

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
Кафедра Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.И. Темных
(подпись)
«__» _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Направление 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

Профиль 22.04.01.04 Синтез и литьё новых металлических материалов

Научный руководитель

(подпись, дата)

А.М. Токмин

Выпускник

(подпись, дата)

Д.Д. Мальцев

Рецензент

(подпись, дата)

С.В. Мишнев

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В. И. Темных
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2018 г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту Мальцеву Данилу Дмитриевичу

Группа МТ 18-01М Направление (специальность): 22.04.01
«Материаловедение и технологии материалов» (22.04.01.04 «Синтез и литье
новых металлических материалов»)

Тема выпускной квалификационной работы: «Исследование процесса
индукционного нагрева для получения слоистых композиционных
материалов»

Утверждена приказом по университету № 17235/с от 09 ноября 2018.

Руководитель ВКР: А.М. Токмин, доцент, кандидат технических наук,
кафедра М и ТОМ.

Исходные данные для ВКР: информационный обзор, исследования на
кафедре.

Перечень разделов ВКР:

1. Анализ литературных данных
2. Методики и технология эксперимента
3. Экспериментальные исследования
4. Заключение и основные выводы по результатам исследований

Руководитель ВКР _____ доцент, к.т.н. А.М.Токмин
подпись, дата должность, ученая степень, инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению _____ Д.Д. Мальцев
подпись, дата инициалы, фамилия

« _____ » _____ 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Слоистые композиционные материалы, обладающие разнообразными физико-химическими свойствами, применяются в машиностроении, теплоэнергетики, горно-добывающей, металлургической области и др. Технология индукционного нагрева, заложенная В.П. Вологдиным находит широкое применение для термической обработки и наплавки различных сплавов.

В магистерской диссертации представлены исследования процессов индукционной наплавки порошковых материалов различных структурных классов на стальную подложку. Целью работы является исследование процесса и отработка технологии индукционного нагрева для получения слоистых композиционных материалов. В ходе работы проведен анализ литературы по способам получения слоистых КМ, изучена теория нагрева в условиях действия высокочастотного электромагнитного поля, и описана кинетика нагрева подложки и порошкового материала. Изготовлены образцы слоистых композиционных материалов различных толщин как наплавленного слоя, так и слоя подложки. Исследованы микроструктуры и определены фазы, образованные в зоне сплавления материалов.

В результате исследований отработаны режимы наплавки разного рода материалов различной толщины, на подложку. Впоследствии чего были изучены структуры, фазовый состав, распределение элементов в наплавленном материале, переходной зоне и подложке.

Ключевые слова:

СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ,
МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ПОРОШОК, ПОДЛОЖКА, ИНДУКЦИОННАЯ
НАПЛАВКА, МИКРОСТРУКТУРА, КАРБИД ХРОМА.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Исследование процесса индукционного нагрева для получения слоистых композиционных материалов» содержит 80 страниц текстового документа, 41 рисунок, 40 использованных источников.

Цель работы: исследование и отработка технологии индукционного нагрева для получения слоистых композиционных материалов.

Задачи:

1 Изучить принципы индукционной наплавки и особенности технологии при наплавке порошковыми материалами.

2 Отработать технологию индукционной наплавки порошковыми материалами с различными магнитными свойствами 1 порошок ПР-10Р6М5 с ферромагнитными свойствами и 2 порошок ПГ-С27 «Сормайт» с парамагнитными свойствами

3 Провести экспериментальные исследования образцов, наплавленных по разработанной технологии.

4 Определить степень влияния режимов индукционной наплавки на структуру и свойства слоистых композиционных материалов.

В ходе работы проведен анализ литературы по способам получения слоистых КМ, изучена теория нагрева в условиях действия высокочастотного электромагнитного поля, и описана кинетика нагрева подложки и порошковых материалов. Изготовлены образцы слоистых композиционных материалов различных толщин наплавленного слоя на подложку. Исследованы микроструктуры и определены фазы, образованные в зоне сплавления материалов.

В результате исследований отработаны режимы наплавки разного рода материалов различной толщины на подложку. Впоследствии чего были изучены структуры, фазовый состав, распределение элементов в наплавленном материале, переходной зоне и подложке.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Композиционные материалы	9
1.1 Волокнистые композиционные материалы	10
1.2 Дисперсно-упрочненные композиционные материалы	11
1.3 Слоистые композиционные материалы	13
2 Способы получения слоистых композиционных материалов (СКМ)	15
2.1 Основные виды наплавов	16
2.2 Материалы, применяемые для наплавки	32
3 Индукционная наплавка порошковыми материалами	37
3.1 Теоретические сведения индукционной наплавки	37
3.2 Изготовление порошков	42
3.3 Способы индукционной наплавки.....	44
4 Оборудование и методы исследования.....	56
5 Экспериментальная часть.....	65
5.1 Применяемые наплавляемые материалы.....	65
5.2 Технология получения СКМ методом индукционного нагрева	68
5.3 Анализ структур наплавленного слоя порошков ПР-10Р6М5 и ПГ-С27 «Сормайт»	72
Заключение	76
Список использованных источников	77

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной работы изделия, предназначены для работ в условиях высоких температур и агрессивного воздействия внешней среды, должны обладать специфическими свойствами, одновременно сочетающими жаропрочность, жаростойкость, термо-механическую усталость, теплопроводность и др. Для их получения используются инновационные технологии, предусматривающие формирование гетерогенных материалов, одной из которых является – индукционная наплавка.

Современное представление об эффективном управлении свойствами материалов основывается на возможности создания условий, которые могут радикально влиять на процессы самоорганизации структур. Высокоэнергетическое воздействие способствует увеличению скоростей нагрева и охлаждения, что в последствии приводит к созданию максимально неравновесных структур, которые, при конкретных ситуациях, могут обеспечить требуемый комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств. Управление структурообразованием материалов заданного состава, в условиях далеких от термодинамического равновесия, позволяет обеспечить требуемую стойкость рабочей зоны изделия при воздействии высоких контактных и динамических нагрузок в условиях абразивного, ударно-абразивного и ударного износа.

Применение индукционной наплавки является эффективным способом повышения служебных свойств деталей машин и инструмента.

Использование порошков высоколегированных сталей и сплавов для нанесения покрытия на сталь позволяет получать в наплавленном слое широкую гамму структурных и фазовых составляющих и, следовательно, регулировать свойства рабочей поверхности. Поэтому, комплексный подход, включающий многофакторное воздействие на фазо- и структурообразование в металлических системах с применением современного оборудования, имеет особую актуальность.

Целью работы является исследование процесса и отработка технологии индукционного нагрева для получения слоистых композиционных материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1 Изучить принципы индукционной наплавки и особенности технологии при наплавке порошковыми материалами.

2 Отработать технологию индукционной наплавки порошковыми материалами с различными магнитными свойствами 1 порошок ПР-10Р6М5 с ферромагнитными свойствами и 2 порошок ПГ-С27 «Сормайт» с парамагнитными свойствами

3 Провести экспериментальные исследования образцов, наплавленных по разработанной технологии.

4 Определить степень влияния режимов индукционной наплавки на структуру и свойства слоистых композиционных материалов.

1 Композиционные материалы

Композиционный материал представляет собой искусственно созданный гетеро фазный неоднородный материал, состоящий из двух и более компонентов, с чёткой границей раздела фаз и сохранением индивидуальности каждого отдельного компонента.

На сегодняшний день композиционные материалы нашли широкое применение в авиастроении, судостроении, приборостроении, нефтяной, сельскохозяйственной и других отраслях промышленности [1].

Композиционные материалы, как правило, состоят из трёх составляющих: матрица, различного рода армирующие включения и межфазная граница.

Во всех композиционных материалах, кроме слоистых, в основе лежит матрица и включённые в неё армирующие элементы. Матрица обеспечивает монолитность композита, создаёт форму изделия и взаимное расположение армирующей составляющей, равномерно распределяет напряжение по всему объёму материала и перераспределяет при разрушении некоторых волокон [16].

В качестве матричного материала используют металлический, углеродный и керамический материал.

Предъявляемые требования к матрице делятся на 2 группы:

- технологические (определяют способ создания изделий из КМ, параметры технологических процессов и др.);
- эксплуатационные (прочность, стойкость, износостойкость, ударная вязкость, физико–химические свойства, температура эксплуатации и т.д.).

Для КМ характерны следующие признаки:

- 1 Состав и форма компонентов определены заранее;
- 2 Компоненты присутствуют в количествах, обеспечивающих заданные свойства материала;

3 КМ является однородным в макромасштабе и неоднородным в микромасштабе;

4 Компоненты различаются по свойствам;

5 Между компонентами существует явная граница раздела.

По структуре КМ делятся на несколько основных классов:

- слоистые;
- волокнистые;
- дисперсно-упрочненные;
- упрочнённые частицами;
- нано композиты.

1.1 Волокнистые композиционные материалы

Волокнистые КМ представляют собой матрицу и армирующий материал в виде волокон или нитевидных кристаллов (рис.1). Даже небольшое количество армирующего материала приводит к появлению новых механических свойств [1]. Изменение количества, размера и концентрации армирующих элементов позволяет менять свойства материала. Армирование волокнами позволяет придать материалу определенные свойства в разных направлениях по заданной оси.

В волокнистых КМ упрочняющими элементами являются волокна или нитевидные кристаллы чистых элементов и тугоплавких соединений (С, В, Al₂O₃, SiC и др.), и проволоки из металлов и сплавов (Мо, Ве, W и др.) Для армирования используют непрерывные и дискретные волокна с размером диаметра от долей до сотен микрометров [4].

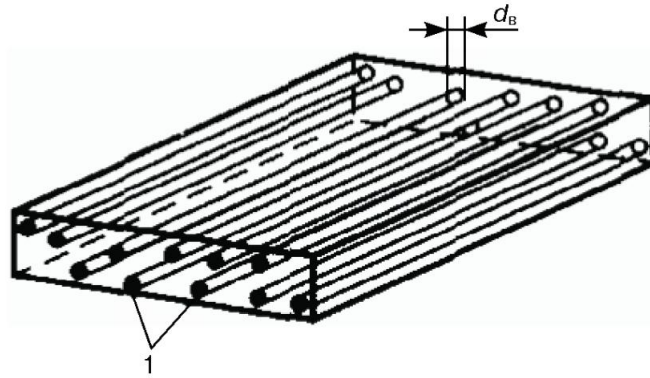


Рисунок 1 – Волокнистый КМ:

1 – волокна в матрице, $d_в$ – диаметр волокна

Механические свойства высокопрочных материалов определяются наличием поверхностных дефектов (разрезов, трещин и т. д.). Около вершин этих дефектов, концентрируются внутренние напряжения, которые зависят от внешнего приложенного напряжения, глубины трещины и радиуса кривизны в вершине трещины. Для хрупких материалов коэффициент концентрации напряжений (ККН) 102-103. В этом случае при действии уже относительно небольших напряжений у кончика трещины растягивающие напряжения достигают предельных значений и материал разрушается.

Существует критическая длина трещины, приводящая к разрушению материала. Важен тот факт, что соответствующее критическое напряжение зависит от абсолютного размера трещины [16]. Из хрупких веществ материал с высокой воспроизводимой прочностью можно получать в основном в виде волокон. Это обусловлено тем, что волокна менее чувствительны к имеющимся в них дефектам.

Особенность волокнистой композиционной структуры заключается в равномерном распределении высокопрочных, высокомодульных волокон в пластичной матрице.

1.2 Дисперсно-упрочненные композиционные материалы

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДКМ) представляют собой материалы, в матрице которых равномерно распределены

мелкодисперсные частицы армирующего вещества (рис.2). В таких материалах при нагружении всю нагрузку воспринимает матрица, в которой с помощью множества практически не растворяющихся в ней частиц 2-й фазы создается структура, эффективно сопротивляющаяся пластической деформации.

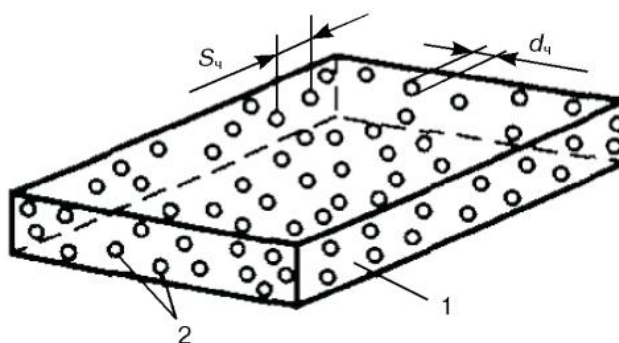


Рисунок 2 –Дисперсно–упрочнённый КМ:

1 – матрица; 2 – армирующие частицы; $d_ч$ – диаметр частицы;
 $S_ч$ – расстояние между частицами

Известно, что вязкий, материал перед разрушением претерпевает значительную деформацию. Причем пластические деформации (сдвиг) в реальных кристаллических материалах начинаются при напряжениях, которые меньше, чем теоретически рассчитанные, примерно в 1000 раз.

Такая низкая прочность по сравнению с теоретической объясняется двумя возможными факторами:

- 1 в пластической деформации активно участвуют дислокации;
- 2 сказывается масштабный фактор соотношения длины межатомных связей и размеров образца.

Чаще придерживаются 1-й теории. При деформации, благодаря дислокациям, сдвиг атомов в соседнее положение происходит не одновременно по всей поверхности скольжения, а скачками. Такое постепенное скольжение за счет небольших смещений атомов в области дислокаций не требует значительных напряжений, что и проявляется при испытаниях пластичных материалов [2].

1.3 Слоистые композиционные материалы

Слоистые КМ состоят из матрицы и армирующего материала, но что характерно, расположение армирующих фаз, в данном случае, идёт послойно (рис.3).

Структура слоистых композитов представлена чередующимися матричными и армирующими слоями. Объёмная доля армирующих слоёв задаётся соотношением толщин матричного и армирующего слоя [8,9].

Слои в композитах, в зависимости от их толщины, можно классифицировать как листы или пластины с толщиной 1 – 10 мм и более, фольги толщиной 0,05 – 1 мм и плёнки толщиной 10^{-3} – 0,05 мм [8].

Слоистые композиционные материалы можно классифицировать исходя из свойств матрицы и наполнителя:

- 1) на материалы с твёрдой матрицей и мягким наполнителем;
- 2) на материалы с мягкой матрицей и твёрдым наполнителем.

Материалы первой группы применяются в качестве жаростойких композитов, а материалы второй группы – в качестве теплостойких материалов [10].

По функциональным признакам все производимые в настоящее время слоистые композиты подразделяются на следующие виды: коррозионностойкие, антифрикционные, электротехнические, инструментальные, износостойкие, термобиметаллы, биметаллы для глубокой вытяжки и бытовых изделий.

К слоистым композитам относятся биметаллы, имеющие в составе два разных металла с очень разными коэффициентами линейного расширения α -слой, β -слой [11]. При изменении температуры биметаллы деформируются, и эту деформацию можно точно определять.

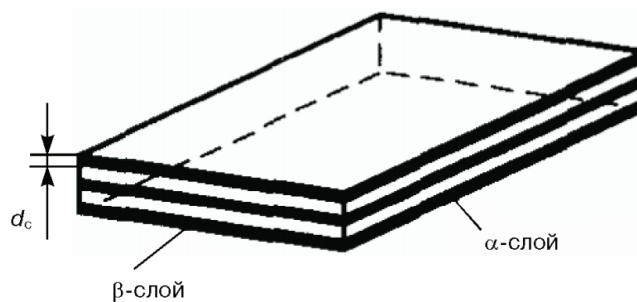


Рисунок 3 – Слоистый КМ:

d_c – толщина слоя в слоистом α – β –композите

Алюминий и некоторые высокопрочные алюминиевые сплавы обладают низкой коррозионной стойкостью, поэтому высокопрочный алюминий, покрытый коррозионным алюминиевым сплавом, обладает одновременно высокими прочностью и коррозионной стойкостью.

Можно называть слоистое стекло и ламинаты на основе пластиков как слоистые КМ [5].

Применение слоистых металлических композиций позволяет не только повысить надёжность и долговечность деталей и оборудования, но и существенно сократить расход высоколегированных сталей, дефицитных и дорогостоящих цветных металлов (никель, хром, медь, молибден и др.), снизить энергоёмкость и металлоёмкость, расходы на техническое обслуживание, производство запчастей и ремонт оборудования [11].

Слоистые композиционные материалы (СКМ) применяют в таких сферах деятельности как строительство, машиностроение, авиа – и приборостроение. Так же слоистые композиты применяются в химической и нефтехимической промышленности, используются в качестве несущих конструкция, переходников, приспособлений и деталей, которые должны обладать определенными свойствами.

2 Способы получения слоистых композиционных материалов (СКМ)

В настоящее время имеется много способов получения слоистых композиционных материалов. Разработки в данном направлении способствуют созданию современных машин, приборов, аппаратов с новым комплексом свойств [6].

При выборе способа получения СКМ, необходимо учитывать глубину проплавления компонента и скорости нагрева.

При анализе литературы по производству СКМ были выявлены основные способы: газовая наплавка, сварка взрывом, дуговая наплавка под флюсом, наплавка открытой дугой, наплавка в среде защитного газа, наплавка порошковой проволокой, вибродуговая наплавка, электрошлаковая наплавка, плазменная наплавка, индукционная наплавка.

Наплавкой называют процесс соединения двух и более компонентов, с целью увеличения толщины или формирования специальных качеств слоя, отличающихся от свойств основного металла [1,7].

В зависимости от требований к изделиям выделяются основные свойства матрицы:

- 1 Повышенная износостойкость;
- 2 Коррозионная стойкость;
- 3 Жаростойкость;
- 4 Малое электрическое сопротивление и т.д.

Наплавку используют при восстановлении изношенных деталей и изготовлении новых [7]. Применение определенных сталей и сплавов при наплавке позволяет повысить надежность узлов и деталей высокопроизводительных агрегатов и машин, уменьшить потребление дорогостоящих материалов.

2.1 Основные виды наплавок

В настоящий момент известно большое количество способов наплавки, к наиболее распространенным из них относятся следующие:

- газовая наплавка;
- дуговая наплавка под флюсом;
- наплавка открытой дугой;
- наплавка в среде защитного газа;
- наплавка порошковой проволокой;
- автоматическая наплавка под флюсом ленточным электродом;
- вибродуговая наплавка;
- электрошлаковая наплавка;
- плазменная наплавка;
- сварка взрывом;
- индукционная наплавка.

Газовая наплавка (рис. 4). Газовая наплавка – один из способов сварки плавлением, протекающей в условиях частичного оплавления основного металла при использовании высокотемпературного пламени, получаемого при сжигании смеси горючего газа с кислородом [12].

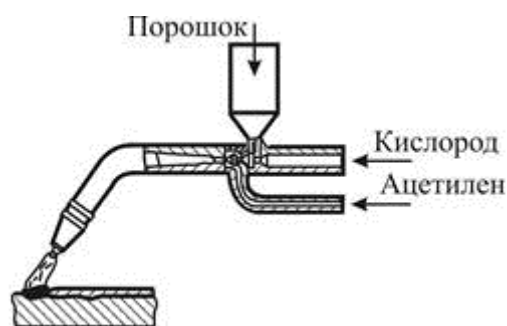


Рисунок 4 – Горелка для газопорошковой наплавки

Газовая наплавка обеспечивает следующие преимущества:

- незначительное проплавление основного металла;
- возможность наплавки деталей сложной формы;

– уменьшение опасности возникновения трещин, поскольку процесс наплавки включает предварительный подогрев и последующее замедленное охлаждение изделия;

– низкая стоимость сварочного оборудования.

Вместе с тем для газовой наплавки характерны и недостатки:

– низкая производительность при наплавке массивных деталей, требующих продолжительного предварительного подогрева;

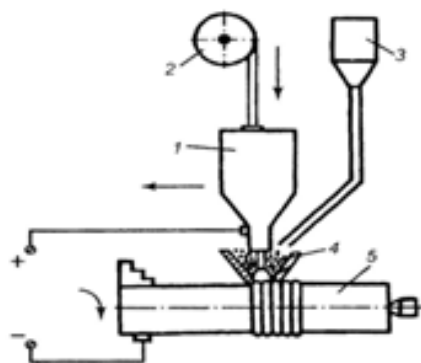
– высокая квалификация сварщика;

– отсутствие возможности автоматизации процесса;

– при работе с легированными сталями и цветными металлами требуется применения флюсов;

– низкая экологичность процесса.

Дуговая наплавка под флюсом. Возможность наплавки при большой силе тока и высокой погонной энергии обеспечивает этому способу высокую производительность при хорошем качестве наплавляемого металла, и благодаря этому данный способ занимает основное положение в области автоматической наплавки (рис. 5).



- 1 – наплавочный аппарат;
- 2 – кассета;
- 3 – бункер;
- 4 – приемник;
- 5 – деталь

Рисунок 5 – Схема установки для дуговой наплавки под слоем флюса

Дуговая наплавка под флюсом имеет следующие преимущества:

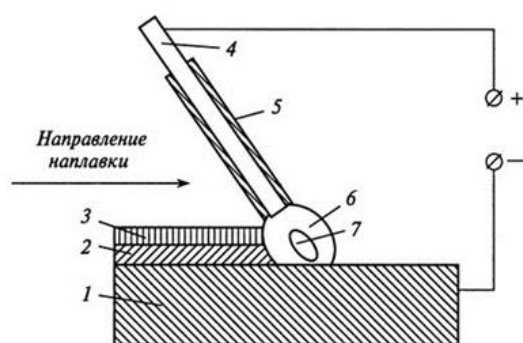
– высокая производительность процесса при наплавке изделий простой формы с большой площадью наплавляемой поверхности;

- простота осуществления процесса, не требующего высокой квалификации сварщика;
- возможность получения хорошего внешнего вида валика;
- хорошие условия труда, связанные с отсутствием разбрызгивания электродного металла, потому что дуга скрыта под слоем флюса.

Этому способу наплавки присущи следующие недостатки:

- более высокая стоимость оборудования, чем для ручной дуговой наплавки покрытыми электродами;
- непригодность для наплавки мелких изделий сложной формы;
- большая глубина проплавления основного материала;
- невозможность изготовления тонкостенных деталей.

Наплавка открытой дугой. Наплавка без защитной среды, в среде воздуха, осуществляется проволокой сплошного сечения или порошковой проволокой при отсутствии подачи флюса или защитного газа в зону дуги [12]. Наплавка проволокой сплошного сечения связана с большими практическими трудностями и уступает способу наплавки порошковой проволокой с флюсовой сердцевинкой (рис. 6).



- 1 – основной металл;
- 2 – наплавленный валик;
- 3 – шлаковая корка;
- 4 – электродный стержень;
- 5 – покрытие электродного стержня;
- 6 – газшлаковая защита;
- 7 – сварочная ванна

Рисунок 6 – Схема ручной наплавки

Наплавка открытой дугой порошковой проволокой обладает следующими преимуществами:

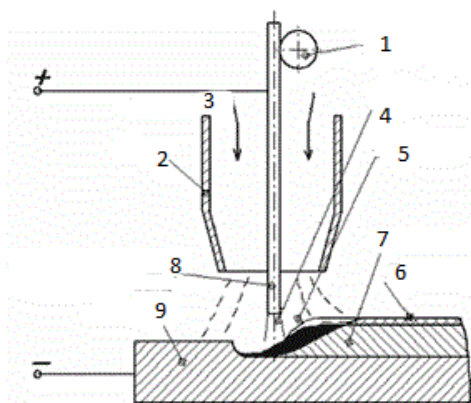
- простота используемого оборудования и технологии, связанная с отсутствием необходимости применения защитного газа и флюса;
- возможность наплавки в полевых условиях;
- простой способ введения легирующих элементов в наплавленный металл, состав которого можно регулировать в широких пределах.

Однако имеется ряд недостатков:

- большая глубина проплавления основного материала при наплавке разнородных материалов;
- высокая стоимость получения проволок сложного химического состава.

Наплавка в среде защитного газа. Способ состоит в дуговой наплавке при защите зоны дуги аргоном, гелием или иным инертным газом. Наплавку в среде инертного газа (рис. 7) осуществляют в двух вариантах: плавящимся и вольфрамовым электродами. Задача получения наплавленного металла с заданными свойствами требует тщательного выбора состава защитного газа. Применение механизированных средств подачи наплавочного материала с постоянной скоростью позволяет осуществлять наплавку в автоматическом или полуавтоматическом режиме [12].

Применение инертного газа исключает необходимость использования флюса, поэтому данный способ особенно эффективен при наплавке цветных металлов, высоколегированных сталей и других материалов, чувствительных к окислению и азотированию. Высокое качество наплавленного металла обеспечивается при широком выборе наплавочных материалов.



- 1 – механизм подачи сварочной проволоки;
- 2 – сопло;
- 3 – защитный газ;
- 4 – сварочная дуга;
- 5 – газовая среда;
- 6 – шлаковая корка;
- 7 – наплавленный металл;
- 8 – плавящийся электрод;
- 9 – изделие

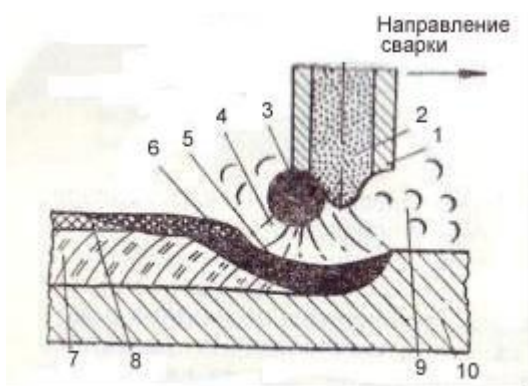
Рисунок 7 – Схема наплавки в защитном газе плавящимся электродом

Наплавка порошковой проволокой. Порошковая проволока представляет собой непрерывный электрод трубчатой или другой, более сложной конструкции с порошкообразным наполнителем – сердечником. Сердечник состоит из смеси минералов, руд, ферросплавов металлических порошков, химикатов и других материалов. Назначение различных составляющих сердечника подобно назначению электродных покрытий – защита расплавленного металла от вредного влияния воздуха, раскисление, легирование металла, стабилизация дугового разряда и др. Составляющие сердечника должны, кроме того, удовлетворять общепринятым требованиям, предъявляемым ко всем сварочным материалам: обеспечивать хорошее формирование швов, легкую отделимость шлаковой корки, провар основного металла, минимальное разбрызгивание металла, отсутствие пор, трещин, шлаковых включений и других дефектов, определенные механические свойства швов и сварных соединений и т. д.

Порошковые проволоки используются для сварки без дополнительной защиты зоны сварки, а также для сварки в защитных газах, под флюсом, электрошлаковой. Проволоки, используемые для сварки без дополнительной защиты, называются само защитными. Входящие в состав сердечника проволоки таких материалов при нагреве и расплавлении в дуге создают необходимую шлаковую и газовую защиту расплавленного металла. В

настоящее время наибольшее распространение получили порошковые проволоки для сварки в углекислом газе и само защитные порошковые проволоки. В зависимости от диаметра и состава порошковой проволоки сварка может осуществляться во всех трех пространственных положениях.

Схема процесса сварки самозащитой порошковой проволокой со свободным формированием шва приведена на рис. 8. Электрическая дуга возбуждается между оболочкой 1 порошковой проволоки и основным металлом 10. За счет тепла, выделяемого в дуге, плавятся оболочка и сердечник 2 проволоки. Расплавившийся металл оболочки и сердечника образует на торце проволоки капли 3, которые растут и переносятся в сварочную ванну 5. При расплавлении минералов, руд и химикатов, входящих в состав сердечника, образуется шлак 6, покрывающий тонким слоем капли и сварочную ванну. Дуга 4 горит между каплей или оболочкой и сварочной ванной. При разложении карбонатов и органических материалов сердечника выделяются Газы 9, которые защищают расплавленный металл от воздуха. Проволока по мере оплавления автоматически подается в зону сварки. При удалении дуги жидкий металл сварочной ванны кристаллизуется, образуя сварной шов 7, покрытый слоем затвердевшего шлака 8.

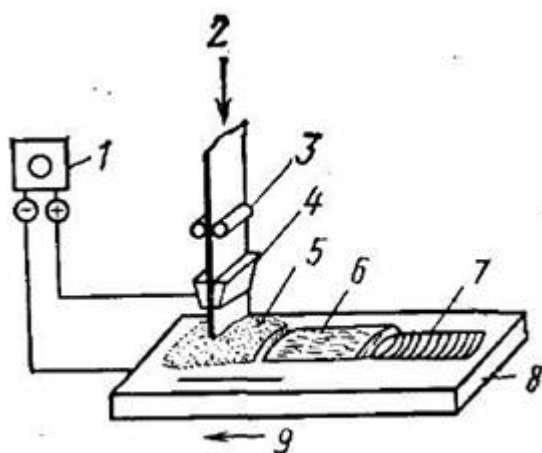


- 1 – оболочка;
- 2 – сердечник проволоки;
- 3 – капля;
- 4 – дуга;
- 5 – сварочная ванна;
- 6 – шлак;
- 7 – сварной шов;
- 8 – затвердевший шлак;
- 9 – газы;
- 10 – основной металл

Рисунок 8 – Схема процесса наплавки самозащитной порошковой проволокой

Автоматическая наплавка под флюсом ленточным электродом.

Такой метод основан на применении специального ленточного электрода, который можно рассматривать как большое количество обычных электродов, расположенных в один ряд (рис. 9).



- 1 – источник питания;
- 2 – ленточный электрод;
- 3 – ролики подачи электрода;
- 4 – мундштук (токоподвод);
- 5 – флюс;
- 6 – шлак;
- 7 – наплавленный металл;
- 8 – основной металл;
- 9 – направление наплавки

Рисунок 9 – Наплавка ленточным электродом и оплавление конца ленточного электрода

При увеличении ширины ленты ширина валика возрастает, глубина проплавления уменьшается от 2,8 до 0,9 мм.

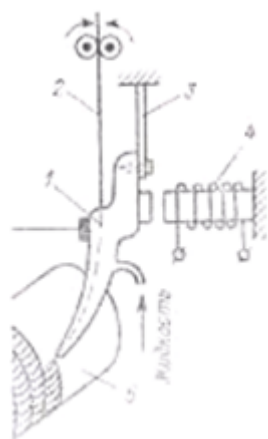
В настоящее время выпускают ленту холодного проката шириной от 20,0 до 100 мм и толщиной от 0,4 до 1,0 мм и литые ленты большей толщины. Проплавление основного металла при хорошо подобранных режимах 0,5–1,5 мм. За один проход можно наплавить валик толщиной от 2 до 8 мм. Доля участия основного металла в наплавленном валике составляет от 5 до 10 %. Коэффициент наплавки будет в пределах 15–20 г/(А·ч). Способ эффективен для наплавки больших поверхностей однотипных деталей.

Порошковая лента позволяет за счет изменения состава шихты в широких пределах изменять химический состав наплавленного металла. Для наплавки лентой применяются специальные автоматы или автоматы типа А–384, АБС, АДС – 1000–2 с измененной сварочной головкой, имеющей постоянную скорость подачи ленты.

Наплавка в защитном газе позволяет механизировать процесс в любом пространственном положении наплавляемой плоскости. В качестве защитных газов используются аргон, гелий, углекислый газ и др.

Аргон применяется для наплавки жаропрочных, коррозионностойких и других сталей и цветных металлов; углекислый газ для наплавки углеродистых и некоторых марок легированных сталей. Автоматическая наплавка в среде CO_2 в 3–4 раза повышает производительность и на 30–40 % снижает себестоимость восстановления деталей по сравнению с ручной дуговой наплавкой.

Вибродуговая наплавка представляет собой разновидность электрической дуговой наплавки металлическим электродом. Вибрация электрода, вызывающая многократные короткие замыкания сварочной цепи, улучшает стабильность процесса за счет частых возбуждений дуговых разрядов в моменты разрыва цепи и способствует переносу электродного металла малыми порциями. Это позволяет получать небольшую глубину проплавления и возможность наплавлять детали малого диаметра. Наплавка производится специальной головкой 1, которая в процессе наплавки периодически замыкает и размыкает электрическую цепь в месте контакта электродной проволоки 2 с наплавляемой деталью 5. Происходит это потому, что конец проволоки постоянно вибрирует (рис. 10). Головка для наплавки обычно монтируется на токарном или токарно-винторезном станке.



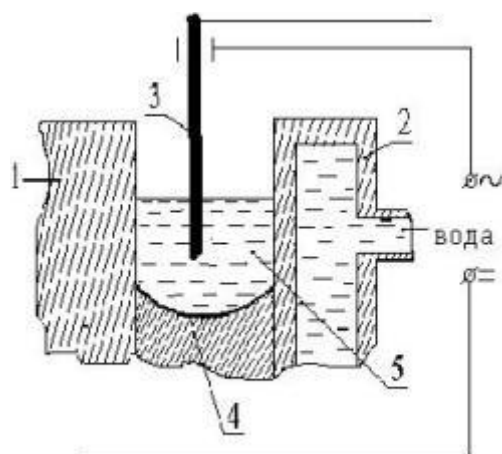
- 1 – головка;
- 2 – сварочная проволока;
- 3 – плоская пружина;
- 4 – электромагнитный вибратор;
- 5 – наплавляемая деталь

Рисунок 10 – Вибродуговая наплавка

При наплавке в плавильную зону подаются: 3–4 % водный раствор кальцинированной соды, 20–30 % раствор технического глицерина и др. Они обеспечивают ионизацию дугового промежутка и более быстрый отвод теплоты, что позволяет получать более высокую твердость наплавленного слоя при незначительных остаточных деформациях.

Способ эффективен при наплавке цилиндрических поверхностей малых диаметров. Для восстановления размеров применяют также электрическую металлизацию.

Электрошлаковая наплавка (рис. 11). Наплавка этим способом протекает в условиях непрерывной подачи электродной проволоки или ленты внутри слоя расплавленного шлака, а плавление их происходит за счет теплоты электросопротивления при пропускании тока между основным металлом и электродом [7].



- 1 – направляемая поверхность;
- 2 – водоохлаждаемый кристаллизатор;
- 3 – присадочный материал;
- 4 – наплавленный металл;
- 5 – жидкий шлак

Рисунок 11 – Схема электрошлаковой наплавки

В полость, образованную наплавляемой поверхностью 1 и водоохлаждаемым кристаллизатором 2, подается присадочный материал 3. Ток, проходя между электродом и наплавленным металлом 4 через жидкий шлак 5, поддерживает в нем высокую температуру (до 2000 °С) и электропроводность.

Электрошлаковая наплавка обладает следующими преимуществами:

– экономичность наплавки возрастает при увеличении толщины наплавляемого слоя (применение многоэлектродных головок обеспечивает наплавку слоя большой толщины без существенного увеличения продолжительности наплавки);

– меньше расход флюса, чем при дуговой наплавке под флюсом;

– возможность наплавки высокоуглеродистых и других материалов, обладающих высокой чувствительностью к образованию трещин, что обеспечивается низкой скоростью охлаждения наплавленного металла;

– относительная простота процесса наплавки, особенно при использовании расходоуемого наконечника.

Так же этот метод имеет ряд недостатков:

– процесс очень энергоемкий;

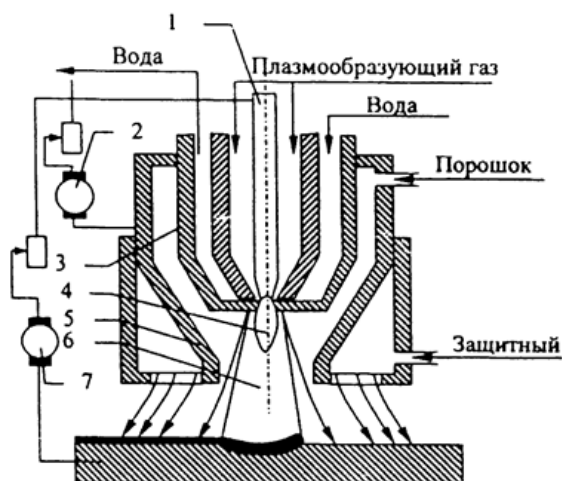
– дорогостоящий;

– невозможность наплавки малогабаритных изделий.

Плазменная наплавка. Современный способ нанесения износостойких покрытий на рабочую поверхность при изготовлении и восстановлении изношенных деталей машин [29]. От других методов она отличается тем, что, нагрев и плавление материала покрытия и поверхностного слоя основы осуществляется плазменной струей (рис.12). В зону наплавки подается наплавочная проволока, порошок или при комбинированном способе одновременно порошок и проволока (например, для восстановления изношенных деталей автомобиля на Витебском мотороремонтном заводе применяют 75...80% проволоки Св-08Г2С и 20...25% самофлюсующегося порошка ПГ-СРУ).

Плазмой называется высокотемпературный сильно ионизированный газ, состоящий из молекул, атомов, ионов, электронов, световых квантов и др. При дуговой ионизации газ пропускают через канал и создают дуговой разряд, тепловое влияние которого ионизирует газ, а электрическое поле создаёт направленную плазменную струю. Газ может ионизироваться также под действием электрического поля высокой частоты. Газ подаётся при

давлении в 2 ...3 атмосферы, возбуждается электрическая дуга силой 400 ... 500 А и напряжением 120 ... 160 В. Ионизированный газ достигает температуры 10 ... 18 тыс. С, а скорость потока - до 15000 м/сек. Плазменная струя образуется в специальных горелках – плазмотронах. Катодом является не плавящийся вольфрамовый электрод.



- 1 – вольфрамовый электрод;
- 2 – источник питания дуги косвенного действия;
- 3 – внутреннее сопло;
- 4 – плазменная струя косвенного действия;
- 5 – наружное сопло;
- 6 – плазменная струя прямого действия;
- 7 – защитный газ.

Рисунок 12 – Схема плазменной наплавки с вдуванием порошка в дугу

Достоинствами плазменной наплавки являются:

- Высокая концентрация тепловой мощности и минимальная ширина зоны термического влияния.
- Возможность получения толщины наплавляемого слоя от 0,1 мм до нескольких миллиметров.
- Возможность наплавления различных износостойких материалов (медь, латунь, пластмасса) на стальную деталь.
- Возможность выполнения плазменной закалки поверхности детали.
- Относительно высокий КПД дуги (0.2 ... 0.45).
- Малое (по сравнению с другими видами наплавки) перемешивание наплавляемого материала с основой, что позволяет достичь необходимых характеристик покрытий.

В качестве плазмообразующих газов можно использовать аргон, гелий, азот, кислород, пар, водород и воздух. Наилучшие результаты наплавки получаются с аргоном и гелием.

Плазменная наплавка целесообразна для восстановления крупногабаритных деталей большой длины и диаметром более 20 мм из углеродистых и легированных сталей (например, коленчатых валов, валов насосов бумагоделательных машин и т.п.)

Наплавка ведется на установке скоростной плазменной наплавки (источник питания УПС-301, плазмотрон СИБ-4, сила тока 90...170А, напряжение 30...35В, поперечная подача плазмотрона 1,5...2 мм/об, дистанция наплавки 8...10 мм).

Наиболее приемлем диффузионно-легированный самофлюсующийся порошок на основе ПР-Сталь 45 с гранулометрическим составом 40...160 мкм. Расход порошка 35 г/мин, толщина наплавленного слоя за проход 0,5...1,5мм, твердость – требуемая (диапазон 20...60 HRC).

Сварка взрывом. Сварка взрывом представляет собой твердофазный, без диффузионный, управляемый технологический процесс получения сварных соединений однородных и разнородных металлов [19]. Характерными для сварки взрывом являются интенсивные пластические деформации металла в околошовной зоне, вызванные воздействием импульса высокой амплитуды и малой длительностью.

В некоторых случаях сварка взрывом является единственным возможным способом изготовления композиционного материала необходимого состава и геометрических размеров [17]. При этом не требуется узкоспециализированного дорогостоящего оборудования.

В настоящее время существует большое число схем процесса сварки взрывом, но все они основываются на базовой схеме (рис. 13)

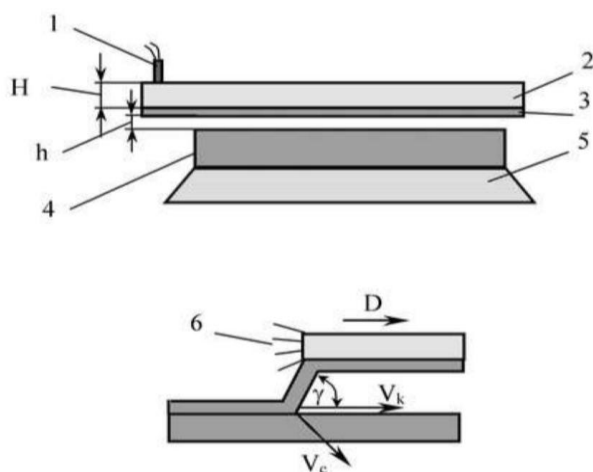


Рисунок 13 – Схема сварки взрывом.

На опоре 5 укладывают основную пластину 4, сверху над которой располагается метаемая пластина 3. На метаемый слой располагают заряд взрывчатого вещества высотой H – 2 и закрепляют детонатор 1. При активации происходит распространение детонационной волны по заряду, со скоростью детонации D . С действием давления 6 отдельные участки метаемой пластины поочередно получают скорость порядка нескольких сотен метров в секунду, поворачиваются относительно своей оси и соударяются со скоростью V_c с неподвижной пластиной. В результате косоуго соударения, правильно выбранных параметрах процесса в зоне контакта происходят частичная очистка соединяемых поверхностей, их активизация и образование соединения со скоростью V_k с волнообразной границей раздела слоев.

Во время изготовления цилиндрических прутков материал для изготовления композита находится в стальной трубе, которая находится внутри взрывчатого вещества. В процессе взрыва происходит динамическое обжатие и прочное соединение металла матрицы с металлом наполнителя. В итоге формируется композиционный материал цилиндрической формы (рис. 14).

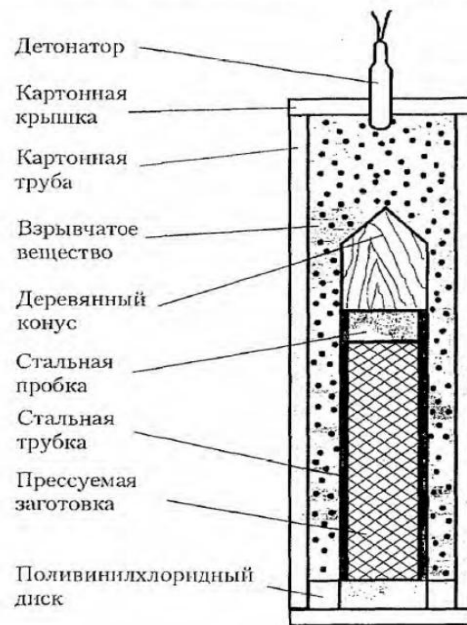


Рисунок 14 – Схема получения цилиндрических композиционных материалов сваркой взрывом

Вследствие сварки взрывом пакета слоистых материалов происходит совместная пластическая деформация поверхностных слоев соединяемых металлов. Происходит сближение металлов на расстояние взаимодействия межатомных сил. При этом происходит упрочнение по всей толщине каждого слоя, а величина этого упрочнения зависит от индивидуальных свойств материала данного слоя.

В случае деформации взрывом слоистых композиционных материалов с резко различающимися температурами плавления необходимо учитывать возможность оплавления одной из составляющих.

Режимы сварки взрывом подбираются в зависимости от материала матрицы и упрочнителя. Помимо этого, необходимо контролировать массу заряда взрывчатого вещества, скорость детонации и другие параметры [13].

Индукционная наплавка. Основоположником метода индукционной термической обработки и промышленного использования токов высокой частоты для нагрева металла является профессор В. П. Вологдин, который разработал теорию индукционного нагрева и создал первые промышленные установки [12].

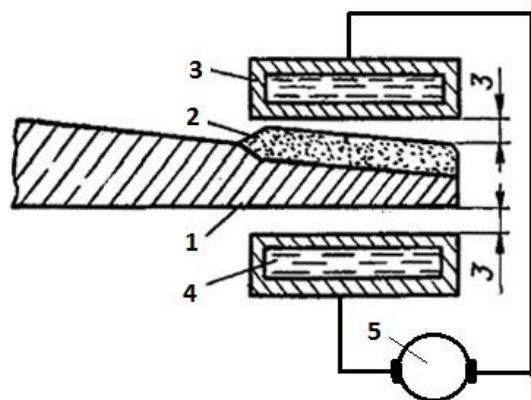
Наплавка может быть одновременной или непрерывно-последовательной. Последняя может выполняться на достаточно больших площадях поверхности при сравнительно небольшой мощности в индукторе.

Индукционная наплавка может осуществляться на детали, имеющие плоскую поверхность, наружную или внутреннюю цилиндрические поверхности. Наплавляемый металл может удерживаться на плоских поверхностях или имеющих малую кривизну за счет сил поверхностного натяжения, а при наплавке цилиндрических поверхностей с вращением деталей – за счет центробежных сил. Для удержания расплава на плоских поверхностях могут использоваться технологические буртики или специальные формующие холодильники. Для повышения производительности процесса и уменьшения расхода электроэнергии используются сплавы с более низкой температурой плавления, а также шихта с улучшенной теплопроводностью, увеличенной объемной массой и уменьшенным количеством флюса.

Индукционный нагрев, широко применяемый в настоящее время в различных отраслях промышленности, обеспечивает высокую производительность, экономичность, автоматизацию производства, улучшение условий труда и повышение качества нагреваемых заготовок.

Сущность метода индукционной наплавки состоит в следующем: индуктор, состоящий из медной трубки, с одним или несколькими витками, размещают над заготовкой. На заготовку, в зону наплавки, предварительно наносят наплавочный материал, как правило, в виде порошка. Через индуктор пропускают ток высокой частоты (ТВЧ), который создаёт переменное электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи Фуко в поверхностном слое заготовки, что вызывает его нагрев и последующее расплавление присадочного материала (рис 15).

Толщина границы раздела, при данном способе получения слоистых композиционных материалов может варьироваться от 40 до 60 мкм.



- 1 – наплавляемая заготовка;
- 2 – порошкообразный наплавочный материал, предварительно нанесенный на наплавляемую поверхность;
- 3 – индуктор;
- 4 – охлаждающая жидкость;
- 5 – источник питания токов высокой частоты

Рисунок 15 – Схема индукционной наплавки

Данный метод нашёл применение в области упрочнения плоских деталей и внутренних цилиндрических поверхностей [15].

В зависимости от требований, предъявляемых к мощности и частоте ИЭТУ, распространение получили следующие источники питания:

- для установок большой мощности промышленной частоты – печные трансформаторы;

- для установок большой мощности средней и повышенной частоты – электромашинные преобразователи мощные тиристоры;

- для низких мощностей и высоких частот (выше 25 кГц) используются транзисторы;

- для больших мощностей и высоких частот – ламповые генераторы

Основные достоинства метода индукционной наплавки:

- малая глубина проплавления основного металла;

- возможность наплавки тонких слоев;

- высокая эффективность в условиях серийного производства.

Основные недостатки:

- низкий КПД процесса;

- перегрев основного металла;

- необходимость использования для наплавки таких материалов, которые имеют температуру плавления ниже температуры плавления основного металла.

2.2 Материалы, применяемые для наплавки

Порошок ПР-10Р6М5

Применение метода порошковой металлургии к получению изделий из быстрорежущей стали позволяет избежать характерных для этой стали явлений карбидной неоднородности.

Использование порошковой быстрорежущей стали открывает хорошие перспективы повышения качества и стойкости режущего инструмента.

Порошковые инструментальные стали для покрытий предназначены для изготовления режущего и формообразующего инструмента методом горячего компактирования, для восстановления и упрочнения штампового инструмента плазменной наплавкой (РТА), создания рабочих поверхностей режущего инструмента, упрочнения валков холодной прокатки плазменной наплавкой и др. целей. Порошки инструментальных сталей для покрытий изготавливают методом распыления расплава газом.

Порошковые быстрорежущие стали имеют целый список преимуществ перед сталями, полученными по обычной металлургической технологии:

- пониженная склонность к росту зерна, равномерное распределение и дисперсность карбидной фазы;
- повышенная шлифуемость;
- более высокий уровень механических и эксплуатационных характеристик.

Таблица 1 – Химический состав металлических порошков

Марка порошка	Номинальный химический состав, %											
	Основные компоненты								Примеси, не более			
	Fe	C	Cr	W	Mo	V	Co	Si	Mn	Ni	S	O
ПР-10P6M5	Осн.	1	4	6,5	5	2	–	<0,5	0,55	0,4	0,03	0,03
ПР-10P6M5-д	Осн.	1	4	6,5	5	2	–	<0,6	0,65	2	0,03	Н.о.
ПР-30M6Ф1	Осн.	0,75	4	–	6	1	–	<0,4	0,55	0,4	0,03	0,03
ПР-P0M6Ф1K8	Осн.	0,75	4	–	6	1	8	<0,4	0,55	0,4	0,03	0,03
ПР-P0M6Ф3K8	Осн.	1,2	4	–	6	2,5	8	<0,4	0,55	0,4	0,03	0,03
ПР-P0M2Ф3C	Осн.	1,2	4	<0,8	2,5	3	<0,5	0,5	0,55	0,35	0,03	0,03
ПР-17X5B3MФ5C2	Осн.	1,7	5,5	3	0,5	5	–	2	0,8	0,4	0,03	0,03
ПР-22X6BMФ8C	Осн.	2,1	6	1	0,5	8	–	1	1	0,4	0,03	0,03
ПР-X3BMФ5C	Осн.	1,3	3	1,5	1,5	5	–	0,8	0,5	0,4	0,03	0,03
ПР-X12MФ	Осн.	1,5	12	–	0,5	0,3	–	–	0,4	0,4	0,03	0,03
ПР-X12MФ3T	Осн.	2,2	12	–	0,5	3	Ti0,08	–	0,6	0,4	0,03	0,03
ПР-100X18MФK2	Осн.	1	18	<0,3	1,2	0,15	1,5	<1	1	0,45	0,03	0,05
ПР-8X4B2Ф2C	Осн.	0,9	4,5	2,5	–	2	–	1,4	1	Н.о.	Н.о.	Н.о.

Порошки быстрорежущих сталей:

ПР-10P6M5, ПР-P0M6Ф1, ПР-P0M6Ф1K8, ПР-P0M6Ф3K8, ПР-P0M2Ф3C, ПР-10P6M5-д порошок для дробеструйной обработки, микротвердость ≥ 400 HV 0,05/5 (согласно требованиям ТУ), фактическая 750-1000HV (по факту).

Порошки штамповых сталей:

ПР-17X5B3MФ5C2, ПР-22X6BMФ8C, ПР-X3BMФ5C, ПР-X12MФ, ПР-X12MФ3T, ПР-100X18MФK2, ПР-8X4B2Ф2C.

Размер частиц (основная фракция), мкм:

Порошки, кроме ПР-10P6M5-д: <40, <63 (20-63), 40-100, 63-200, 80 -160, 100-280, <315, 160-400, <800, др. Порошок для дробеструйной обработки ПР-10P6M5-д: 40-250, 80-200, 100-315, 140-200, 160-315, 160-400, 315-630.

Порошок ПР-10Р6М5 является композицией, в котором преобладает содержания ванадия, он составляет основу порошка. Остальное приходится на такие компоненты, как углерод (до 6,5%), хром (до 1,9%), вольфрам (до 5,2%), молибден (до 4,1%) и железо (1%). От такого химического состава напрямую зависят и главные свойства припоя этого вида, и сферы, в которых он сможет показать наибольшую результативность. Считается, что идеально подойдет припой, изготовленный в соответствии с маркой ПР-10Р6М5, для нанесения на поверхности деталей и оборудования специального слоя, защищающего от различных неблагоприятных явлений и воздействий. Преимущественно такое порошкообразное вещество наносят на поверхности при помощи плазменной горелки, подбирая наилучший экземпляр, за счет того, что порошок может иметь разную фракцию.

Порошок ПГ-С27 «Сормайт»

Высокоуглеродистые сплавы на железной основе нашли широкое применение в различных сферах машиностроения. Среди них можно отметить следующие : плазменная наплавка, электродуговая и индукционная наплавка износостойких покрытий на детали машин металлургического, горнодобывающего и энергетического оборудования, сельскохозяйственной и дорожной техники, автомобильного и железнодорожного транспорта, шнеков экструдеров (ПН-АН2) и другого оборудования

Ниже приведена таблица (табл.2) с марками порошков, их номинальным химическим составом и свойствами.

Таблица 2 – Химический состав и свойства высокоуглеродистых металлических порошков

Марка	Номинальный состав	Твердость, HRC	Свойства
ПГ-С27	Fe C3,9 Cr26 Si1,5 Ni1,7 W0,3 Mo 0,1 Mn1,1	≥ 54,2	Стойкость к абразивному изнашиванию при умеренных ударных нагрузках и температуре до 500 °С.
ПГ-С1	Fe C2,9 Cr29 Si3,5 Mn1 Ni4	≥ 54	Стойкость к абразивному и газоабразивному изнашиванию.
ПГ-УС25	Fe C4,9 Cr38 Si2,1 Ni1,4 Mn≤2,5	≥ 55,9	Стойкость к интенсивному абразивному изнашиванию без ударов.
ПГ-ФБХ6-2	Fe C4,5 Cr34 Si1,7 Mn2,7 B1,6	≥ 53,2	Стойкость к абразивному изнашиванию (наплавка на оборудование угледобывающей отрасли).
ПГ-АН1	Fe C2,4 Cr29 Si2 Mn1 B1,5	≥ 54	Стойкость к абразивному изнашиванию при умеренных ударах (защитные покрытия металлургического оборудования, строительных машин и т. п.).
ПР-Х30СРНДЮ	Fe C4,9 Cr30 Si3,2 Ni1,4 Mn1 B2 Cu0,6 Al0,4	≥ 60	Наплавка износостойких покрытий рабочих органов с/х техники и др.
ПР-Х18ФНМ(ПН-АН2)	Fe C Cr V NiMo и др.	42–43, 51–53 после отпуска при 650 °С	Стойкость против абразивного износа, задиранья и коррозии
ПР-ЧН15Д7	Fe C2,6 Ni15 Cu7 Cr2,2 Si2,2 Mn1	240–280 НВ	Восстановление дефектов чугунного литья.

Обработанные наплавочным порошком ПГ–С27 детали эксплуатируются в следующих сферах деятельности:

1. Подвижной состав железнодорожного транспорта и пути:

- сцепки вагонов;
- стрелки;
- остряки;

- детали автосцепки;
2. В горнодобывающем и металлургическом оборудовании:
- ковши экскаваторов;
 - детали дробилок.
3. В строительном и сельскохозяйственном машиностроении:
- лемеха плугов;
 - лапы культиваторов и т. п.

3 Индукционная наплавка порошковыми материалами

3.1 Теоретические сведения индукционной наплавки

Основоположником метода индукционной термической обработки и промышленного использования токов высокой частоты для нагрева металла является профессор В. П. Вологдин, который разработал теорию индукционного нагрева и создал первые промышленные установки. Ему принадлежит мировой приоритет в этой области [31].

Для нагрева металла электрическим током в настоящее время пользуются преимущественно токами высокой частоты. ТВЧ для индукционного нагрева металла получают в специальных установках – генераторах. Они бывают машинными, полупроводниковыми и ламповыми. В машинных генераторах получают токи с частотой от 500 до 10 000 Гц, в полупроводниковых преобразователях – от 4000 до 66 000 Гц, а в ламповых генераторах – до 10 000 000 Гц (10 МГц).

Сущность индукционного нагрева заключается в следующем. Заготовка (деталь) помещается в переменное магнитное поле проводника, несущего ток промышленной или повышенной частоты. Вследствие электромагнитной индукции в детали возникает вихревой ток (ток Фуко), который её нагревает. Ферромагнитные материалы нагреваются в этих условиях также теплом, выделяющимся при перемагничивании заготовки. Количество выделившегося тепла (Q), можно вычислить по формуле (1.1) Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где I – сила тока, А;

R – электрическое сопротивление материала заготовки, Ом;

τ – время нахождения детали в переменном магнитном поле индуктора, с.

Изменяя силу тока I , можно получить любое количество тепла и, следовательно, любую температуру и любую скорость нагрева.

Возникающие в детали индукционные токи оттесняются к её поверхности. Плотность вихревого тока i_x у поверхности максимальна и убывает по мере приближения к центру детали, подчиняясь экспоненциальному закону (поверхностный эффект):

$$i_x = \frac{i_0}{e^{x/\delta}}, \quad (2)$$

где i_x – плотность индукционного тока на глубине x от поверхности детали, А/см²;

i_0 – плотность тока на поверхности детали, А/см²;

e – основание натурального логарифма ($e = 2,718$);

x – расстояние от поверхности детали, см;

δ – глубина проникновения вихревого тока в металл, см.

В технических расчётах используется термин «глубина проникновения тока» – это поверхностный слой δ нагреваемого изделия, в котором выделяется основное количество индуцированного тока. Эту величину можно вычислить, пользуясь следующей формулой:

$$\delta_{\text{хол.}} = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}, \quad (3)$$

где $\delta_{\text{хол.}}$ – глубина проникновения вихревого тока в ферромагнитный (холодный) материал (деталь), см;

ρ – удельное электрическое сопротивление нагреваемого тела, Ом·см;

μ – магнитная проницаемость нагреваемого тела;

f – частота тока, питающего индуктор, Гц.

Так, для холодной магнитной углеродистой стали при $\rho = 1,2 \cdot 10^{-5}$ Ом·см, $\mu = 50$ и $f = 50$ Гц глубина проникновения вихревого тока $\delta_{\text{хол}}$ составит $\approx 3,5$ мм, а при частоте 2500 Гц – около 0,5 мм, то есть чем больше частота тока, тем меньше $\delta_{\text{хол}}$.

С повышением температуры металла ρ возрастает, а μ уменьшается и для сталей при переходе из ферромагнитного состояния в парамагнитное μ

становится равной 1 Гс/Э, вследствие чего глубина проникновения тока в изделие увеличивается, и она может быть определена для конструкционных сталей по формуле

$$\delta_{\text{гор}} \approx \frac{50}{\sqrt{f}}, \quad (4)$$

где $\delta_{\text{гор}}$ – глубина проникновения вихревого тока в горячий металл, см;

f – частота тока, Гц.

Глубина проникновения тока при «горячем режиме» может быть принята за глубину нагрева, так как в этом слое выделяется основная часть ($\approx 86\%$) энергии.

В таблице 3 приведены данные по глубине проникновения тока в материалы при различных температурах и частотах тока.

Таблица 3– Глубина проникновения индукционного тока в различные материалы в зависимости от температуры и частоты тока

Материал	Температура, °С	Глубина проникновения тока, см, при частоте, Гц					
		50	1000	2500	8000	70000	150000
Конструкционная сталь	20	0,280	0,064	0,040	0,022	0,007	0,005
	1000	8,500	1,900	1,200	0,700	0,220	0,160
Аустенитная сталь	20	3,220	0,715	0,450	0,250	0,085	0,058
	1000	8,550	1,900	1,200	0,670	0,220	0,155
Алюминий	20	1,200	0,270	0,170	0,095	0,032	0,021
	600	2,400	0,540	0,340	0,170	0,064	0,042
Медь	20	0,95	0,210	0,134	0,075	0,025	0,013

Необходимую частоту тока (f , Гц) в зависимости от формы изделия и глубины проникновения тока δ в мм можно определить по следующим формулам:

$$f \approx \frac{5 \cdot 10^4}{\delta^2} \text{ – для деталей простой конфигурации;} \quad (5)$$

$$f \approx \frac{5 \cdot 10^5}{\delta^2} \text{ – для деталей сложной конфигурации;} \quad (6)$$

$$f \approx \frac{5 \cdot 10^6}{m^2} \text{ – для деталей простой конфигурации;} \quad (7)$$

Превышать полученные частоты не рекомендуется, т.к. это сопровождается увеличением времени нагрева и снижением КПД установки. Необходимая частота зависит также от диаметра детали. Ниже приведены рекомендуемые частоты для нагрева деталей различного диаметра (табл. 4).

Таблица 4 – Частоты электрического тока, рекомендуемые для нагрева деталей различного диаметра

Частота тока, Гц	50	500	1000	2500	8000	60 000 и выше
Диаметр детали, см	15	7...15	5...12	3...8	2...4	Меньше 3

На практике, для индукционного нагрева, используют три частоты:

1) $f = 60\ 000 \dots 80\ 000$ Гц – для деталей диаметром меньше 3 см при источнике тока от ламповых генераторов и тиристорных преобразователей.

Большие частоты не применяют, так как они входят в диапазон радиочастот;

2) $f = 1000 \dots 10\ 000$ Гц – для деталей диаметром 3...15 см и толщиной нагретого слоя свыше 20 мм. Используются машинные или тиристорные преобразователи;

3) $f = 50$ Гц – для поверхностного нагрева деталей диаметром больше 15 см, а также для сквозного нагрева с питанием от электрической сети.

Эффект близости. Природа эффекта близости и поверхностного эффекта одна и та же. Только в данном случае концентрация тока в определенных местах поверхности проводника рассматривается как результат суммарного взаимодействия собственного поля и электромагнитных полей всех проводников с током в системе. Распределение тока и магнитного поля в проводниках прямоугольного сечения для случая одинаково и встречно направленных токов показано на рис. 16. Из рис. 16 видно, что наибольшая плотность тока при одинаковом его направлении наблюдается на наружных поверхностях проводников, а при встречном направлении тока – на внутренних поверхностях. Эффект близости

проявляется только в том случае, если проводники с током сближаются на малые расстояния.

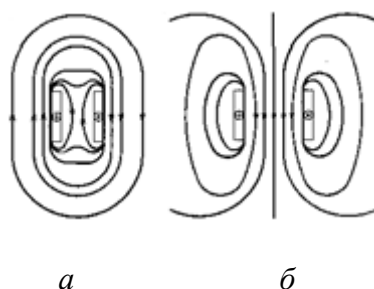


Рисунок 16 – Распределение тока в проводниках при эффекте близости:

a – одинаково направленные токи; *б* – встречно направленные токи

Эффект близости позволяет разработать такой индуктор, который может обеспечить требуемую локальность нагрева заданной поверхности изделия.

Кольцевой эффект. Другой разновидностью поверхностного эффекта является кольцевой эффект, который заключается в том, что у свернутого в кольцо или спираль проводника наибольшая плотность тока наблюдается на его внутренней поверхности. Кольцевой эффект проявляется тем сильнее, чем больше высота проводника по отношению к диаметру кольца. Наблюдается ярко выраженная симметрия магнитного поля индуктора. Внутри индуктора магнитное поле значительно больше, чем снаружи. Кольцевой эффект является полезным при нагреве у деталей наружной цилиндрической поверхности. Вместе с тем он затрудняет или делает вообще невозможным нагрев до заданной температуры внутренних цилиндрических поверхностей. Это связано с резким снижением напряженности электромагнитного поля у нагреваемой поверхности (рис.17).

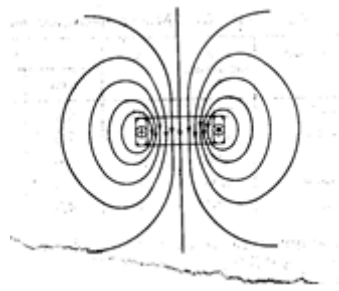


Рисунок 17 – Магнитное поле индуктора

3.2 Изготовление порошков

Изготовление порошков – наиболее сложная, в техническом отношении, самая затратная и трудоёмкая стадия процесса порошковой металлургии.

Изготовление порошков осуществляется двумя основными способами:

- физико-механическим;
- химико металлургическим.

Физико – механический метод

В рамках данного метода исходное сырьё преобразуется в порошок без нарушения химического состава, посредством механического измельчения, как в твёрдом, так и в жидком агрегатных состояниях сплава [36].

Физико-механическое измельчение производят следующими способами:

- дробление и размол;
- распыление и грануляция.

Дробление и размол.

Данный вид получения порошков заключается дроблении либо размоле твёрдого сырья, при котором изначальные параметры частиц уменьшаются до заданных значений [37].

Данный способ целесообразен при измельчении материалов высокой степени хрупкости, таких как Si, Sb, Cr, Mn, сплава Al-Mg, а также ферросплавов на основе Fe.

Механическое измельчение может проводиться путём:

- сжатия (статическое измельчение);
- удара, раздавливания, истирания, раскалывания (динамическое измельчение)(рис. 18).

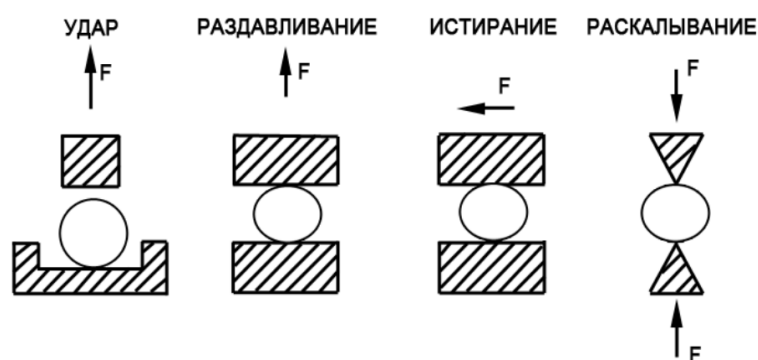


Рисунок 18 - Основные виды динамического измельчения

Измельчение порошков производится в различного рода дробильных агрегатах и мельницах, таких как:

- шнековые, валковые, конусные дробильные агрегаты (грубое измельчение с получением фазы от 1 до 10мм);
- шаровые мельницы барабанного типа(тонкое и сверхтонкое измельчение частиц);
- вибромельницы (для более интенсивного частотного режима);
- мельницах планетарно-центробежного типа (для тонкого помола трудно измельчаемых материалов);
- мельницах роторно-вихревого типа (для измельчения пластичных металлов).

Изготовление порошков путём распыления и грануляции жидких расплавов металлов

Наименее сложным и одновременно едва ли не самым малозатратным считается способ изготовления порошков путём распыления и грануляции жидких расплавов металлов при T^0 плавления которых не превышает $1650^{\circ}C$ (Al,Zn,Cu,Pb,Ni,Fe, ферросплавы и т.д.)

Суть данного способа механического измельчения заключается в дроблении струи расплава на мельчайшие капли под воздействием энергонасыщенного жидкостного либо газового потока, которые, остывая, оседают в виде частиц порошка [38]. Образование расплавов происходит в специальных электрических печах, нередко в защитных средах, образуемых инертными газами.

Химико-металлургический метод

Этот метод получения металлических порошков так же можно реализовать различными способами, среди которых востребованными являются следующие:

- химическое восстановление металла из исходного сырья (восстановительный способ);
- электролиз (электролитический способ);
- термокарбонильная диссоциация (карбонильный способ) [39].

3.3 Способы индукционной наплавки.

Существующие варианты наплавки с использованием индукционного нагрева токами высокой частоты можно классифицировать по состоянию основного металла и виду наплавляемого материала. Различают следующие способы наплавки: порошкообразной шихтой, монолитным или брикетированным присадочным материалом, в огнеупорной среде, центробежной и жидким сплавом.

Наплавки порошкообразной шихтой. При наплавке порошкообразной шихтой в качестве присадочного материала используют порошкообразную шихту, которая состоит из гранулированного сплава и флюсов на основе буры. Приготовленную шихту наносят равномерным слоем на поверхность наплавляемого изделия. Затем изделие с нанесенным слоем шихты вводят в индуктор ТВЧ, форма и размеры которого определяются конфигурацией упрочняемой поверхности. Питание индуктора осуществляют от ламповых высокочастотных установок с частотой 70 или 440 кГц.

После включения питания внутри индуктора возникает переменное электромагнитное поле. В электропроводящих телах, находящихся в электромагнитном поле, индуцируются токи. Происходит нагрев элементарных объемов материала и изделия в целом. Однако в данном случае наплавки шихта, расположенная между индуктором и нагреваемой поверхностью, в связи с большим сопротивлением металлического порошка незначительно реагирует на воздействие переменного электромагнитного поля. Наплавочная шихта является как бы «электропрозрачной» для возникающего в индукторе поля. Поэтому основное количество тепла будет выделяться в тонких поверхностных слоях основного металла, а присадочный материал (шихта) будет нагреваться главным образом в результате теплопередачи от наплавляемой поверхности. В этой связи температура плавления порошкообразного сплава входящего в состав шихты, должна быть ниже температуры плавления основного (наплавляемого) металла. При этом скорость нагрева упрочняемой поверхности должна значительно превышать скорость отвода тепла в тело детали и потерь на излучение.

В процессе нагрева шихты до температуры 600–750 °С происходит расплавление флюса и образование жидкой фазы, которая смачивает поверхность детали и частички твердого сплава. Улучшается теплопередача от основного металла в присадочный, а температурный градиент резко уменьшается. При дальнейшем нагреве увеличивается химическая активность флюса и он вступает в контакт с окислами, переводя их в жидкий шлак. Одновременно происходит процесс плавления гранул присадочного материала, которые хорошо смачивают раскисленную поверхность основного металла. В результате на наплавляемой поверхности детали образуется слой жидкого присадочного сплава, наружная поверхность которого защищена от взаимодействия с кислородом воздуха слоем жидкого шлака (рис. 19). Учитывая мгновенность процесса наплавки, выбирают такой

флюс, чтобы раскисление наплавляемого металла продолжалось в течение нескольких секунд.

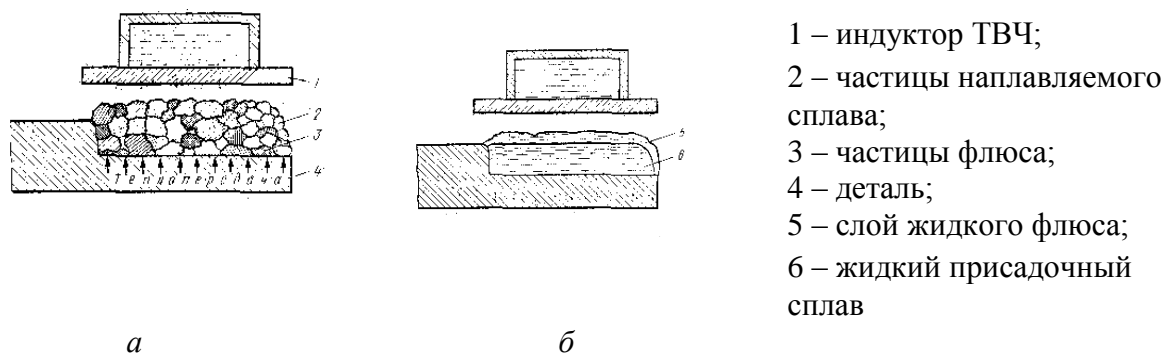


Рисунок 19 – Схема способа индукционной наплавки порошкообразной шихтой:

а – начало процесса; *б* – окончание процесса

После отключения питания индуктора ТВЧ происходит процесс кристаллизации наплавленного слоя сплава. Дальнейшая обработка заключается в удалении шлака и придании режущему лезвию или всей детали окончательной формы известными методами – гибкой, заточкой и пр.

Рассмотренный вариант индукционной наплавки выгодно отличается от других известных тем, что возможна качественная наплавка не только механически обработанных поверхностей, но и покрытых слоем ржавчины или окалины [12]. При наличии указанных видов загрязнений необходимо только незначительное увеличение количества флюсов в шихте.

При наплавке порошкообразной шихтой используют флюсы, состоящие в основном из трех компонентов: буры, борного ангидрида и силикокальция. Третий компонент вводят для повышения активности раскисления, так как в состав силикокальция входит силицид кальция (CaSi_2) и примеси алюминия, магния, железа. Как известно, силицид кальция широко используется в металлургической промышленности как высокоактивный восстановитель окислов металлов. Добавка силикокальция во флюс

позволяет резко уменьшить вязкость шлака в интервале температур, начиная от момента завершения процесса наплавки до полной кристаллизации жидкого сплава. Кроме того, силикокальций способствует хорошей дегазации расплава, предотвращает появление на поверхности металла окислов типа вьестита и обеспечивает рафинирование жидкого присадочного сплава в результате удаления неметаллических включений, содержащих по 30 % кальция.

В практике индукционной наплавки используют флюсы двух типов: плавленные и в виде механической смеси различных компонентов. Плавленные флюсы получают в результате совместного предварительного плавления при температуре около 850 °С кристаллической буры, борной кислоты и силикокальция. Такие флюсы обозначают индексом П (плавленные) и цифрой, которая показывает массовое отношение количества борного ангидрида к буре. Например, у флюса марки П–1,5 отношение содержания борного ангидрида к буре равно 1,5. Флюсы, представляющие собой механическую смесь буры, борного ангидрида и силикокальция, вводятся непосредственно в наплавочную шихту в виде исходных компонентов.

Однако такие флюсы имеют ряд недостатков:

- компоненты флюса не подлежат длительному хранению;
- происходит значительное газовыделение в процессе наплавки;
- имеется токсичность борного ангидрида;
- имеется гигроскопичность отдельных компонентов.

В отличие от механических смесей плавленные флюсы практически не растворимы в воде. Это позволяет использовать наплавочные пасты с пластификаторами, содержащими воду. Токсичные в отдельности компоненты после сплавления образуют инертное при комнатной температуре соединение. При использовании флюсов группы П заметно улучшается формирование поверхности наплавленного сплава.

В качестве наплавочного материала используют металлический порошок [14]. Известно, что металлические порошки практически не

реагируют на действие переменного электромагнитного поля индуктора ТВЧ, а их нагрев осуществляется главным образом в результате теплопередачи от основного наплавляемого металла. В этой связи сплавы, которые используются для индукционной наплавки, должны соответствовать некоторым дополнительным требованиям:

- температура плавления сплава должна быть ниже температуры плавления основного металла не менее чем на 100–150 °С;
- наплавочный материал должен быть в виде порошка определенного гранулометрического состава;
- сплав должен иметь минимальную магнитную проницаемость.

Износостойкость наплавленного сплава зависит от числа твердых составляющих в структуре сплава. В области восстановления и упрочнения деталей используются два различных метода контроля содержания твердых компонентов в наплавке:

- изменением химического состава сплава;
- введением в шихту труднорастворимых примесей, образующих в результате взаимодействия с легкоплавкой связкой специфические композитные материалы – псевдосплавы.

В настоящее время наиболее широко распространен первый способ регулирования содержания твердых составляющих в сплаве. К преимуществам псевдосплавов следует отнести возможность в очень широких пределах управлять свойствами наплавляемого материала, а результате выбора соответствующих компонентов.

Наплавка порошкообразной шихтой используется для ограниченной номенклатуры автомобильных деталей [25].

Наплавка монолитным или брикетированным материалом. При наплавке монолитными или брикетированным присадочным материалом на упрочняемую поверхность наносят монолитный или брикетированный присадочный материал, форма и размеры которого приблизительно

соответствуют необходимому наплавленному слою. Затем осуществляется расплавление ТВЧ присадочного материала на основном металле [12].

Данный способ впервые был использован западными автомобильными фирмами. Например, английская фирма «AustimotorCo. Ltd» разработала технологию и оборудование для восстановления и упрочнения наплавкой автомобильных клапанов [33]. В качестве присадочного материала применяют литые кольца из стеллита.

Шесть технологических позиций, приведенных на рис. 20, объясняют сущность принципиальной схемы способа. В тарелке клапана предварительно протачивают канавку, в которую укладывают кольцо стеллита. Затем заготовку клапана закрепляют за стержень в вертикальном положении при помощи механизма фиксации установки.

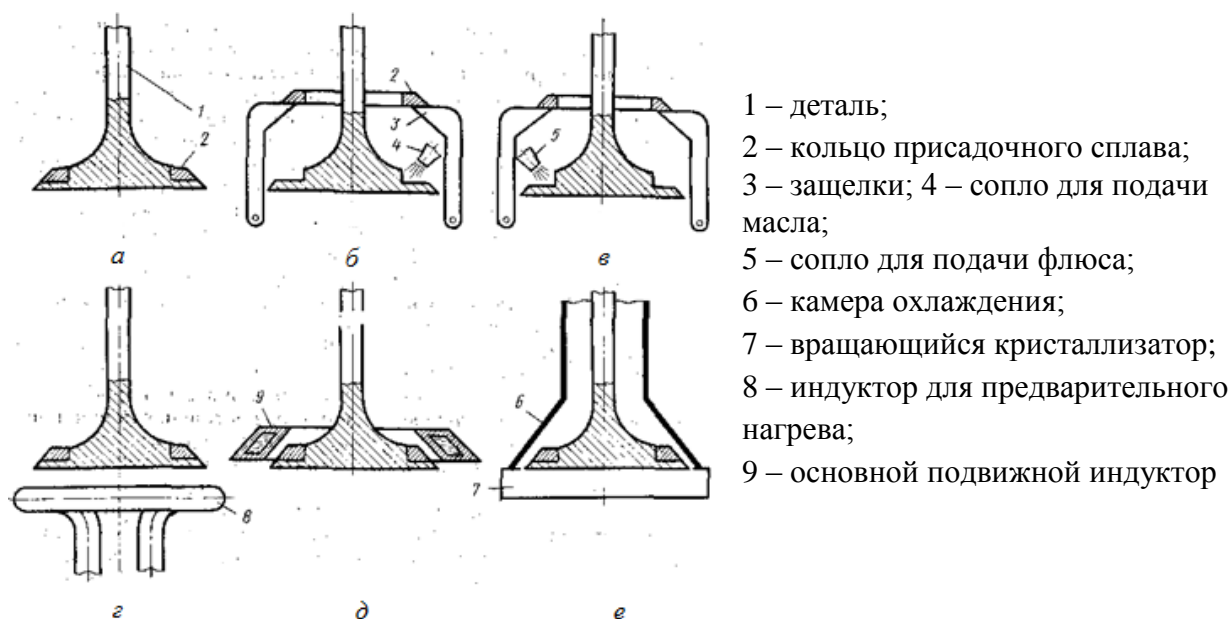


Рисунок 20 – Схема наплавки клапанов монолитным присадочным материалом

В положениях б–осуществляется нанесение флюса на наплавленную поверхность (канавка под кольцом спутника). Для этого с помощью задвижек заполняющее кольцо сателлита поднимается на определенную высоту над клапанной пластиной и удерживается в этом положении. Кроме того,

сопрягаемых поверхностей кольца и канавки распыляется из сопла струей сернистого масла. В положении *на* проблемные места и прочие сопла применять флюсы. Пылевые частицы флюса хорошо прилипают к поверхностям, покрытым маслом. После этого защелки занимают наименьшее положение, и заполняющее кольцо возвращается в исходное положение.

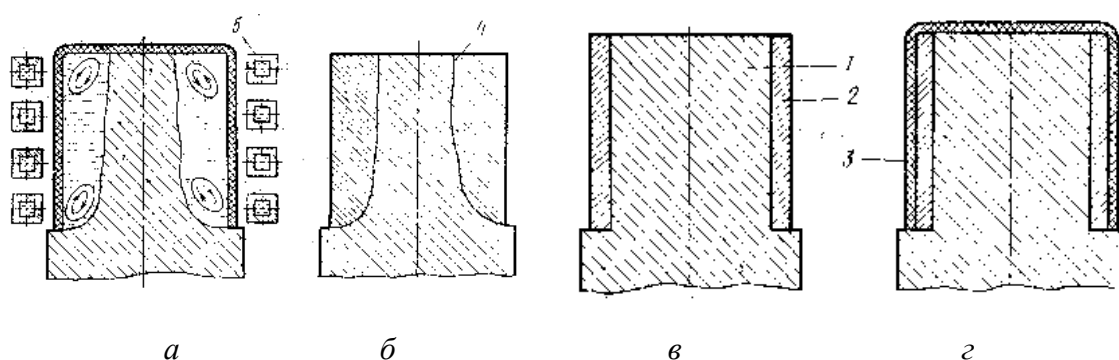
Двухступенчатый нагрев основного и присадочного материалов осуществляется в положениях *з-д*. Сначала продукт предварительно нагревается с помощью неподвижного индуктора, питаемого от ТВЧ 2,5 кВт и частотой 450 кГц. После этого (положение *д*) заготовки клапана окончательно нагреты подвижным индуктором, который приведен в действие более мощным (10 кВт) высокочастотным генератором. В результате нагрева расплавляются флюс и наполнитель (кольцо). Поток жидкости очищает осажденную поверхность от оксидов, а поступающий сюда затем расплав спутника приварен к основному металлу вентильной заготовки.

При положении *е* со специальной камерой и вращающейся пресс-формой осуществляется направленное затвердевание наплавленного слоя стеллита и охлаждение биметаллической заготовки до комнатной температуры. Далее заготовка отправляется на механическую обработку.

Наплавка в огнеупорной среде. Наплавка позволяет восстанавливать не только плоские, но и цилиндрические, конические и прочие рабочие поверхности деталей [12,25]. Это обеспечивается в результате принудительного формирования расплава на упрочняемой поверхности специальной огнеупорной оболочкой.

Рассмотрим сущность данного способа на примере наплавки цилиндрической поверхности цапфы вала (рис. 21). На наплаваемую поверхность детали наносят слой присадочного металла требуемой формы и размеров. Присадочный металл наносят любыми известными методами – установкой монолитных или брикетированных втулок, заливкой жидкого металла, расплавлением мерных заготовок и пр. Для каждого конкретного

случая в зависимости от особенностей наплавляемой поверхности выбирают свою технологическую схему подачи присадочного сплава. Огнеупорную оболочку наносят на наружную поверхность присадочного металла и частично на наплавляемую деталь. В качестве материала для огнеупорной оболочки используют смесь, состоящую из мелкозернистого (размер зерен обычно менее 0,2 мм) наполнителя (кварцевый песок, магнезит и др.) и связующего компонента – термореактивной смолы. Песчано-смоляные смеси быстро твердеют при тепловой обработке, после которой оболочка приобретает прочность и хорошую газопроницаемость. Наиболее часто в качестве связующего материала используют порошкообразную смесь фенолоформальдегидной смолы с уротропином, который вводится для ускорения процессов затвердения.



1 – основной материал; 2 – присадочный сплав (наплавляемый материал); 3 – огнеупорная оболочка; 4 – граница между основным и наплавленным металлами;
5 – индуктор ТВЧ

Рисунок 21 – Схема процесса индукционной наплавки в огнеупорной среде:

а – деталь после нанесения присадочного материала; *б* – деталь после нанесения огнеупорной оболочки; *в* – расплавление основного и присадочного материала через оболочку; *г* – деталь после наплавки

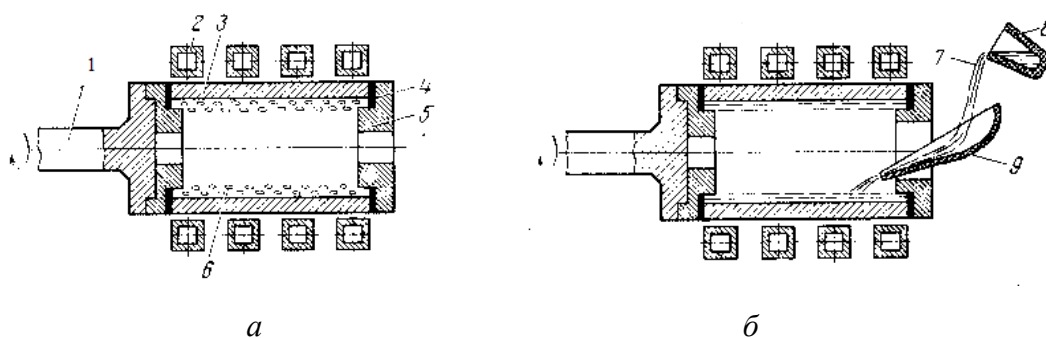
Подготовленную таким образом деталь помещают в индуктор токов высокой частоты. Для индуцируемого электромагнитного поля огнеупорная

оболочка является «электропрозрачной». Благодаря этому происходит нагрев и плавление присадочного и частично или полностью основного металла в объеме, замкнутом оболочкой. Меняя время нахождения наплавляемой детали во включенном индукторе, можно управлять глубиной проплавления основного металла. В результате наличия эффекта электромагнитного перемешивания металла происходит интенсивное усреднение состава присадочного и основного материалов внутри огнеупорной оболочки. При частичном расплавлении основного металла граница сплавления образуется в месте контакта жидкой и твердой фаз. При полном переводе основного металла в жидкую фазу граница сплавления отсутствует. Благодаря тому, что, нагрев, плавление и кристаллизация металла происходят внутри огнеупорной оболочки (без доступа атмосферного кислорода), качество наплавленных деталей высокое. После остывания с наплавленной детали легко удаляется огнеупорная оболочка. Изделие направляют на последующую механическую обработку.

Данный способ может быть использован для восстановления зубчатых венцов и валов коробок передач, ведущих шестерен, главной передачи автомобиля и других деталей [33].

Центробежная индукционная наплавка. Наплавка используется для восстановления и упрочнения внутренних цилиндрических поверхностей (рис.22). К особенностям данного способа следует отнести принудительное формирование расплава присадочного металла центробежными силами [12].

В зависимости от агрегатного состояния присадочного материала различают две разновидности центробежной наплавки. В одном случае присадочный металл подается на наплавляемую поверхность в твердом состоянии в виде кусочков, стружки, порошка и пр. В другом – подается на предварительно нагретую поверхность в виде расплава.



1 – шпиндель центробежной машины; 2 – индуктор ТВЧ; 3 – наплавляемая деталь;
 4 – прокладки; 5 – крышка с отверстием; 6 – шихта; 7 – присадочный сплав; 8 –
 разливочный ковш; 9 – лоток из огнеупорного материала

Рисунок 22 – Принципиальная технологическая схема центробежной наплавки:

а – присадочный металл в виде шихты; *б* – присадочный металл в виде расплава

В первом случае стальную заготовку втулки закрепляют в патроне шпинделя центробежной установки с горизонтальной осью вращения. Порция присадочного металла определенной массы (определяется размерами наплавляемого слоя) вместе с флюсом подаются во внутреннюю полость втулки, размещенной в цилиндрическом индукторе ТВЧ. Для нагрева втулок используют одно- и многovitковые индукторы. При использовании одновиткового индуктора центробежные установки должны помимо вращательного обеспечивать и возвратно-поступательное движение шпинделя. В этом случае вся поверхность заготовки будет равномерно нагреваться до заданной температуры. Заготовки втулок перед наплавкой закрывают с обоих торцов специальными крышками (заглушками). По конструкции они бывают глухие или с отверстием, служащим для выхода газов и визуального наблюдения за процессом. Во избежание выплеска жидкого металла в процессе наплавки крышки во время сборки уплотняют асбестовыми прокладками.

Частоту вращения заготовки выбирают в зависимости от степени склонности присадочного сплава к ликвации. При использовании сильно

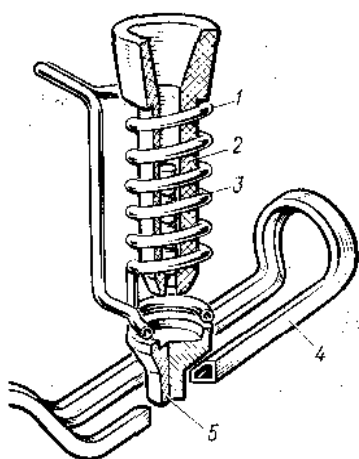
легирующих сплавов необходимо использовать минимальные скорости вращения. Кроме того, для таких сплавов необходимо регламентировать количество заливаемого металла, температуру, продолжительность нагрева и скорость охлаждения. Для нагрева используют, как правило, относительно низкие частоты 2500 Гц или 8000 Гц. Это связано с большей глубиной проникновения тока в материал заготовки в электромагнитном поле.

Нашел применение и второй вариант центробежной наплавки с использованием предварительно расплавленного присадочного металла. Способ используется при наплавке гильз автомобильных двигателей, восстановлении рабочей поверхности тормозных барабанов [33,25].

Наплавка заливкой жидкого присадочного сплава на предварительно нагретую поверхность. Наплавка заключается в том, что восстанавливаемую (упрочняемую) поверхность детали очищают от окислов и покрывают флюсом. Затем деталь нагревают до температуры 1050–1200 °С, после чего на восстанавливаемую поверхность подают жидкий присадочный сплав. В результате контакта жидкого присадочного сплава с предварительно нагретой и очищенной от окислов поверхностью детали происходит надежное сплавление [12].

Рассмотрим данный способ наплавки на примере упрочнения (аналогично осуществляется и восстановление) толкателей клапанов автомобильных двигателей (рис. 23) [33]. В тарелке толкателя перед наплавкой протачивают углубление, которое по форме и размерам соответствует наносимому упрочняемому слою. Первоначально при помощи дозатора в выточку тарелки толкателя подается порция (0,2–0,3 г) флюса, затем заготовка перемещается в зону действия щелевого индуктора ТВЧ предварительного нагрева, где нагревается до температуры 1150–1200 °С. Присадочный материал, в качестве которого используется низколегированный износостойкий чугун, в виде мерных заготовок (палочек) через загрузочную воронку подается в керамический тигель, который расположен в многовитковом цилиндрическом индукторе ТВЧ с переменным

шагом витков. Большое число витков к нижней части тигля обеспечивает более высокую температуру расплаву в области выпускного отверстия. После расплавления порция присадочного сплава вытекает через выпускное отверстие в дне тигля и попадает в выточку поверхности толкателя. Нижний виток цилиндрического индуктора обеспечивает необходимый дополнительный нагрев заготовке и залитому жидкому присадочному сплаву.



- 1 – индикатор ТВЧ для плавления присадочного материала;
- 2 – керамический тигель;
- 3 – присадочный материал;
- 4 – индуктор ТВЧ для нагрева тарелки толкателя;
- 5 – толкатель

Рисунок 23 – Схема наплавки жидким сплавом толкателей
автомобильных двигателей

Индуктор для предварительного нагрева заготовок толкателей питается от машинного генератора с частотой тока 2500 Гц, плавящий же индуктор зенитам от лампового генератора с рабочей частотой тока 66–70 кГц [34]. Часовой расход мощности на подогрев заготовок толкателей составляет 45–50 кВт и около 32–35 кВт идет на расплавление мерных палочек присадочного сплава. Заключительной операцией является принудительное охлаждение стержня толкателя, которое осуществляется из спрейера водой. Это обеспечивает направленную кристаллизацию и отбел наплавленного слоя чугуна.

4 Оборудование и методы исследования

Получение экспериментальных образцов слоистого композиционного материала методом наплавки осуществляли с помощью индукционной многофункциональной установки ИЗ 25/40–80 (рис. 24).

Данная установка предназначена для выполнения различных технологических процессов при термической обработке деталей черных и цветных металлов путем индукционного нагрева токами высокой частоты.

Таковыми технологическими процессами могут быть:

- соединение различных деталей посредством пайки высокотемпературными припоями (медно-фосфорными, медно-цинковыми, серебряными и т.д.);

- нагрев заготовок различного типа в локальных зонах под закалку, ковку, гибку, отжиг и т. д;

- процесс индукционно-металлургического способа упрочнения плоских поверхностей деталей, испытывающих работе повышенные нагрузки и удары, и истирание (зубья экскаваторов, бульдозерные ножи, молотки дробильных мельниц и т. д.);

- плавка металлов и сплавов в диэлектрическом и графитовом тиглях.



Рисунок 24 – Установка индукционная многофункциональная ИЗ 25/40–80

Установка ИЗ 25/40–80 оснащена генератором УВГ 2-25, разработанным в ЦКБ «Геофизика» г. Красноярска, который позволяет работать на любой частоте в диапазоне частот 40...80 кГц в режиме автоподстройки частоты и дискретной регулировки мощности.

Так же в комплект установки входит система водяного охлаждения и выносной нагрузочный контур, включающий в себя индуктор с ферритным сердечником (рис 25).



Рисунок 25 – Система водяного охлаждения

В процессе проведения эксперимента было использовано еще одно оборудование, муфельная электрическая печь. Предназначенная для термической обработки материала. Муфельная печь состоит из нагревательных элементов, рабочей камеры и корпуса (рис 26).



Рисунок 26 – Муфельная электрическая печь

Вертикальное и горизонтальное перемещение детали относительно индуктора осуществляется при помощи стола (рис. 27). Вертикальное перемещение стола обеспечивается при помощи рукоятки 13 и ходового винта 10, которые приводят в действие рычаги 3 и 4, обеспечивая перемещение в вертикальном направлении среднего стола 1. На средний стол, крепится ходовая гайка 8 с ползуном 7. Ползун приводится в действие при помощи рукоятки 12 и ходового винта 11, перемещая при этом, в горизонтальном направлении, стол 6.

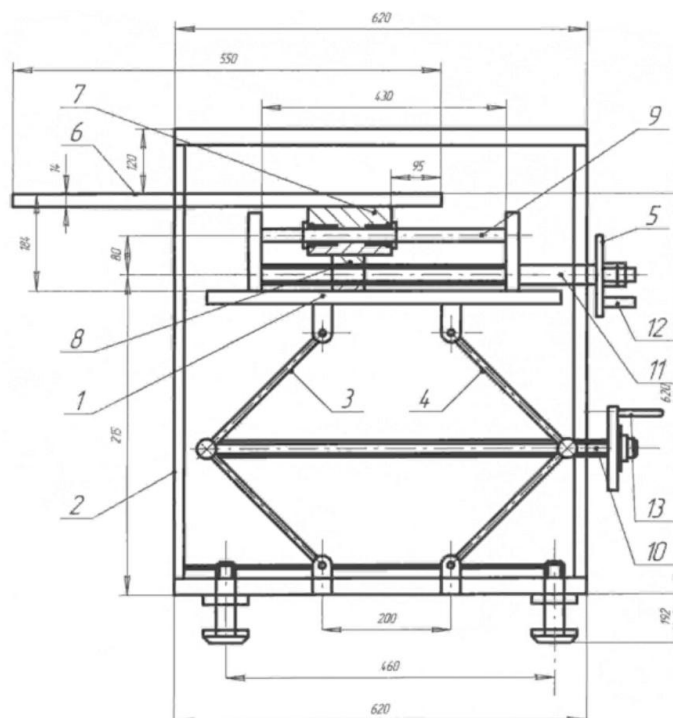


Рисунок 27 – Стол для вертикального и горизонтального перемещения детали:
 1 – стол средний; 2 – каркас; 3, 4 – рычаг; 5 – колонка; 6 – стол верхний; 7 – ползун;
 8 – гайка ходовая; 9 – направляющая; 10, 11 – винт ходовой; 12, 13 – рукоятка.

Шихта наносится на поверхность компонента основы в виде порошка равномерным слоем либо при помощи дозатора, либо выравниванием при помощи лопатки до нужной высоты.

Технические характеристики ИЗ 25/40–80:

1 Максимально потребляемая мощность от трехфазной питающей сети 3·380В–30 кВт.

2 Максимально генерируемая в нагрузку высокочастотная мощность составляет 25 кВт.

3 Конструкция нагрузочного контура – выносная, нагрузочный контур может размещаться от генератора на расстоянии до 2,5 м.

4 Для выполнения технологических процессов (см. назначение) установка комплектуется выносным нагрузочным контуром ВНК, работает в диапазоне частот 40–80 кГц.

5 Охлаждение водяное:

– от водонапорной сети с давлением 1,5...2,0 кг/см² и расходом не менее 12 л/минуту;

Примечание. По согласованию с заказчиком установка ИЗ 25/40–80 поставляется с автономной системой охлаждения (блок охлаждения АШХ 2.964.035)

6 Время непрерывной работы при максимальной выходной мощности 4 часа с последующим перерывом 1 час.

Устройство и принцип работы составных частей ИЗ 25/40–80:

– генератор EDU 2 – 25;

– ВНК.

Функционально в установке ИЗ 25/40–80 генератор EDU 2–25 является источником высокочастотной энергии. Выносной нагрузочный контур DYR выполняет функцию согласования выходных параметров генератора с параметрами нагруженного контура.

Методика приготовления шлифов

Шлиф изготавливают по поперечному сечению образца. Механическая зачистка проводится наждачной бумагой различной зернистости. При смене наждачной бумаги изменяют направление шлифовки на 90 ° для удаления рисок, созданных предыдущим шлифованием.

Заключительный этап обработки – механическое полирование образца до зеркального блеска. Полирование образцов проводится на ватмане с применением алмазной пасты зернистостью 20/14; 3/1.

Каждая операция проводится до полного исчезновения следов предыдущей. После полирования образцы тщательно протирают спиртом.

Качество полирования контролируется просмотром шлифа под микроскопом при увеличении в 50 раз. В случае необходимости шлиф просматривают при увеличении от 1250 до 1500 раз. Поверхность должна быть зеркальной, не иметь рисок и царапин.

Выявления микроструктуры образца

Заключительный этап в приготовлении шлифа – травление. Травление

основано на том, что полированная металлическая поверхность шлифа, опущенного в реактив, представляет собой участки (фазы) с различными по величине электрохимическими потенциалами. Поэтому зерна каждой фазы имеют различную травимость.

Для выявления микроструктуры был использован Травитель 5б [3мл HCl; 50г FeCl₃; 120мл спирта; 120 мл H₂O] [35].

Условия травления: температура 18–20 ° С, время 20–30 секунд.

Травление считается законченным, если поверхность шлифа становится слегка матовой. После остатки реактива смываются водой, и шлиф высушивают спиртом, прикладывая к нему лист фильтровальной бумаги.

Традиционный метод измерения твердости образца

Измерение твёрдости образца (микрошлифа) проводилось на твердомере ТК-2М – прибор настольного типа, предназначенный для измерения твердости металлов и сплавов по методу вдавливания алмазного конуса или стального закалённого шарика под действием заданной нагрузки в течении определённого времени (рис.28).



Рисунок 28 – Измерение твёрдости образца на приборе ТК-2М.

Испытания проводились в соответствии с ГОСТом 9013-59.

На приборе измерения твёрдости материала проводится по 3м шкалам:

шкале «А», «В» и «С».

Шкала «А» применяется в практике сравнительно редко. Испытание проводится алмазным конусом, для определения твердости изделий из твёрдых сплавов, а также для испытания изделий с поверхностной термической обработкой. При испытании ответственных деталей твердостью HRC 20 – 50 допускается применение наконечника из твёрдого сплава.

Шкала «В» используется для определения твердости мягких металлов с наибольшей твёрдостью 100 единиц, так как при более высокой твёрдости испытание шариком становится недостаточно чувствительным ввиду малой глубины проникновения шарика в металл (менее 0,06 мм).

Шкала «С» применяется для испытания материалов с твёрдостью не более 70 единиц, так как при большей твёрдости на конусе алмаза создаётся слишком большое давление, и он может разрушиться.

При проведении испытаний необходимо следить, что бы расстояние центра отпечатка от края образца или центра другого отпечатка при испытании на шкалах «А» и «С» было не менее 3, а по шкале «В» – не менее 4 мм.

По приведенной ниже таблице (табл. 5) в зависимости от твёрдости образца выбирают шкалу твёрдости, нагрузку и вид наконечника.

Таблица 5 – Характеристики измерения твёрдости образца.

Применимая твёрдость металла, HV	Обозначение шкалы	Вид наконечника	Нагрузка, кгс	Обозначение твёрдости по Роквеллу	Допустимые пределы шкалы
60240	«В»	Стальной шарик	100	HRB	25100
240–900	«С»	Алмазный конус	150	HRC	20–67
390–900	«А»	Алмазный конус	60	HRA	70–85

Измерение микротвердости образца

Измерение микротвёрдости образца проводилось на микротвердомере

ПМТ-3М (рис. 29). Данный прибор применяется при определении твёрдости таких объектов, которые не могут быть испытаны обычно применяемыми методами(по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу), а именно мелких деталей приборов, тонких полуфабрикатов (лент, фольги, проволоки), тонких слоёв, получающихся в ходе термической обработки (азотирования, цианирования и др.) и гальванических покрытий .



Рисунок 29 – Микротвердомер ПМТ – 3М и ручной пресс.

Методика проведения макроанализа

Макроскопический анализ – изучение строения материала не вооружённым глазом или увеличением до 30ти крат.

Макроанализ проводился на приборе МБС 3 – микроскопе с увеличением от 4х до 100 крат (рис. 30), работающем как при искусственном, так и естественном освещении. С помощью данного прибора визуально удалось определить величину упрочнённого слоя, а также тщательнее рассмотреть такие поверхностные дефекты как сколы, трещины, выкрашивание кромки зуба.



Рисунок 30 – Микроскоп МБС 3

Методика проведения макроанализа

Микроскопический анализ заключается в исследовании структуры с помощью микроскопа и фотокамеры (рис. 31).



Рисунок 31 – Микроскоп фирмы *CarlZeiss*

Наблюдаемая структура называется микроструктурой. Анализ проводился при увеличении в 100 и 500 раз. Изображение, передаваемое цифровой фотоаппаратурой, выводится на монитор компьютера. Далее полученное изображение можно сохранить в необходимом нам формате, например, с расширением *jpg* или *gif*.

5 Экспериментальная часть

5.1 Применяемые наплавляемые материалы

В рамках данной магистерской диссертационной работы, для проведения экспериментов по отработке режимов индукционной наплавки в ходе создания металлических композиционных материалов нами были выбраны 2 вида наплавляемых порошков ПГ-С27 с парамагнитными свойствами и ПР-10Р6М5 с ферромагнитными свойствами.

Порошок ПГ-С27

Металлический гранулированный порошок ПГС–27 «Сормайт» (рис. 32) нашел широкое применение для наплавки деталей металлургического и энергетического оборудования.

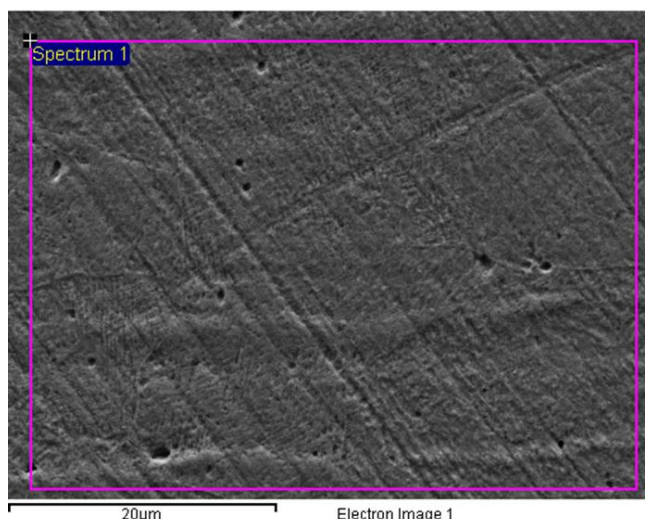


Рисунок 32 – Структура наплавленного слоя ПГ-С27 «Сормайт»

В таблице 6 указан химический состав порошка ПГ - С27.

Таблица 6 - Химический состав ПГ – С27 «Сормайт»

Хим. Элемент	Fe	Cr	Ni	Mo	W	C	Si	Mn
Кол – во, %	Основа	28	2,51	0,31	0,4	3,95	1,18	0,8

Достоинствами данного наплавляемого материала являются хорошая сопротивляемость ударно – абразивному износу, а также не обязательная термическая обработка.

Наплавочный порошок «Сормайт ПГ-С27» может наноситься методами плазменного напыления, и лазерной и индукционной наплавки.

Ниже представлена рентгенограмма (рис. 33) порошка ПГ-С27 «Сормайт». Рентгенограмма свидетельствует о наличие в наплавленном слое карбидов хрома в аустенитной матрице.

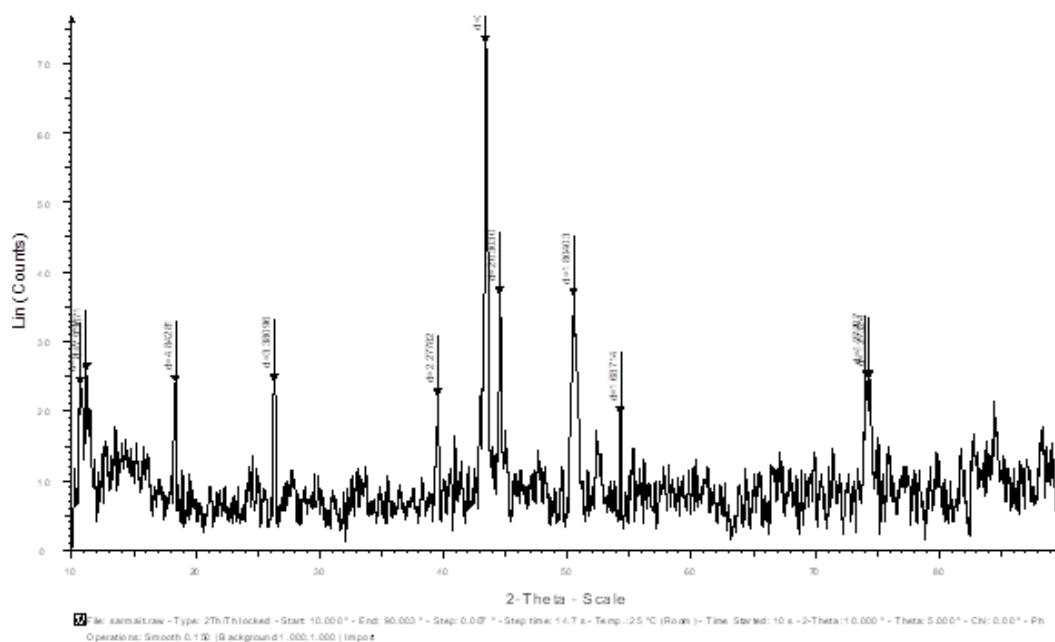


Рисунок 33– Рентгенограмма порошка ПГ-С27 «Сормайт»

Порошок ПР-10Р6М5

В качестве второго наплавляемого материала применяется порошок быстрорежущей стали 10Р6М5. Данный материал может использоваться для получения износостойких слоев с высокой теплостойкостью, в частности для крупногабаритного инструмента путем наплавки на режущие кромки. На рисунке 34 представлена структура наплавленного слоя порошка ПР-10Р6М5. Можно отчетливо наблюдать достаточно дисперсную структуру с

наличием ледебуритной эвтектики, причем эвтектика имеет высокодисперсное строение, что несомненно положительно сказывается на механических свойствах. Это связано, прежде всего с условиями индукционной наплавки.

Порошок ПР-10Р6М5 ферромагнитный материал, его можно наплавлять в предварительно брикетированном состоянии, т.е. выше точки Кюри, когда он перейдет в парамагнитное состояние. Перед наплавкой готовилась смесь, состоящая из 80% порошка ПР-10Р6М5 и 20% дробленой плавленной буры. Так как порошок обладает ферромагнитными свойствами, то в процессе наплавки его частички начинают намагничиваться на индуктор, чтобы это избежать мы прижимаем порошок кварцевым стеклом, толщина которого составляет 2-3 мм. Стекло удерживает порошок и не дает ему перемещаться до точки Кюри, пока он не перейдет в парамагнитное состояние.

Флюс АН-20 выбран в соответствии с требованиями, предъявляемыми к флюсам для проведения наплавочных работ. Химический состав флюса АН-20 показан в таблице 7.

Таблица 7 – Химический состав флюса АН-20

Химический Элемент	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	K ₂ O+N a ₂ O	MnO	Fe ₂ O ₃	S	P
Содержание химического элемента, %	19 – 22	3 – 9	9 – 13	27 - 32	25 - 33	2 - 3	Не более 0,5	Не более 0,8	Не более 0,06	Не более 0,03

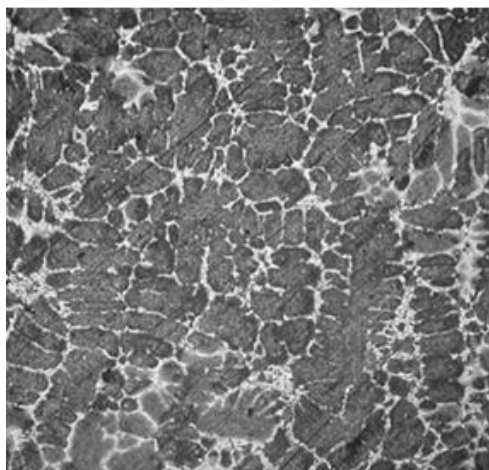


Рисунок 34 – Структура наплавленного слоя сталью 10P6M5

В таблице 8 указан химический состав порошка ПР-10P6M5.

Таблица 8 – Химический состав порошка ПР-10P6M5

Хим. Элемент	Fe	C	Cr	W	Mo	V	Co	Si
Количество, %	Основа	1	4	6,5	5	2	–	<0,5

Ниже представлена рентгенограмма (рис. 35) порошка ПР-10P6M5. На рентгенограмме наблюдаются альфа фаза и карбиды М₆С, МС.

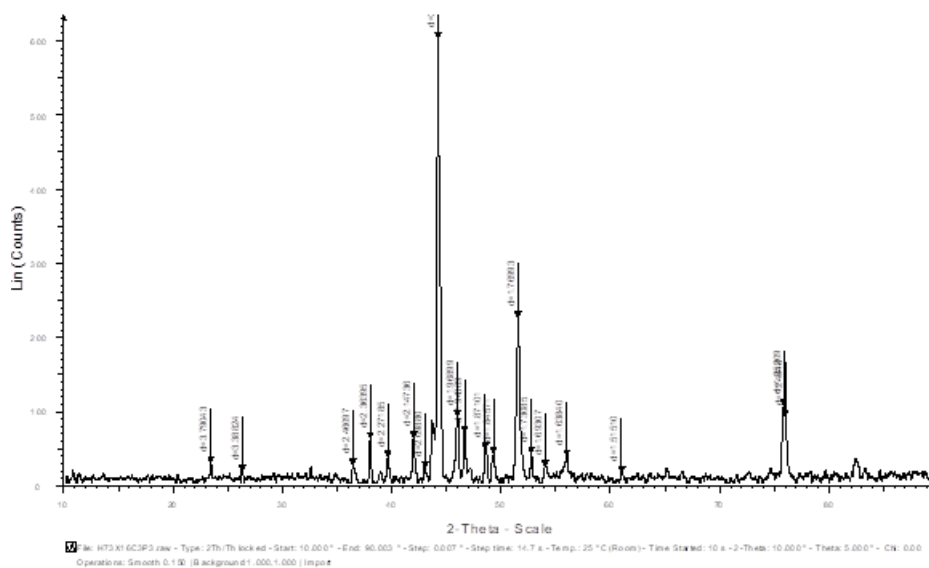


Рисунок 35 - Рентгенограмма порошка ПР-10P6M5

5.2 Технология получения СКМ методом индукционного нагрева

Порядок работы установки ИЗ 25/40–80:

- 1 Подключить установку к системе водяного охлаждения, для чего:
 - вернуть в генератор входной (АШХ 8.652.171) и выходной (АШХ 8.652.156) водяные штуцера;
 - резиновыми шлангами соединить входной штуцер генератора с соответствующим вентилем входного трубопровода, выходной – с вентилем сливного трубопровода. Места соединения затянуть хомутами;
 - те же операции выполнить и с нагрузочным контуром;
 - при открытых вентилях генератора и ВНК входным вентилем установить давление воды 1,5–2 кг/см²;
 - проверить и убедиться в отсутствии протекания воды в местах соединения шлангов, при необходимости подтянуть хомуты.
- 2 Подсоединить силовую кабель (АШХ 4.853.208) к разъему генератора X1, обратный конец кабеля – к вводно-силовому щиту.
- 3 Подсоединить кабель управления (АШХ 4.854.195) к разъему X4 пульта управления генератора, обратный конец – к разъему X1 пульта управления ВНК.
- 4 Подсоединить кабель ножной педали (АШХ 4.854.196) к разъему X2 пульта управления ВНК, обратный конец – к замыкающим контактам ножной педали.
- 5 В соответствии с требованиями, изложенными в паспорте на генератор и ВНК, выполнить контур заземления установки [16].
- 6 В соответствии с выполняемым технологическим процессом установить на выносной нагрузочный контур индуктор с деталью под термообработку.
- 7 По данным паспорта на наружный индуктор в выносном нагрузочном контуре установить требуемый коэффициент трансформации согласующего трансформатора Т1 переключателем S3, на панели блока управления

декадными переключателями «установка частоты» установить рабочую частоту установки.

8 На панели блока управления тумблер «внутр-внеш» установить в положение «внутр», тумблер «ручн-авт» в положение «ручн», тумблер «вкл-возб» – положение «выкл».

На панели управление ВНК переключатель S3 установить в крайнее правое положение (режим, минимально потребляемый мощности).

9 Подать напряжение трехфазной цепи на генератор, включением автомата на вводно-силовом щите (при этом на панели блока управления загорается световая индикация «дежурная сеть 27 В»).

10 Включить напряжения питания генератора нажатием кнопки «Вкл» на панели блока управления (при этом загорается световая индикация «питание вкл»).

11 Тумблер «вкл. Возб» установить в положении «вкл. возб», декадными переключателями «установка частоты» в области заранее установленной рабочей частоты (п. 8) добиться максимального тока нагрузки по показаниям приборов «ток нагрузки».

12 Установить тумблер «вкл. возб» в положение выключено (ручка тумблера вниз), тумблер «ручн-авт» в положение «авт».

13 На блоке коммутации ВНК последовательно переключением переключателя S3 в левом направлении установить требуемый технологическим процессом энергетический режим. При этом необходимо следить, чтобы ток нагрузки не превышал 25А.

14 Дальнейшая работа (нагрев детали в индукторе) осуществляется включением тумблера S2, либо нажатием ножной педали [13].

15 Если в процессе работы ток нагрузки превысит 28А, то генератор отключится блоком автоматической защиты (на панели блока управления загорается световая индикация «перегрузка»). В этом случае на панели управления ВНК переключатель S3 переключить на одну ступень в правое

положение (понижение потребляемой мощности) и снова выключить напряжения питания генератора (п. 11).

16 После окончания работы снять напряжение питания генератора нажатием кнопки «откл» на панели блока управления, отключить трехфазную цепь автоматом вводно-силового щита, закрыть воду.

Для проведения процесса наплавки, в качестве образца подложки была выбрана пластина толщиной 25 мм из стали 09Г2С, размер которой составлял 100 x 300. Наплавку проводили на установке ИЗ 25/40–80 производства ЦКБ «Геофизика».

Наплавку порошков можно проводить двумя способами:

– Первый способ заключается в насыпании порошка заданной толщины, которая формируется дозатором или лопаткой, на подложку, с дальнейшим наплавлением.

– Второй способ заключается в предварительном изготовлении брикетов из порошков или смеси из порошков и флюсов, и дальнейшей наплавкой. Такую технологию подготовки порошков предпочитают использовать при наплавке ферромагнитных материалов.

Толщина насыпания порошка может регулироваться вручную в лабораторных условиях, или же при помощи дозатора в промышленных условиях. Так как эксперимент производился в лабораторных условиях, то нанесение порошка на подложку производилось вручную, с помощью лопатки. Толщина слоя порошка составляла от 2 до 10 мм.

Заготовку помещали на подвижный столик, находящийся под индуктором с ферритным усилителем, который, в свою очередь, выполняет функцию усиления напряженности электромагнитного поля на торце индуктора. Расстояние между наплаваемым образцом и индуктором составляло порядка 4-7 мм.

Затем, включив установку, осуществляют процесс индукционной наплавки порошка на наплаваемый образец. Столик нужно перемещать для того, чтобы процесс наплавки проходил по всей поверхности нанесенного

порошка и наблюдать за процессом. Наплавку проводят до полного расплавления наплавляемого материала, после чего индукционную установку отключают.

Первый эксперимент заключался в наплавке порошка ПГ-С27 «Сормайт» изображенный на рисунке 36.



Рисунок 36 – Наплавление порошка ПГ-С27 «Сормайт»

Второй эксперимент заключался в наплавке порошка ПР-10Р6М5 (рис. 37).

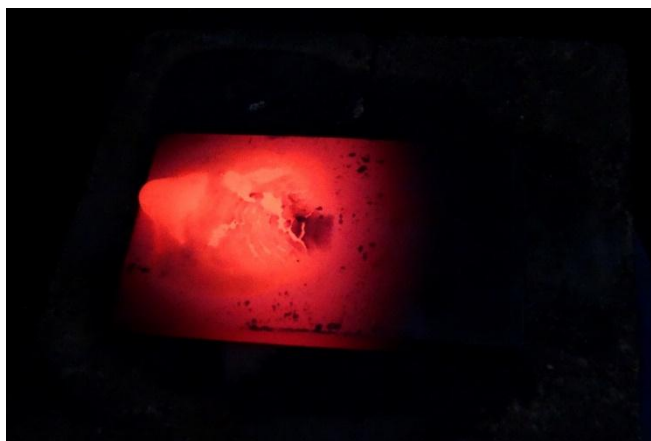


Рисунок 37 – Наплавление порошка ПР-10Р6М5

В результате экспериментов были получены слоистые КМ из которых в дальнейшем были вырезаны образцы для металлографических исследований.

5.3 Анализ структур наплавленного слоя ПР-10Р6М5 и ПГ-С27 «Сормайт»

После получения наплавленных образцов, для наиболее полного представления об их микроструктуре и свойствах, было проведено их комплексное исследование.

Микроструктура образца ПР-10Р6М5 и зоны его сплавления представлены на рисунке 38.



Рисунок 38 – Микроструктура наплавленного слоя ПР-10Р6М5

Далее был проведен спектральный анализ зоны сплавления образца с подложкой (рис 39).

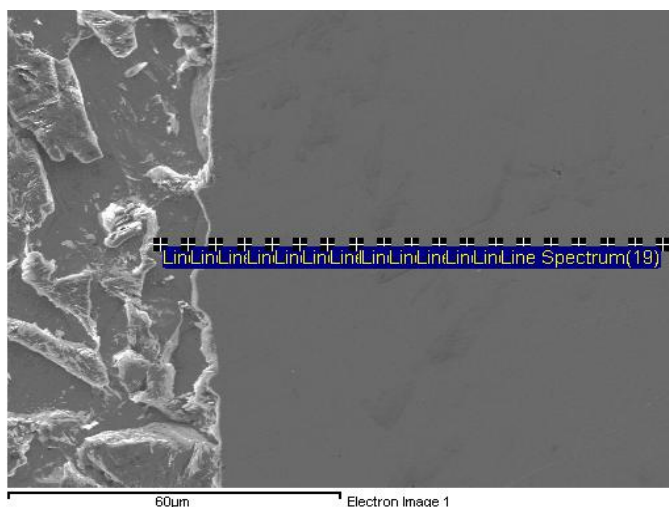


Рисунок 39 – СЭМ изображения образца ПР-10Р6М5, site 8, с маркерами спектра, x1000

Таблица 9 элементный состав образца сварка, site 8, x 1000.

Таблица 9 – Элементный состав линейного спектра, в атомн. %

Spectrum	B	C	Si	Cr	Fe	Ni	Total
LineSpectrum(1)		2.18			97.82		100.00
LineSpectrum(2)					100.00		100.00
LineSpectrum(3)		2.83	2.50	7.11	27.99	59.57	100.00
LineSpectrum(4)		2.69	4.71	7.07	9.36	76.17	100.00
LineSpectrum(5)	18.64			76.51	2.09	2.76	100.00
LineSpectrum(6)			10.79	3.75	3.81	81.65	100.00
LineSpectrum(7)			6.05	6.57	6.17	81.21	100.00
LineSpectrum(8)		2.12	5.34	5.53	7.00	80.01	100.00
LineSpectrum(9)			5.35	6.51	8.32	79.82	100.00
LineSpectrum(10)	18.91	2.92	3.70	12.58	5.53	56.36	100.00
LineSpectrum(11)	21.97		2.23	39.51	4.27	32.02	100.00
LineSpectrum(12)	23.54	2.90	1.85	32.47	4.39	34.85	100.00
LineSpectrum(13)		2.46	4.40	7.39	7.62	78.14	100.00
LineSpectrum(14)				5.33	4.89	89.78	100.00
LineSpectrum(15)		1.93	4.87	6.36	7.79	79.05	100.00
LineSpectrum(16)			4.87	7.78	8.17	79.18	100.00
LineSpectrum(17)		2.22	4.31	6.97	9.16	77.33	100.00
LineSpectrum(18)			3.65	8.21	8.35	79.79	100.00
LineSpectrum(19)		2.61	4.31	7.41	7.61	78.07	100.00

Микроструктура наплавленного слоя образца и зоны его сплавления представлены на рисунке 40.

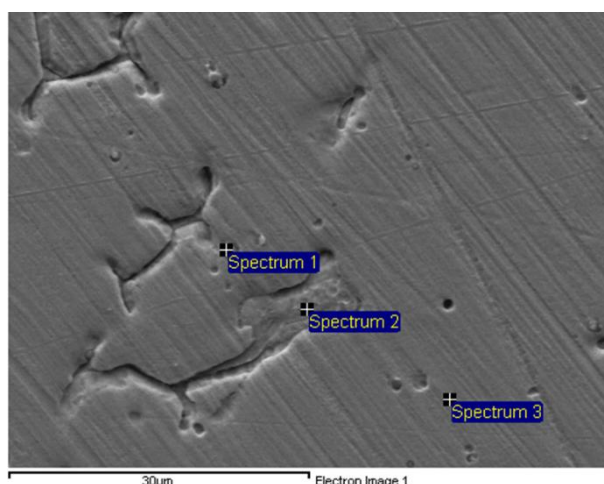


Рисунок 40 - Микроструктура наплавленного слоя ПГ-С27 «Сормайт»

Далее был проведен спектральный анализ зоны сплавления образца, результаты которого представлены на рисунке 41 и в таблице 10.

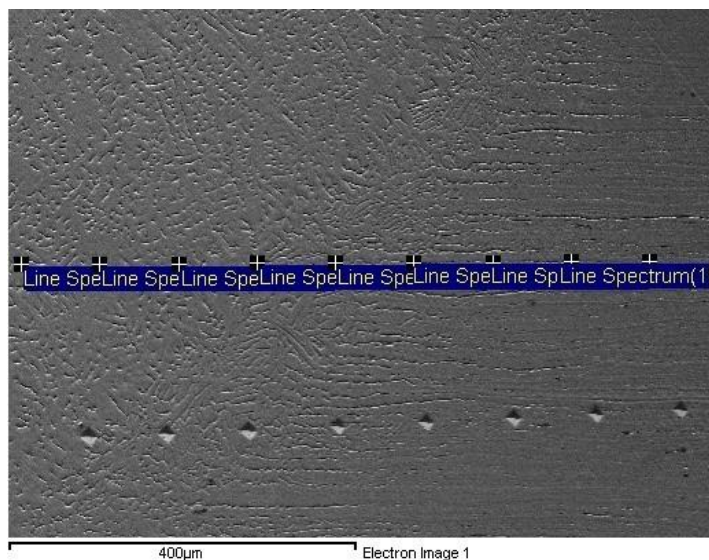


Рисунок 41 - СЭМ изображение образца ПГ-С27 «Сормайт», с маркером линейного спектра, шаг 90 мкм x150

Таблица 10 - Элементный состав линейного спектра, в атомн. %

Spectrum	C	N	Si	Cr	Fe	Ni
LineSpectrum(1)	7.91		0.97	19.00	62.72	9.39
LineSpectrum(2)				21.26	69.08	9.66
LineSpectrum(3)	10.89		0.96	19.03	61.50	7.62
LineSpectrum(4)	8.60	1.66	0.86	18.63	63.14	7.11
LineSpectrum(5)	8.74		1.00	17.22	65.39	7.65
LineSpectrum(6)		1.96	0.90	18.82	69.18	9.14
LineSpectrum(7)	8.68	1.45		16.56	64.96	8.35
LineSpectrum(8)	9.84			17.84	65.37	6.96
LineSpectrum(9)	13.88			17.32	61.67	7.13
LineSpectrum(10)			1.18	19.88	70.84	8.10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы были изучены способы получения слоистых композиционных материалов методом индукционной наплавки, основные применяемые материалы и режимы наплавки компонентов.

Результаты:

1 Изучен принцип индукционной наплавки и особенности технологии при наплавке порошковыми материалами.

2 Отработана технология индукционной наплавки порошковыми материалами с различными магнитными свойствами 1 порошок ПР-10Р6М5 с ферромагнитными свойствами и 2 порошок ПГ-С27 «Сормайт» с парамагнитными свойствами

3 Проведены экспериментальные исследования образцов, наплавленных по разработанной технологии.

4 Определена степень влияния режимов индукционной наплавки на структуру и свойства слоистых композиционных материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Кербер М.Л. Композиционные материалы. Соросовский образовательный журнал. 1999.
- 2 Черепанов, А. И. Теория и технология литейных композиционных материалов: курс лекций / А.И. Черепанов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т; Политехн. ин-т, 2007. – 132 с.
- 3 Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов и др.; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. — 2-е изд., испр, и доп.— М.: Машиностроение, 1986. — 384 с.
- 4 Композиционные материалы: Справочник/ В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; под общ. Ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. 512с.; ил.
- 5 В.А. Рогов, М.И. Шкарупа, А.К. Велис. - КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ РОЛЬ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ Вестник РУДН, серия Инженерные исследования, 2012, № 2
- 6 Гольдштейн Я.Е., Гольдштейн В.А. Металлургические аспекты повышения долговечности деталей машин / Челябинск Металл 1995, 512с.
- 7 Кусков Ю.М., Скороходов В.Н., и др. Электрошлаковая наплавка / М.: Наука и технологии 2001, 180с.
- 8 Арзамасов, Б.Н. Материаловедение : учебник для технических вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]. - М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2001. - 648с.
- 9 Карпинос, Д.М. Новые композиционные материалы / Д.М. Карпинос, Л.И. Тучинский, Л.Р. Вишняков. – Киев : Вища школа, 1977. – 312с

- 10 Батаев, А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учеб. пособие / А.А. Батаев, В.А. Батаев. – М.: Университетская книга; Логос, 2002. – 400с.
- 11 Ковтунов, А.И. Слоистые композиционные материалы: электронное учебное пособие / А.И. Ковтунов, С.В. Мямин, Т.В. Семистенова. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017 г.
- 12 Индукционная наплавка твёрдых сплавов / В. Н. Ткачёв, Б. М. Фиштейн, Н. В. Казинцев, Д. А. Алдырёв. – М.: Машиностроение, 1970. – 183 с.: ил.
- 13 Портной, К.И. Композиционные материалы на никелевой основе / К.И. Портной, Б.Н. Бабич, И.Л. Светлов. – М.: Металлургия, 1979. – 264с.
- 14 Кипарисов, С.С. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – Москва: Металлургия, 1980. – 496 с.
- 15 Грохольский, Н.Ф. Восстановление деталей машин и механизмов сваркой и наплавкой. - М.: Машиностроение. -1966.-275с.
- 16 Производство металлических слоистых композиционных материалов [Текст] / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев и др. - Москва: Интернет Инжиниринг, 2002. - 496 с.
- 17 Процессы обработки металлов взрывом [Текст] /А. В. Крупин, Н. Калюжин, Е. У. Атабеков и др. - Москва: Металлургия, 1996. - 336 с.
- 18 Король, В. К. Основы технологии производства многослойных металлов [Текст] / В. К. Король, М. С. Гильденгорн. - Москва: Металлургия, 1970. - 236 с
- 19 Лысак, В. И. Сварка взрывом [Текст] / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. - Москва: Машиностроение, 2005. - С. 486-501.
- 20 Казаков, Н. Ф. Диффузионная сварка материалов [Текст]/ Н. Ф. Казаков. - 2-е изд., перераб, и доп. - Москва: Машиностроение, 1976. - 312 с.
- 21 Николаев, Г. А. Специальные методы сварки [Текст] / Г. А. Николаев, Н. А. Ольшанский. - Москва: Машиностроение, 1975. - 232 с.

22 Патон Б.Е. Проблемы сварки на рубеже веков // Автоматическая сварка. – 1999. - №1. С. 4-14.

23 И. А. Кондратьев, Н.М. Пономаренко. Полуавтоматическая наплавка крестовин стрелочных переводов. В сб. Наплавка в машиностроении и ремонте. Теоретические и технологические основы наплавки. Киев. ИЭС им. Е.О. Патона, 1981, с. 129-132

24 Гладкий П.В., Фрумин И.И., Плазменная наплавка с присадкой порошков. Резка, наплавка и сварка сжатой дугой. М., ЦИНТИ химнефтемаш, 1968.

25 Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой // М.: Машиностроение, 1987. - 192 с.

26 Никифоров, Г.Д. Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для вузов. / Г.Д. Никифоров, Г.В. Бобров, В.М. Никитин. М.: Машиностроение, 1986.-320 с.

27. Щицын Ю. Д. Плазменные технологии в сварочном производстве. – Ч. 1 // Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2004, 73 с.

28. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин. – Харьков: Metallurgizdat, 1961. – 422 с

29 Переpletчиков Е.Ф. Плазменная наплавка / Е.Ф. Переpletчиков // Сварщик. – 2000. – № 2.– С. 8 – 11

30 Шлямнев, А. П. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: справочник [Текст] / А. П. Шлямнев. - Москва: Интернет Инжиниринг, 2000. - 232 с.

31 Вологдин, В.П. Поверхностная закалка индукционным способом / В.П. Вологдин. – М.: Metallurg издат, 1939. – 244 с.

32. Индукционная закалка сталей: учебное пособие / Ю.Д. Корягин, В.И. Филатов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 52 с.

33. Емелин, В. И. Восстановление деталей и узлов машин: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / В. И. Емелин. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. 367 с.

34. Слухоцкий А. Е. Индукторы для индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин – Ленинград: Энергия, 1974 – 264 с.
35. Способы металлографического травления: Справ. изд.: Пер. с нем. Беккерт М., Клемм Х. 2-е изд., перераб и доп. М.: Metallurgiya, 1988. С.400 с ил.
36. Бальшин М.Ю. Основы порошковой металлургии / М.И. Бальшин, С.С. Кипарисов// «Металлургия», М.1978. – 185 с.
37. Порошковая металлургия и напыленные покрытия, под ред. Б.С. Митина, Ю.В. Ленинский, М., 1987.
38. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 2000г., 424с.
39. Киричек А.В. Повышение эффективности упрочняющих технологий. Справочник. Инженерный журнал №3, 2004г., с. 15-20.
40. ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников – Введ. 01.01.77. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1993. –35 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
Кафедра Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
В.И. Темных
(подпись)
«__» _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Направление 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

Профиль 22.04.01.04 Синтез и литьё новых металлических материалов

Научный руководитель

Токмин 30.04.20
(подпись, дата)

А.М. Токмин

Выпускник

Мальцев 2.07.20
(подпись, дата)

Д.Д. Мальцев

Рецензент

Мишнев 20.07.20
(подпись, дата)

С.В. Мишнев

Красноярск 2020