

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)

Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических материалов

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Исправление литейных дефектов чугуна сваркой и пайкой»

Обучающийся

И.Г. Галушкин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

к.т.н., доцент А.Ю. Краснопевцев

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

Тольятти 2025

Содержание

Введение	3
1 Способы ремонтной сварки чугунных деталей	6
1.1 Особенности сварки чугуна	7
1.1.1 Основные затруднения при сварке	7
1.1.2 Влияние величины и формы графита на свариваемость чугуна.....	8
1.2 Области применения сварки чугуна.....	8
1.3 Классификация способов сварки чугуна	9
1.4 Сварка и наплавка при ремонте и восстановлении чугунных деталей.....	29
2 Методы и способы выполнения ремонтной и восстановительной сварки и пайки.....	36
3 Исправление литейных дефектов отливок блоков цилиндров сваркой и пайкой	49
3.1 Исправление поверхностных дефектов отливок блоков цилиндров сваркой.....	49
3.2 Исправление сквозных дефектов отливок блоков цилиндров пайков	56
Заключение	66
Список используемой литературы и используемых источников...	68

Введение

Для дальнейшего развития машиностроения нужно обратить внимание на «изобретение и внедрение более новых совершенных существующих на данное время конструкционных материалов, для соединения которых необходимо применять более прогрессивные и уникальные технологические процессы.

В современном машиностроении более 45 % деталей современных узлов машин применяются из литья различных сплавов, а 2/3 деталей выполнены из чугуна различных марок. При этом важно учитывать, что выбор конкретного типа чугуна зависит от требуемых механических характеристик и условий эксплуатации готовых изделий. По прогнозам развития техники, в ближайшем будущем сохранится преобладание производства и потребления чугунного литья в машиностроении и автомобилестроении. Это связано с тем, что литье из чугуна существенно превосходит литье из других сплавов по экономическим, физико-механическим и эксплуатационным свойствам.

Важно отметить, что чугун обладает рядом уникальных характеристик, таких как высокая износостойкость, хорошие демпфирующие свойства и относительная простота обработки. Эти качества делают его незаменимым материалом для многих отраслей промышленности.

В последние годы расширяется применение отливок из различных чугунов (серый чугун с пластинчатым графитом, высокопрочный чугун с шаровидным графитом), продолжает развиваться производство высокопрочных чугунов с шаровидным графитом, идет разработка новых классов легированных чугунов, обладающих особыми физико-механическими свойствами. Эти

материалы открывают новые возможности для создания более долговечных и надежных деталей. В различных отраслях промышленности стала возможной замена деталей из сталей различных марок, цветных сплавов, деталями из чугунов повышенного качества.

С древности для производства металлических изделий и деталей использовалось литье, которое изначально отливали из меди и бронзы, потом научились отливать из чугуна и только после чугунного литья человек освоил литье из стали и других сплавов. Литье, как технологический процесс, выигрывает перед другими способами получения металлических заготовок и изделий по сложности конфигурации, минимальным припускам на обработку резанием, механическим свойствам получаемых заготовок.

Исторически литье развивалось параллельно с прогрессом металлургии, и сегодня этот метод остается одним из самых востребованных в промышленности благодаря своей универсальности и высокой точности.

Большая часть изготовленных при помощи литья заготовок отливок бракуется по причине возникновения дефектов в процессе плавки и формовки. В основном дефекты образуются по причине наличия ошибок в процессе проектирования технологии и несоблюдения технологических рекомендаций производства, которые приводят к нарушению режима литья.

Стоит подчеркнуть, что контроль качества на каждом этапе литейного производства играет решающую роль в минимизации брака. Современные методы неразрушающего контроля позволяют выявлять дефекты на ранних стадиях, что значительно снижает затраты на исправление.

Определению разновидностей дефектов литья и диагностике причин их возникновения, а также разработке методов устранения дефектов посвящены многочисленные труды учёных П.Н. Аксёнова, П.Ф. Василевского, А.И. Вейника, Б.Б. Гуляева, С.П. Дорошенко, Б.В. Рабиновича, Л.И. Кожинского, И.Б. Куманина, Я.И. Медведева, И.А. Мухоморова, В.Д. Орешкина и других отечественных и зарубежных исследователей.

В последнее время очень много успехов в области решения и исправления проблем качества литья из чугуна, однако, брак отливок продолжает оставаться существенным и доходит в ряде случаев до 45 %. Поэтому остро стоит проблема повышения качества и устранения дефектов отливок. Повышение производительности и качества ремонтных работ при исправлении дефектов в отливках чугуна – это актуальная задача» [1].

Цель магистерской работы – разработка способов исправления литейных дефектов отливок блоков цилиндров сваркой и пайкой.

Задачи работы:

1. Проанализировать существующие способы ремонтной сварки чугунных деталей.
2. Рассмотреть особенности сварки чугуна, основные затруднения при сварке, области применения сварки чугуна, классифицировать способы сварки чугуна.
3. Изучить особенности, методы и способы сварки, наплавки и пайки при ремонте и восстановлении чугунных деталей.
4. Предложить для апробации способы ремонтной сварки и пайки для устранения дефектов литейного происхождения в отливках блоков цилиндров.
5. Сделать выводы об эффективности разработанных способов ремонтной сварки и пайки.

1 Способы ремонтной сварки чугунных деталей

«Перлитный чугун представляет собой сплав, в котором» «перлит сочетается с равномерно распределенным мелкозернистым и пластинчатым графитом. Содержание перлита в структуре может варьироваться от 25 до 100 %. Этот вид чугуна обладает повышенной прочностью и пластичностью, поэтому широко применяется для изготовления ответственных деталей и хорошо поддается сварке» [2].

«Перлитная структура определяется химическим составом чугуна, условиями остывания, а также интенсивностью охлаждения сплава в форме. Главный параметр для обеспечения требуемой структуры – варьирование содержания кремния и углерода в углеродном эквиваленте. Величина чистого углерода, который кристаллизуется в виде графита, зависит от интенсивности остывания чугуна, процента кремния и содержания остальных элементов, которые приводят к выделению графита. Если величина кремния выше 4% и обеспечивается малая скорость остывания отливки, то при этом весь углерод кристаллизуется как графит. Кремний тоже обеспечивает очень важное влияние при сварке чугуна при применении материала в виде присадки, имеющего от 3,5 до 4,5% кремния, так как он уменьшает величину растворимости углерода как в жидком, так и в твёрдом состоянии, а также позволяет кристаллизоваться графиту в чистом виде.

Чугуны на перлитно-ферритной металлической основе как правило используются для получения крупногабаритного литья. В структуре таких отливок присутствуют перлит, графит и немного феррита. При этом важно обратить внимание, что свариваемость

перлитно-ферритных чугунов хуже, чем чугунов на чисто перлитной основе» [3].

Ферритные чугуны содержат менее 25% перлита в своей структуре, а большая часть углерода присутствует в виде графита, отделенного от сплава. Такая структура типична для крупных и массивных деталей, а также для деталей, работающих в условиях повышенной тепловой нагрузки на протяжении длительного времени. Сварка этого типа чугуна представляет собой сложный процесс, требующий специальной технологии.

1.1 Особенности сварки чугуна

1.1.1 Основные затруднения при сварке

«При быстром охлаждении сплава, нагретого до 760 °С, часто возникает склонность к образованию твёрдых прослоек. В результате такого процесса образуются промежуточные структуры, такие как мартенсит и тростит, которые обладают высокой твердостью. Это создает определённые трудности при обработке сплава с помощью обычного режущего инструмента.

Из-за недостаточной пластичности чугуна, при сварке возникают трещины из-за неравномерного нагрева изделия. Чем больше разница в температуре между основным металлом и сварным швом, тем выше вероятность трещинообразования. Однако, если деталь перед сваркой равномерно нагреть до 300 °С и выше, опасность трещин значительно снижается.

Во время плавления и затвердевания материала происходит потеря его пластических свойств, а также наблюдается высокая текучесть в состоянии плавления. Переход из твёрдого состояния в

жидкое происходит непосредственно, минуя промежуточное пластическое состояние» [3].

1.1.2 Влияние величины и формы графита на свариваемость чугуна

«Хорошая свариваемость – мелкий пластинчатый или сферообразный графит в чугунах перлитного класса;

Удовлетворительная свариваемость – графитные включения малого и среднего размера. Отдельные включения графита окружены достаточным полем металла, обеспечивающего свариваемость;

Ограниченная свариваемость – крупные включения графита, образующие сплошную сетку. Сложная чугунная отливка может иметь в различных своих частях неодинаковую структуру. Толстые стенки – феррит (медленное охлаждение), тонкие с быстрым охлаждением – мелкозернистые» [3].

1.2 Области применения сварки чугуна

1. «Исправление дефектов литья:

а) дефекты, обнаруживаемые после извлечения отливок из литейных форм в литейном цехе (раковины, недоливы, трещины, рыхлоты, пористость и др.). Большинство дефектов исправляются на специально оборудованных участках;

б) дефекты литья – обнаруживаются в процессе механической обработки (раковины, пустоты, трещины). Исправление – сложная задача, требующая специальных электродов, технологии и квалификации сварщика.

2. Исправление различных повреждений, полученных в процессе эксплуатации:

а) сварка чугуновых деталей на ремонтных заводах с массовой однотипной продукцией (автомобили, тракторы и др.) – это позволяет применять единообразную технологию сварки, тщательно отработанную, обеспечивающую высокое качество сварного соединения;

б) восстановление деталей больших габаритов и веса, вышедших из строя вследствие поломок и износа. Вопрос исправления таких деталей крайне сложен и требует применения специфических способов сварки.

3. Изготовление сварных изделий из отдельных чугуновых отливок методом промежуточного литья или электрошлаковой сваркой (сварно-литые чугуновые изделия). Качество сварного соединения в чугуновых изделиях определяется следующими показателями:

а) обрабатываемость наплавленного слоя (сварного шва) обычным режущим инструментом;

б) одинаковая твёрдость металла шва, зоны термического влияния и основного металла;

в) равнопрочность сварного соединения основному металлу;

г) одинаковый химический состав и структура наплавленного и основного металла» [3].

1.3 Классификация способов сварки чугуна

1. «Горячая сварка чугуна.

1.1. Газовая сварка чугуновой присадкой с применением флюса.

1.2. Газовая сварка с применением присадок из цветных металлов.

1.3. Дуговая сварка угольным электродом с чугунной присадкой.

1.4. Дуговая сварка чугунным электродом.

1.5. Дуговая сварка стальным электродом с тонкой стабилизирующей обмазкой.

1.6. Литейная сварка способом промежуточного литья.

2. Холодная сварка чугуна.

2.1. Дуговая сварка стальным электродом с качественной обмазкой для сварки стали.

2.2. Дуговая сварка стальным электродом со специальной обмазкой для чугуна.

2.3. Дуговая сварка электродами из медно-железных сплавов.

2.4. Дуговая сварка электродами из медно-никелевых сплавов.

2.5. Дуговая сварка электродами из железоникелевых сплавов.

2.6. Газовая низкотемпературная сварка специальной чугунной присадкой.

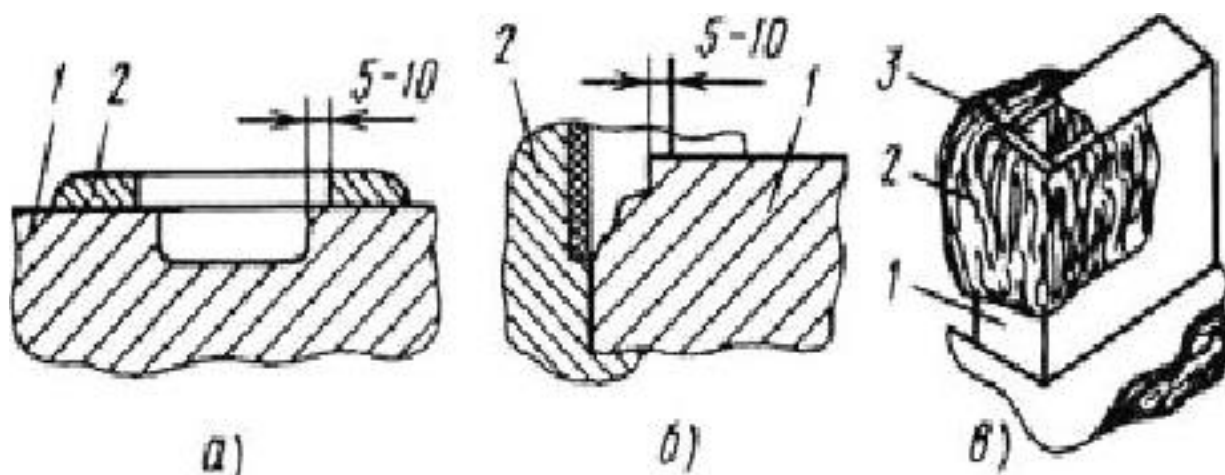
Качество сварного соединения в чугунных изделиях определяется следующими показателями:

- а) обрабатываемость обычным режущим инструментом;
- б) одинаковая твёрдость металла шва, переходных зон и основного металла;
- в) равнопрочность сварного соединения основному металлу;
- г) одинаковый химический состав и структура наплавленного и основного металла» [3].

Горячая сварка чугуна. «Изначальный нагрев перед сваркой позволяет обеспечить варьирование скоростью охлаждения металла наплавки, что обеспечивает исключение формирования структур,

отличающихся твёрдостью и хрупкостью, а также уменьшить напряжённое состояние в конструкции, получаемой сваркой, тем самым исключая трещинообразование» [3]. Для множества деталей хватит нагрева до 400...450 °С, но для деталей, отличающихся сложностью конструкции и/или относящихся к ответственным, необходима повышенная температура от 550 до 600 °С. Для определённости с методом обеспечения нагрева необходимо учитывать особенности производственных условий. В условиях выпуска серийной программы используются печи специализированного типа, включая газовые, горны, конвейерные, электропечи. Для штучных деталей применяются горны временного исполнения, в которых применяется кокс, древесный уголь, газ. Сварка с нагревом должна обеспечиваться только в нижнем положении. Непосредственно перед сваркой требуется обеспечить тщательную зачистку свариваемой зоны от самых разных дефектов и повреждений, и предотвратить неплотность стыковки металла. Высокая температура нагрева металла основы тормозит остывание металла наплавки, поэтому при сварке с нагревом требуется тщательно подготовить зону соединения во избежание стекания жидкого металла (рисунок 1). Формовка, как правило, обеспечивается графитовыми, коксовыми, угольные пластинками. В случае крупногабаритных изделий применяется формовочная смесь, имеющая высокую прочность, которая включает жидкое стекло и кварцевый песок. После завершения формовки требуется основательно высушить форму, медленно увеличивая температуру с 60 до 120°С, после чего нагревать дальше до температуры сварки со скоростью от 120 до 150 °С в час с применением горелок, печей и других устройств нагрева. Мало- и среднегабаритные изделия нагреваются до 300-400 °С, а крупногабаритные – до 500-600 °С.

Индикатор нагрева – возникновение коричнево-красного оттенка. С учётом производственной специфики, например, при ликвидации при литье или ремонте разнообразных дефектов, используются разные способы нагрева и обеспечивающие его устройства. В машиностроительных литейных производствах, характеризующихся массовыми объёмами, наибольшей эффективностью характеризуются печи конвейерного типа. При ремонте самыми удобными являются горны и печи муфельного типа, имеющие открытый кожух. С целью предварительного нагрева больших деталей в условиях единичных ремонтных работ применяются агрегаты временного типа, состоящие из огнеупоров, в частности печи ямного типа, размещённые в цехе в его земляном полу. «Особенность охлаждения после сварки характеризуется массой и габаритами изделия и может длиться от нескольких часов, в том числе, до нескольких дней. С целью создания охлаждения с уменьшенной скоростью после сварки применяются теплоизоляторы – такие материалы как асболисты, шлаковые наполнители, песок и иные материалов. При этом есть возможность обеспечить остывание вместе с горнами и печами для гарантированного торможения охлаждения сварочного шва при обеспечении таких его свойств, когда они будут равным основному металлу» [3].



а - несквозной раковины; б - недолива кромки детали; в - общий вид заформованного дефекта: 1 - деталь; 2 - формовка; 3 - графитовые пластины

Рисунок 1 – Формовка места сварки для горячей сварки чугуна

Базовые сварочные материалы для горячей сварки чугуна приведены в таблице 1.

Ацетиленокислородная сварка чугунных изделий. «Чугун сваривается при использовании обычного пламени. Присадочным материалом являются прутки чугуна марок А и Б (по ГОСТ 2671-70), или прутки чугуна марки ПЧ-1 (таблица 1, 2). Чугунные прутки имеют диаметр 8-16 мм. При сварке чугуна применяется флюс. Флюс используется разных марок, в состав которых входит плавная и безводная бура (прокалённая при 400°С кристаллическая бура, растираемая после остывания в тонкодисперсный порошок). Также в процессе сварки чугуна часто применяется газифлюс БМ-1, представляющий смесь из метанола 25...30% и метилбората 70...75%. Данная смесь помещается во флюсосмеситель специального типа КГФ-3, после чего через него пропускается горячий газ для сварки» [1].

Таблица 1 – Базовые сварочные материалы для горячей сварки чугуна

Наименование	Марка и обозначение	Назначение
Наплавленный металл – серый чугун с перлитно-ферритной структурой		
Прутки чугунные (ГОСТ 2671-70)	А, Б	Для горячей газовой сварки (заварки) и изготовления электродов
Прутки чугунные	ПЧ-1	Для горячей газовой сварки, наплавки (Ø 10...12 мм), изготовления электродов (Ø 12...16). Разработаны с целью улучшения сварочно-технологических свойств прутков и повышения качества наплавленного металла
Электроды чугунные на прутках ПЧ-1, А, Б	ЭЧ-1	Для горячей дуговой сварки наплавки (Ø 12...16 мм)
Наплавленный металл – серый чугун с перлитной структурой		
Прутки чугунные	ПЧС-1 (ПЧ-2)	Для горячей газовой сварки, наплавки, изготовления электродов
Прутки чугунные самофлюсующие	ПЧ-3	Для горячей газовой сварки, наплавки при исправлении дефектов модифицированных чугунов
Электроды чугунные на прутках ПЧС-1	ЭЧ-2	Для горячей дуговой сварки и наплавки
Наплавленный металл – высокопрочный чугун с шаровидным графитом		
Электроды чугунные на прутках ПЧС-2	ЭВЧ-1	Для горячей дуговой сварки-наплавки ванным способом

«Флюс обладает высокой испаряемостью, его пары убираются горючим газом, после чего через специальный рукав вводятся в горелку, в котором они и сгорают. Данный процесс носит название газифлюсовой сварки. Флюс БМ-1 позволяет создать наверху

сварочной ванны шлаковый покров, характеризующийся плотностью и вязкостью. Газосварка чугуна характеризуется преимуществами в технологии в сравнении с иными способами» [1]. Газосварка обеспечивает легкость контроля интенсивности нагрева и величины зон нагрева рядом со сварочным швом, и варьировать интенсивность образования сварочной ванны дополнительным присадочным металлом и интенсивность остывания сварочного шва. Данные способы достаточно часто используются в практике, обеспечивая создание сварочных соединений, имеющих качество, соответствующее качеству металла основы.

«Сварку выполняют по следующей технологии:

- предварительный подогрев сварных кромок горелкой до температуры 750...800 °С;
- обработка нагретой поверхности флюсом;
- дальнейшее повышение температуры кромок сварочной горелкой до 960...1100 °С;
- подача присадочного металла в зону сварки и его разогрев;
- расплавление кромок и присадочного металла с образованием сварочной ванны. Глубину сварочной ванны необходимо регулировать в пределах 3...6 мм. Данный способ применяется обычно для ремонта мелких чугунных деталей» [1].

Таблица 2 – Химический состав чугуна

Марка	Углерод	Кремний	Марганец	Фосфор	Сера	Хром
					не более	
А	3...3,6	3...3,5	0,5...0,8	0,2...0,5	0,08	0,05
Б	3...3,6	3,6...4,8	0,5...0,8	0,3...0,5	0,08	0,05

Сварка угольным или графитовым электродом.

«Использование такого способа сварки позволяет получить повышенную температуру и высокую интенсивность температурного влияния. Сварка ведётся на постоянном токе с использованием электродов, имеющих диаметр 8-20 мм. Сила тока находится в диапазоне 350-800 А. Сила тока определяется диаметром электрода и величиной свариваемого металла. Прутки-присадки из чугуна используются диаметром 6-14 мм. Применяемые при данном процессе флюсы – те же, что и при ведении газовой сварки. Если шов выполнен правильно, то он имеет химсостав, мехсвойства, микроструктуру, близкие к чугуну, полученному литьём» [4].

Флюс при сварке чугуна выполняет следующие функции:

- очищает свариваемую поверхность основного металла от окислов и загрязнений, растворяя их;
- растворяет легкоплавкие соединения;
- защищает расплавленную ванну от окисления;

- увеличивает жидкотекучесть сварочных шлаков и ванны расплавленного металла и смачиваемость основного металла.

Дуговая сварка чугуном электродом. «При работе с тяжёлыми чугунными отливками, когда требуется устранить значительные дефекты, используется метод горячей дуговой сварки с использованием чугунного электрода» [3].

«В промышленности широко используются разнообразные покрытия для чугунных электродов. Они выполняют несколько функций: стабилизируют дуговой промежуток, защищают электродный металл от выгорания в процессе плавления и переноса через дуговой промежуток, а также легируют металл шва. Наиболее распространены электроды марки ОИЧ-1 для горячей сварки чугуна. Они состоят из чугунного стержня марки А или Б (табл. 2) диаметром 10-18 мм, на котором нанесено покрытие. Покрытие состоит из мела (25%), графита (41%), ферросилиция (9%) и полевого шпата (25%). Толщина покрытия составляет 0,1-0,2 мм, а длина чугунного стержня – 350-500 мм. Поврежденная область должна быть обязательно очищена. Подготовленная деталь нагревается до 350-400 °С. Сварка может выполняться как от источников переменного, так и постоянного тока. Сила тока регулируется в зависимости от диаметра электрода и составляет 50-90 А на 1 мм. После зажигания дуги сварщик плавит кромки

изделия, создавая расплавленный металл. При правильном нагреве расплавленный металл хорошо пропитывает кромки основного металла. Дуга должна быть расположена по центру сварочной ванны» [3].

С целью интенсификации ликвидации ощутимых дефектов в сварочную ванну вводятся фрагменты электродов из чугуна, либо специально подготовленные фрагменты чугунного лома. Сущность состоит в том, что при сварке происходит рост поверхности на 2-6 мм относительно уровня металла основы. В данном случае усиление шва работает как литейная прибыль, в которую аккумулируется шлак со временем создающий литейную корку.

Холодная сварка чугуна. Главная цель создания разнообразных способов сварки чугуна в холодном состоянии – это решение следующих задач:

1. С целью обеспечения организации мехобработки сварочного шва используются медные и никелевые электроды. Это обеспечивает получение такого металла шва, который пригоден для обработки, в частности, МНЧ-2, ЦЧ-4. При этом обеспечение зон обработки вокруг шва является весьма трудноразрешимой задачей ввиду того, что данные области зачастую имеют мартенситную структуру, образовавшуюся в результате ускоренного остывания.

2. Требуется создать такие условия, чтобы они обеспечивали уменьшение внутренних напряжений и ликвидацию формирования трещин. Для решения данной задачи требуется использование металла шва, обладающего высокой пластичностью, и выполнения процесса проковки.

3. Одна из неразрешенных задач сварки в холодном состоянии – соответствие химсостава металла-присадки основному металлу, так как в процессе как правило применяется металл с иным составом. При сварке чугуна в холодном состоянии применяются такие подходы как:

- 1) сварка стальными электродами;
- 2) сварка электродами из цветных металлов.

Сварка стальными электродами. «При ведении наплавки на чугунное изделие стальным электродом в глубине первого слоя формируются такие сплавы, которые состоят из фрагментов чугуна и высокоуглеродистой стали с 1,6-1,8% С. Данные сплавы проходят закалку и характеризуются высокой хрупкостью.

Для повышения качества сварных соединений из чугуна используются такие приёмы в технологии, которые направлены на уменьшение хрупкости, жесткости, а также снижение склонности к трещинам в различных слоях и зонах шва» [4].

«Таковыми приемами являются:

1) выполнение сварки первых слоёв на режимах с малой погонной энергией;

2) применение электродов малого диаметра 3...4 мм;

3) уменьшение силы тока до 90...150 А;

4) обеспечение минимальной глубины проплавления (1,5...2 мм);

5) применение обратного слоя (после наплавки первого валика длиной 50...60 мм сварщик сейчас же накладывает на этот валик второй слой). Такой приём является как бы местной термообработкой, что улучшает структуру сварного соединения.

Использование данных мероприятий приводит к улучшению организации переходных зон и повышению гибкости первого слоя наплавки. Однако, они не полностью устраняют процессы закалки и возникновения трещин.

Проведённое обширное испытание стальных электродов показало, что во многих случаях они эффективно обеспечивают надёжное сварное соединение чугуном. Среди качественных электродов особенно хорошо проявили себя электроды УОНИ 13/55, которые обеспечивают надёжное сплавление с чугуном. Сварной металл обладает определённой вязкостью, а во втором и третьем слоях он также обрабатывается легко» [4].

Электроды ЦЧ-4, содержащие ванадий в качестве мощного карбидообразователя, обеспечивают эффективную обработку наплавленного металла с помощью режущего инструмента.

«При восстановлении массивных дефектов крупногабаритных чугуновых изделий стальным электродом применяется такой способ сварки как сварка с использованием «шурупов» [3]. С целью увеличения прочности сварочного соединения в условиях, когда нет каких-то спецтребований, применяются шпильки из стали, обеспечивающие в некоторой степени разгрузку самой малопрочной области сварочного шва – линии сплавления.

Шпильки обеспечивают скрепление изделий. Размеры шпилек определяются толщиной изделия, например, чтобы диаметр шпильки был 0,3-0,4 от толщины изделия, но не более 12 мм; глубина вворачивания – 1,5 диаметра шпильки, но не более половины толщины изделий, подвергаемых соединению; высота выступающей части – 0,75-1,2 диаметра шпильки. Шпильки ориентируют в шахматном порядке на скошенных участках деталей, либо в один ряд с каждой стороны, с расстоянием между ними в 4-6 диаметров шпильки.

«При выполнении сварочных работ следует придерживаться следующей последовательности действий. Вначале необходимо обработать каждую шпильку и облицевать кромки электродами

диаметром 3 мм при низких токах. Затем на обработанные кромки и шпильки наносятся валики и окончательно заполняется разделка. При сварке деталей с толстыми стенками рекомендуется использовать связи из круглой или полосовой стали в шов для уменьшения объёма наплавленного металла (рисунок 2). Чтобы предотвратить растекание расплавленного металла, рекомендуется сформировать дефектный участок для его удержания. Во время сварки следует делать перерывы для охлаждения детали. Температура основного металла на расстоянии 50...100 мм от шва не должна превышать 50...60 °С» [3].

После заваривания всей области, которую требуется исправить, необходимо обратить особое внимание на окончательную сварку крайних рядов шпилек. В случае многослойной сварки необходимо учесть, что валики должны пересекаться под определённым углом.

Сварка электродами из цветных металлов. «Для сварки чугуна с использованием электродов из цветных металлов применяется специальная техника с целью получения сварного соединения, которое может быть обработано обычным режущим инструментом. Использование меди и никеля, которые не образуют соединений с углеродом и не растворяют его, позволяет получить

мягкие наплавки, обладающие прочностью от 80% до 90% от основного металла» [4].

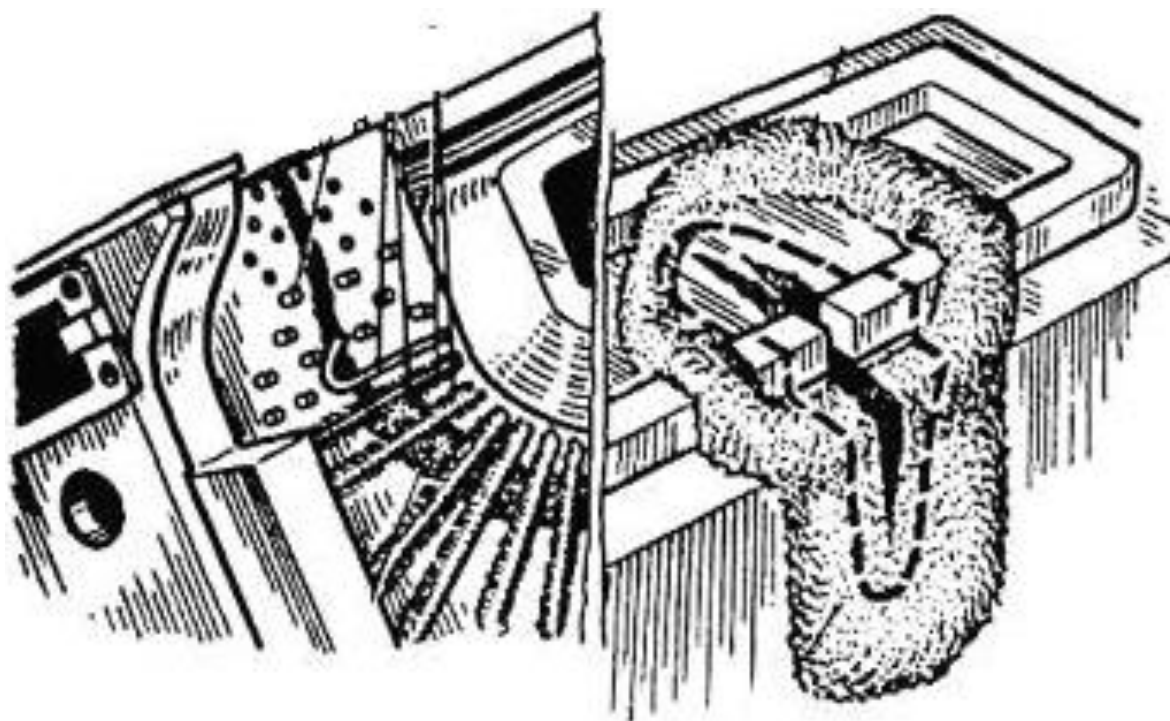


Рисунок 2 – Ремонтная сварка чугунного изделия стальным электродом с применением шпилек

Сварка медно-железными электродами. «Изучение разнообразных вариаций в электродах меди и железа показали, что наилучшие результаты обеспечиваются при 5-20% железа и 80-95%. Данные сплавы имеют повышенную прочность и хорошо обрабатываются режущим инструментом. Применение данных сварочных электродов для сварки чугуна происходит уже достаточно давно» [4].

«Существует несколько методов их изготовления:

- 1) медный стержень с оплёткой из жести, покрытый тонкой стабилизирующей обмазкой;
- 2) медный стержень в железной трубке со стабилизирующей обмазкой;
- 3) электрод из биметаллической проволоки (медь на проволоке, электролитическое омеднение);
- 4) пучок из медных и стальных электродов;
- 5) медный стержень с обмазкой основного типа (мрамор, плавиновый шпат), в который введён железный порошок (электроды ОЗЧ-1, ОЗЧ-2, ОЗЧ-6)» [4].

При сварке с применением таких электродов как ОЗЧ-6, ОЗЧ-2 совместно с проковыванием обеспечиваются очень хорошие результаты. С целью снижения склонности к перегреву сварка ведётся распределенными по поверхности участками короткой длины. Плюсы железомедных электродов состоят в возможности обеспечения эффективного проковывания металла наплавки в разогретом, красном состоянии. Это уменьшает усадочные напряжения, снижая риск трещин в зоне термического влияния. Минус состоит в том, что образуется неоднородная структура, в которой твёрдая железная составляющая сосредоточена в мягкой медной основе. Это существенно затрудняет усложняет мехобработку режущим инструментом.

Электроды, содержащие никель. «Основное применение электродов заключается в ремонте различных дефектов, обнаруженных в процессе механической обработки, где невозможно допустить местное повышение твёрдости. Для решения таких задач широко используются сплавы на основе меди и никеля, а также железа и никеля:

- тип «Монель» – Ni – 65...75%; Cu – 27...30%; Fe – 2...3%; Mn – 1,2...1,8%;

- тип «Мельхиор» – Ni – 80%; Cu – 20%» [4].

Переходная зона при применении таких сплавов для сварки характеризуется низким отбелом. Это в сравнении со сваркой стальными и медно-железными электродами. При этом минус таких сплавов состоит в их очень высокой литейной усадке. Это приводит к формированию горячих трещин в металле, а также снижает механические свойства сварочных соединений. Из-за этого данные электроды лучше не применять для заполнения трещин в изделиях, работающих в нагруженном механическом поле. При этом электроды из монельметалла лучше применить для получения промежуточного слоя. После этого сварка продолжается электродами иного состава. При данном подходе снижается отбел в зоне термического влияния. В частности, при сварке со шпильками, лучше сначала облицевать слоем из монельметалла, а уже после

вести сварку электродами УОНИ 13/55. При этом сварочное соединение будет характеризоваться приемлемыми механическими свойствами и обработкой резанием.

Для сварки высокопрочного чугуна используются электроды ОЗЧ-3, ОЗЖН-1 и ЦЧ-3, которые состоят из сплава железа с 55% никеля. При изготовлении электродов применяются обмазки основного типа, которые имеют толщину слоя 0,8...1 мм на каждой стороне. Сварка проводится обычно постоянным током обратной полярности. Наплавленный слой обладает хорошей обрабатываемостью, так как влияние никеля способствует уменьшению зоны окисления.

Аустенитно-медный электрод. «Электрод АНЧ-1 состоит из стержня, изготовленного из стали марки 04Х18Н9, и медной оболочки. На электроде нанесено покрытие фтористо-кальциевого типа. Аустенитно-медные электроды имеют некоторые преимущества по сравнению с железно-медными. Они обладают большей стойкостью к трещинам и порам, а также лучшей обрабатываемостью. Это связано с графитизирующей способностью никеля и меди, которая снижает образование пятен. Кроме того, в сочетании с проковкой шва, аустенитно-медные электроды, также как и железоникелевые и железно-медные, обеспечивают необходимую плотность сварного соединения» [4].

Низкотемпературная пайка-сварка чугуна латунными припоями. «Процесс осуществляется при температуре в диапазоне 700...750 °С, при которой не происходят изменения в структуре чугуна. Это предотвращает появление светлых пятен на поверхности и снижает вероятность образования трещин. Пайку-сварку рекомендуется использовать для устранения дефектов на уже обработанных поверхностях, где важно сохранить первоначальную форму изделия, и когда невозможно предварительно нагревать материал. Также она эффективна при работе с тонкими сечениями, чтобы избежать деформации. Этот метод позволяет соединять чугун с другими металлами, что упрощает конструкцию отливок. В качестве припоя используется сплав ЛОК-59-1-0,3, содержащий до 0,4% кремния. Для соединения и сварки изделий используется припой ЛОМНА-54-1-10-4-02, который содержит медь, олово, марганец, никель и небольшое количество алюминия (до 0,6%)» [1]. «При использовании этого припоя для пайки-сварки, металл паяного шва приобретает цвет чугуна, имеет твёрдость в диапазоне 180...200 НВ и временное сопротивление разрыву в диапазоне 280...340 МПа. Для этой операции используется поверхностно-активный флюс ФПСН-2, содержащий 50% борной кислоты (H_3BO_3), 25% углекислого лития ($LiCO_3$), 25% углекислого натрия (Na_2CO_3) и добавку, содержащую

галогены, которая помогает удалять вязкую окись алюминия, образующуюся во время пайки-сварки. Температура плавления флюса составляет 650 °С, что служит индикатором начала процесса. Пайку выполняют с помощью обычной сварочной горелки, работающей на ацетилене или газах-заменителях. Пламя должно быть нормальным. Перед пайкой необходимо подготовить кромки механической обработкой. На поверхности чугуна не должно быть грязи или окалины. Следы жиров удаляют с помощью растворителей, таких как ацетон, бензин и т.д. Флюс наносят на основной металл после предварительного подогрева кромок до 300...400 °С. Пайку-сварку начинают в момент плавления флюса, направляя пламя на прилегающие к разделке участки основного металла, чтобы избежать раздувания флюса. Расплавленный флюс равномерно распределяют по всей поверхности свариваемого места с помощью прутка припоя, затем пламя направляют на конец прутка, чтобы его оплавить, и по спирали снизу-вверх заполняют разделку металлом припоя. Сразу после затвердевания сварки её проковывают медным молотком» [4].

1.4 Сварка и наплавка при ремонте и восстановлении чугунных деталей

Увеличенный предел прочности на сжатие характеризует одно из главных свойств чугунных изделий. Чугунные детали являются основой машиностроения, их характеризует надежность в работе, когда влияют усталостные нагрузки, они также могут нивелировать вибрацию.

При работе обнаруживаются дефекты, сосредоточенные снаружи и внутри изделий из чугуна. При этом компоненты дорогого оборудования извлекаются до починки. Это ведёт к росту финансовых вложений в производство. Когда это невозможно – приобретается новое оборудования, либо производство останавливается.

Ликвидация дефектов при ремонте данных изделий ведётся именно наплавкой (рисунок 3).



Рисунок 3 – Восстановление изношенной чугуной детали
посредством наплавки

На свариваемость оказывают влияние не только свойства чугуна (химический состав, структура и т.д.), но и способ, режим наплавки, состав наплавочных материалов и другие параметры. Чугун – это трудносвариваемый материал, так как в процессе сварки в шве образуются хрупкие и трудно обрабатываемые структуры отбела и закалки, которые содержат высокое количество углерода, серы и фосфора в основном металле, также чугун имеет склонность к образованию неравновесных фаз при кристаллизации, а низкая пластичность основного металла и зоны оплавления приводят к образованию трещин и пор. Изменения, вызванные длительным воздействием высоких температур, а также проникновением в него масел и продуктов отработки приводят к возрастанию и трудности сварки. При холодной наплавке

затруднения возрастают, что приводит к рекомендации использования способа горячей наплавки (деталь предварительно подогревается) и при низкотемпературных процессах (пайки, сварки) образование дефектов менее вероятно» [5].

«В процессе сварки и наплавки чугуна рекомендуются электроды на основе прутков из чугуна ЭЧ-1, ЭЧ-2 и ЭВЧ-1, представляющие собой чугунный стержень и обмазку, обеспечивающие необходимые сварочнотехнологические свойства электродов» [2]. «Наплавленный металл, получающийся таким способом – чугун. При осуществлении сварки данными электродами неблагоприятное влияние углерода в зоне шва уменьшается графитизацией. В случае достаточно хорошего процесса графитизации, углерода в связанном состоянии было бы мало и в металле шва образовалась бы мягкая ферритоперлитная структура. Охлаждать заваренные детали стоит медленно в печи или с тепловой изоляцией (30 °С/ч). Недостатком указанных электродов является то, что в условиях сварки графитизация указанных участков металла шва почти не происходит. Наплавленный металл не имеет стабильных показателей по структуре (перлит различной степени дисперсности + феррит повышенной скорости охлаждения), твердость металла шва 190-260 НВ, а размеры и расположение графитовых включений – неориентированные. Чугун данного вида не пригоден для поверхностной закалки, при незначительных нагрузках в металле шва образуются трещины. Кроме того, при сварке сварные швы накладываются короткими участками (длиной не более 100-120 мм), вразброс, с перерывами для охлаждения шва и околошовной зоны до температуры 50-60 °С. Проверка состава чугунного прутка показала один из составляющих – кремний (до 4,5 %), таким образом, электроды данного вида оказались

малоэффективными для сварки современных марок чугуна. Из общего количества чугунных деталей следует выделить корпусные. Эффективным способом исправления поверхностных дефектов корпусных чугунных деталей является сварка (наплавка) электродом ЦЧ-4» [1].

«Электродам ЦЧ-4 свойственны хорошие сварочно-технологические показатели: лёгкость зажигания дуги, стабильное горение, лёгкое отделение шлаковой корки, незначительные металлопотери на разбрызгивание, а также хорошее формирование металла в шве при сваривании в нижнем положении. В металл шва, сваренного электродами ЦЧ-4 в процессе сварки вводится ванадий – сильный карбидообразователь. Карбиды данного элемента, образующиеся в процессе сварки, не растворяются в массе железа и образуют форму нетвёрдых мелкодисперсных включений. При этом металлическая основа оказывается достаточно пластичной и обезуглероженной. После сварки имеется возможность обработки режущим инструментом» [5].

«При использовании данного электрода обеспечивается обрабатываемость металла сварного шва. Сварку следует производить на прямой полярности, так как температура анода сварочной дуги выше температуры катода, что обеспечивает более интенсивный нагрев изделия, чем при обратной полярности. Сварочная ванна, при этом, должна охлаждаться медленнее, что благоприятствует устранению твёрдых структурных составляющих. Кроме того, при этом углерод находится в виде иона, который под влиянием постоянного электрического поля перемещается по катоду. Это означает, что при сварке на прямой полярности ионы углерода будут стремиться всплыть, удаляясь из зоны сплавления в верхние слои ванны, где они легко окислятся, в результате чего

происходит снижение содержания углерода и кремния в металле шва. Благоприятная структура зоны шва обеспечивается сваркой на прямой полярности (рисунок 4)» [3].

«При высоком напряжении холостого хода сварочного трансформатора и малой длине сварочных кабелей возможна сварка переменным током.

Возрастание трудностей сварочных работ велико в тех случаях, когда структура чугуна претерпела изменения, вызванные длительным воздействием высоких температур. Каждый вид ремонта требует узкого и специфического подхода» [5].

«Процесс сварки, с неравномерным нагревом и охлаждением различных участков, в большинстве случаев способствует увеличению внутренних напряжений и образованию трещин. Таким образом изделия сложной конфигурации при наличии разностенности перед сваркой термообрабатывать для уменьшения внутренних напряжений. Нагрев производится медленно, для равномерного прогрева всего объёма детали, со скоростью не выше 50-100 °С/ч, в зависимости от сложности детали. Выбор времени выдержки (3-5 ч) также зависит от сложности деталей. Чем выше температура, тем меньше время выдержки и тем эффективнее снимаются внутренние напряжения.

При нагреве чугуна происходит процесс снятия внутренних напряжений. Уже при 250-300 °С появляются заметные результаты, а при 500- 550 °С внутренние напряжения почти полностью снимаются. Для реализации технологии сварки и наплавки необходимо простейшее сварочное оборудование (сварочный трансформатор, сварочный выпрямитель).

Таким образом, изучены особенности сварки и наплавки чугуна, а также рассмотрены различные виды электродов и способы

устранения дефектов чугунных деталей. Чугун – это трудносвариваемый материал, который обладает низкой пластичностью и склонностью к образованию трещин и пор. При сварке чугуна рекомендуется использовать метод горячей наплавки или низкотемпературные процессы, такие как пайка. Это позволяет снизить вероятность образования дефектов и улучшить качество сварного соединения. Для устранения дефектов чугунных деталей можно применять различные методы, такие как заварка, наплавка и пайка. Выбор метода зависит от характера дефекта и требований к качеству ремонта» [5].



Рисунок 4 – Сварка чугунных деталей электродами ЦЧ-4

2 Методы и способы выполнения ремонтной и восстановительной сварки и пайки

Для эффективного выполнения ремонтных работ необходимо учитывать не только тип дефекта, но и материал, из которого изготовлена деталь. В случае с чугуном важно понимать его специфические свойства, такие как хрупкость, склонность к образованию трещин при перепадах температур и низкая пластичность. Эти особенности требуют особого подхода при выборе методов сварки и пайки.

«Для чугунных отливок в зависимости от особенностей поверхностных дефектов в общем случае используются следующие способы их исправления:

- заварка и запайка, если литейные дефекты влияют на работоспособность детали;
- декоративная заделка литейных дефектов комплексным компаундом на основе эпоксидного компаунда ЭК-1 и железного порошка ПЖ В2.

При выборе метода заварки важно учитывать не только тип дефекта, но и условия эксплуатации детали. Например, для деталей, работающих под высокой нагрузкой, предпочтительнее использовать методы, обеспечивающие максимальную прочность соединения, такие как многослойная сварка с предварительным подогревом.

Общим требованием для заварки чугунного литья является соблюдение температурного режима. Во всех случаях процесс заварки ведётся на минимальном токе короткими валиками 100-200 мм с перерывами для остывания основного и наплавленного металла. В зависимости от конфигурации чугунной отливки, вида и

локализации литейного дефекта в общем случае существуют следующие способы его заварки:

- без подогрева при расположении литейного дефекта на необрабатываемой поверхности отливки и имеющейся возможности её свободного перемещения;

- с местным подогревом при расположении литейного дефекта на отдельной части отливки, деформации которой ограничены её другими частями, которые также следует подогревать до достижения ими малинового оттенка;

- с общим подогревом в случае отливки сложной конфигурации и ведении заварки на постоянном токе обратной полярности» [6-11].

Стоит отметить, что предварительный подогрев детали снижает риск образования трещин в зоне сварки, так как уменьшает термические напряжения. Однако слишком высокий нагрев может привести к деформации детали, поэтому важно строго контролировать температуру.

«Отливка проплавляется на минимальную глубину для уменьшения глубины отбела (цементита ледебурита) в завариваемой зоне, при этом сначала наплавляются кромки разделанной зоны. Заварка производится параллельными валиками в 2-3 слоя с перекрытием каждого предыдущего слоя на половину его ширины. При нанесении 2-го и 3-го слоя ток увеличивается на 15-20%. При заварке литейных дефектов в чугунных отливках с толщиной стенки до 10 мм применяются электроды диаметром до 3 мм. При однослойной заварке для обеспечения возможности последующей обработки режущим инструментом заваренной зоны поверх наплавленного металла накладывается отжигающий валик без его попадания на тело чугунной отливки.

При работе с чугуном важно учитывать, что наплавленный металл должен иметь схожие с основным материалом механические свойства. Для этого используются специальные электроды, содержащие никель или медь, которые уменьшают риск образования хрупких структур в зоне сварки.

При заварке глубинных литейных дефектов чугунной отливки для снижения уровня остаточных напряжений при финишном заполнении дефектной зоны наплавленный металл в горячем пластичном состоянии проковывается лёгкими ударами молотка, либо применяются такие технологические приёмы как сварка горкой, обратноступенчатый способ и др.» [6].

Проковка наплавленного металла позволяет снизить внутренние напряжения и улучшить структуру шва. Однако этот метод требует высокой квалификации сварщика, так как неправильное выполнение может привести к разрушению соединения.

Восстановление крупных толстостенных чугунных деталей со сложными трещинами большой глубины и протяженности осуществляется следующим образом.

Для восстановления таких деталей часто применяются комбинированные методы, включающие механическую обработку, термическое воздействие и сварку. Это позволяет добиться высокой прочности соединения и минимизировать риск повторного образования трещин.

Путём проведения сверлильных операций создаётся ряд отверстий определённого диаметра с заданным интервалом вдоль трещины, перпендикулярно ее поверхности. Расстояние между отверстиями выбирается таким образом, чтобы каждое последующее отверстие перекрывало предыдущее при

последующей сварке. Диаметр отверстий определяется в зависимости от угла наклона трещины к вертикали.

Важно правильно подобрать диаметр отверстий: слишком маленькие отверстия могут не обеспечить достаточного перекрытия швов, а слишком большие – ослабить конструкцию. Оптимальный диаметр обычно составляет 10-20 мм, в зависимости от толщины стенки детали.

В каждое следующее отверстие вставляют съёмную технологическую заглушку из графита, чтобы предотвратить протекание в него расплава из предыдущего отверстия через созданную трещиной перемычку между отверстиями. Соединение осуществляют либо электрошлаковым способом, либо дуговой сваркой с использованием высоко никелевой проволоки с автоподогревом для создания сплошного шва, в зависимости от диаметра отверстия. Электрошлаковая сварка особенно эффективна для толстостенных деталей, так как обеспечивает глубокий провар и минимальные деформации. Однако этот метод требует специального оборудования и высокой квалификации оператора. Под отверстиями устанавливают графитовый тигель или создают подкладку, засыпая «сухим песком и сверху чугуновой стружкой или дробью, затем уплотняют их до образования заглушки на выходе из отверстия. Для обработки области трещины проводят местный подогрев по всему поперечному сечению детали» [7].

Использование графитовых тиглей и подкладок из песка позволяет избежать вытекания расплавленного металла и улучшает качество шва. Кроме того, это снижает затраты на вспомогательные материалы.

Этот метод позволяет увеличить прочность соединения трещины, создавая монолит, и уменьшить сложность ремонта.

Исследование относится к сфере машиностроения и может применяться для восстановления сваркой деталей из серого чугуна, включая станины станков, держатели опор и другие, подверженные хрупкому разрушению. При использовании этого метода размеры восстанавливаемой детали не ограничиваются.

Данный метод особенно актуален для ремонта крупногабаритных деталей, которые сложно или экономически невыгодно заменять. Он позволяет значительно продлить срок службы оборудования и снизить затраты на ремонт.

Существует метод восстановления чугунного отливка в стальном ободе, который заключается в создании отверстия в стенке отливка, проходящего вдоль трещины, и последующей электрошлаковой сварке этого отверстия. Однако данный метод имеет ряд ограничений, связанных с точностью определения глубины трещины и сложностью контроля процесса сварки. Для его успешного применения необходимо использовать современные методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковая дефектоскопия или рентгенография. Ось отверстия должна совпадать с серединой обода, а глубина сварного шва должна быть равна глубине трещины. Однако недостатком этого метода является то, что отверстие остается закрытым, что затрудняет контроль процесса сварки и требует точного определения глубины трещины. Для устранения этого недостатка можно использовать эндоскопы или миниатюрные видеокамеры, позволяющие визуально контролировать процесс заполнения отверстия расплавленным металлом. При наличии длинной трещины невозможно полностью проварить её одним отверстием, что делает этот метод неэффективным. Также при глубокой трещине требуется сверление длинного отверстия малого диаметра, что требует дополнительного

оборудования. В таких случаях целесообразно применять комбинированные методы, например, предварительную заделку трещины специальными составами с последующей сваркой.

Существует эффективный метод электрошлаковой сварки с использованием многослойной техники, где края деталей обрабатываются путем создания ряда прямоугольных отверстий, чередующихся с перегородками. Многослойная техника позволяет равномерно распределить термические напряжения и снизить риск образования новых трещин. Однако она требует больше времени и ресурсов по сравнению с традиционными методами. Эти отверстия заполняются сварочным материалом, начиная с центра соединения и двигаясь к краям, где происходит плавление перегородок. В процессе сварки перегородки охлаждаются и тепловые зоны сварки максимально приближаются к краям деталей. Для улучшения качества шва можно использовать принудительное охлаждение перегородок, например, с помощью воздушного или жидкостного охлаждения. Для компенсации деформаций в каждом слое шва ширина перегородок последовательно уменьшается, что повышает прочность сварного шва и предотвращает образование кристаллических трещин. Этот метод особенно эффективен для деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, так как обеспечивает высокую усталостную прочность соединения.

«Однако данный метод имеет недостаток при ремонте трещин из-за большого зазора между деталями. Также он не подходит для восстановления трещин в деталях из серого чугуна. Для устранения этого недостатка можно использовать дополнительные технологические приёмы, такие как предварительная наплавка кромок или применение компенсаторов напряжений.

Один из наиболее сходных по характеру методов восстановления чугунной изложницы включает в себя процесс обработки трещины с обеих сторон, установку стальных элементов в получившиеся углубления, их сварку между собой, при этом разделка трещины осуществляется с использованием сверления. Использование стальных элементов повышает прочность соединения, но требует точного подбора материала, чтобы избежать электрохимической коррозии в месте контакта стали и чугуна. Затем производится электрошлаковая наплавка металла в образованные отверстия для сплавления стальных стержней, расположенных с обеих сторон трещины» [7].

Этот метод обеспечивает высокую прочность, но требует значительных временных и трудовых затрат, что ограничивает его применение в массовом производстве.

Этот метод требует значительных усилий для создания ряда отверстий и установки стальных стержней в крайние отверстия. Его недостатком является необходимость формирования прямоугольного отверстия, что делает его несовершенным с технологической точки зрения. Для упрощения процесса можно использовать современные станки с ЧПУ, которые позволяют быстро и точно выполнять отверстия сложной формы. Для его осуществления требуется специализированное оборудование и техническое обеспечение. Кроме того, данный метод не обеспечивает полного монолитного скрепления трещины на всей ее длине. Поэтому он чаще применяется для локального ремонта, а не для восстановления протяжённых трещин.

Технический результат, достигаемый решением поставленной задачи, заключается в достижении равнопрочного монолита

основного металла и металла наплавки при невысокой сложности процесса восстановления.

В методе восстановления толстостенных чугунных изделий с длинными трещинами, где требуется пробить отверстия вдоль линии разлома, перпендикулярно её протяжению, и вставить в них технологические подкладки, а затем залить их сваркой, предусматривается дополнительное подогревание изделия в зоне трещины. Отверстия пробивают с интервалом, который минимум частично перекрывает предыдущий шов при сварке каждого следующего. В каждое последующее отверстие помещают временную пробку, чтобы предотвратить поступление расплавленного металла из предыдущего отверстия. Сварка проводится с использованием автоподогрева, что обеспечивает образование сплошного шва.

«Кроме этого, местный подогрев в индивидуальном случае достигается до температуры 400-450 °С. Отверстия в стене детали делают цилиндрическими, их диаметр выбирается в зависимости от угла отклонения трещины от вертикали. Для сварки отверстий диаметром от 18 до 35 мм используется электродуговой метод, а для отверстий диаметром от 35 до 50 мм – электрошлаковый метод. Для сварки отверстий применяется аустенитная высоконикелевая проволока» [7].

В некоторых случаях пайка может быть более подходящим вариантом получения неразъёмного соединения чем сварка [8]. В частности, пайка нашла применение при устранении сквозных дефектов чугунного литья. Точнее этот процесс в соответствии с отечественным и зарубежным стандартами на терминологию в области пайки в трактовке 1979 г. можно назвать пайкосваркой. Под ней понимается некапиллярная пайка, при которой соединяемым

кромкам заготовок придаётся форма, подобно разделке кромок при сварке плавлением (ГОСТ 17325-79), а соединение открытого типа получается последовательно, подобно сварке плавлением, с помощью присадочного металла (ИСО 857-79).

«К одной из чугунных отливок в высокой степени склонной к формированию поверхностных литейных дефектов в виде пор и раковин относится отливка «Блок цилиндров» легкового автомобиля из серого чугуна с пластинчатым графитом на перлитной основе марки типа СЧ20 следующего химического состава, %_{масс}: С 3,25-3,40; Si 1,8-1,9 (в печи, без учёта его прироста из графитизирующего модификатора); Mn 0,5-0,7; P ≤ 0,03; S ≤ 0,06; Cr ≤ 0,15-0,25; Cu ≤ 0,10-0,45; Sn 0,08-0,10» [9].

«Исправление литейных дефектов в отливках блоков цилиндров двигателей ВАЗ осуществляется в следующих зонах:

- на плоскости прилегания головки блока цилиндров несквозных дефектов диаметром до 10 мм на расстоянии свыше 5 мм от наружного диаметра отверстий и зон резьбовых соединений;
- на плоскости прилегания крышек коренных подшипников дефектов диаметром до 5 мм на расстоянии свыше 5 мм от резьбовых отверстий и прилегающих рёбер за исключением боковой поверхности подшипника, на которой заварка не допускается» [10];
- «на плоскостях со стороны маховика и шестерни несквозных дефектов диаметром до 10 мм;
- на боковых наружных стенках дефектов диаметром до 10 мм за исключением сквозных дефектов в зоне водяной рубашки;
- рёбрах жёсткости и выломах тела отливки при отбивке литников, прибылей и выпоров.

Непосредственно перед выполнением заварки литейных дефектов отливки блоков цилиндров нагреваются в промышленной

печи по режиму $T = 670 \pm 10^{\circ}\text{C} \times 20-30$ мин (в зависимости от модели отливки блока цилиндров), после чего выгружаются на теплоизолирующую сушильную плиту во избежание их быстрого остывания. Заварка производится в нейтральном ацетиленокислородном пламени без избытка кислорода и включает следующие операции:

- начиная со дна дефекта прогреть вокруг него основной металл восстановительной частью пламени горелки до светло-красного цвета ($800-850^{\circ}\text{C}$) после чего сосредоточив пламя на поверхности дефекта расплавить её;

- расплавить поверхность дефекта до основного металла и тщательно очистить чугунным прутом зону дефекта от неметаллических включений, после чего погрузить чугунный пруток в жидкую ванну и при её непрерывном перемешивании вводить флюс на поверхность зоны дефекта, не допуская стекание расплава маневрируя пламенем горелки и чугунным прутом; в начальный момент заварки держать угол наклона прутка к поверхности отливки $\approx 80^{\circ}$ с постепенным его уменьшением $\approx$ до 0° [10];

- «поддерживать расплавленный металл в полужидком состоянии путём прерывания нагрева для остывания жидкой ванны, не допуская значительных перерывов, приводящих к формированию шлаковых прослоек между слоями и несплавлению, после чего прогреть пламенем горелки наплавленный металл для выравнивания исправляемого дефекта с удалением пламенем подтёков металла; допускаются остатки шлака на поверхности исправленного дефекта, удаляемые при последующей дробемётной очистке; усиление шва наплавки над основной поверхностью отливки до 1 мм;

- замедлить скорость охлаждения металла в интервале температур перлитного превращения с целью обеспечения нормативной твёрдости области заваренного дефекта для чего горелка медленно отводится на 50-100 мм от поверхности жидкой ванны, после чего выдерживать наплавленный металл под пламенем горелки на обрабатываемых поверхностях до 1 мм, на необрабатываемых – до 0,5 мм; по мере охлаждения на периферии зоны наплавленного металла формируется тёмное кольцо закристаллизовавшегося металла, после распространения которого в центр заварки горелка окончательно отводится;

- при соблюдении максимального времени нахождения отливки вне печи после её нагрева – до 10 мин затем отливка повторно помещается в печь для отжига по режиму $T = 600 \pm 20^{\circ}\text{C} \times 20\text{-}30$ мин (в зависимости от модели отливки блока цилиндров).

Газовая заварка поверхностных литейных дефектов отливок блоков цилиндров чугуном прутком приводит к нижеперечисленным возможным дефектам (вторичной дефектности), обусловленных следующими причинами возникновения (табл. 3)» [6].

Для дуговой пайки используется медный электрод марки «Комсомолец 100».

Специальное покрытие этих электродов содержит ферромарганец и кремнистую медь [10], в результате чего в расплав припоя попадает достаточное количество элементов-раскислителей марганца (4,80-5,20 %) и кремния (0,60-0,90%) [11], позволяющих вести процесс на воздухе без применения флюса.

Помимо технологических преимуществ для полноценной комплексной оценки применимости такой технологии в действующем производстве необходимо также выполнить

исследование паяной зоны и примыкающих к ней чугуновой и медной поверхностей соединения.

Для анализа микроструктуры применялся инвертированный металлографический микроскоп «OLIMPUS GX 53» с анализатором изображений «Siams 800» (рисунок 5).

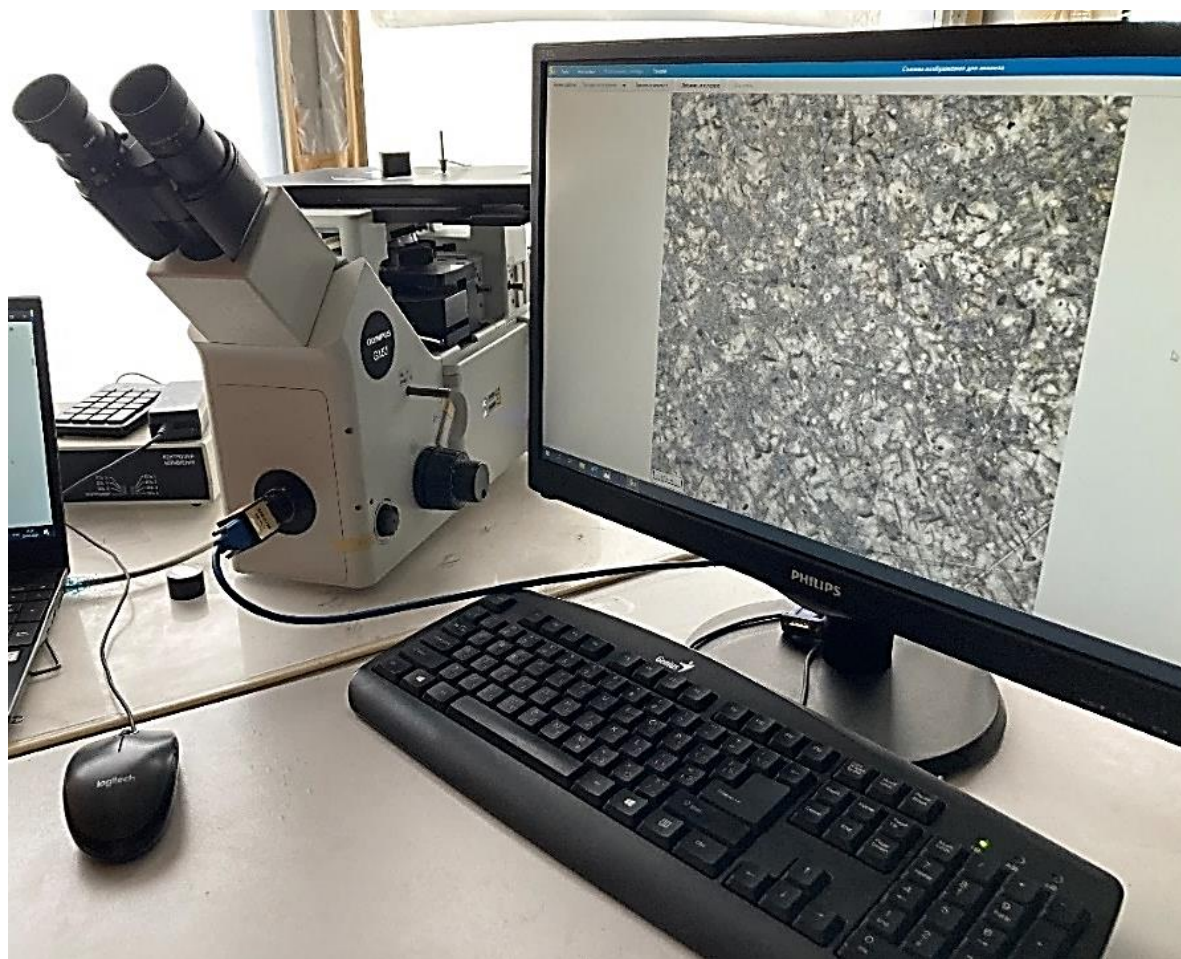


Рисунок 5 – Металлографический микроскоп «OLIMPUS GX 53»

Таблица 3 – Возможные дефекты газовой заварки поверхностных литейных дефектов отливок блоков цилиндров чугуном прутком и причины их возникновения

№ п/п	Дефекты	Причины возникновения
1	Губчатая пористость	Некачественный чугунный пруток
2	Чернота и поры в зоне сплавления основного и наплавленного металла	Некачественная расчистка поверхности дефекта. Неполное раскисление флюсом*
3	Отбел (цементит ледебурита) в наплавленном металле и зоне сплавления	Недостаточный прогрев основного металла. Ускоренная кристаллизация наплавленного металла.
4	Повышенная твёрдость наплавленного металла	Ускоренная кристаллизация наплавленного металла от 800 до 650°C
5	Трещины в наплавленном и основном металле	Недостаточный прогрев отливок до заварки. Высокая скорость охлаждения отливки после заварки. Отсутствие отжига после заварки.
6	Не удаляемые при механической обработке режущим инструментом поверхностные дефекты	Недостаточное усиление шва наплавки над основной поверхностью отливки
*) двухкомпонентный раскисляющий порошок, состоящий на 89-92% из углекислого натрия Na_2CO_3 и на 8-11% из тетраборнокислого натрия (буры) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$		

Для выявления структуры сварного и паяного соединений выполнялось травление: в качестве травителя для чугуна применялся двухпроцентный раствор азотной кислоты в спирте (нитал) ($2,5 \text{ мл HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), а для медного припоя – водный раствор хлористого шестиводного железа в соляной кислоте ($16,7 \text{ г FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}/25\text{мл HCl}/100 \text{ мл H}_2\text{O}$).

3 Исправление литейных дефектов отливок блоков цилиндров сваркой и пайкой

3.1 Исправление поверхностных дефектов отливок блоков цилиндров сваркой

«Для снижения уровня вторичной дефектности (табл. 1) при газовой заварке поверхностных литейных дефектов отливок блоков цилиндров двигателей ВАЗ проведено исследование влияния изменённого химического состава (%_{масс}) чугуновых прутков диаметром 6-8 мм и длиной до 350 мм: С 3,2-3,4; Si 3,3-3,5; Mn 0,5-0,7; P 0,2-0,4; S ≤ 0,04; Cr ≤ 0,05; Ni 0,4-0,6 из серого чугуна с пластинчатым графитом и величиной отбела (цементита ледебурита) не более 20% сечения по всей длине;

Более высокое содержание в химическом составе прутка кремния и введение никеля по сравнению с химическим составом отливки обусловлено следующим:

- увеличением жидкотекучести присадочного материала за счёт повышения его углеродного эквивалента $C_{\text{экв}} = C + (Si + P)/3$;
- стабилизация перлитной металлической основы в зоне наплавки и снижение склонности к формированию в ней отбела (цементита ледебурита).

На рисунках 6-13 приведены внешний вид, макро- и микроструктура фрагмента отливки блока цилиндров с заваренными поверхностными раковинами чугуновым прутком опытного химического состава.

Микроструктура и твёрдость пятна наплавки:

- микроструктура – ферритная, состоящая из независимо закристаллизованных блоков (сварившихся капель расплавленного металла); отбела по линии сплавления не выявлено;

- твёрдость по Виккерсу в сердцевине пятна 205 HV1.

Таким образом, по результатам проведённых исследований установлено снижение спектра возможных вторичных дефектов с шести до одного (табл. 1, 2) при использовании для газовой заварки поверхностных литейных дефектов отливок блоков цилиндров чугуновых никельсодержащих прутков с повышенным углеродным эквивалентом» [9].

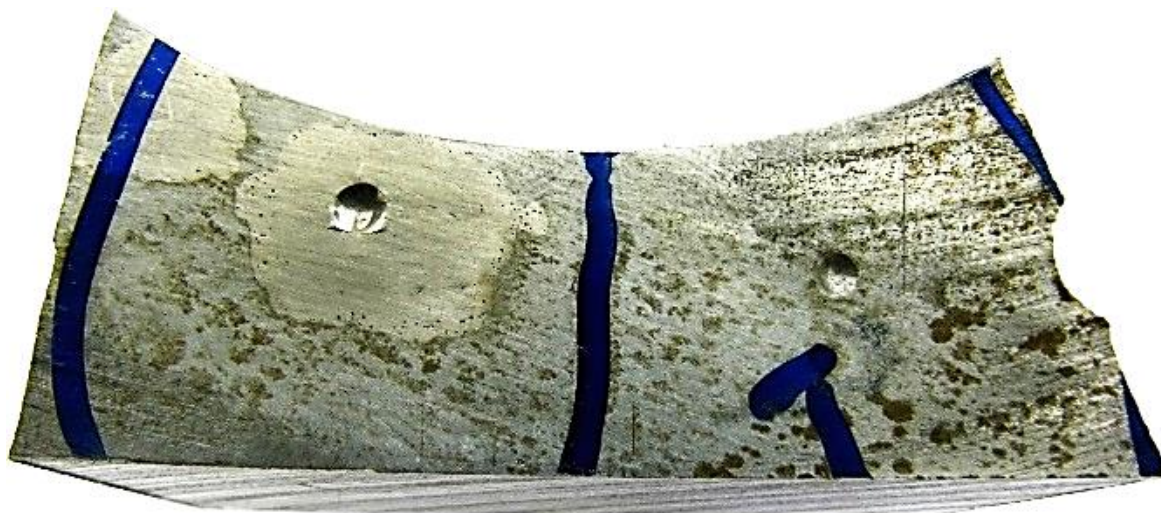


Рисунок 6 – Внешний вид пятен заварки с отпечатками от индентора при измерении твёрдости



Рисунок 7 – Чернота по границе раздела основного и наплавленного металла на зеркале цилиндра



Рисунок 8 – Вид пятен в сечении после холодного макротравления.
Глубина пятна не менее 2,95 мм



Рисунок 9 – Вид пятна в сечении – чернота, поры, загрязнения по границе раздела с основным металлом

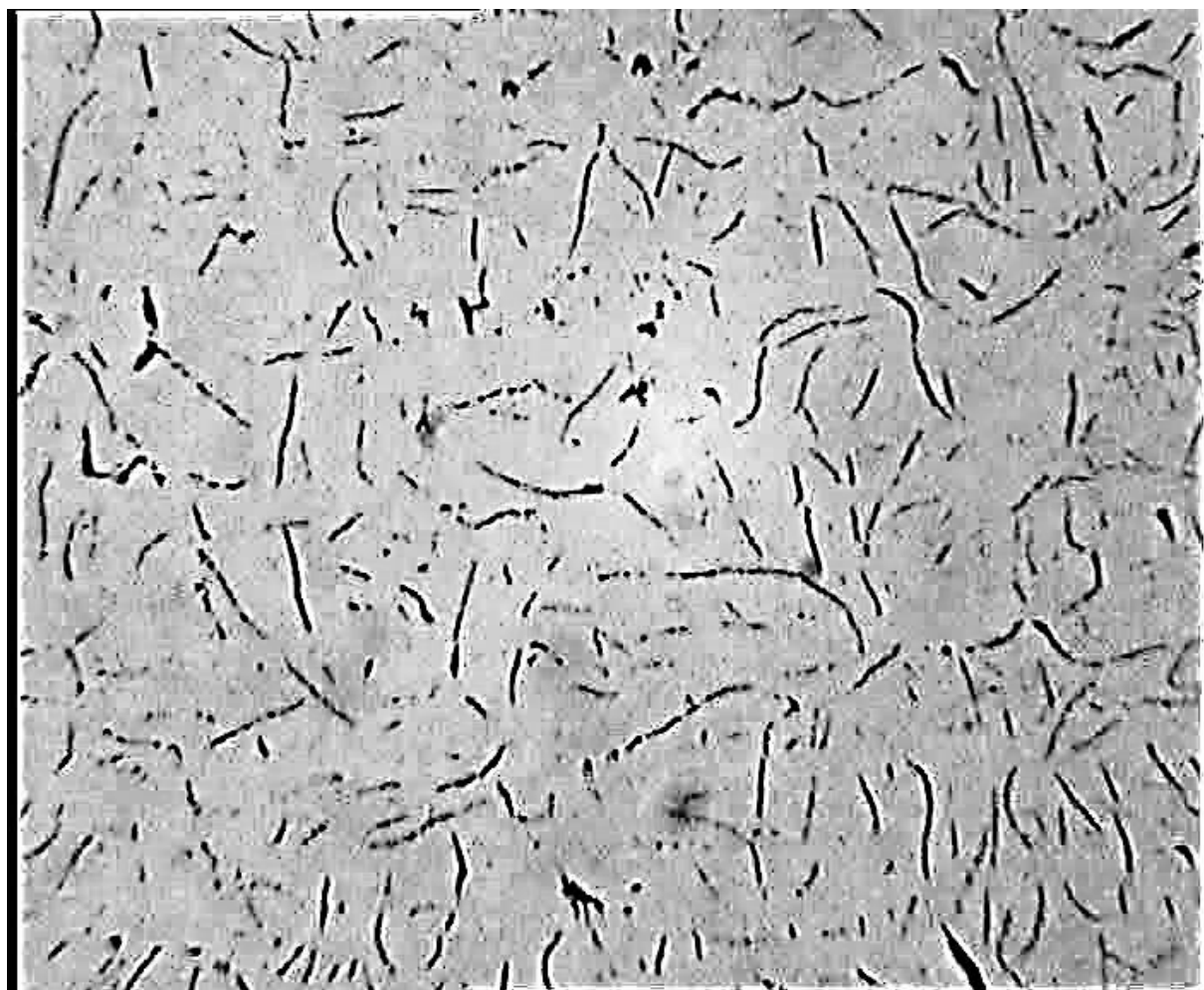


Рисунок 10 – Графит в микроструктуре чугуна отливки блока цилиндров

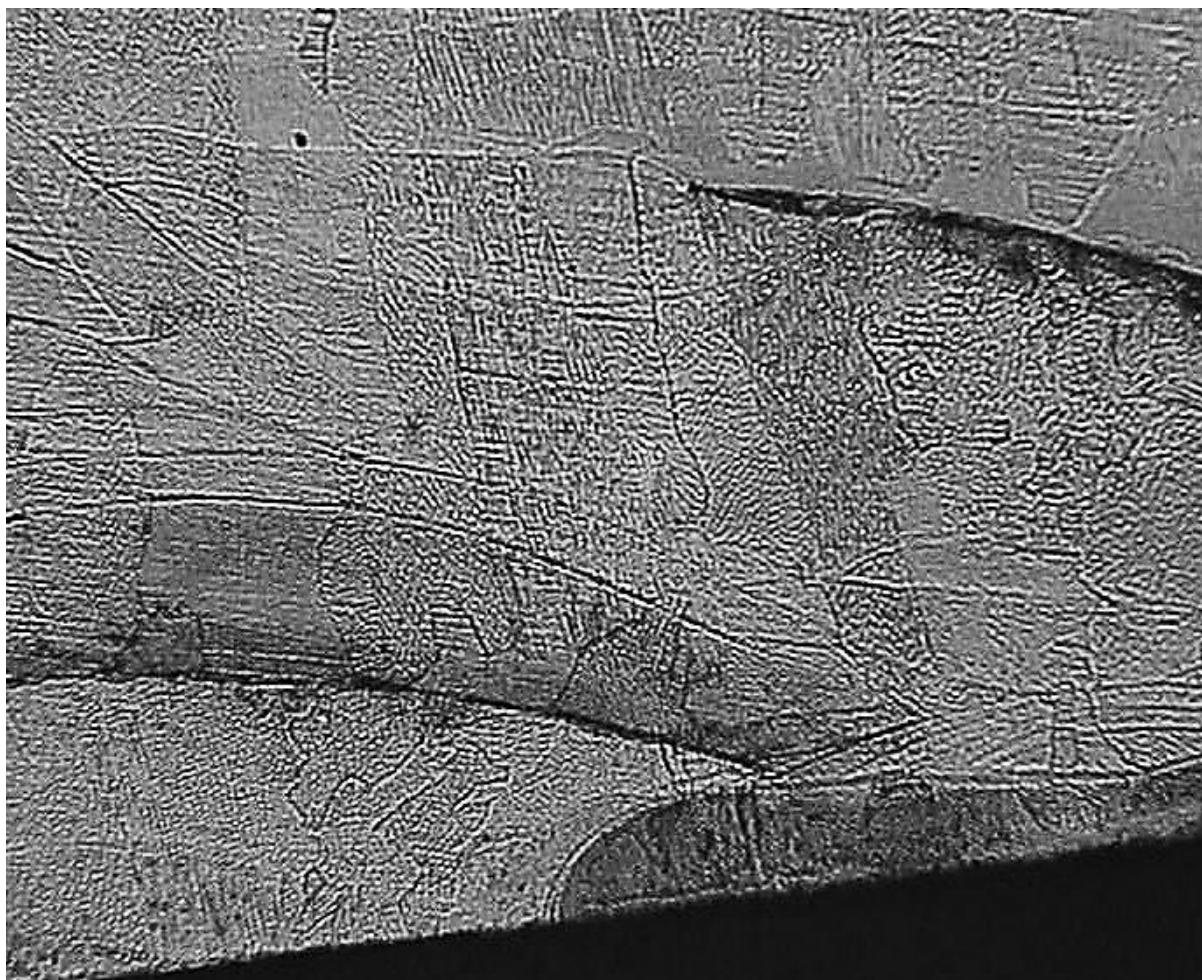


Рисунок 11 – Микроструктура наплавки (×50)

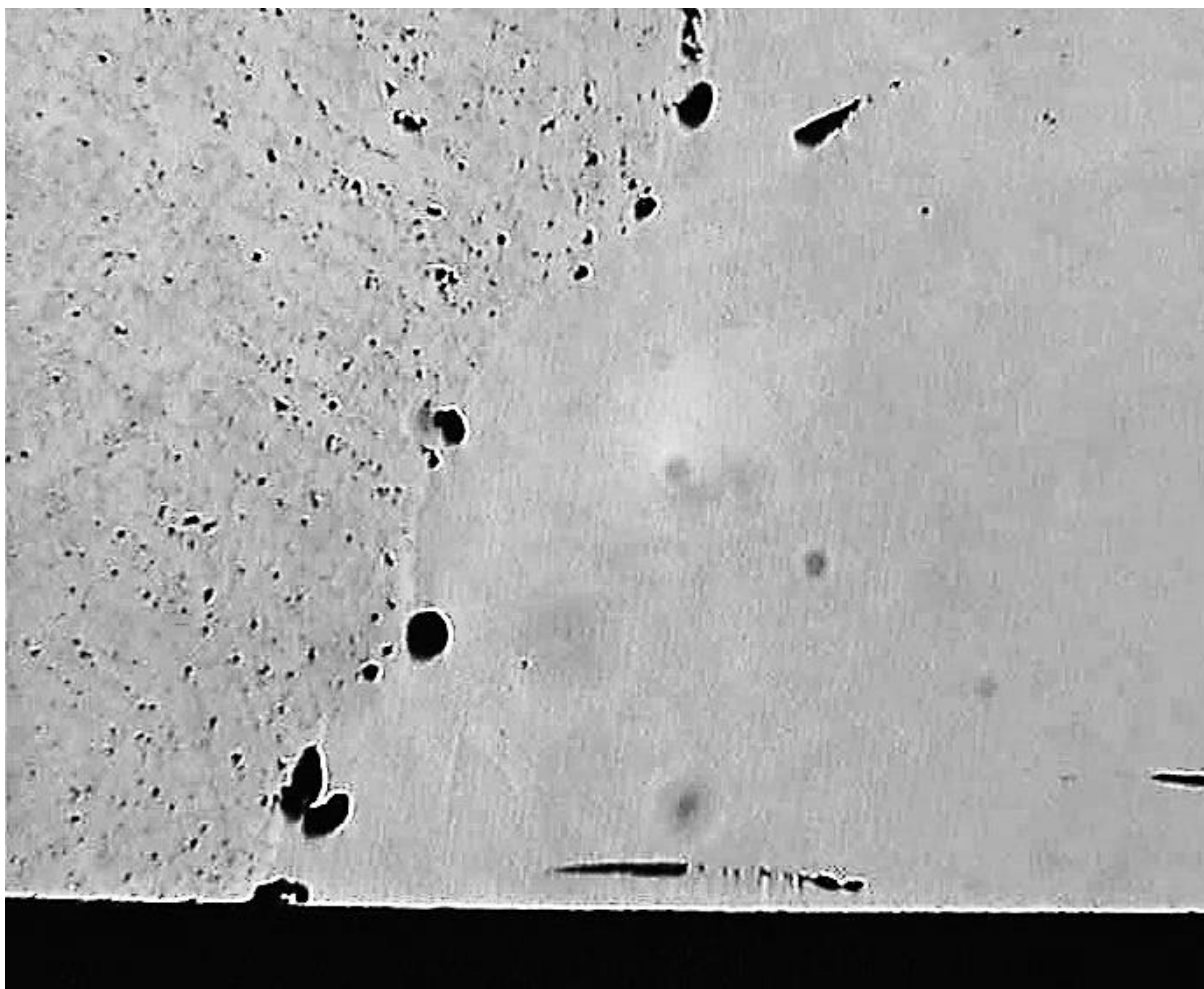


Рисунок 12 – Поры по линии сплавления ($\times 50$)

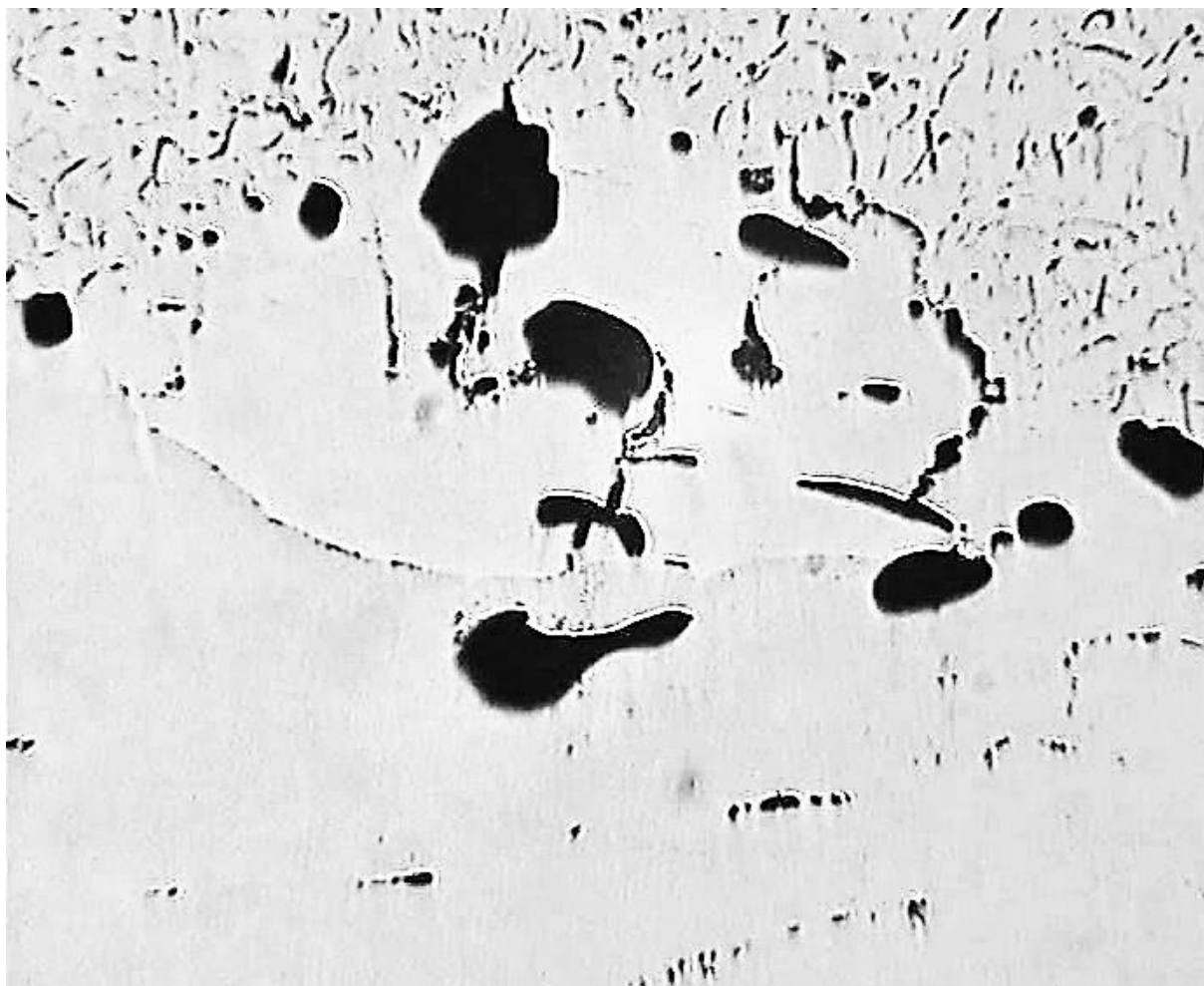


Рисунок 13 – Скопление пор (×100)

Таблица 2 – Фактическая дефектность газовой заварки поверхностных литейных дефектов отливок блоков цилиндров чугуном пруток опытного химического состава

№ п/п	Дефекты	Присутствие
1	Губчатая пористость	-
2	Чернота и поры в зоне сплавления основного и наплавленного металла	+
3	Отбел (цементит ледебурита) в наплавленном металле и зоне сплавления	-
4	Повышенная твердость наплавленного металла	-
5	Трещины в наплавленном и основном металле	-
6	Не удаляемые при механической обработке режущим инструментом поверхностные дефекты	-

3.2 Исправление сквозных дефектов отливок блоков цилиндров пайков

Дуговой бесфлюсовой пайкой медным электродом марки «Комсомолец 100» без предварительного нагрева была устранена сквозная несплошность на фрагменте детали «Блок цилиндров». Область напаянного металла представляет собой окружность диаметром ≈ 20 мм с усилением над плоской поверхностью образца на 1 мм, тесно прилегающая к его поверхности и формирующая однородный слой (рисунок 14).

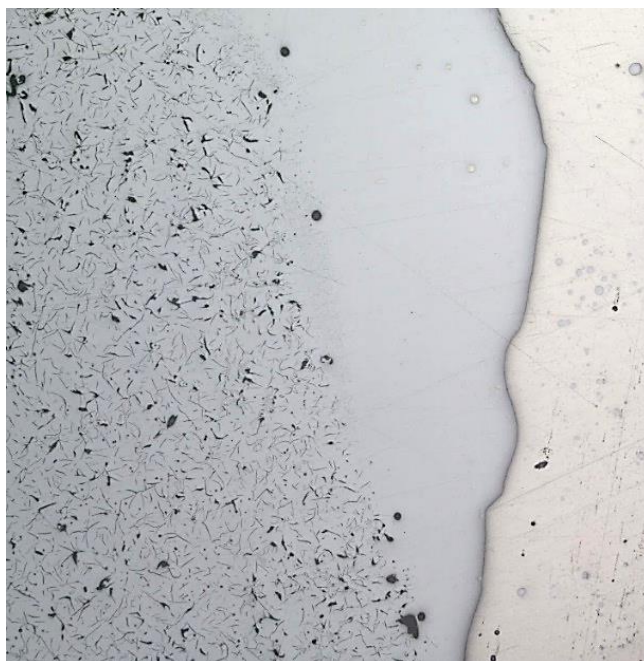
Микроанализ качества паяного соединения (рисунок 10) показал его приемлемую, удовлетворительную сплошность, без видимых трещин и пор, напаянный слой меди плотно прилегает к чугунной основе, т.е. пайка выполнена качественно. Результаты анализа микроструктуры паяного соединения приведены на рисунках 15-20.



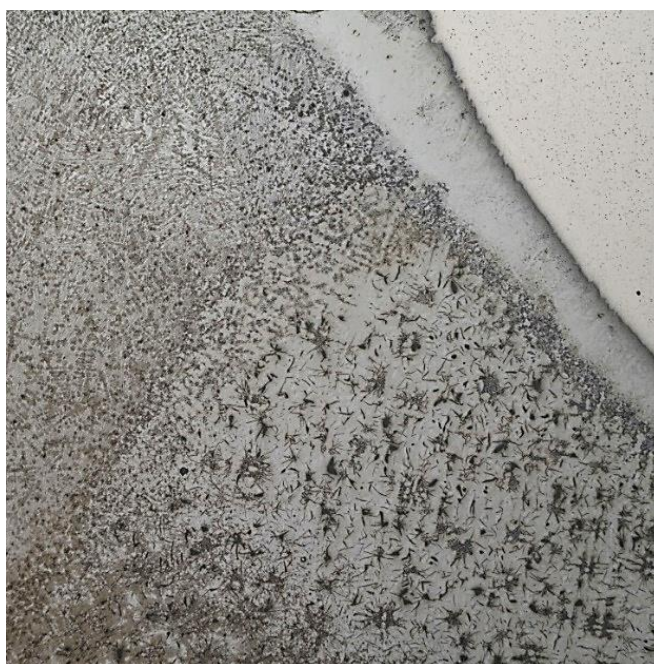
Рисунок 14 – Внешний вид объекта исследования



Рисунок 15 – Шлиф с залитыми в пластмассу темплетами
фрагментов паяного соединения



а) в нетравленном виде



б) после травления 2,5 мл $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

Рисунок 16 – Микроструктура переходной зоны паяного соединения при увеличении $\times 50$



а) в нетравленном виде



б) после травления 2,5 мл $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

Рисунок 17 – Микроструктура переходной зоны паяного соединения при увеличении $\times 100$



a) $\times 200$



a) $\times 500$

Рисунок 18 – Микроструктура переходной зоны паяного соединения при увеличениях



а) в нетравленном виде



б) после травления 2,5 мл $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

Рисунок 19 – Микроструктура основного металла (серого чугуна)
при увеличении $\times 100$



а) припоя (меди)



б) переходной зоны

Рисунок 20 – Микроструктура при увеличении $\times 100$ после травления $16,7 \text{ г FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}/25\text{мл HCl}/100 \text{ мл H}_2\text{O}$

В структуре наблюдаются мелкие единичные поры, размером ≈ 10 мкм, что допустимо ГОСТ 30242-97 «Дефекты соединений при сварке металлов плавлением».

Структура переходной диффузионной зоны (металл – припой) по мере продвижения в сторону чугуна от границы сплавления:

медь $\rightarrow$ «высокомедистая ε -фаза» [13, 14] + цементит + ледебурит $\rightarrow$ перлит пластинчатый + цементит + ледебурит $\rightarrow$ перлит пластинчатый.

«Основной механизм перлитизирующего действия меди заключается в её оттеснении поверхностью пластин кристаллизующегося перлитного цементита с образованием на них тонкой плёнки медистой ε -фазы, практически непроницаемой для углерода и, как следствие, стабилизирует структуру пластинчатого перлита. Графитизирующее действие меди не является постоянным. При содержании меди более 4%_{ат.} в чугунах с пластинчатым и шаровидным графитом в процессе их кристаллизации медь вызывает отбеливающий эффект. Эффект отбеливающего действия меди не всегда имеет негативный характер и может быть специально использован при получении половинчатых чугунов с особыми свойствами. Включения медистой фазы в таких чугунах обеспечивают значительное преобразование и измельчение структуры, препятствуя росту включений графита и цементита, устраняя ледебуритный характер отбела и обеспечивая получение композиционной структуры. Результаты экспериментов по отбелу медистых чугунов с пластинчатым графитом показали, что при содержании меди около 4% происходит изменение специфики характера её влияния, т.е. данное содержание можно считать концентрационной границей перехода от графитизирующего действия меди к отбеливающему» [15].

Металлографический анализ полученного паяного соединения «серый чугун – медь» позволяет понять стадийность кинетики формирования его структуры. При расплавлении медного электрода под действием электрической дуги медь, попадая на поверхность раковины, формирует непроницаемый для диффузии углерода слой высокомедистой ε -фазы. Нагретая в зоне дуги до температур, близких линии ЕСF, поверхность чугуна впоследствии охлаждается с более высокой скоростью по сравнению со скоростью охлаждения в песчано-глинистой форме, и её структура формируется в соответствии с метастабильной диаграммой «железо – углерод». Область переходного слоя состоит из высокомедистой ε -фазы, встроенной в ледебурито-цементитную сетку. По мере снижения содержания меди в переходном слое зёрна высокомедистой ε -фазы в ледебурито-цементитном каркасе заменяются на зёрна пластинчатого перлита, после чего структура по глубине не меняется. Сформировавшуюся структуру переходного слоя можно классифицировать как структуру с композиционным упрочнением из высокомедистой фазы в дендритах цементита с меньшей хрупкостью и повышенной прочностью благодаря пластичности меди [16, 17].

Таким образом, металлографический анализ показал высокие качество паяного шва в соединении «серый чугун – медь» с незначительным количеством пор и его механическую прочность, основанную на характере полученной структуры с композиционным упрочнением, а следовательно, имеется техническая возможность эффективного устранения сквозных раковин, несплошностей литейного происхождения в чугунных отливках путём их дуговой пайки медным плавящимся электродом.

Заключение

В рамках данного исследования была выполнена комплексная работа, направленная на изучение и совершенствование методов устранения литейных дефектов в чугунных отливках, в частности, в блоках цилиндров, с применением сварки и пайки. Актуальность темы обусловлена широким использованием чугуна в промышленности и необходимостью обеспечения высокой надежности деталей, подверженных различным видам повреждений в процессе эксплуатации.

В ходе работы были тщательно проанализированы существующие технологии ремонтной сварки чугунных деталей, включая их преимущества и недостатки. Особое внимание уделено ключевым особенностям сварки чугуна, таким как склонность к образованию трещин, пористости и других дефектов, связанных с высоким содержанием углерода и специфической структурой материала. Рассмотрено влияние формы и распределения графитовых включений на процесс сваривания, а также проведена классификация основных методов сварки, применяемых в производственных условиях.

Особый интерес представляет изучение методов наплавки и пайки, которые позволяют восстанавливать чугунные детали с минимальным риском термических деформаций. В рамках экспериментальной части исследования была подтверждена техническая возможность устранения поверхностных дефектов сваркой с использованием никельсодержащего присадочного материала. Данный подход показал высокую эффективность за счет улучшенной адгезии и снижения внутренних напряжений в зоне соединения.

Отдельно стоит отметить результаты исследования

бесфлюсовой пайки медью сквозных дефектов в чугунных отливках. Микроструктурный анализ подтвердил образование прочного соединения между серым чугуном и медью, что обеспечивает необходимую герметичность и механическую прочность. Практические испытания продемонстрировали, что предложенные методы позволяют успешно восстанавливать как поверхностные, так и сквозные дефекты, что существенно расширяет возможности ремонта чугунных деталей.

Проведенная работа имеет значительную практическую ценность, поскольку разработанные технологии могут быть внедрены в производственные процессы ремонта и восстановления чугунных отливок. Это позволит сократить затраты на замену деталей, увеличить их ресурс и повысить надежность эксплуатации. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований в области совершенствования методов сварки и пайки чугуна, включая разработку новых композитных присадочных материалов и оптимизацию режимов термообработки.

Таким образом, диссертационное исследование вносит вклад в развитие технологий ремонта чугунных изделий и может быть рекомендовано к применению в машиностроении, автомобильной промышленности и других отраслях, где используются чугунные детали.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Шкрябин Л.А. Технология ремонта корпуса шиберной задвижки для технологических трубопроводов предприятий нефтехимии [Электронный ресурс]. URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/4411>
2. Ельцов В.В. Технология сварки плавлением : электронное учебное пособие / В.В Ельцов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2019.
3. Ельцов В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин : электронное учебное пособие / В.В Ельцов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015.
4. Ельцов, В.В. Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов : учеб. пособие по дисциплинам «Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов» и «Основы восстановления деталей и ремонт автомобилей» / В.В. Ельцов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012.
5. Чигрин, В. Н. Сварка и наплавка при ремонте и восстановлении чугунных деталей / В. Н. Чигрин // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации : материалы Международной научно-практической конференции, Чистополь, 29 мая 2020 года / ЧУДПО «Научно-исследовательский и образовательный центр». – Казань: ООО ПК «Астор и Я», 2020. – С. 89-93. – EDN KJDWIT.
6. Селевцова И.В., Дорф Т.В. О применимости метода исправления дефектов чугунной корпусной отливки // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2023. № 4. С. 85-90.
7. Чуркин Б.С. Теория литейных процессов : учебник / Б.С. Чуркин. – Екатеринбург : РГППУ, 2006. – 454 с.

8. Технология литейного производства [Электронный ресурс]: учебник / Ю. И. Категоренко [и др.]; под ред. Ю. И. Категоренко, В. М. Миляева. 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. 684 с.
9. Болдырев Д. А. Исправление поверхностных дефектов отливок блоков цилиндров сваркой / Д. А. Болдырев, И. Г. Галушкин, А. Ю. Краснопевцев // Литейное производство. – 2024. – № 9. – С. 2-6.
10. Краснопевцев А.Ю. Отличия, преимущества и недостатки пайки по сравнению со сваркой // Сварочное производство. 2020. № 8. С. 39-45.
11. Рыбаков В.М. Сварка и резка металлов: Учебник для сред. проф.-техн. училищ. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 1979. – 214 с.
12. Комсомолец-100 [Электронный ресурс]. URL: <https://kazan.svarnov.ru/storage/docs/komsomolec-100-teh-dokumentaciya.pdf>
13. Сафронов Н.Н, Сафронов Г.Н., Харисов Л.Р. СВС-чугаль из дисперсных отходов машиностроения // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2017. №3(76). С. 4-17.
14. Долженко, А.М., Пушкаренко Н.В., Рязанцева В.С. Холодная пластическая деформация высокоуглеродистых чугунов // Инновационные технологии в машиностроении, образовании и экономике. Электронный журнал. 2018. № 1(7). Ч. 4. С. 32-35.
15. Гончаров В.В. Построение диаграммы состояния системы Fe-C-Si и анализ особенностей структурообразования в

- сплавах этой системы // Автореф. дисс. канд. техн. наук. Курск, 2011. 16 с.
16. Кудрявцев И.В. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Справочник в 5 томах. Т.4. Чугун. М.: Машиностроение, 1969. 248 с.
 17. Краткая химическая энциклопедия. Т. 2. Малоновый эфир / Под ред. И.Л. Кнунянц. М.: Советская энциклопедия, 1963. 1088 с.
 18. Инструкция по оформлению цитат и ссылок на первоисточники. – Тольятти: ТГУ, 2019. – 12 с.
 19. Методические указания по оформлению выпускных квалификационных работ по программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры. – Тольятти: ТГУ, 2024. – 39 с.
 20. Положение о выпускной квалификационной работе. – Тольятти: ТГУ, 2024. – 32 с.
 21. Гуревич, С. М. Дефекты отливок и методы их исправления [Текст] / С. М. Гуревич. – М.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
 22. Зубцов, М. Е. Технология сварки и наплавки чугуна [Текст] / М. Е. Зубцов, В. А. Колганов. – Л.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
 23. Лашко, Н. Ф. Пайка металлов [Текст] / Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
 24. Иванов Б. Г., Журавицкий Ю. И., Левченков В. И. Сварка и резка чугуна. М., «Машиностроение», 1977. 208 с.
 25. Чернышов Г.Г. Сварочное дело : Сварка и резка металлов : учебник для начального профессионального образования. – 8-е изд., стер. – М.: Академия, 2013. – 496 с.

26. Easterling, K. Brazing of Cast Iron: Process Optimization and Mechanical Properties. *Welding Journal*. – 2016. – Vol. 95 № 3. – P. 85-94.
27. Klančnik, G., Habjan, J., & Klobčar, D. Welding of Cast Iron: Challenges and Solutions. *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2018. – Vol. 27 № 6. – P. 2765-2775.
28. Lippold, J. C. *Welding Metallurgy and Weldability of Cast Irons*. John Wiley & Sons. – 2015. – Vol. 1 № 1. – P. 1-320.
29. Sokolov, G., Salenko, A., & Zhukov, I. Repair Techniques for Cast Iron Defects: Brazing vs. Welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 103 № 1-4. – P. 567-578.
30. Wang, H., Li, Y., & Zhang, X. Microstructure and Properties of Repaired Cast Iron by Laser Cladding. *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 185 № 1. – P. 108234.