические свойства материала, такие как твердость, предел

прочности и относительное удлинение, определяются с использованием статических методов (Бринелля, Роквелла, Виккерса) и разрывных испытательных машин (Amsler 20SZBDA, P–20). Эти испытания проводятся в соответствии с ГОСТ 9012 и ГОСТ 1497–84, что гарантирует соответствие результатов стандартам. Для оценки внутренних несплошностей и анализа разрушений применяются неразрушающие методы контроля (рентгеновский аппарат ЭКСТРАВОЛЬТ 225) и фрактографический анализ (микроскопы Stemі 2000С и Scios 2 LoVac). Эти методы позволяют выявить дефекты и установить причины разрушений, что важно для дальнейшей оптимизации материала.

Особое внимание уделено технологии производства чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом (ВЧШВГ). Основным методом модифицирования расплава в условиях АО «АВТОВАЗ» является «заливка сверху», которая, несмотря на упрощенную схему, обеспечивает необходимый уровень сфероидизации графита. Отличие производства ВЧШВГ от ВЧШГ заключается в немодифицировании расплава, что требует точного контроля параметров процесса.

Проведенные исследования и испытания направлены на установление норм для ВЧШВГ, используемого в производстве средненагруженных деталей автомобилей. Полученные данные будут включены во внутренний стандарт АО «АВТОВАЗ», что обеспечит контроль качества и соответствие материала техническим требованиям.

3 Применение гибридного высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом

При изучении нормативной документации, а именно ГОСТ 7293, выявлено упоминание ВЧ с пометкой «ВЧ35 и ВЧ40 с вермикулярным графитом», где описаны только требования к относительному удлинению $\delta \geq 1\%$. Для применения материала, в условиях массового производства, важно понимание поведения материала в разных условиях, с разной концентрацией химических элементов и какими могут быть механические свойства материала, если они не нормированы технической документацией. В результате чего было принято решение о полном изучении механических характеристик материала при различном соотношении шаровидного графита к вермикулярному в микроструктуре и стандартизации ВЧШВГ.

На основании методики 3D моделирования поведения материала в деталях, «ВЧШВГ, исследуемый в данной работе, может быть применен для производства следующих средненагруженных, и в некоторых случаях термонагруженных, автомобильных деталей. Некоторые детали представлены на рисунках 23–26:

- кронштейн крепления заднего тормоза / правой опоры/ правой/левой опоры двигателя/ кронштейна генератора;
- коллектор выпускной;
- картер редуктора заднего моста;
- крышка подшипника дифференциала заднего моста;
- маховик.

Основанием для данного предположения являются прочностные и пластические требования к материалу средне– и термонагруженных деталей,

а именно $\sigma_b \geq 400$ МПа и $\delta \geq 1\%$ » [5]. Замена ВЧ на описанных выше деталях может быть проведена на ВЧШВГ, так как прочностной расчет по математической модели детали, на примере детали «Кронштейн крепления заднего тормоза» [22], показал схожие их механические характеристики и достижение ВЧШВГ требуемых прочностных и пластических характеристик к материалу для средне- и тремонагруженных деталей.



Рисунок 23 – Внешний вид детали
«Кронштейн крепления заднего тормоза» [22]

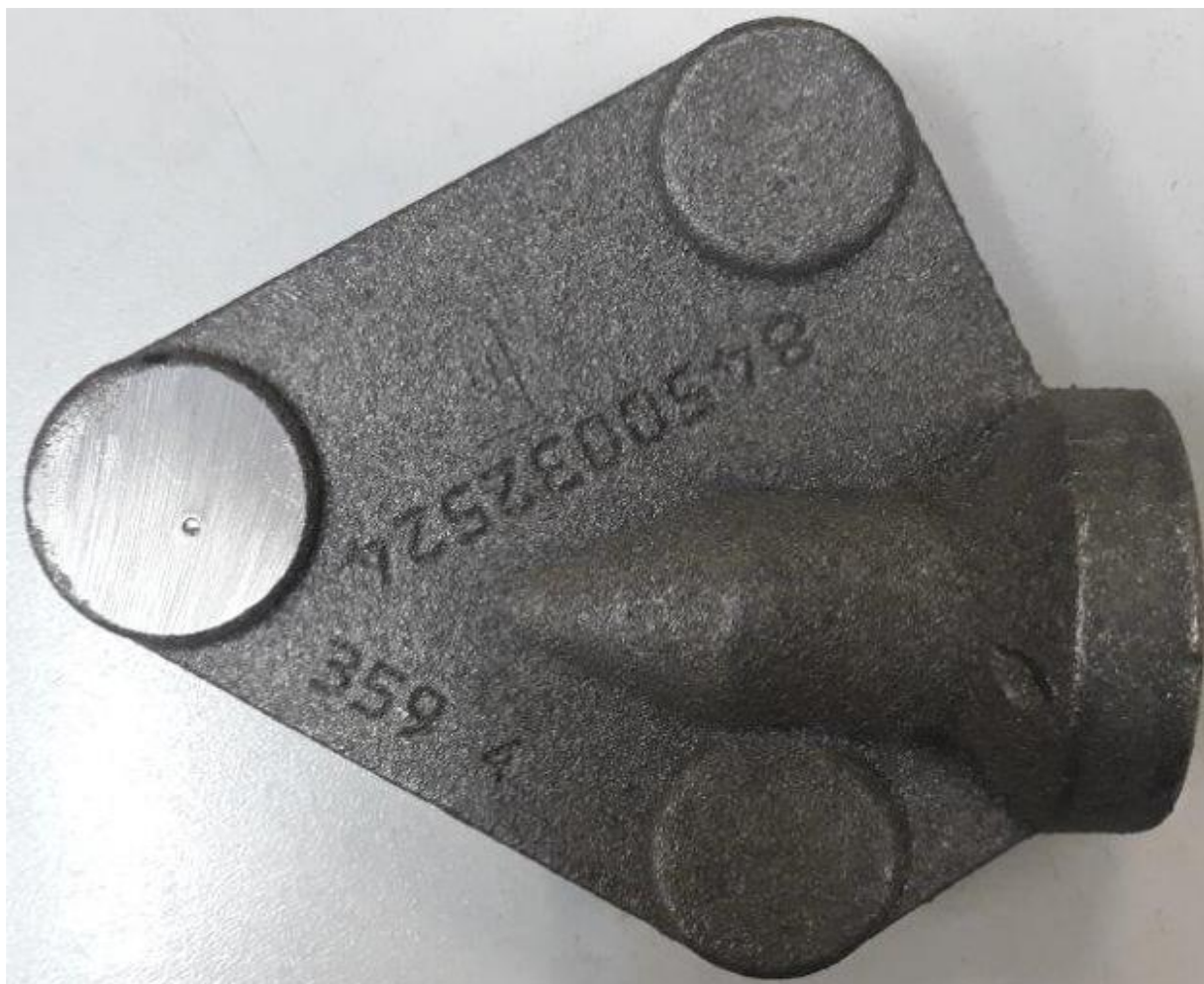


Рисунок 24 – «Внешний вид детали
«Кронштейн левой опоры подвески двигателя»» [22]



Рисунок 25 – «Внешний вид детали
«Коллектор выпускной»» [22]



Рисунок 26 – «Внешний вид отливки детали
«Картер редуктора заднего моста»» [22]

В данном разделе рассмотрены вопросы применения ВЧШВГ в производстве автомобильных деталей. Анализ нормативной документации, в частности ГОСТ 7293, показал, что существующие стандарты не в полной мере охватывают требования к механическим свойствам материала, особенно при различном соотношении форм графита в структуре. Это обусловило необходимость детального изучения характеристик ВЧШВГ для его дальнейшей стандартизации и внедрения в массовое производство.

Исследования, включая 3D-моделирование поведения материала, подтвердили возможность использования ВЧШВГ для изготовления средненагруженных и термонагруженных деталей, таких как кронштейны крепления тормозов и опор двигателя, выпускные коллекторы, картеры редукторов и другие детали. Критически важными для такого применения являются прочностные и пластические свойства материала, в частности предел прочности при растяжении и относительное удлинение.

Результаты прочностных расчетов, выполненных на примере детали «Кронштейн крепления заднего тормоза», продемонстрировали соответствие характеристик ВЧШВГ требованиям, предъявляемым к материалам для прочностных и пластических характеристик. Это позволяет рассматривать ВЧШВГ в качестве перспективной замены традиционного высокопрочного чугуна марки ВЧ50 в ряде узлов автомобильных деталей.

4 Результаты исследований гибридного высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом и их анализ

4.1 Результаты химического анализа исследуемого материала и разработка требования к химическому составу

В рамках настоящей работы проведены исследования по стандартизации нового материала – высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом (ВЧШВГ). Экспериментальная часть включала производство опытной партии отливок средненагруженных деталей на чугунолитейном производстве АО «АВТОВАЗ».

Путем сфероидизирующей обработки расплава по технологии модифицирования «заливка–сверху», характеризующаяся как одна из наиболее распространённых технологий ковшевого сфероидизирующего модифицирования, подробнее описанная в разделе 3, посредством спектрального анализа получен следующий химический состав, таблица 6. «На основании полученных результатов, по определению массовой доли химического элемента в составе закристаллизованных отливок, определены нормативные требования к химическому составу ВЧШВГ, таблица 7.

Таблица 6 – Фактический химический состав отливок из ВЧШВГ

Номер партии	Содержание химических элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg
1	3,59	2,30	0,32	0,022	0,007	0,054	0,25	0,022
2	3,55	2,36	0,32	0,021	0,007	0,084	0,21	0,020
3	3,58	2,37	0,31	0,021	0,005	0,046	0,23	0,025
4	3,50	2,30	0,34	0,025	0,008	0,061	0,20	0,031
5	3,59	2,40	0,30	0,020	0,005	0,049	0,23	0,023
6	3,70	2,53	0,32	0,022	0,008	0,069	0,24	0,030
7	3,62	2,26	0,34	0,020	0,006	0,053	0,34	0,022
8	3,57	2,40	0,31	0,022	0,008	0,052	0,21	0,037
9	3,56	2,33	0,35	0,021	0,008	0,070	0,25	0,034
10	3,78	2,34	0,28	0,020	0,010	0,044	0,27	0,040
11	3,62	2,27	0,27	0,020	0,010	0,043	0,26	0,023
12	3,57	2,28	0,31	0,022	0,007	0,053	0,19	0,020
13	3,60	2,42	0,31	0,025	0,008	0,049	0,20	0,038
14	3,58	2,40	0,33	0,023	0,009	0,045	0,15	0,030
15	3,60	2,36	0,31	0,022	0,008	0,046	0,15	0,027
16	3,55	2,40	0,29	0,022	0,006	0,040	0,18	0,027
17	3,55	2,40	0,29	0,022	0,007	0,040	0,18	0,037
Диапазон	3,50– 3,78	2,26– 2,53	0,27– 0,35	0,020– 0,025	0,005– 0,010	0,043– 0,084	0,15– 0,34	0,02– 0,04

Таблица 7 – Требования к химическому составу расплава чугуна ВЧШВГ в печи ожидания

Химический элемент	C	Si	Mn	S	Cr	Cu	Sn
Содержание%	3,60–3,95	1,85–2,00	≤0,40	≤0,012	≤0,07	≤0,20	≤0,02

Определенные нормативные требования к химическому составу легли в основу дальнейшей стандартизации материала» [5,22]. Анализ фактического химического состава показал, достижение стабильности технологического процесса с соблюдением требований возлежании последствий описанных в разделе 2.1. для получения гибридного высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом марки ВЧШВГ40–1, посредством технологического процесса модифицирования расплава чугуна «заливка–сверху», путем уменьшения навески ферросиликомагнезиевого сфероидизирующего модификатора по сравнению с количеством вводимого модификатора для получения ВЧ марки ВЧ50.

4.2 Результаты исследований механических свойств, структуры и общие требования к материалу

После получения отливок деталей, на примере детали «Кронштейн крепления заднего тормоза», исследованы его структурные составляющие, а именно металлическая основа и оценены графитовые включения по ГОСТ 3443–87, таблица 8. Помимо стандартной процедуры оценивания степени сфероидизации графитовых включений и металлической основы, в отливках, проведен анализ долевого соотношения включений графита, который показал, что соотношение шаровидного графита к вермикулярному составляет 70...95% шаровидного графита и 5...30% вермикулярного графита, таблица 9.

Таблица 8 – Результаты оценки микроструктуры отливок деталей «Кронштейн крепления заднего тормоза» [5,22]

Образец	Металлическая основа, %			Степень сфероидизации графита, %
	перлит	феррит	цементит	
1	30	70	0	ВГф2; ВГ ф3 – 30 ШГф4; ШГф5 – 70
2	35	65	0	ВГф2; ВГФ3 – 45 ШГф4; ШГф5 – 55
3	35	65	0	ВГф2; ВГФ3 – 45 ШГф4; ШГф5 – 55

Таблица 9 – Определение процентного соотношения графитовых включений в отливках из ВЧШВГ

Тип граф. включ.	Номер партии																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ШГ, %	75	80	90	80	80	90	80	70	90	95	90	80	90	80	75	95	95
ВГ, %	25	20	10	20	20	10	20	30	10	5	10	20	10	20	25	5	5
Диапазон 70–95/5–30																	

Результаты определения долевого соотношения компактных форм графита, а именно шаровидной и вермикулярной в таблице 9, показали, что по

данному соотношению и количеству шаровидного графита ВЧШВГ накладывается на область по количеству шаровидного графита в ВЧ, однако выступает за нее в меньшую сторону, по фактическим показателям, рисунок 16. Определение положения ВЧШВГ проводилось путем сравнительного анализа микроструктуры ВЧШВГ, ВЧ и ЧВГ металлографическим методом на шлифах не подвергнутых травлению, рисунки 27 – 30.

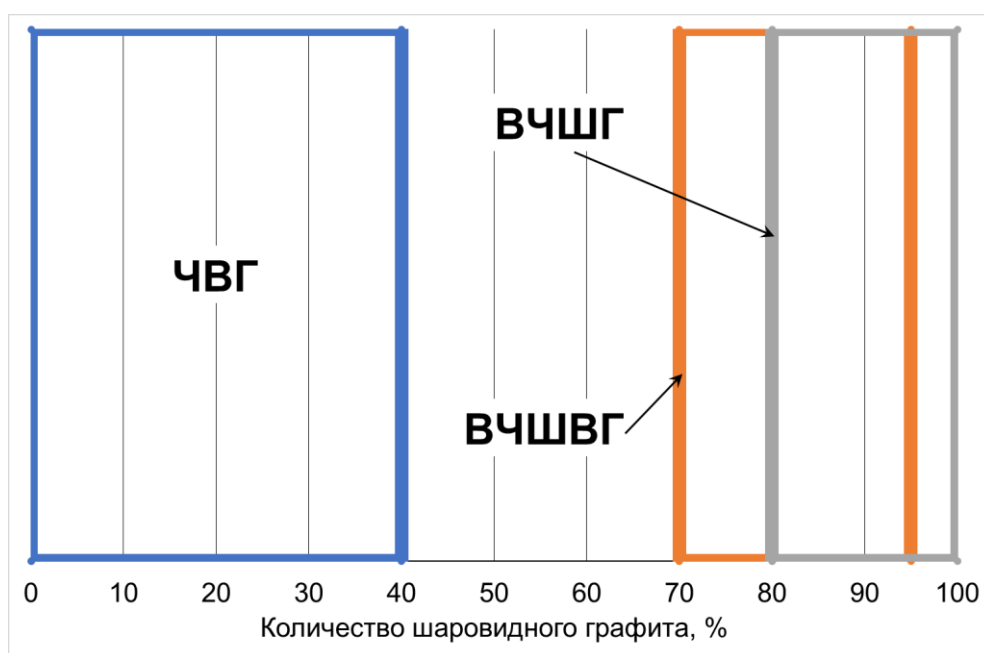


Рисунок 27 – Фактическое положение ВЧШВГ по содержанию шаровидного графита в микроструктуре



Рисунок 28 – Микроструктура ЧВГ,
не травлено

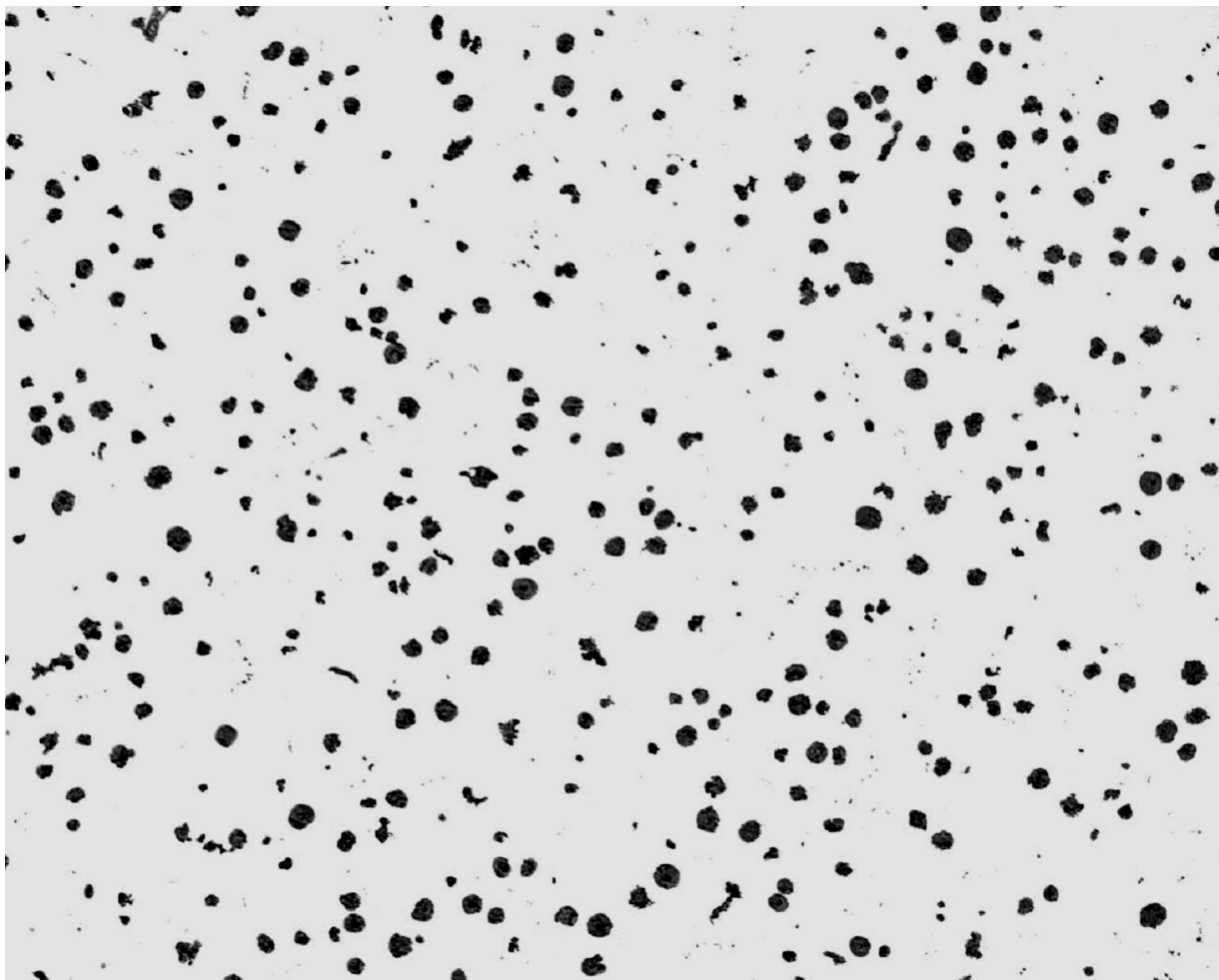


Рисунок 29 – Микроструктура ВЧШГ,
не травлено

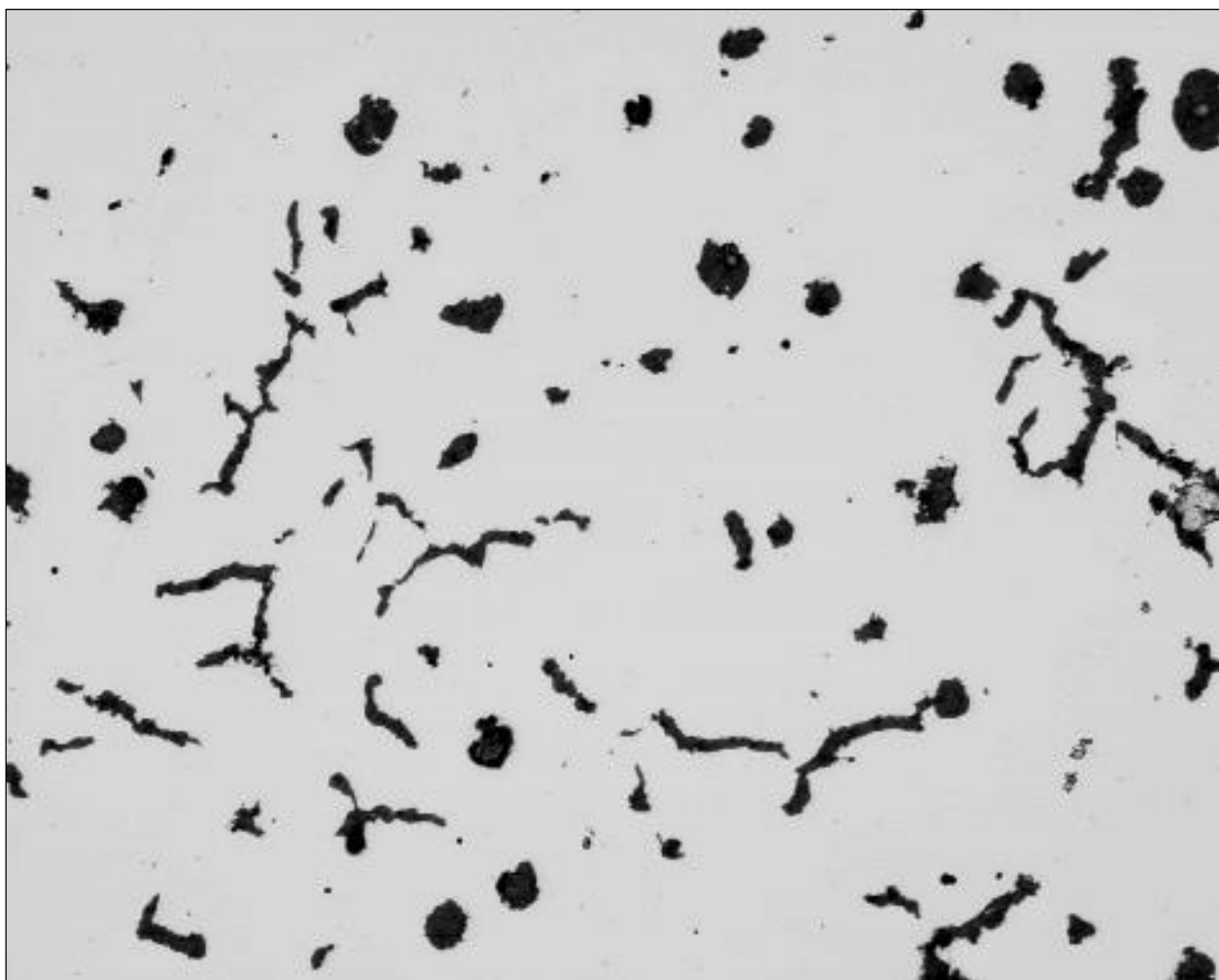


Рисунок 30 – Микроструктура ВЧШВГ
не травлено

Требования к соотношению шаровидного графита к вермикулярному в ВЧШВГ не выдвигаются, по сравнению с ЧВГ и ВЧШГ, что и является его главной особенностью. Так как при получении нами иного соотношения шаровидного графита к вермикулярному, например 40–60/60–40 (в среднем 50/50), мы получим следующие механические характеристики в сравнении с другими типами конструкционных графитизированных чугунов, а именно ВЧ, ЧВГ и ковкого чугуна (КЧ), рисунки 31, 32.

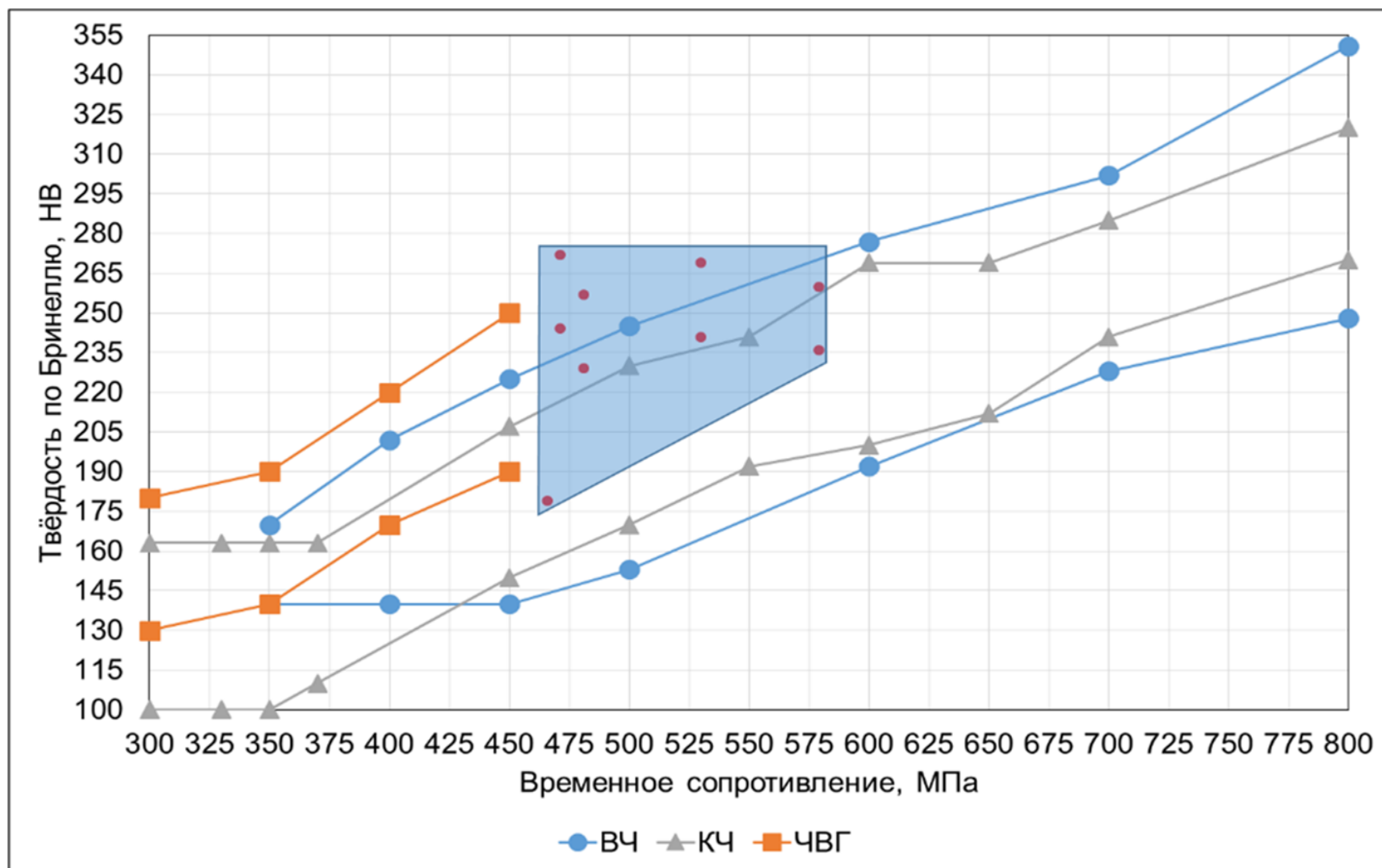


Рисунок 31 – «Область минимальных значений твёрдости по Бринеллю и временного сопротивления для ВЧ, КЧ, ЧВГ и ВЧШВГ» [5,22]

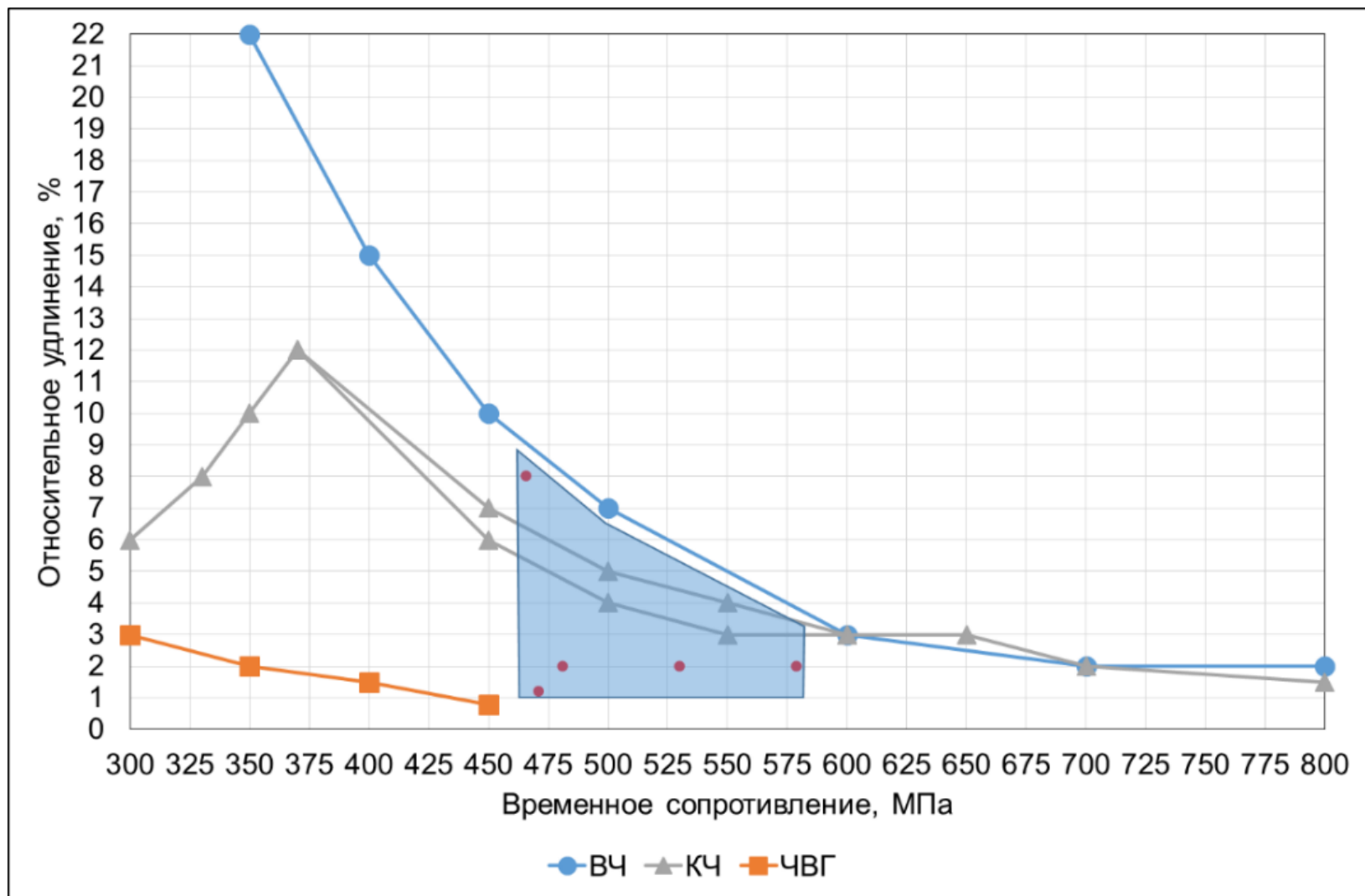


Рисунок 32 – «Область минимальных значений временного сопротивления и относительного удлинения для ВЧ, КЧ, ЧВГ и ВЧШВГ [5,22]

По результатам анализа представленных графиков можно сделать следующие выводы:

- по временному сопротивлению данная марка превосходит ЧВГ;
- минимальные значения твёрдости по Бринеллю соответствуют средним значениям для КЧ и ВЧШГ, а максимальные – наибольшим для ВЧШГ;
- область значений относительного удлинения находится между КЧ и ЧВГ» [5,22].

Фактические механические свойства, таблица 10, фактический химический состав, таблица 6, при соотношении шаровидного графита к вермикулярному 8–35/65–92% позволяет идентифицировать данный вид чугуна как ковкий чугун марки КЧ45–6.

Таблица 10 – Фактические механические свойства ВЧШВГ марки ВЧШВГ40–1

Номер партии	Свойства		
	НВ _{ср}	σ_b , МПа	δ , %
1	207	451	6,0
2	207	461	6,0
3	190	461	6,5
4	199	451	6,0
5	196	461	6,5
6	199	466	7,0
7	200	486	12,0
8	207	491	8,5
9	192	491	12,0
10	182	491	8,5
11	191	500	7,5
12	177	476	9,5
13	198	481	9,0
14	178	491	12,0
15	180	471	9,5
16	202	456	12,0
17	193	471	13,5
Диапазон	177–207	451–500	6,0–13,5

При проведении дальнейшего сопоставительного анализа ВЧШВГ и КЧ по основным ключевым свойствам можно сделать следующие выводы:

- по прочностным характеристикам ВЧШВГ находится на уровне с КЧ;
- ВЧШВГ обладает более низким относительным удлинением по сравнению с КЧ;
- концентрации напряжений в ВЧШВГ могут быть эквиваленты влиянию хлопьевидного графита в КЧ, при конкретном соотношении шаровидного графита к вермикулярному;
- предел прочности, усадка и обрабатываемость резанием в ВЧШВГ имеет схожие показатели по сравнению с КЧ;
- литейные свойства ВЧШВГ и толщина стенки в получаемых отливках из ВЧШВГ имеет более положительную динамику в сравнении с КЧ.

Однако, «соотношение шаровидного графита к вермикулярному 70...95/5...30%, при идентичной прочности и пластичности ВЧШВГ и КЧ45–6, которые в одном случае обеспечиваются ферритно–перлитной металлической основой с высокой твердостью, а в другом перлитно–ферритной с низкой твердостью, оказывает большее надрезающее, разупрочняющее влияние, чем хлопьевидный графит в КЧ» [5,22].

На основании проведенных исследований и полученных результатах в рамках АО «АВТОВАЗ» проведена стандартизация гибридного высокопрочного чугуна марки ВЧШВГ40–1, который включен в СТО «Марки графитизированных чугунов для отливок деталей автомобиля. Состав, структура, свойства» [5] с требованиями, представленными в таблице 11. Сравнение структурных и механических характеристик приведено в таблице 12.

Таблица 11 – Технические требования к ВЧШВГ марки ВЧШВГ40–1 по структуре и механическим свойствам

Механические свойства			Микроструктура			
σ_b , МПа	δ , %	НВ	Шаровидный/ вермикулярный графит	Пластинчатый графит	Феррит/перлит	Цементит
≥ 400	≥ 1	170–250	не оговаривается	не допускается	не оговаривается	$\leq 5\%$

Таблица 12– Параметры марки ВЧШВГ40–1 в сравнении с близкими марками других типов чугунов

Марка	Механические свойства			Микроструктура			
	σ_b , МПа	δ , %	НВ	Графит	ПГ	Ф/П	Ц, %
ВЧШВГ40–1	≥ 400	≥ 1	170–220	ШГ/ВГ не оговаривается	Не допускается	Не оговаривается	≤ 5
ЧВГ40	≥ 400	≥ 1	170–220	$\text{ШГ} \leq 40\% / \text{ВГ} \geq 60\%$			
ВЧ40	≥ 400	≥ 15	140–202	$\text{ШГ} \geq 90\%$		$\Phi > \Pi$	
ВЧ50	≥ 500	≥ 7	153–245	$\text{ШГ} \geq 80\%$		$\Phi > \Pi$	
КЧ45–6	≥ 450	≥ 6	150–207	ХГ	–	$\Phi > \Pi$	–

Проведенные исследования высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом (ВЧШВГ) позволили установить ключевые закономерности, связывающие химический состав, микроструктуру и механические свойства материала. Анализ химического состава расплава подтвердил стабильность технологического процесса, при этом массовая доля магния находилась в диапазоне 0,02–0,04%, что обеспечило формирование гибридной структуры графита. Металлографические исследования выявили соотношение шаровидного и вермикулярного графита в пределах 70–95% и 5–30% соответственно, которое при идентичной прочности и пластичности ВЧШВГ и КЧ45-6 оказывает большее надрезающее влияние на металлическую основу, чем хлопьевидный графит в КЧ.

Механические испытания продемонстрировали, что временное сопротивление (σ_b) варьируется в диапазоне 451–500 МПа, относительное

удлинение (δ) — от 6,0 до 13,5%, а твердость по Бринеллю (НВ) — 177–207. Эти показатели соответствуют характеристикам ковкого чугуна марки КЧ45–6, однако ВЧШВГ обладает преимуществами в литейных свойствах и обрабатываемости. Особое значение имеет отсутствие жестких ограничений на соотношение форм графита в стандарте, что позволяет адаптировать материал под конкретные эксплуатационные условия.

На основании полученных данных разработаны нормативные требования к ВЧШВГ40–1, включенные в СТО АО «АВТОВАЗ». Стандартизация материала обеспечивает контроль качества и воспроизводимость свойств, что создает основу для его применения в производстве средненагруженных деталей автомобиля. Результаты работы подтверждают перспективность ВЧШВГ как альтернативы традиционному высокопрочному чугуну марки ВЧ50, сочетающей прочностные характеристики с технологичностью и экономической эффективностью.

Заключение

Проведенное исследование посвящено комплексному изучению гибридного высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом (ВЧШВГ) и его стандартизации в рамках АО «АВТОВАЗ». Работа охватывает широкий спектр вопросов, начиная от анализа научных публикаций и патентной документации до разработки нормативных требований к материалу. Результаты исследования имеют значительную научную и практическую ценность, что подтверждается внедрением марки ВЧШВГ40–1 во внутренний стандарт предприятия.

В первом разделе проведен детальный анализ классификации и эксплуатационных характеристик чугунов, используемых в автомобилестроении. Установлено, что традиционные материалы, такие как серый чугун (СЧ), ковкий чугун (КЧ) и высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ), обладают рядом ограничений, связанных с их механическими свойствами, технологичностью и экономической эффективностью. Внимание уделено чугуну с вермикулярным графитом (ЧВГ), который сочетает преимущества СЧ и ВЧШГ, но также имеет недостатки, такие как низкое относительное удлинение. Анализ показал, что гибридный чугун с комбинированной структурой графита (ВЧШВГ) может стать перспективной альтернативой для средненагруженных деталей автомобиля, устраняя недостатки существующих материалов.

Во втором разделе описаны методики и оборудование, использованные для изучения структуры и свойств ВЧШВГ. Применение спектрального анализа, металлографических исследований, механических испытаний и неразрушающего контроля позволило получить достоверные данные о химическом составе, микроструктуре и механических характеристиках

материала. Особое внимание уделено технологии ковшевого модифицирования «заливка сверху», которая обеспечила стабильное соотношение шаровидного и вермикулярного графита в структуре чугуна. Использование современного оборудования, такого как спектроанализатор OBLF QSN 750 II, позволило провести высокоточные измерения и анализ.

Третий раздел посвящен практическому применению ВЧШВГ в производстве средненагруженных деталей автомобиля. На основе 3D-моделирования подтверждена возможность замены традиционных материалов на ВЧШВГ для таких деталей, как кронштейны крепления тормозов, выпускные коллекторы и картеры редукторов. Прочностные расчеты показали, что материал соответствует требованиям к прочности и пластичности, предъявляемым к средне- и термонагруженным деталям. Это открывает перспективы для оптимизации технологических процессов и снижения себестоимости производства.

Четвертый раздел является ключевым, так как в нем представлены результаты экспериментальных исследований и их анализ. Химический анализ расплава подтвердил стабильность технологического процесса, а при исследовании микроструктуры выявлено фактическое соотношение шаровидного и вермикулярного графита в диапазоне 70–95% и 5–30% соответственно. Механические испытания показали, что ВЧШВГ марки ВЧШВГ40–1 соответствует требованиям по временному сопротивлению ($\sigma_b \geq 400$ МПа) и относительному удлинению ($\delta \geq 1\%$). Соотношение шаровидного графита к вермикулярному 8–35/65–92% позволяет идентифицировать данный вид чугуна как ковкий чугун марки КЧ45–6. При этом материал демонстрирует лучшие литейные свойства и обрабатываемость, что делает его более предпочтительным для массового производства.

На основании проведенных исследований разработаны нормативные требования к ВЧШВГ40–1, которые включены в СТО АО «АВТОВАЗ». Материал стандартизирован по химическому составу, микроструктуре и механическим свойствам, что обеспечивает контроль качества и воспроизводимость результатов. Особенностью стандарта является отсутствие жестких требований к соотношению форм графита, что позволяет гибко адаптировать материал под конкретные задачи. Это отличает ВЧШВГ от традиционных чугунов, где такие требования строго регламентированы.

Первая задача, связанная с анализом научных публикаций и патентной документации, позволила выявить ключевые тенденции в развитии графитизированных чугунов и обосновать актуальность исследования. Вторая задача, посвященная технологическим и экономическим предпосылкам стандартизации, подтвердила целесообразность внедрения ВЧШВГ в производство. Третья задача, включающая подбор методик исследований, обеспечила достоверность и точность полученных данных. Четвертая задача, направленная на разработку нормативных требований, завершилась успешной стандартизацией материала.

Проведенная работа открывает направления для дальнейших исследований, таких как изучение влияния различных соотношений графитовых включений на эксплуатационные характеристики, оптимизация технологических параметров модифицирования и расширение области применения ВЧШВГ в других отраслях машиностроения. Также актуальным остается вопрос разработки международных стандартов для данного материала, что позволит повысить его конкурентоспособность на мировом рынке.

Результаты работы подтверждают, что гибридный высокопрочный чугун с шаровидным и вермикулярным графитом является перспективным

материалом для автомобилестроения. Его уникальные свойства, сочетающие прочность, пластичность и технологичность, позволяют рассматривать ВЧШВГ40–1 в качестве замены традиционных чугунов для средненагруженных деталей, таблица 13.

Таблица 13 – Технические требования к ВЧШВГ марки ВЧШВГ40–1 для СТО «Марки графитизированных чугунов для отливок деталей автомобиля. Состав, структура и свойства»

Механические свойства			Микроструктура			
σ_b , МПа	δ , %	НВ	Шаровидный/ вермикулярный графит	Пластинчатый графит	Феррит/перлит	Цементит
≥ 400	≥ 1	170–250	не оговаривается	не допускается	не оговаривается	$\leq 5\%$

Стандартизация материала в рамках АО «АВТОВАЗ» создает основу для его широкого внедрения в производство, что соответствует стратегическим задачам импортозамещения и повышения конкурентоспособности отечественной промышленности.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Антипов А. В., Ванин В. А. Перспективные материалы в автомобилестроении: высокопрочные чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2018. – № 5. – С. 34–39.
2. Болдырев Д. А. Технологические особенности получения различных марок высокопрочного чугуна // XI Съезд литейщиков России: Труды Съезда. – Екатеринбург: Уралвагонзавод, 2013. – С. 33–38.
3. Болдырев Д. А., Давыдов С. В. Графитизированные чугуны с нерегламентируемыми формами графитных включений // Литейное производство. – 2015. – № 4. – С. 2–6.
4. Болдырев Д. А., Давыдов С. В., Попова Л. И., Прасолов С. Г. Гибридный чугун с шаровидным и вермикулярным графитом для средненагруженных деталей автомобиля // Литейщик России. – 2022. – № 1. – С. 6–10.
5. Болдырев Д. А., Долоскова Н. К. Конструкционный высокопрочный чугун со смешанным шаровидным и вермикулярным графитом // Сталь. – 2025. – № 4. – С. 25–30.
6. Болдырев Д. А., Попова Л. И., Давыдов С. В. Высокопрочный чугун с шаровидным и вермикулярным графитом – оптимальный материал для автомобилестроения // Литейное производство. – 2017. – № 5. – С. 2–4.
7. Болдырев Д. А., Попова Л. И., Прасолов С. Г., Давыдов С. В. О качественной идентификации чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом // Литейщик России. – 2019. – № 11. – С. 20–25.
8. Болдырев Д. А., Попова Л. И., Прасолов С. Г., Давыдов С. В., Токарев А. А. Высокопрочный чугун с шаровидным и вермикулярным графитом – рациональная альтернатива ковкому чугуну // Литейщик России. – 2021. – № 3. – С. 12–15.

9. Болдырев Д. А., Сафронов Н. Н. Технологические особенности получения чугунов с компактным графитом // Литейное производство. – 2015. – № 8. – С. 2–5.
10. Болдырев Д. А., Прасолов С. Г., Попова Л. И. Гибридный высокопрочный чугун с шаровидным и вермикулярным графитом как альтернатива ковкому чугуну // Литейное производство. – 2023. – № 2. – С. 12–16.
11. Boonmee S., Stefanescu D. M. On the crystallization of compacted graphite in cast iron // International Journal of Metalcasting. – 2013. – Vol. 7, № 2. – P. 7–16.
12. Chisamera M., Riposan I., Stan S., White D. Graphite nucleation control in Mg-treated cast iron for production of compacted graphite iron // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2012. – Vol. 21, № 7. – P. 1352–1360.
13. ГОСТ 1215–79. Ковкие чугуны. Марки.
14. ГОСТ 1412–85. Чугуны с пластинчатым графитом для отливок. Марки.
15. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
16. ГОСТ 28394–89. Чугуны с вермикулярным графитом для отливок. Марки.
17. ГОСТ 3443–87. Чугуны. Методы металлографического анализа структуры.
18. ГОСТ 7293–85. Чугуны высокопрочные с шаровидным графитом для отливок. Марки.
19. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю.
20. Давыдов С. В., Болдырев Д. А., Сканцев В. М., Попова Л. И. Конструкционные чугуны с компактными формами графита // Вестник Брянского государственного технического университета. – Брянск: БГТУ, 2015. – Вып. 3. – С. 24–29.

21. Dawson S., Schroeder T. Compacted graphite iron – a material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads // International Journal of Metalcasting. – 2009. – Vol. 3, № 2. – P. 7–18.
22. Долоскова Н. К., Болдырев Д. А. Чугун с комбинированным шаровидным и вермикулярным графитом: ключевые особенности, технические требования и стандартизации // Литейщик России. – 2024. – № 11. – С. 13–20.
23. Дорошин Б. А., Крылов В. Г. Технология выплавки высокопрочного чугуна для автомобильных деталей // Литейное производство. – 2019. – № 3. – С. 12–16.
24. Elliott R. Compacted Graphite Iron – A Material Solution for Modern Engine Design // International Journal of Cast Metals Research. – 2002. – Vol. 15. – P. 215–222.
25. Górny M., Kawalec M. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of compacted graphite iron // Journal of Materials Science. – 2014. – Vol. 49, № 20. – P. 7044–7054.
26. Guesser W. L., Schroeder T., Dawson S. Compacted graphite iron: mechanical and physical properties for engine design // SAE Technical Papers. – 2015. – № 2015–01–1290. – P. 1–10.
27. Гиршович Н. Г. Чугуны с шаровидным графитом. – М.: Машиностроение, 2015. – 280 с.
28. Иванов С. К., Петров В. М. Современные методы модифицирования чугунов в автомобилестроении // Вестник машиностроения. – 2020. – № 7. – С. 45–49.
29. Кенис М. С., Болдырев Д. А. Чугун с вермикулярным графитом в транспортном машиностроении // Машиностроение. – 2015. – С. 3–5.
30. Козлов И. С. Влияние технологии выплавки на свойства чугуна с вермикулярным графитом // Металлы. – 2017. – № 4. – С. 56–61.
31. Кузнецов Б. Л. Введение в литейное материаловедение чугуна // Машиностроение. – 1995. – С. 133–142.

32. Lacaze J., Sertucha J. Effect of composition and cooling rate on the formation of vermicular graphite in cast iron // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2017. – Vol. 48, № 5. – P. 2265–2276.

33. Патент РФ № 2007466 С1. Способ получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / Смирнов В. П., Кузнецов А. Н.; заявитель и патентообладатель НИИ "Металлургия". – № 5023456/02; заявл. 12.05.1993; опубл. 15.02.1994, Бюл. № 5. – 5 с.

34. Патент РФ № 2134302. Способ получения чугуна с вермикулярным графитом / Михайлов Г. Г., Радя В. С.; заявитель Уральский политехнический институт. – № 96123456; заявл. 10.03.1997; опубл. 10.08.1999, Бюл. № 22. – 6 с.

35. Патент РФ № 2585912 С1. Способ получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / Сидоров А. В., Крючков Н. П.; заявитель ОАО "АВТОВАЗ". – № 2015145678; заявл. 10.12.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16. – 7 с.

36. Попов А. А. Технологические аспекты производства автомобильных деталей из высокопрочного чугуна // Литейщик России. – 2021. – № 2. – С. 18–22.

37. Рахштадт А. Г. Термическая обработка чугунов. – М.: Metallurgia, 2016. – 320 с.

38. Rivera G., Boeri R., Sikora J. Nucleation and growth of graphite in compacted graphite cast iron // ISIJ International. – 2003. – Vol. 43, № 11. – P. 1791–1797.

39. Сканцев В. М. Чугуны с компактным графитом: структура и свойства // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2019. – № 8. – С. 25–30.

40. Stefanescu D. M. Solidification of casting alloys: compacted graphite cast iron // ASM Handbook. – 2008. – Vol. 15. – P. 365–374.

41. Suarez R., Fernandez B., Menendez J. L., Rodriguez J. A. Influence of inoculation on the formation of vermicular graphite in cast iron // *Materials Science and Technology*. – 2010. – Vol. 26, № 8. – P. 927–932.
42. Терентьев В. Ф. Материалы для автомобилестроения: современные тенденции // *Автомобильная промышленность*. – 2022. – № 1. – С. 15–19.
43. Федоров В. П., Юрченко Ю. В. Применение чугуна с вермикулярным графитом в двигателестроении // *Двигателестроение*. – 2018. – № 4. – С. 40–45.
44. Чугуны в современном машиностроении / Под ред. В. С. Иванова. – М.: Машиностроение, 2017. – 360 с.
45. Winter P., Schumacher P., Ludwig T. H. Influence of rare earth elements on the formation of compacted graphite in cast iron // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 142. – P. 424–433.