

Федеральное государственное автономное  
Образовательное учреждение  
Высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
Кафедра Материаловедения и технологии и обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.И. Темных  
(подпись)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**Исследование влияния защитных сред различного агрегатного  
состояния на свойства слоистых материалов при  
индукционной наплавке**

**Направление: 22.03.01 Материаловедение и технология материалов**

Научный руководитель	_____	Токмин А.М.
	(подпись, дата)	
Выпускник	_____	Эссаулов В.В.
	(подпись, дата)	
Нормоконтролер	_____	Свечникова Л.А.
	(подпись, дата)	

Красноярск 2020

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

Политехнический институт  
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В. И. Темных

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

**Студенту Эссаулову Вадиму Владимировичу.**

**Группа:** МТ 16-01Б.

**Направление (специальность):** 22.03.01 Материаловедение и технологии обработки материалов.

**Профиль:** 22.03.01.07 Материаловедение и технологии материалов в машиностроении.

**Тема ВКР:** Исследование влияния защитных сред различного агрегатного состояния на свойства слоистых материалов при индукционной наплавке.

**Утвержденная приказом по университету № 21639/с, от 27.12.2019 г.**

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

**Перечень разделов ВКР:**

- 1 Методы нанесений покрытий и их анализ.
- 2 Защитные среды, применяемые при наплавке.
- 3 Экспериментальное оборудование и методы проведения исследований.
- 4 Экспериментальные исследования.

**Перечень графического материала:** Презентационный материал.

Руководитель \_\_\_\_\_ доцент, канд. тех. наук А.М.Токмин  
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ В.В.Эссаулов  
подпись, дата инициалы, фамилия

## АННОТАЦИЯ

Применение износостойких композиционных материалов на рабочих органах горнодобывающей и строительной-дорожной техники позволяет увеличить не только эксплуатационный срок службы, но и экономить дорогостоящие металлы, за счет применения низколегированного компонента основы слоистого композиционного материала. Комплексный подход в установлении взаимосвязи между составом наплавляемого материала, защитных сред, применяемого технологического оборудования и технологических режимов, позволяет определить воздействие на фазо- и структурообразование при получении композиционных материалов,, имеет особую актуальность.

Целью данной работы является: Исследование влияния защитных сред различного агрегатного состояния, на формирование структуры и свойств композиционного материала, полученного методом индукционной наплавки.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Исследование влияния защитных сред различного агрегатного состояния на свойства слоистых материалов при индукционной наплавке». содержит 54 страницы, 18 рисунков, и 19 источников литературы.

**Цель работы:** Исследование влияния защитных сред различного агрегатного состояния, на формирование структуры и свойств композиционного материала, полученного методом индукционной наплавки

Для выполнения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи:**

1 Изучение влияние агрегатного состояния защитной среды на структуру и свойства наплавленного слоя и переходной зоны

2 Определить влияние технологических режимов, скоростей нагрева и охлаждения, химического состава металлического порошка на структурообразование, физико-механические и эксплуатационные свойства слоистого композиционного материала.

3 Получить слоистый композиционный материал высокоэнергетическим индукционным нагревом.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Методы нанесения покрытий и их анализ.....	8
1.1 Плазменная наплавка.....	9
1.2 Лазерная наплавка.....	10
1.3 Дуговая наплавка .....	13
1.4 Электрошлаковая наплавка.....	14
1.5 Электронно-лучевая наплавка .....	16
1.6 Индукционная наплавка .....	17
1.6.1 Индукторы для наплавки .....	21
1.6.2 Установки для индукционного нагрева.....	22
1.7 Газовая наплавка .....	24
1.8 Плазменная наплавка.....	25
2 Защитные среды, применяемые при наплавке.....	28
2.1 Защитные флюсы .....	34
3 Экспериментальное оборудование и методы проведения исследований .....	39
3.1 Экспериментальное оборудование.....	39
3.2 Методы проведения исследований .....	40
3.3 Технология получения композиционного материала .....	42
4 Экспериментальные исследования .....	45
4.1. Влияние подготовки поверхности компонента основы на формирование границы раздела композиционного материала .....	45
4.2 Формирование границы раздела композиционного материала .....	47
4.3 Формирование структуры наплавленного слоя .....	48
4.4 Анализ микротвердости .....	49
ВЫВОДЫ.....	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	53

## ВВЕДЕНИЕ

Наплавка металла применяется для восстановления геометрии изношенных деталей машин и механизмов, формирования упрочняющих слоев металла на поверхности изделий и создания биметаллических структур. По своей сути наплавка – это один из видов сварочных технологий, т. к. она основана на тех же физических и технологических принципах, что и традиционные виды сварки. Для восстановления и защиты поверхностей деталей с помощью слоя расплавленного металла используют различные способы наплавки, отличающиеся друг от друга методами плавления и составами сварочной среды: электродуговые, газопламенные, плазменные, лазерные, индукционные и пр. С помощью этой технологии можно наплавлять на рабочие плоскости стальных конструкций металлы различного химического состава, в том числе медь, бронзу, чугун, а также никелевые, кобальтовые и хромовые сплавы.

Технология наплавки позволяет добиться не только надежного сцепления наносимого металла с основой, но и получить требуемые физические и химические характеристики наплавленного слоя. Первое достигается качественной подготовкой базового изделия и точным соблюдением технологических режимов, а второе – правильным подбором сварочных материалов. Сущность наплавки состоит в равномерном нанесении узких полос расплавленного металла на поверхность детали таким образом, чтобы они соединились в сплошной металлический слой заданной толщины. При нанесении защитных покрытий он может составлять десятые доли миллиметра, а при восстановлении изношенных деталей – до десяти миллиметров. В последнем случае должна быть обеспечена толщина припуска, достаточная для механической обработки детали (обточки, расточки или фрезеровки) до требуемого размера. Перед механообработкой наплавленный слой, как правило, отжигают, а после подвергают закалке с отпуском.

## 1 Методы нанесения покрытий и их анализ

Технологии наплавки, применяемые в современной промышленности (рис. 1), должны обеспечивать как качество наплавленного слоя, так и минимальное воздействие на металл базовой детали, чтобы избежать ее деформации.

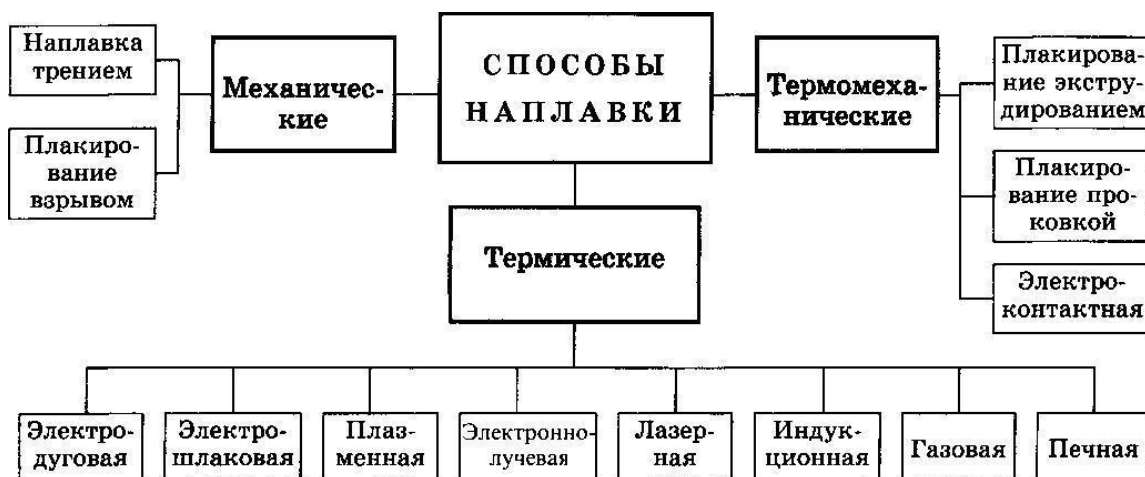


Рисунок 1 – Виды наплавки

Кроме того, разные способы наплавки имеют различные скорости обработки и отличаются расходом сварочных материалов на единицу наплавленного металла. Каждый из них характеризуется собственным соотношением качества с производственными и экономическими показателями. При этом в условиях реального производства наплавка деталей может выполняться не самым удачным способом. К примеру, многие предприятия не располагают оборудованием для электрошлакового наплавления, котороекратно экономит электроэнергию и наплавочные порошки, и применяют для тех же целей электродуговые методы. Большинство наплавочных технологий ориентированы на работу с изделиями из стали, в том числе с нанесением на нее покрытий из цветных металлов.



## 1.1 Плазменная наплавка

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 неплавящийся вольфрамовый электрод.

В закрытую плазменную струю (анодом является сопло или канал горелки). Хотя температура сжатой дуги на 20–30 % в этом случае выше, но интенсивность потока ниже, т. к. увеличивается теплоотдача в окружающую среду. Схема используется для закалки, металлизации и напыления порошков [4].

Комбинированная схема (анод подключается к детали и к соплу горелки). В этом случае горят две дуги. Схема используется при наплавке порошком.

Плазменную наплавку металла можно реализовать двумя способами:

- струя газа захватывает и подаёт порошок на поверхность детали;
- в плазменную струю вводится присадочный материал в виде проволоки, прутка, ленты.

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

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.

Поверхность детали необходимо готовить к наплавке более тщательно, чем при обычной электродуговой или газовой сварке, т. к. посторонние включения уменьшают прочность наплавленного слоя. Для этого производится механическая обработка поверхности (проточка, шлифование, пескоструйная обработка.), иногда обезжиривание. Мощность электрической дуги подбирают такой, чтобы сильно не нагревалась деталь, и чтобы основной металл был на грани расплавления [8.9].

## **1.2 Лазерная наплавка**

Современное оборудование для лазерной наплавки, в основном, оснащается диодными или оптоволоконными лазерными источниками. Помимо этого существуют газовые и другие источники, также используемые для наплавки. Диодные лазеры более всего подходят к процессу наплавки, т.к. плотность распределения энергии в фокусной точке наиболее равномерна.

Лазерная наплавка по характеру излучения бывает:

- непрерывным лазером;

– импульсным лазером;

Существует проволочная и порошковая лазерная наплавка. Лазерное сканирование поверхности с преднанесенным покрытием называется лазерным оплавлением.

Существуют следующие способы подачи материала:

– коаксиальная;

– радиальная;

– латеральная.

Для лазерной наплавки применимы типы лазеров, генерирующих длину волны в диапазоне 0,9–1,3 мкм, т.к. в этом диапазоне у большинства чистых металлов и сплавов степень адсорбции излучения оптимальна.

Непрерывная наплавка характеризуется большей производительностью. Минимальные тепловложения лазерной наплавки перед другими технологиями наплавки и сварки позволяют обрабатывать даже трудносвариваемые материалы. Среднее значение зоны перемешивания материала наплавки с основой составляет 10–30 мкм, в зависимости от режимов наплавки. Толщина наплавки за один проход варьируется от 0,3–3 мм.

Сегодня существуют оптические системы, позволяющие наплавлять как внешние, так и внутренние поверхности. Принципиальным отличием систем для внутренней наплавки является наличие призмы или зеркал поворачивающих поток световой энергии.

Основными потребителями технологий лазерной наплавки являются: нефтегазовая отрасль, металлургия, судостроение, гипсоцементной промышленности.

Импульсный лазер отличается большой пиковой мощностью, работа по наплавке идёт вручную, в основном проволокой, или с помощью роботизированных систем (проволочная или порошковая). Материал подается в ванну расплава.

При ручной наплавке наблюдая процесс под микроскопом с увеличением 10–16 крат. В окуляре микроскопа находится перекрестие, по которо-

му выставляется лазерный луч, поэтому оператор всегда знает куда попадёт следующий импульс. Используемые диаметры сфокусированного луча лазера варьируется в пределах от 0,2–2,5 мм, в зависимости от диаметра подаваемой присадки ( $d$  пятна должен быть в 1,5–2 раза больше диаметра присадки, для перемешивания присадки с наплавляемой поверхностью), что позволяет минимизировать объёмы расплава и соответственно уменьшить тепловложения в обрабатываемый материал. В зону наплавки подаётся инертный газ, предохраняющий ванну расплава от доступа кислорода. Ручная наплавка, в основном, применяется для получения первоначальных размеров изношенных или поврежденных деталей. Чаще всего используется для восстановления повреждённых деталей машин и пресс-форм. Поскольку процесс, по сути является сваркой с присадкой наплавка идёт во время сварки некоторых деталей [12].

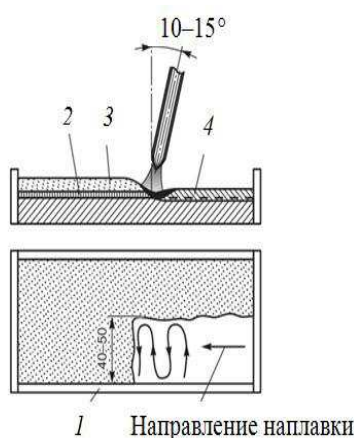
Роботизированная импульсная наплавка чаще применяется для новых изделий, т.к. позволяет снизить трещинообразование наплавляемого слоя, благодаря уменьшению теплового воздействия на деталь.

Ее преимущества:

- дозируемая энергия;
- возможность локальной обработки поверхности;
- отсутствие термических поводов, минимизация зоны термического влияния;
- возможность обработки деталей больших габаритов с большим расходом наплавляемого вещества;
- быстрый нагрев и остывание наплавляемого материала;
- возможность модификации поверхности;
- высокая степень адгезии наплавляемого материала при небольшом перемешивании с основой.

### 1.3 Дуговая наплавка

При дуговой – наплавке покрытыми электродами или автоматической наплавке под флюсом электродное покрытие или флюс превращаются в шлак, химическое взаимодействие которого с металлом ванны обеспечивает его рафинирование, кроме того, шлак защищает ванну от загрязнения окружающим воздухом, это представлено на (рис. 2).



- 1 – Графитовые формовочные пластины;
- 2 – слой прокаленной буры;
- 3 – слой порошкообразного твердого сплава;
- 4 – наплавленная поверхность.

Рисунок 2 – Схема дуговой наплавки:

Механизированные способы наплавки наиболее широко используют при восстановлении изношенных деталей.

Выбор способа наплавки определяется материалом восстанавливаемой детали, требованиями к физико-механическим свойствам наплавленного покрытия, геометрическими параметрами детали, значением износа и др.

Механизированная сварка (наплавка) может быть автоматической и полуавтоматической. При автоматической сварке (наплавке) механизированы как подача электродного материала в виде проволоки или ленты в зону сварки (наплавки), так и относительное перемещение электрода и детали. При полуавтоматической механизирована только подача электрода, то есть

электродная проволока по шлангу подается к держателю, который сварщик перемещает относительно детали.

Оборудование для автоматической наплавки состоит из сварочной головки, токарного или специальный станка, источника питания и аппаратного ящика [1, 3].

Сварочная головка (автомат) включает механизм подачи электродной проволоки или ленты (обычно протягивающие ролики) с механизмом регулирования скорости подачи, механизмов и устройств для подъема, опускания, поворота головки и т.п.

Некоторые установки для наплавки (У-653 и др.), кроме механизма подачи электрода к детали, имеют механизм для поперечных колебаний электрода, благодаря которому получают в один проход наплавленный слой значительной ширины. Повышается производительность и качество наплавки.

#### **1.4 Электрошлаковая наплавка**

Ванна жидкого шлака, имея меньшую, чем у расплавленного металла, плотность, постоянно находится над поверхностью металлического расплава, защищая его от воздействия воздуха. Капли присадочного металла, проходя через шлак, подвергаются металлургической обработке и очищаются от вредных примесей. Направление конвекции шлака зависит от диаметра электрода: при наплавке тонким электродом преобладает вынужденная электромагнитная конвекция, шлак опускается у электрода и поднимается по краям шлаковой ванны, при использовании толстого электрода преобладает свободная тепловая конвекция, шлак опускается по краям шлаковой ванны и поднимается вблизи электрода.

Наплавка с принудительным (ЭШН в водоохлаждаемых кристаллизаторах и формирующих устройствах) и свободным (ЭШН лентами) формированием наплавленного слоя. По начальной стадии электрошлакового про-

цесса различают «твёрдый» старт (наведение шлаковой ванны происходит непосредственно в зоне наплавки) и «жидкий» старт (в полость кристаллизатора заливают заранее приготовленный шлак).

Сущность ЭШН с принудительным формированием наплавляемого слоя заключается в следующем. В шлаковую ванну, находящуюся в полости, образованной наплавляемой поверхностью и водоохлаждаемым кристаллизатором, подается электродный присадочный материал. Ток, проходя между электродом и наплавленным металлом через жидкий шлак, разогревает его до высокой температуры, достаточной для расплавления подаваемого присадочного материала (от 1650 до более, чем 2000 градусов Цельсия) и оплавления поверхности изделия. Расплавленный металл опускается на дно шлаковой ванны и, кристаллизуясь, образует наплавленный слой.

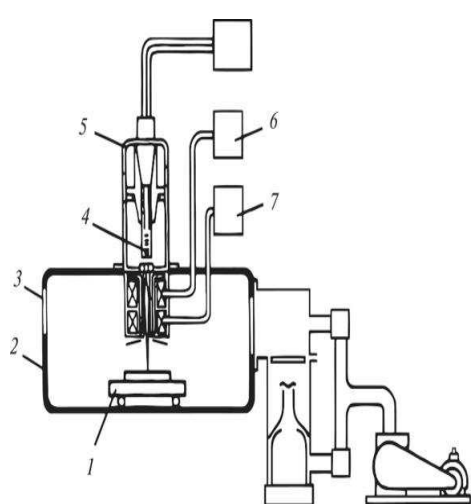
В качестве присадочного материала используются один или несколько электродов из сплошных или порошковых проволок, ленты, пластинчатые электроды большого сечения, плавящиеся мундштуки и композиционные проволоки. При использовании неплавящихся (графитовых, вольфрамовых) электродов возможно применение электронейтральных некомпактных присадочных материалов: дроби, жидкого металла [6].

При ЭШН композитных покрытий в шлаковую ванну загружают сверху гранулированный твёрдый сплав, температура плавления которого выше температуры плавления металла-связки, необходимость применения которого обусловлена недопустимостью вторичного расплавления некоторых твёрдых сплавов, из-за чего наплавка монопокрытий из таких материалов невозможна. Твёрдость и износостойкость обеспечивается частицами твёрдого сплава, а металл-связка держит их на поверхности детали.

## 1.5 Электронно-лучевая наплавка

Сущность электронно-лучевой наплавки заключается в нагреве материала и поверхности детали потоком электронов, обеспечивающем высококонцентрированное вложение энергии в нагреваемую поверхность. Малый объем обрабатываемого металла и кратковременность теплового воздействия обеспечивают незначительную деформацию восстанавливаемой детали. При этом толщина наплавленного слоя может составлять от нескольких десятых миллиметра до 1,0–1,5 мм на сторону.

Вакуумная камера (рис. 3) обеспечивает при наплавке в ее рабочем объеме разрежение 1,33–13,3 МПа.



- 1 – механизм перемещения восстанавливаемой детали;
- 2 – вакуумная камера;
- 3 – смотровые окна;
- 4 – электрод;
- 5 – сварочная пушка;
- 6 – система фокусировки луча;
- 7 – система отклонения луча.

Рисунок 3 – Вакуумная камера

Электроны могут быть ускорены до энергии 20–30 кэВ (низковольтные пушки), до 30–100 кэВ (пушки с промежуточным ускоряющим напряжением) и до 100–200 кэВ (высоковольтные пушки). Поток электронов, эмитируемых катодом, формируется предварительно электростатическим полем в области «катод – анод». Регулирование силы тока луча производится подачей напряжения на электрод 4. Удельная энергия, высвобождаемая в месте бомбардировки металла потоком электронов, может изме-



няться с помощью системы электромагнитной фокусировки луча 6. Для совмещения пятна нагрева с местом сварки или при наплавке по сложному контуру используется система электромагнитного отклонения луча 7.

По сравнению с индукционной наплавкой производительность электронно-лучевой наплавки в 10–15 раз выше. Данный способ можно применять для наплавки любых материалов. Он позволяет точно дозировать энергию, вводимую в металл, изменяя тем самым глубину проплавления и структуру металла детали и наплавленного слоя.

## **1.6 Индукционная наплавка**

Сущность метода индукционной наплавки заключается в нанесении на поверхность детали слоя специального материала с дальнейшим его расплавлением путём индукционного нагрева для восстановления первоначальной формы детали или придания поверхности особых свойств (рис.4).

Наплавленный слой отличается особой прочностью, что обеспечивает повышение износостойкости наплавляемых элементов, а, следовательно, увеличивает их долговечность.

Полученные этим способом биметаллические изделия позволяют экономить дорогостоящие материалы, управлять такими свойствами, как коэффициент трения, существенно снижать себестоимость и повышать долговечность деталей и узлов.

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

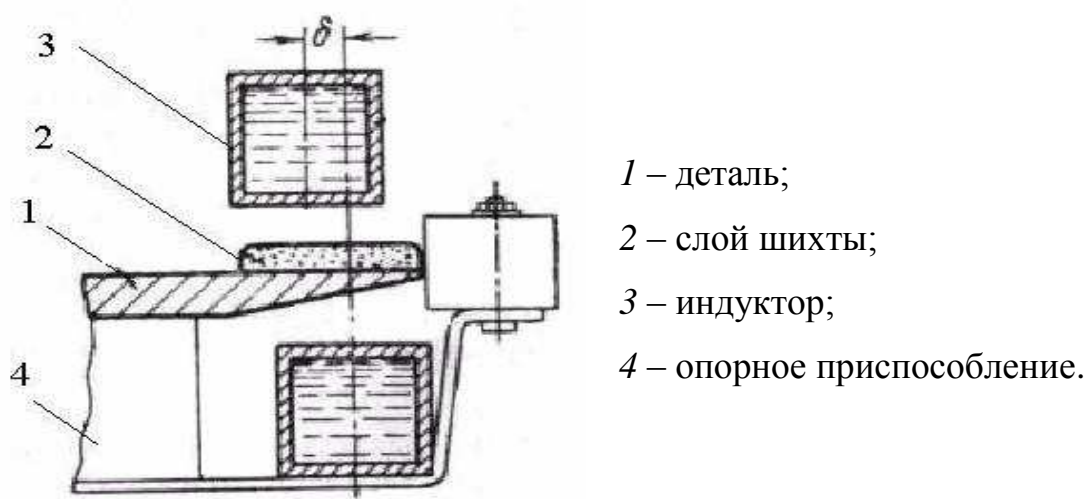


Рисунок 4 – Схема расположения наплавляемой детали в индукторе:

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.

Восстановленные и упрочненные методом индукционной наплавки детали служат в 3–10 раз дольше новых, не упрочненных деталей.

Индукционная наплавка применяется для упрочнения и восстановления деталей:

- железнодорожной техники;
- горнодобывающего оборудования;
- строительной техники;
- дорожно-ремонтной техники;
- автомобилей и тракторов;
- сельскохозяйственной техники.

К ним относятся такие изделия: долото лемеха, лапа культиватора, хвостовик автосцепки, замок автосцепки, центрирующая балка, хомут тяговый, плита опорная и т. д. [2, 4].

Технологический процесс индукционной наплавки складывается из следующих операций:

1 подготовка наплавляемой поверхности детали. Очистка от загрязнений и ржавчины;

2 нанесение шихты на упрочняемую поверхность для получения необходимой толщины износостойкого сплава с учетом требований эксплуатации;

3 подача детали в индуктор и расплавление шихты на всей наплавляемой поверхности;

4 удаление детали из индуктора и передача на участок термической обработки.

При разработке оптимального процесса упрочнения деталей машин необходимо учитывать влияние технологических факторов на качество наплавленного слоя. Основным условием получения качественного слоя наплавленного металла является одновременное расплавление шихты на всей упрочняемой поверхности. С уменьшением толщины основного металла продолжительность наплавки резко увеличивается. Это объясняется снижением коэффициента полезного действия нагрева вследствие уменьшения объема металла, разогреваемого индуктором.

В условиях массового производства неизбежны колебания толщины восстанавливаемых изделий вследствие разной величины их износа. Эта разница может достигать 25–40 % от номинальной толщины кромки. Сужение этого допуска представляет значительные технические трудности и требует либо предварительной механической обработки наплавляемой поверхности, либо пластической деформации в горячем состоянии.

Решающее влияние на стабильность наплавленного слоя по толщине оказывает равномерность слоя нанесенной шихты. При использовании руч-

ных приспособлений для нанесения шихты на наплавляемую поверхность толщина слоя насыпки колеблется в пределах  $\pm 20\%$  от номинальной, что не гарантирует получения равномерной толщины наплавленного слоя. Установлено, что по мере увеличения толщины слоя шихты увеличивается продолжительность наплавки детали.

В процессе индукционной наплавки рабочие органы подвергаются местному нагреву до высоких температур, что вызывает термические деформации детали. Величина и характер деформации зависят от общей жесткости детали, формы поверхности, метода нагрева, глубины фрезерования в период подготовки поверхности [12, 13].

Наибольшей деформации во время наплавки подвергаются длинномерные детали, например, режущие органы сельхозтехники: лемех рыхлителя, нож измельчающего аппарата силосоуборочного комбайна и др. С целью получения детали, соответствующей чертежу, эти заготовки перед наплавкой выгибают в обратную сторону на величину, равную деформации детали от термического воздействия, которую заранее рассчитывают или определяют эмпирическим путем.

При разработке и внедрении технологического процесса наплавки необходимо обеспечить стабильные геометрические размеры поверхности, достигнуть точности дозирования шихты по толщине не ниже  $\pm 5\%$  номинальной толщины слоя шихты, обеспечить стабильную горизонтальную установку упрочняемой плоскости в индукторе, стремиться к использованию сплавов, вязких в интервале наплавочных температур.

Основная задача термической обработки после индукционной наплавки – устранение последствий перегрева основного металла. С этой целью в технологическом процессе изготовления деталей после наплавки обычно предусматривается нормализация.

Нормализация не является совершенно необходимой операцией после индукционной наплавки. Если в эксплуатации деталь не испытывает динамических нагрузок и можно не опасаться хрупкого разрушения, то термиче-

ская обработка после наплавки не производится. Это в первую очередь относится к малоуглеродистой стали (Ст3, 20). Для более ответственных деталей, изготавливаемых из среднеуглеродистых сталей и испытывающих при эксплуатации ударные нагрузки, например, лапы культиваторов, нормализация после наплавки обязательна. В ряде случаев нормализация может быть совмещена с другими операциями, например с нагревом подгибку, если таковой применяется при придании деталям окончательной формы [4, 5].

### 1.6.1 Индукторы для наплавки

Индуктор нагревательный – электромагнитное устройство, предназначенное для индукционного нагрева (рис. 5).

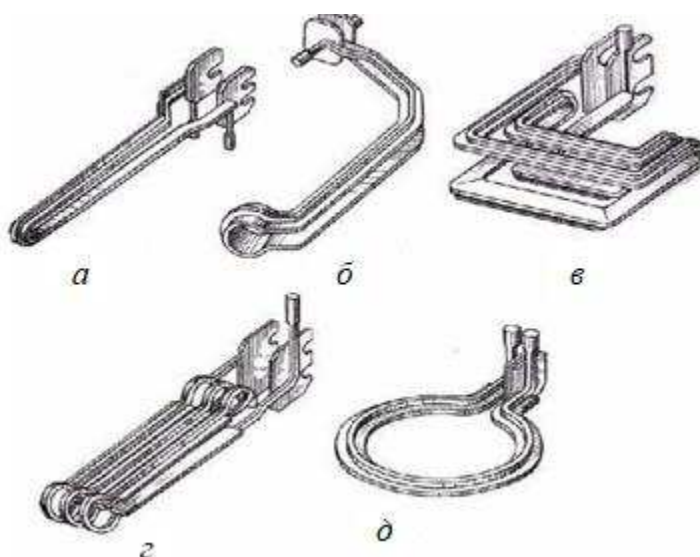


Рисунок. 5. – Индукторы для наплавки различных деталей машин:  
*а* – петлевой; *б* – для наплавки плужных лемехов; *в* – проходной; *г* – трех-  
витковый; *д* – для одновременной центробежной наплавки

Индуктор состоит из двух основных частей: индуктирующего провода, с помощью которого создается переменное магнитное поле, и токопод-

водов для подключения индуктирующего провода к источнику электрической энергии.

Проводящее электрический ток тело, помещенное в магнитное переменное поле, нагревается вследствие теплового действия вихревых токов, наводимых в участках изделия, непосредственно охватываемых индуктирующим проводом [14, 15]. В основном все типы индукторов могут быть разделены на два вида: одновременного и непрерывно-последовательного нагрева. В первом случае площадь индуктирующего провода примерно равна площади нагреваемой поверхности, что позволяет одновременно нагревать все её участки. При втором способе нагреваемое изделие перемещают относительно индуктирующего провода, последовательно нагревая участки поверхности изделия.

### **1.6.2 Установки для индукционного нагрева**

Установки индукционного нагрева серии «ПАРАЛЛЕЛЬ ИП» предназначены для напайки твердосплавных пластин режущего инструмента, а также для наплавки, нагрева и термообработки деталей различной формы с использованием индукторов и приспособлений специальной конструкции. Установки заменяют собой устаревшие высокочастотные установки с ламповыми генераторами и среднечастотные установки с машинными преобразователями. Они более экономичны, удобны и безопасны в эксплуатации, обладают малыми габаритами и современным дизайном.

Установки индукционного нагрева серии «ПАРАЛЛЕЛЬ ИНТ» предназначены для индукционного нагрева труб и прутков до температуры 750 °С в различных технологических процессах (сушка, отжиг, нанесение покрытий, очистка труб и буровых штанг от отложений). Установка ПАРАЛЛЕЛЬ ИНТ-30-8,0 служит для нагрева замков перед наворачиванием на бурильные трубы.

Установки индукционного нагрева серии «ПАРАЛЛЕЛЬ СТЫК» предназначены:

- для нагрева зон стыков и дефектных участков при нанесении изоляции трубопроводов;
- предварительного нагрева околошовной зоны при сварке и наплавке трубопроводов в полевых условиях;
- питания ручных шлифовальных машин (далее – шлифмашин) и другого электроинструмента с однофазными коллекторными двигателями напряжением 220 В, мощностью до 2 кВт.

Установки питаются от сварочных агрегатов постоянного тока и не создают остаточной намагниченности трубы.

Установка УПИ-10-440 предназначена для пайки твердосплавных пластин к режущим кромкам дисковых фрез и пил диаметром 120...1000 мм с толщиной полотна до 10 мм, сверл, резцов. Позволяет без нарушения структуры и деформации материала полотна фрезы производить пайку пластин при локальном нагреве токами высокой частоты.

Автомат для индукционной наплавки фасок клапанов 01.03-172 «РЕМДЕТАЛЬ». Поточная автоматическая линия управляемого индукционного нагрева предназначена для наплавки автомобильных клапанов двигателей внутреннего сгорания методом намораживания. Автоматизированная линия обеспечивает высококачественное упрочнение поверхности клапана при высоком уровне производительности установки.

Автоматическая поточная линия включает систему подачи заготовок и охлаждающей среды, источник питания, представляющий собой тиристорный преобразователь частоты, индуктор и систему управления [12, 13].

## 1.7 Газовая наплавка

При газовой наплавке (ГН) в качестве источника теплоты для получения наплавленного слоя металла используется газовое пламя. Газовым пламенем специальных горелок можно производить наплавку, напыление покрытий, а также их оплавление. Газовое пламя получают при сжигании газообразных продуктов в кислороде. В качестве горючего газа чаще всего применяют ацетилен, максимальная температура пламени которого составляет 3150 °С. Используют для этих целей также пропан-бутан.

При наплавке, в отличие от сварки, желательна малая глубина проплавления основного металла, поэтому наплавку выполняют способом скоростной сварки (способом Линда). При сварке (наплавке) таким способом используют горелку с соплом большого диаметра, нагревая основной металл науглероживающим пламенем. При сварке с использованием горючей смеси, обогащенной ацетиленом, на поверхности металла оседают частицы восстановленного углерода, образуя тонкий науглероженный слой толщиной около 0,02 мм. Вследствие снижения точки плавления металла науглероженного слоя происходит расплавление только в тонком поверхностном слое. Возникновение этого явления, называемого "запотеванием", свидетельствует о готовности основного металла к газовой наплавке. "Запотевание" основного металла в сочетании с применением присадочного материала создает особо благоприятное условие для газовой наплавки с незначительным проплавлением основного металла. Появление "запотевания" позволяет также определить момент нагрева до температуры наплавки и точнее выбрать время подачи наплавочного материала. Вместе с тем науглероживание поверхности при наплавке этим способом вызывает повышение содержания углерода в наплавленном металле, что оказывает неблагоприятное влияние на его механические свойства и коррозионную стойкость. В связи с этим в настоящее время рассмотренный способ при-



меняют только при наплавке высокохромистого сплава на основе железа и других высокоуглеродистых наплавочных материалов, тогда как при нанесении покрытий из коррозионно стойкой стали, для которой науглероживание нежелательно, применяют способы дуговой наплавки плавящимся и вольфрамовым электродами в среде инертного газа [3].

## **1.8 Плазменная наплавка**

Для восстановления старых деталей, повышения износостойкости новых, применяют плазменную наплавку. Инновационный метод образования защитных покрытий сродни плазменной сварке, используется для оборудования, эксплуатируемого в жестких условиях, контактирующего с агрессивной средой.

Принцип плазменной наплавки металла основан на расплавлении присадки электродугой высокой плотности. Плазма возникает двумя способами:

- за счет электрического разряда, возникающего между плазмотроном и направляемой поверхностью (прямое действие);
- между электродом и соплом, к которому подводится охлаждение (косвенное действие).

Для наплавки деталей применяются различные присадки;

- сыпучие и гранулированные порошковые материалы;
- наплавочная порошковая проволока, используемая для сварки;
- металлические прутки, лента;
- спецшнуры, в составе которых имеется металлический порошок.

По сути, наплавка – это поверхностная сварка плазмотроном, обработка металла плазменной дугой. На поверхности образуется диффузионный слой, прочно удерживающий защитную пленку, обладающую специфическими свойствами.

Популярность методики наплавления защитных покрытий плазмотроном объясняется рядом положительных свойств;

- метод применим для многих материалов, включая тугоплавкие;
- геометрические параметры и форма детали значения не имеют, результативность обработки стандартная;
- можно наносить наплавку в несколько слоев, до 6,5 мм толщиной с припуском от 400 до 900 микрон;
- при небольшой глубине расплавления (от 300 микрон до 2,5 мм) формируется незначительная зона термического влияния, риск образования внутренних дефектов минимальный;
- за счет большой скорости разогрева обрабатываемый металл не успевает прогреться на большую глубину, структурная зернистость не изменяется, удается избежать коробления, деформации деталей;
- защитные покрытия можно наносить на тонкие поверхности, минимальная толщина плазменного напыления не более 200 микрон;
- плазменная обработка эффективнее электродуговой наплавки в разы;
- поток плазмы регулируется с большой точностью.

Разработано несколько способов нанесения наплавочного материала:

- плазменная предусматривает нанесение проволоки сжатой дугой, процесс подобен ручной сварке;
- при плазменно-порошковой наплавке наплавочный гранулят из питателя механически подается в плазмотрон, транспортируется газом;
- комбинированный способ объединяет два вида подачи: автоматически в рабочую зону поступают гранулы и проволока, получается расплав с определенными физико-химическими свойствами. Возможно наплавление твердых сплавов: литых, трубчатых, порошковых. Принцип работы такой же, как с присадочной проволокой;
- применение измельченного металла в качестве присадки оправдано при получении тонкого слоя, менее миллиметра;

– микроплазменная обработка металлов – разновидность проволочно-го плазменно-дугового напыления тонкостенных изделий, формируется пятно диаметром от 1 до 5 мм, ламинарная плазменная струя отличается низким уровнем шума в пределах 50 дБ.

Различают три вида струи плазмы:

– закрытая с анодным подключением к соплу или горелки формируется широкой, характеризуется небольшой интенсивностью (главный минус – много тепла уходит в атмосферу, металл прогревается медленно);

– открытая формирует направленный тепловой поток, анод подключается к присадочному прутку, ленте или проволоке, температурный пик расположен над обрабатываемой поверхностью, обеспечивается высокая скорость разогрева;

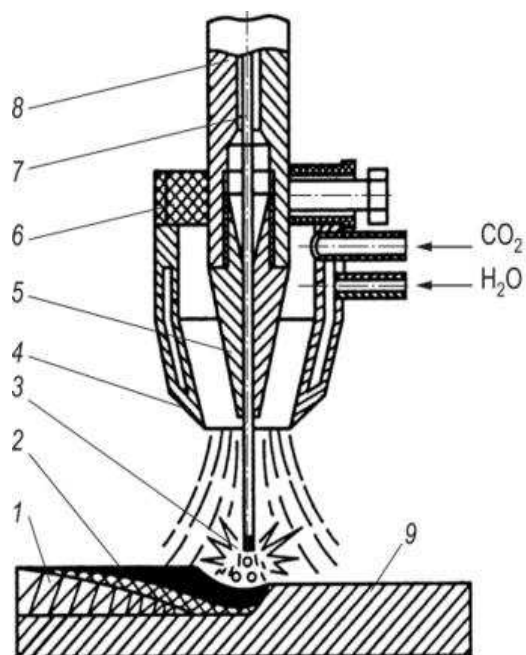
– комбинированная предназначена для плазменно-порошкового напыления, одновременно разжигается две дуги: открытая и закрытая (закрытая формируется в зоне подачи порошковых гранул, открытая – на выходе жесткой присадки).

В качестве формирующей плазму среды применяют воздух, водород или любой инертный газ. По мнению специалистов, качественный слой образуется, когда применяют гелий и аргон.

## 2 Защитные среды, применяемые при наплавке

Наиболее распространена наплавка в среде  $\text{CO}_2$ , которая обеспечивает хорошее формирование шва, наплавленный металл при этом получается плотным, а зона термического влияния малая. Благодаря последнему фактору этот способ применяют для наплавки нежестких деталей.

Отличается тем, что в зону горения электрической дуги подают под давлением 0,05–0,20 МПа газ, который защищает столб дуги и ванну расплавленного металла от кислорода и азота воздуха (рис. 6). Для создания защитной среды используют аргон, гелий, диоксид углерода и их смеси.



- 1 – мундштук;
- 2 – электродная проволока;
- 3 – горелка;
- 4 – наконечник;
- 5 – сопло горелки;
- 6 – электрическая дуга;
- 7 – сварочная ванна;
- 8 – покрытие;
- 9 – заготовка.

Рисунок 6 – Схема наплавки в среде диоксида углерода:

Инертными называют газы, не способные к химическим реакциям и практически не растворимые в металлах. Это одноатомные газы, атомы которых имеют заполненные электронами наружные электронные оболочки, чем и обусловлена их химическая инертность. Из инертных газов для сварки используют аргон, гелий и их смеси.

Аргон – негорючий и невзрывоопасный газ. Он не образует взрывчатых смесей с воздухом. Будучи тяжелее воздуха, аргон обеспечивает хорошую газовую защиту сварочной ванны. Аргон газообразный чистый поставляется согласно ГОСТ 10157–62 трех марок: А, Б и В. Содержание влаги для газообразного аргона всех трех марок не должно превышать 0,03 г/м<sup>3</sup>.

Аргон марки А рекомендуется применять для сварки и плавки активных и редких металлов (титана, циркония и ниобия) и сплавов на их основе, а также для сварки особо ответственных изделий из других материалов на заключительных этапах изготовления. Аргон марки Б предназначен для сварки и плавки плавящимся и неплавящимся вольфрамовым электродом сплавов на основе алюминия и магния, а также других сплавов, чувствительных к примесям растворимых в металле газов. Аргон марки В рекомендуется для сварки и плавки хромоникелевых коррозионно стойких и жаропрочных сплавов, легированных сталей различных марок и чистого алюминия [11].

Аргон в основном получают из воздуха, в котором он содержится в относительно небольшом количестве (1,28 % по массе). Производство аргона осуществляется на кислородных установках с аргонными приставками. В этих приставках сырой аргон очищается до необходимой степени чистоты от азота и кислорода. Гелий подобно аргону химически инертен, но в отличие от него значительно более легок. Гелий легче воздуха, что усложняет защиту сварочной ванны и требует большего расхода защитного газа. По сравнению с аргоном гелий обеспечивает более интенсивный нагрев зоны сварки, что обуславливается большим градиентом падения напряжения в дуге.

Гелий поставляют по МРТУ 51–77– 66 двух сортов – гелий высокой чистоты и гелий технический. Хранят и транспортируют гелий в стальных цельнотянутых баллонах при давлении до 150 ат. Баллоны с гелием окрашены в коричневый цвет с надписью белыми буквами «Гелий». Баллоны должны соответствовать требованиям ГОСТ. Гелий добывают из природных углеводородных газов путем их охлаждения в специальных установках.

При этом газообразные метан, этан и другие углеводороды сжижаются, а гелий остается в газообразном состоянии, так как имеет очень низкую температуру сжижения ( $- 269^{\circ} \text{C}$ ).

Особенно богаты гелием природные газы в США, что определяет широкое применение гелия для сварки в этой стране. В небольшом количестве гелий содержится в воздухе, и его подобно аргону получают в качестве побочного продукта в кислородных установках.

Инертные газовые смеси состоят, как правило, из аргона и гелия. Обладая большей плотностью, чем гелий, такие смеси лучше защищают металл сварочной ванны от воздуха. Особенно хорошими защитными свойствами обладает инертная газовая смесь, состоящая из 70 об. % аргона и 30 об. % гелия. Плотность такой смеси близка к плотности воздуха. Для сварки химически активных металлов находят применение инертная смесь, содержащая 60—65 об. % гелия, а остальное аргон. Инертные газовые смеси хотя заметно дороже, чем аргон, но превосходят его по интенсивности выделения теплоты электрической дуги в зоне сварки.

Смеси инертных и активных газов находят все более широкое применение при сварке плавящимся электродом сталей различных классов ввиду их технологических преимуществ: меньшей по сравнению с активными газами интенсивностью химического воздействия на металл сварочной ванны, высокой устойчивости дугового процесса, благоприятного характера переноса электродного металла через дугу.

Добавка к аргону небольшого количества кислорода или другого окислительного газа снижает поверхностное натяжение расплавленного металла. В результате облегчается образование отдельных капель металла, а их размер уменьшается. Поэтому для сварки стали применяют не чистый аргон, а смеси с кислородом и углекислым газом  $\text{Ar-O}_2$ ,  $\text{Ar-CO}_2$ ,  $\text{Ar-CO}_2\text{-O}_2$ .

Для сварки аустенитных сталей плавящимся электродом рекомендуется применять аргон с добавкой 1 об. % кислорода. Такая газовая смесь обеспечивает устойчивый процесс сварки и вместе с тем слабо окисляет металл

сварочной ванны. Смесь аргона с 2 или 5 об. % кислорода целесообразно применять при сварке ферритных сталей, когда требуется струйный перенос электродного металла. При сварке в таких газовых смесях качество формирования швов высокое, а разбрызгивание электродного металла очень невелико.

Неблагоприятные изменения химического состава металла сварочной ванны происходят при защите углекислым газом. Металл науглероживается, а содержание марганца, ниобия и кремния заметно снижается. В результате снижается коррозионная стойкость металла шва, характеризуемая соотношением концентраций ниобия и углерода. Металл шва, сваренный в смеси  $\text{Ar} + 1\% \text{O}_2$ , наименее отличается по химическому составу от исходной сварочной проволоки. Швы, сваренные в газовых смесях, содержащих углекислый газ, занимают в этом отношении промежуточное положение. Вместе с тем окисление металла сварочной ванны входящими в состав газовых смесей активными газами имеет и положительное значение.

Аргоно-водородную смесь (до 20 об. %  $\text{H}_2$ ) применяют при микроплазменной сварке. Наличие водорода в смеси обеспечивает сжатие столба плазмы, делает его более острым, сконцентрированным. Кроме того, водород создает в зоне сварки необходимую в ряде случаев восстановительную атмосферу.

Активные газы. Активными защитными газами называют газы, способные защищать зону сварки от доступа воздуха и вместе с тем химически реагирующие со свариваемым металлом или физически растворяющиеся в нем. При дуговой сварке стали в качестве защитной среды применяют углекислый газ. Ввиду химической активности его по отношению к вольфраму сварку в этом газе ведут только плавящимся электродом. Применение углекислого газа обеспечивает надежную защиту зоны сварки от соприкосновения с воздухом и предупреждает азотирование металла шва. Углекислый газ оказывает на металл сварочной ванны окисляющее, а также науглероживающее действие. Из легирующих элементов ванны наиболее сильно окис-

ляются алюминий, титан и цирконий, менее интенсивно – кремний, марганец, хром, ванадий и др.

Препятствием для применения углекислого газа в качестве защитной среды прежде являлись поры в швах. Поры вызывались кипением затвердевающего металла сварочной ванны от выделения CO вследствие недостаточной его раскисленности. Применение сварочных проволок с повышенным содержанием кремния устранило этот недостаток, что позволило широко использовать углекислый газ в сварочном производстве.

Углекислый газ (двуокись углерода) бесцветен, не ядовит, тяжелее воздуха. При давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0° С плотность углекислого газа равна 1,97686 г/л, что в 1,5 раза больше плотности воздуха. Углекислый газ хорошо растворяется в воде. Жидкая углекислота – бесцветная жидкость, плотность которой сильно изменяется с изменением температуры. Вследствие этого она поставляется по массе, а не по объему. При испарении 1 кг жидкой углекислоты в нормальных условиях (760 мм рт. ст., 0° С) образуется 509 л углекислого газа. В промышленном масштабе углекислоту получают в специальных установках путем извлечения ее из дымовых газов, образующихся при сжигании топлива, из газов брожения в спиртовой промышленности и газов, получающихся при обжиге известняка. Углекислоту транспортируют в жидком состоянии в стальных баллонах или изо-термических емкостях. В стальных баллонах углекислота находится под давлением до 50 ат, откуда отбирается в газообразном состоянии. Баллоны должны соответствовать требованиям ГОСТ 949–57, быть окрашенными в черный цвет с надписью «CO<sub>2</sub> сварочный», нанесенной желтой масляной краской. В обычный стандартный баллон емкостью 40 л заливают 25 кг углекислоты, при испарении которой образуется 12 600 л газа [8].

В углекислом газе не должны содержаться минеральные масла, глицерин, сероводород, соляная, серная и азотная кислоты, спирты, эфиры, органические кислоты и аммиак. В баллонах со сварочной углекислотой, кроме того, не должно быть воды. Ввиду дефицитности сварочной углекислоты I



сорта для сварки находит применение сварочная углекислота II сорта и пищевая. Повышенное содержание водяных паров в такой углекислоте может при сварке привести к образованию пор в швах и снизить пластические свойства сварного соединения.

Влажность газа повышается в начале и конце отбора газа из баллона, поэтому в этих случаях чаще всего появляются дефекты в швах. Чтобы снизить содержание влаги в поступающем на сварку углекислом газе до безопасного уровня, на его пути устанавливают осушитель. Для улавливания влаги осушитель заполнен хлористым кальцием, силикагелем или другими поглотителями влаги. При выпуске газа из баллона вследствие эффекта дросселирования и поглощения теплоты при испарении жидкой углекислоты газ значительно охлаждается. При интенсивном отборе газа возможна закупорка редуктора замерзшей влагой, содержащейся в углекислоте, а также сухим льдом. Во избежание этого рекомендуется подогревать выходящий из баллона углекислый газ.

Для сварки может быть применена и твердая двуокись углерода (сухой лед), поставляемая по ГОСТ 12162 – 66 двух марок – пищевая и техническая. По содержанию примесей пищевая двуокись углерода соответствует требованиям, предъявляемым к жидкой сварочной углекислоте, тогда как техническая двуокись углерода загрязнена минеральными маслами. Сухой лед вырабатывают в виде блоков цилиндрической или прямоугольной формы.

Находит промышленное применение при сварке низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей газовая смесь углекислого газа с кислородом ( $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ). Применяют смесь, содержащую 30 об. % кислорода (например для сварки сталей покрытых алюминием [5]), в Японии – смесь с меньшим количеством кислорода (не более 20 об. %). Смесь  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  оказывает более интенсивное окисляющее действие на жидкий металл, чем чистый углекислый газ. Благодаря этому повышается жидкотекучесть металла, что улучшает формирование шва и снижает привариваемость ка-

пель металла к поверхности изделия. Кроме того, кислород дешевле углекислого газа, что делает смесь экономически выгодной. Смесь  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$  изготавливают из чистых углекислого газа и кислорода с помощью специальных смесителей [3, 4].

Азот – бесцветный газ, без запаха, не горит и не поддерживает горение. Азот не растворяется в расплавленной меди и не взаимодействует с ней, а поэтому может быть использован при сварке меди в качестве защитного газа. Согласно ГОСТ 9293–59, азот поставляют четырех сортов: газообразный электровакуумный, газообразный 1-го сорта, газообразный 2-го сорта и жидкий. Содержание азота в этих сортах должно быть соответственно не менее об. %: 99,9; 99,5; 99 и 96. Главной примесью является кислород.

Азот получают из атмосферного воздуха путем его сжижения и ректификации. Газообразный азот транспортируют в стальных баллонах под давлением до 150 ат

## **2.1 Защитные флюсы**

Сварка (наплавка) под слоем флюса представляет собой разновидность электродуговой сварки, при которой дуга горит под слоем сварочного флюса, обеспечивающего защиту сварочной ванны от воздуха. Наряду с защитными функциями флюс стабилизирует горение дуги, обеспечивает раскисление, легирование и рафинирование расплавленного сплава сварочной ванны.

Схема процесса наплавки под слоем флюса приведена на (рис. 7). Восстанавливаемая деталь вращается в процессе наплавки с определенной скоростью. Электродная проволока автоматически подается в зону сварки. Дуга горит между концом электрода и восстанавливаемой поверхностью изделия под слоем флюса, который непрерывно подается из бункера. Под действием теплоты, выделяемой сварочной дугой, плавятся электродная проволока и

основной металл, а также часть флюса, попавшего в зону горения дуги. В зоне горения дуги образуется полость, заполненная парами металла, флюса и газами. Их давление поддерживает флюсовый свод, образующийся над сварочной ванной. Под влиянием давления дуги жидкий металл оттесняется в сторону, противоположную направлению сварки, образуя сварочную ванну. Расплавленный флюс в результате значительно меньшей плотности всплывает на поверхность расплавленного металла шва и покрывает его плотным слоем.



Рисунок 7 – Наплавка цилиндрической детали под слоем

Оболочка из расплавленного флюса предохраняет металл наплавки и околошовной зоны от кислорода и азота воздуха и, кроме того, препятствует разбрызгиванию жидкого металла. Благодаря тому, что расплавленный флюс обладает низкой теплопроводностью, замедляется процесс охлаждения наплавленного металла. Это облегчает всплытие на поверхность ванны шлаковых включений и растворенных в металле газов, что резко повышает качество наплавленного слоя сплава.

К достоинствам сварки (наплавки) под слоем флюса относятся: высокая производительность процесса, благодаря применению больших токов, большой глубины проплавления, а также почти полного отсутствия потерь металла на угар и разбрызгивание; возможность автоматизации процесса;

высокое качество наплавленного металла в результате надежной защиты флюсом сварочной ванны; улучшение условий труда сварщика.

К недостаткам этого процесса сварки следует отнести: значительный нагрев детали; невозможность наплавки деталей диаметром менее 40 мм по причине стекания расплавленных наплавленного металла и флюса с поверхности восстанавливаемой детали; необходимость в отдельных случаях повторной термической обработки детали [3].

Наплавку цилиндрических поверхностей деталей выполняют, как правило, по винтовой линии с перекрытием предыдущего валика последующим на  $1/2$ – $1/3$  ширины. Для предотвращения стекания расплавленных флюса и металла с восстанавливаемой поверхности наплавку ведут со смещением А электрода с зенита в сторону, обратную направлению вращения детали (см. рис. 3). Смещение электродной проволоки зависит в основном от диаметра наплаваемой детали и определяется опытным путем. Для деталей диаметром 50–150 мм смещение электрода лежит в пределах 3–8 мм.

Тетраборат натрия – неорганическое соединение, натриевая соль борной кислоты с химической формулой  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , наиболее распространённое и используемое соединение бора, образует несколько кристаллогидратов, широко применяется в промышленности.

Образует несколько кристаллогидратов с разным содержанием воды. Эти кристаллогидраты и безводный тетраборат натрия  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  обычно называют «бурá». Примеры кристаллогидратов:

- пентагидрат ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), так называемая «ювелирная бура», используется при пайке ювелирных изделий;
- декагидрат ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ).

Однако наиболее часто «бурой» называют декагидрат  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Эта соль представляет собой прозрачные кристаллы с молярной массой 381,43 г/моль, имеющие хорошую растворимость в тёплой воде. При нагревании свыше 400 °С полностью теряет кристаллизационную воду.

Так как тетраборат натрия является солью слабой кислоты и сильного основания, в воде гидролизует. Водный раствор тетрабората натрия имеет щелочную реакцию.

Взаимодействует с сильными кислотами, образуя соответствующую соль и борную кислоту: Многие соли металлов борной кислоты нерастворимы в воде и при взаимодействии в растворе их растворимых солей с тетраборатом натрия образующиеся бораты выпадают в осадок. На этом основано применение буры для «умягчения» воды:

С оксидами многих переходных металлов бура при сплавлении образует разнообразно окрашенные соединения — бораты «перлы буры». По окраске перлов можно судить о качественном химическом составе пробы.

Окрашивает пламя горелки в зелёный цвет (характерная реакция на соединения бора).

Получение: Десятиводную соль  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  получают из природных минералов, например, буры или кернита, осуществляя их перекристаллизацию. Также для этой цели применяют химическое взаимодействие некоторых природных боратов с карбонатом или гидрокарбонатом натрия.

Тетраборат натрия применяется:

- как сырьё для получения борной кислоты и различных соединений бора;
- в производстве эмалей, глазурей, оптических и цветных стёкол, различных керамик;
- при пайке и плавке металлов в составе флюса;
- в бумажной и фармацевтической промышленности;
- в производстве строительных материалов как компонент антисептика для изготовления целлюлозного утеплителя «Эковата»
- как дезинфицирующее и консервирующее средство;
- для приготовления буферных растворов;
- в аналитической химии;

- как стандартное вещество для определения концентрации растворов кислот;
- для качественного определения оксидов металлов (по цвету перлов);
- в фотографии – в составе медленно действующих проявителей в качестве слабого ускоряющего вещества;
- как компонент моющих средств;
- как компонент косметики;
- как инсектицид в отравленных приманках для уничтожения тараканов.

### 3 Экспериментальное оборудование и методы проведения исследований

#### 3.1 Экспериментальное оборудование

Для получения экспериментальных образцов композиционного образцов используют установку УВГ 2–25 (рис. 8) индукционная закалочная многофункциональная предназначена для исполнения разных технологических процессов при термической обработке и наплавки деталей из цветных и черных металлов путем индукционного нагрева токами высокой частоты.

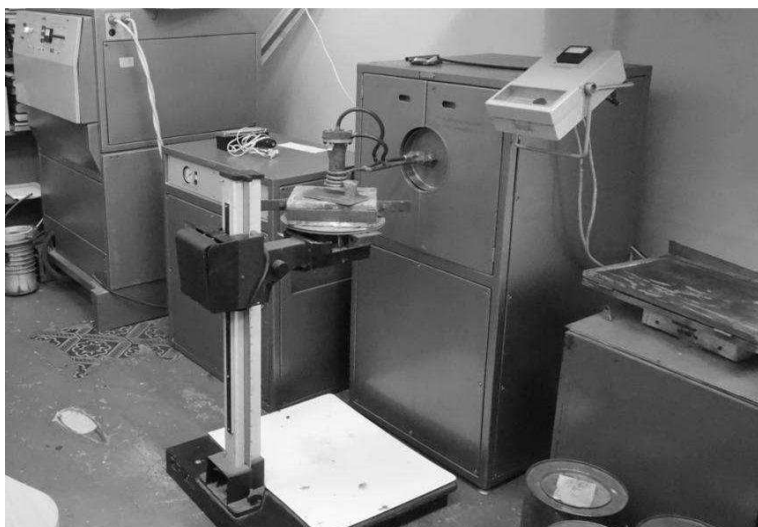


Рисунок 8 – Индукционная закалочная установка УВГ 2 – 25

В частности, такими технологическими процессами могут быть:

- соединения различных деталей посредством пайки высокотемпературными припоями;
- нагрев заготовок различного типа в локальных зонах под закалку, ковку, гибку, отжиг и т. д.;

– процесс индукционно-металлургического способа упрочнения плоских поверхностей деталей, испытывающих в работе повышенные нагрузки на удары и истирание;

– плавка металлов и сплавов в диэлектрическом и графитовом тиглях.

Установка УВГ 2–25 позволяет работать на любой частоте в диапазоне частот 40-80 кГц в режиме автоподстройки частоты и дискретной регулировки мощности, что позволяет производить оперативную смену индукторов под необходимый технологический процесс и выполнять работы широкого профиля;

Установка УВГ 2–25 имеет такие характеристики как:

– максимально потребляемая мощность от трехфазной питающей сети;

– максимально генерируемая в нагрузку высокочастотная мощность – 25 кВт;

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

Для выполнения технологических процессов установка комплектуется выносным нагрузочным контуром ВНК, работает в диапазоне частот 40–80 кГц. Водяное охлаждение: от водопроводной сети с давлением 1,5–2,0 кг/см, и расходом не менее чем 12 л/минуту;

### **3.2 Методы проведения исследований**

Металлографические исследования проводились на оптическом металлографическом микроскопе *Carl Zeiss*. (рис. 9).

Данный микроскоп снабжен системой визуализации изображения, что в значительной степени облегчает работы оператора и расширяет возможности фиксации изображения с применением различных опций.





Рисунок 9 – Металлографический микроскоп *Carl Zeiss*

2 Электронно-микроскопические исследования структуры выполнялись на *JEOL JSM-7001F* под руководством КТМ ЦМ Зеер Г.М.

3 Измерения твердости выполнялись на приборе по методу Роквелла TR5014, а по методу Бринелля – 5004. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3 (рис. 10).



Рисунок 10 – Прибор для определения микротвердости ПМТ-3

4 Энергодисперсионный анализ выполнялся на растровом электронном микроскопе *JEOL JSM-7001F*

5 Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре *D8 AdvanCe* (*Bruker*)

### **3.3 Технология получения композиционного материала**

Образцы для проведения наплавки представляют собой пластины размером 100×200×10 мм из материала Ст3. С целью определения влияния качества подготовленной поверхности на качество наплавленного слоя и зоны сплавления, были использованы пластины с различными способами подготовки:

- механически не обработанные, с наличием ржавчины и других загрязнений;
- механически обработанные, без наличия загрязнений, жировых плёнок и ржавчины;
- механически обработанная поверхность на фрезерном станке с шагом 3,0 × 1,0 и 4,0 × 1,5 мм;
- механически обработанная поверхность от различного рода загрязнений, с предварительным подогревом.

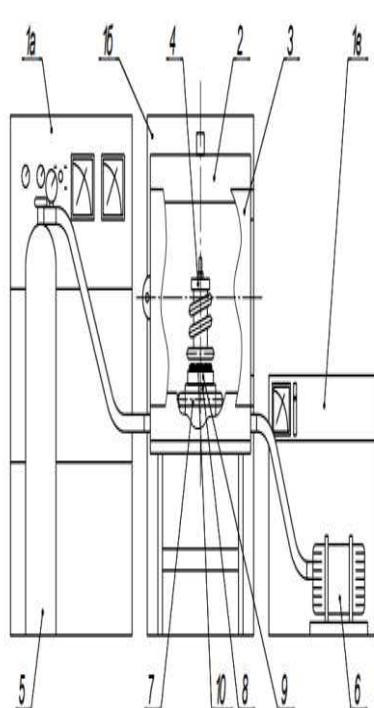
Перед наплавкой на наплавливаемый образец при помощи дозатора или лопатки наносится порошок наплавливаемого сплава, либо шихта, состоящая из смеси наплавливаемого сплава и твёрдого или жидкого флюса (метилбората) слоем 1,5–10,0 мм. После этого наплавливаемый образец помещают в камеру для индукционной наплавки и закрепляют в зажимном устройстве позиционера. Затем деталь при помощи установочных винтов позиционера помещают в индуктор, и после этого закрывают дверь камеры для индукционной наплавки.

После этого из камеры для индукционной наплавки при помощи насоса откачивают воздух до давления порядка 30 Па и включают подачу защитного газа в камеру для индукционной наплавки. При достижении газом в камере давления чуть больше атмосферного (приблизительно равного 1,1

атм.), подачу газа отключают. Такое давление позволяет избежать проникновения атмосферного воздуха в камеру, но не оказывает значительного влияния на результат эксперимента. Контроль за давлением воздуха или защитного газа в камере осуществляют при помощи мановакуумметра.

Далее, углекислый газ так же, при помощи насоса, откачивают из камеры для индукционной наплавки до давления порядка 30 Па, после чего опять включают подачу углекислого газа и отключают его по достижении давления газа в камере около 1,1 атм. Данные действия позволяют добиться меньшей концентрации остаточного кислорода воздуха в защитной атмосфере в камере.

Для индукционной наплавки в комбинированных защитных средах была предложена технология индукционной наплавки порошковых материалов с применением защитных газов. Для реализации этого процесса была сконструирована специальная камера (рис. 11).



- 1 – установка УВГ - 2-25 ( а – генератор;
- б – согласующий контур; в – система охлаждения );
- 2 – корпус камеры;
- 3 – дверца камеры;
- 4 –торцевой индуктор;
- 5 – гаовый баллон;
- 6 – форвакуумный насос;
- 7 – газоподводная трубка;
- 8 – огнеупорный столик;
- 9 – наплавляемая заготовка;
- 10 – наплавляемая шихта.

Рисунок 11– Камера для индукционной наплавки в среде защитных газов

Камера представляет из себя герметичный винипластовый ящик кубической формы. На передней стенке ящика выполнена прозрачная дверца. Внутри ящика размещены торцевой индуктор, огнеупорный столик для размещения наплавляемой заготовки, и газоподводящая трубка, служащая для равномерного подвода защитного газа относительно наплавляемой заготовки. Воздух откачивается из камеры при помощи форвакуумного насоса, а защитный газ поступает в камеру из баллонов [6].

Перед наплавкой на наплавляемый образец при помощи дозатора или лопатки наносится порошок наплавляемого сплава, либо шихта, состоящая из смеси наплавляемого сплава и твёрдого или жидкого флюса (метилбората) слоем 1,5–10,0 мм. После этого наплавляемый образец помещают в камеру для индукционной наплавки и закрепляют на огнеупорном столике непосредственно под индуктором, на расстоянии от него порядка 5 мм, после чего дверь камеры для индукционной наплавки закрывают. Затем из камеры для индукционной наплавки при помощи насоса откачивают воздух, одновременно включая подачу защитного газа. По истечении 5–6 минут отключают насос а, затем, отключают подачу защитного газа. Давление воздуха или защитного газа в камере регулируется при помощи перепускного клапана и поддерживается на уровне около 1,01 атм. Затем, включив установку, осуществляют процесс индукционной наплавки порошка на наплавляемый образец. При этом скорость нагрева должна составлять около 1000 град/сек. Во время наплавки следует наблюдать за процессом через окно в двери камеры для индукционной наплавки. Наплавку проводят до полного расплавления наплавляемого материала, после чего индукционную установку отключают. После охлаждения образца, открывают дверь камеры для индукционной наплавки и извлекают образец для его последующей обработки и исследования. Разработанная технология позволяет выполнять индукционную наплавку порошковых материалов в комбинированных защитных средах, что в перспективе позволит повысить качество покрытий, получаемых индукционным способом.

## 4 Экспериментальные исследования

После получения экспериментальных образцов композиционного материала было проведено их комплексное исследование, для наиболее полного представления о влиянии режимов и параметров индукционной наплавки на формирование структуры и свойств

### 4.1. Влияние подготовки поверхности компонента основы на формирование границы раздела композиционного материала

Проведенные металлографические исследования полученных образцов позволили определить влияние качества подготовки поверхности металла компонента основы на образование границы раздела композиционного материал,

Наличие на поверхности загрязнений, окислов различного происхождения и т.п. приводит к образованию большого количества крупных дефектов в виде грубых разветвленных пор и газовых пузырей, которые расположены как непосредственно на границе раздела (рис. 12), так и объеме металла полученного слоя (рис. 13).

Образование такого рода дефектов определено отставанием протекания процесса рафинирования компонента основы, от скорости кристаллизации расплавленного металлического порошка, что указывает на недопустимость получения слоистого композиционного материала, без предварительной механической обработки компонента основы.

Получение композиционного материала с предварительно обработанной поверхностью компонента основы от различного рода загрязнений способствует получению границы раздела без наличия дефектов и выраженной в линию (рис. 14).

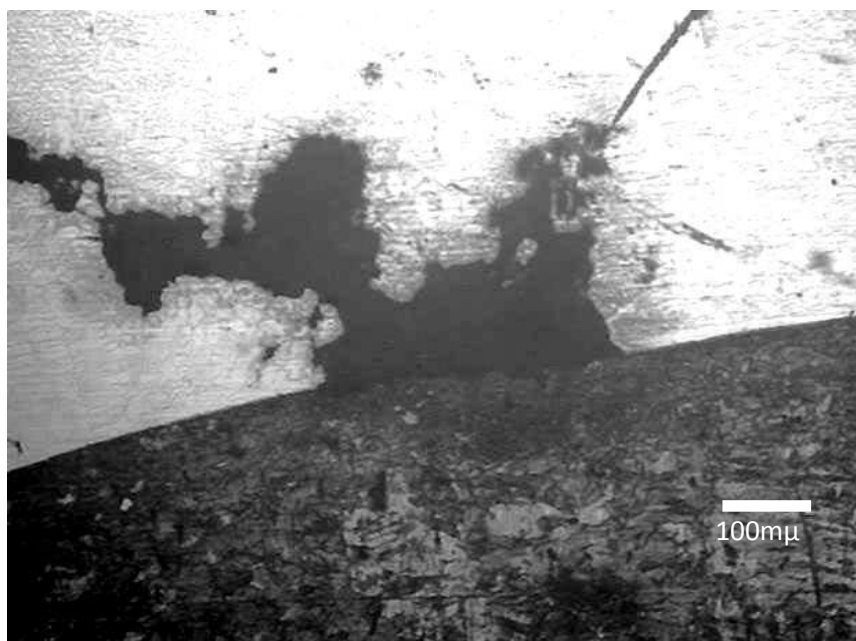


Рисунок 12 – Дефекты на границе раздела слоистого композиционного материала

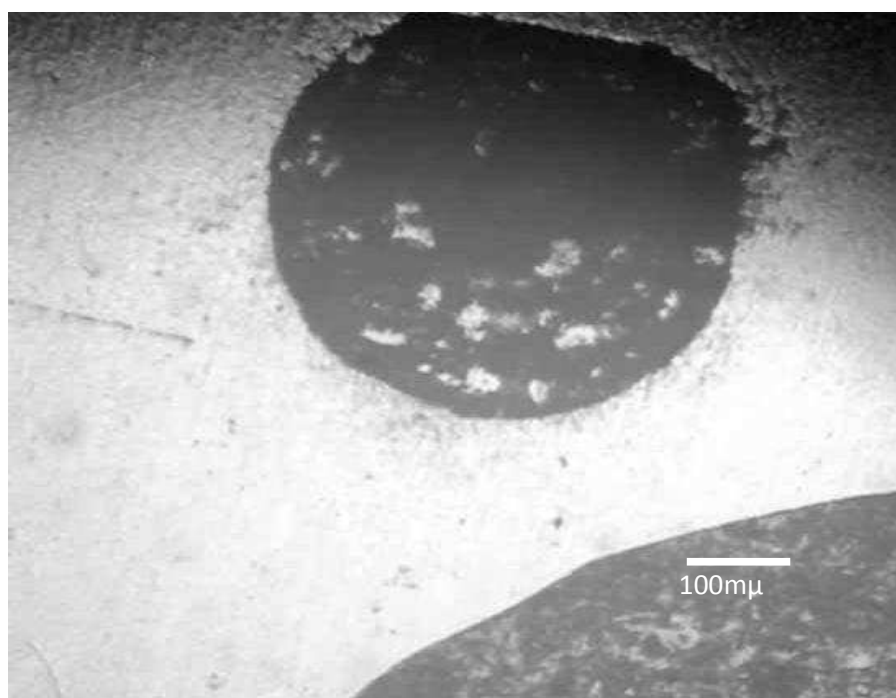


Рисунок 13 – Дефекты в объеме полученного слоя

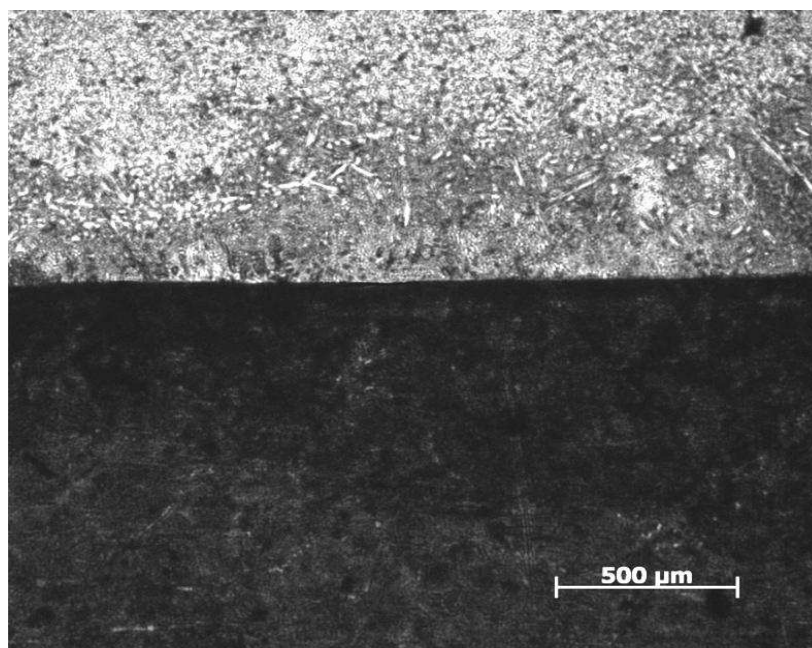
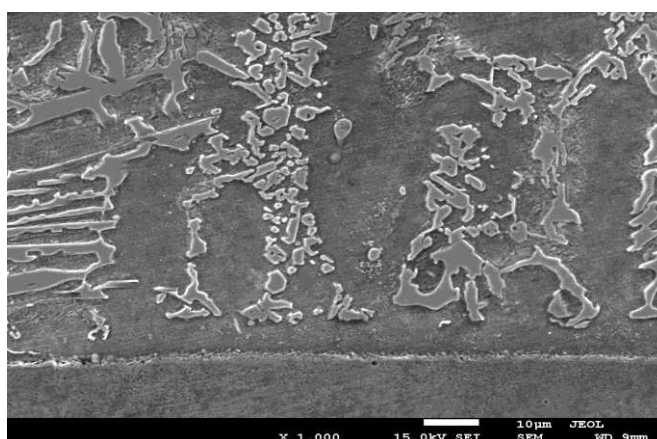


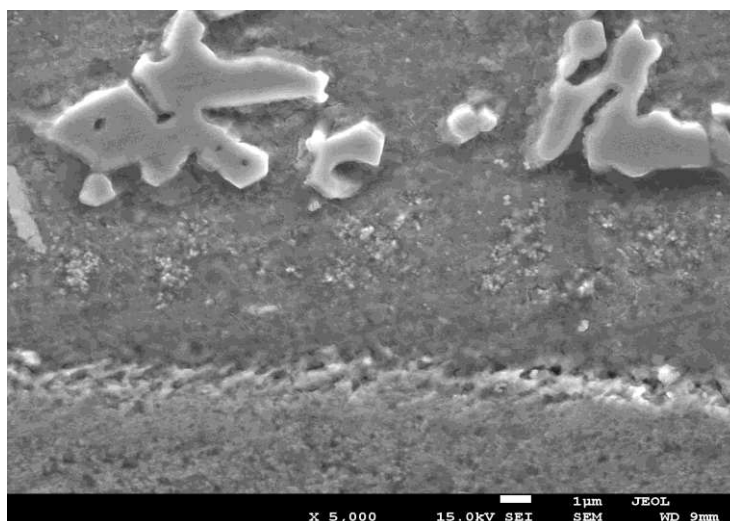
Рисунок 14 – Граница раздела компонентов композиционного материала с применением обработанной поверхности

#### 4.2 Формирование границы раздела композиционного материала

Проведенные металлографические исследования границы раздела (рисунок 15) показывают, что толщина границы раздела компонентов композиционного материала составляет 5–7 мкм.



*a*



*б*

Рисунок 15 – Граница раздела композиционного материала (снизу – компонент основа): *а* –  $\times 1000$ ; *б* –  $\times 5000$

Это позволяет предположить, что в процессе формирования композиционного материала расплавление металла компонента основы не происходит. Формирование границы раздела происходит за счет смачивания поверхности жидким расплавом и протеканием диффузии в глубь металла.

Приведенные условия исключают изменения химического состава получаемого слоя и дает возможность прогнозирования структурно-фазового состава и свойств слоистого композиционного материала.

### 4.3 Формирование структуры наплавленного слоя

При кристаллизации аустенитной хромисто-карбидной эвтектики, карбиды типа  $Me_7C_3$ , в отличие от ледебурита с карбидами типа  $Me_3C$ , не образуют непрерывную фазу, а располагаются в виде изолированных тригональных карбидов в аустенитной основе, что подтверждается металлографическими исследованиями (рис. 16). Чугуны, имеющие в структуре карбиды типа  $Me_7C_3$ , обладают более высокой твердостью, по отношению к чугу-



нам, в структуре которых, присутствуют карбиды цементитного типа или карбиды типа  $(Cr,Fe)_{23}C_6$ .

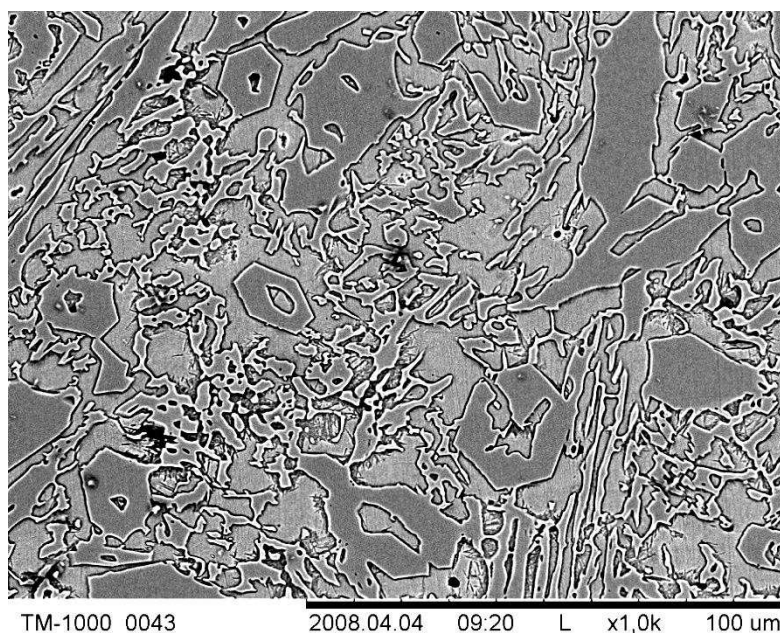


Рисунок 16 – Тригональные карбиды типа  $Me_7C_3$ ,  
в структуре полученного слоя

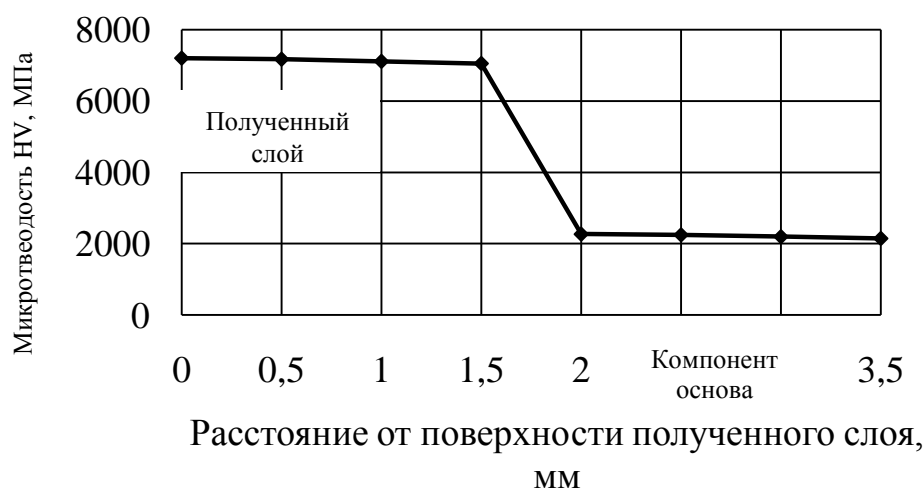
Полученные результаты исследования показали, что формирование границы раздела слоистого композиционного материала происходит без расплавления компонента основы, а структурно-фазовый состав полученного слоя состоит из карбидов хрома типа  $(Cr,Fe)_3C_7$  и легированной никелем и хромом метастабильной аустенитной матрицы.

#### 4.4 Анализ микротвердости

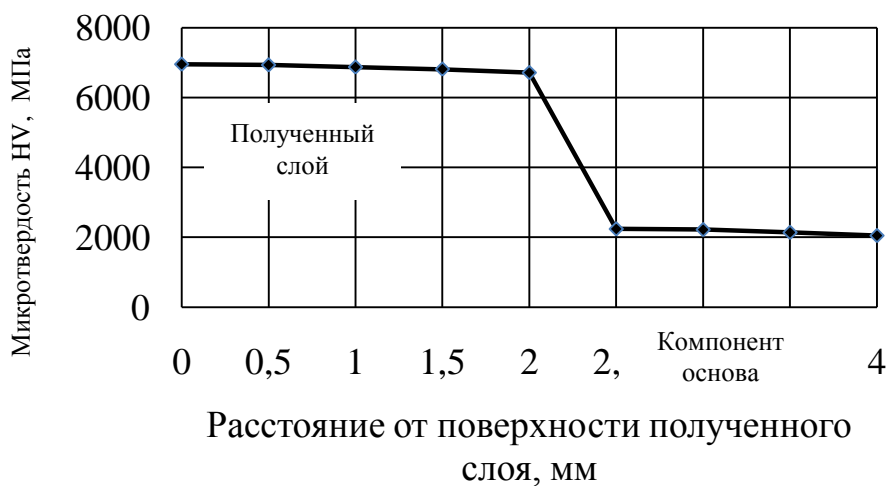
Для проведения анализа микротвердости были отобраны образцы слоистого композиционного материала, полученные при различных скоростях и разной толщиной слоя.

Из рис. 17 можно отчетливо наблюдать, увеличение микротвердости полученного слоя, с уменьшением его толщины (измерение микротвердости

проводилось от поверхности полученного слоя, в глубину). При этом необходимо отметить: микротвердость наплавленного слоя от поверхности в глубину наплавленного слоя во всех случаях остается постоянной, что подтверждает отсутствие расплавления металла компонента основы при получении слоистого композиционного материала.



*а*



*б*

Рисунок 17 – Графики изменения микротвердости полученного слоя и компонента основы в зависимости от толщины полученного слоя

*а* – 1,5 мм; *б* – 2,0 мм.

При проведении анализа микротвердости, был сделан снимок на котором показано изменение величины отпечатка алмазной пирамиды в плоскости поперечного сечения слоистого композиционного материала (рис. 18).

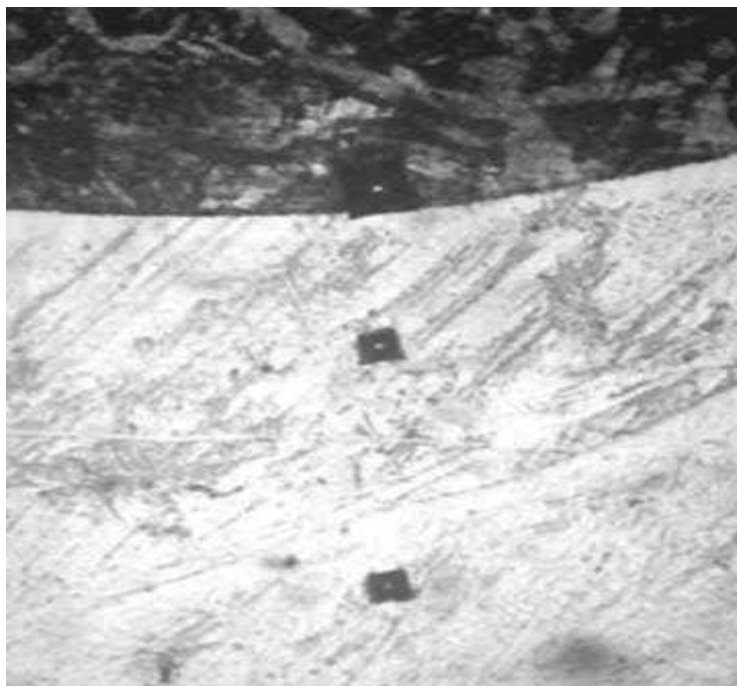


Рисунок 18 – Отпечатки алмазной пирамиды (полученный слой снизу),  $\times 500$

Диагональ отпечатка пирамиды на компоненте основы в непосредственной близости к границе раздела намного больше, чем на полученном слое, а следовательно и микротвердость этой зоны будет приближена к микротвердости основного металла. Наличие данного фактора подтверждает, что образование границы раздела слоистого композиционного материала происходит путем адгезии жидкой фазы с компонентом основы и последующей диффузии, что способствует сохранению химического состава применяемой шихты.

## **ВЫВОДЫ**

1 Выполнен анализ защитных сред различного агрегатного состояния, применяемых для наплавки изделий различного назначения металлическими материалами. Определены основные преимущества этих сред для индукционной наплавки порошковыми материалами.

2 Изучено влияние защитных сред различного агрегатного состояния на структуру и свойства наплавленных слоев и переходной зоны.

3 Получен слоистый композиционный материал индукционной наплавкой металлическими порошками в защитных средах различного состава.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Гольдштейн Я. Е., Гольдштейн В. А. Металлургические аспекты повышения долговечности деталей машин/ Челябинск Металл 1995, 512 с.
- 2 Кусков Ю.М., Скороходов В.Н., и др. Электрошлаковая наплавка / М.:Наука и технологии 2001, 180 с.
- 3 Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление, / М.: Машиностроение,1985, 240с.
- 4 Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой М.Машиностроение 1987, 187 с.
- 5 Вологдин, В. В. Пайка и наплавка при индукционном нагреве / М.: Машиностроение 1965, 62 с.
- 6 Доценко Н.И. Восстановление автомобильных деталей сваркой и наплавкой/ М.: Транспорт 1972, 351 с.
- 7 Кряжков В.М., Баранов Ю.Н., Буйлов К. Н. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники механизированной наплавкой с применением упрочняющей технологии / М.: ГОСНИТИ, 1972, 208 с.
- 8 Лившиц Л.Г., Поляченко А.В. Восстановление автотракторных деталей/М.: Колос 1966, 479 с.
- 9 Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Казинцев Н.В., Алдырев Д.А. Индукционная наплавка твердых сплавов./ Москва. Машиностроение. 1970, 183 с.
- 10 Волоченко В.Н., Ямпольский В.М. Винокуров В.А. и др., Теория сварочных процессов / М.: Высш.шк. 1988, 559 с.
- 11 Штенников В.С. Расчет доли участия электродного, порошкообразного основного металла в наплавленном валике// Сварочное производство– 1986.– №6.– с. 22.
- 12 Ерохин А. А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки / М.: Машиностроение. 1964, 253 с.

13 Штенников В.С. Расчет доли участия электродного, порошкообразного и основного металла в наплавленном валике/ Сварочное производство–1986.

14 Сараев, Ю. Н. Влияние параметров импульсного процесса электрошлаковой наплавки на структуру и абразивную износостойкость Fe–C–Cr–Mn-покрытий / Ю. Н. Сараев/ Сварочное производство – 2005. –№10. – С. 13–17.

15 Вашковец, В.В. Способ восстановления деталей электрошлаковой наплавкой / В. В. Вашковец/ Техника машиностроения, 2008. – N 1. –С. 53.

16 Гладкий, П. В. Плазменная наплавка (обзор) / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев / Технология машиностроения, 2007. –№ 4. – С. 41– 49.


17 Белый А.В., Макушок Е.М., Коболь И.Л. Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии / Минск: Наука и техника. 1990, 52 с.

18 Лещинский Л.К., Самотугин С.С. Плазменное поверхностное упрочнение / Киев: Наука 1990, 109 с.

19 Вайнерман А.С. и др. Плазменная наплавка металлов. / М.: Машиностроение, 1969. – 162с.

Федеральное государственное автономное  
Образовательное учреждение  
Высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
Кафедра Материаловедения и технологии и обработки материалов


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

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**Исследование влияния защитных сред различного агрегатного  
состояния на свойства слоистых материалов при  
индукционной наплавке**

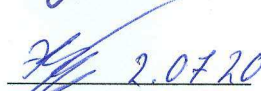
**Направление: 22.03.01 Материаловедение и технология материалов**

Научный руководитель

  
(подпись, дата)

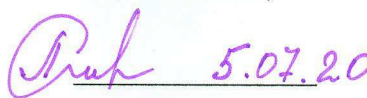
Токмин А.М.

Выпускник

  
(подпись, дата)

Эссаулов В.В.

Нормоконтролер

  
(подпись, дата)

Свечникова Л.А.

Красноярск 2020