

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

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ / Темных В. И.
(подпись)
« _____ » _____ 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Направление 22.03.01.07 «Материаловедение и технологии
материалов в машиностроении»

Применение индукционной технологии для получения слоистых композиционных материалов

Научный Руководитель	_____	Токмин А. М.
	(подпись, дата)	
Выпускник	_____	Жмак Е. Г.
	(подпись, дата)	
Нормоконтроль	_____	Свечникова Л. А.
	(подпись, дата)	

Красноярск 2019

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

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ / Темных В. И.
« ____ » ____ 2019 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

Студентке Жмак Елене Георгиевне

Группа МТ15-01Б Направление (специальность) 22.03.01

«Материаловедение и технологии материалов»

Тема выпускной квалификационной работы « Применение индукционной технологии для получения слоистых композиционных материалов»

Утверждена приказом по университету № 19099/с от 19.12.2018 г.

Руководитель ВКР: А. М. Токмин, профессор, канд. тех. наук, кафедра МиТОМ.

Исходные данные: Самофлюсующийся порошок H77X15C3P2-4, пластина из стали 20, температура плавления порошка 1220 °С, получение слоистого композиционного материала и исследование структуры, фазового состава и свойств переходной зоны и наплавленного слоя.

Перечень разделов: введение, литературный обзор, принцип работы устройства оборудования для индукционной наплавки, экспериментальная часть, заключение работы.

Руководитель ВКР

_____ А. М. Токмин

Задание принял к исполнению

_____ Е. Г. Жмак

« ____ » _____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время развитие промышленности стремиться, не только получить более качественные детали, но и повысить эксплуатационные свойства. Тем самым это приводит к созданию новых материалов, которые будут обладать совокупностью свойств, включающих в себя высокую прочность, износостойкость, жаростойкость, жаропрочность, коррозионную стойкость и т. д. Поэтому были изобретены и в дальнейшем нашли широкое применение слоистые композиционные материалы. Использование, которых сокращает расходы дорогостоящих цветных металлов на изготовление деталей и оборудования, позволяет повысить долговечность деталей и способствует к созданию новых конструкций и разработке технологических процессов.

В данной бакалаврской работе представлены исследования жаростойкого слоистого композиционного материала полученного методом индукционной наплавки.

Ключевые слова: индукционная наплавка, слоистый композит, жаростойкость, микротвердость.

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа по теме «Применение индукционной технологии для получения слоистых композиционных материалов», содержит 57 страниц, 34 рисунков, 27 используемых источников, 8 таблиц.

Цель работы: Исследование структуры и свойств слоистого композиционного материала, обладающего высокой жаростойкостью и износостойкостью, полученного с применением индукционной технологии.

Задачи:

1 Получение слоистого композиционного материала путем индукционной наплавки порошков заданного состава.

2 Изучение влияния толщины наплавленного слоя на структуру и свойства зоны сплавления.

3 Исследование влияния индукционного нагрева на зону термического воздействия подложки.

4 Исследование фазового состава наплавленного слоя.

5 Изучение элементного распределения на границе перехода подложки к наплавленному слою.

В результате проведения работы был изучен принцип работы индукционной установки ИЗ 25/40–80 с дальнейшим исследованием слоистого композиционного материала, полученного методом индукционной наплавки.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Литературный обзор.....	8
1. 1 Композиционные материалы.....	8
1. 2 Слоистые материалы.....	12
1. 3 Технологии получения слоистых материалов.....	16
1. 4 Виды наплавки.....	18
2 Принцип работы устройства оборудования для индукционной наплавки.....	31
2. 1 Назначение установки ИЗ 25/40-80.....	31
2. 2 Технические характеристики установки ИЗ 25/40-80.....	32
2. 3 Устройство и принцип работы составных частей установки ИЗ 25/40-80.....	33
2. 4 Технические характеристики блока охлаждения.....	33
2. 5 Назначение блока охлаждения АШХ 2.964.035.....	34
2. 6 Указание мер безопасности.....	34
3 Экспериментальная часть.....	36
3. 1 Механизм индукционного нагрева.....	36
3. 2 Материалы, используемые для наплавки.....	37
3. 3 Технология процесса наплавки.....	40
3. 4 Оборудование, применяемое для исследований.....	41
3. 5 Исследования наплавленных слоев.....	42
3.5.1 Исследования микротвердости наплавленного слоя толщиной 1 мм.....	45
3.5.2 Исследования микротвердости наплавленного слоя толщиной 3 мм.....	48
3.5.3 Исследования микротвердости наплавленного слоя толщиной 6 мм.....	51
Заключение.....	55
Список использованных источников.....	56

ВВЕДЕНИЕ

Жаростойкость или окалиностойкость, как и жаропрочность, являются важными характеристиками изделий в условиях эксплуатации. Довольно большое количество деталей работают при повышенных температурах. Соответственно, чтобы изделие не подвергалось окислению или изменению механических и физических свойств, что повлечет за собой, в худшем случае угрозу аварии, существуют различные материалы, обладающие определенными свойствами для устранения таких проблем.

Жаростойких материалов существует большое количество. Например, различные марки сталей, жаростойкость которых достигается введением хрома, сплавы на никелевой основе и т. д. Некоторые металлы и сплавы, например такие как, никромы стоят дорого или не обладают тем рядом свойств, которые нужно получить. Поэтому разработаны композиционные материалы, обладающие сразу несколькими свойствами, которые в обычных или так называемых традиционных материалах будут не реализованы [1].

Одной из технологий получения таких изделий является индукционная наплавка, которая позволяет получать различные толщины слоев и регулировать глубину прокаливаемого слоя. А также создавать слоистые материалы, которые в первую очередь обладают высокой прочностью, износостойкостью и низкой стоимостью.

1 Литературный обзор

1.1 Композиционные материалы

Композиционными называют сложные материалы, которые состоят из двух и более разнородных по химическому составу и структуре компонентов, определенным образом распределенных по объему детали (изделия), нерастворимые или малорастворимые друг в друге, разделенные в материале ярко выраженной границей. Это дает возможность конструировать материалы с заданными свойствами.

Композиционные материалы обладают свойствами, которые трудно реализованы в традиционных материалах. Например, такими как, высокий модуль упругости и удельная прочность, более высокие значения временного сопротивления и предела выносливости (на 50–100 % больше, чем у обычных сплавов); они обладают пониженной склонностью к трещинообразованию. Использование композитов позволяет одновременно снизить расход материальных ресурсов, но при этом повысить жесткость конструкций в целом [1].

Композиционные материалы, как правило, состоят из матрицы и наполнителей. Матрица – это компонент, который позволяет сделать изделие любой формы, соединять материалы, обладающие различными физическими и химическими свойствами. Также воспринимает и перераспределяет нагрузки на наполнитель от внешних нагрузок, прикладываемых к несущему упрочняющему компоненту. Прочностные характеристики материала матрицы являются определяющими при сдвиговых нагрузках, при нагружении композита в направлениях, отличных от ориентации волокон, а также при циклическом нагружении [1]. Поэтому материал матрицы должен быть пластичным и обладать высокой прочностью контактного взаимодействия (адгезионной прочностью) с поверхностью наполнителя. В матрице разделенным компонентом является наполнитель, который оказывает значимое влияние на свойства композиционных материалов, и обеспечивает их усиление, а также и армирование в целом.

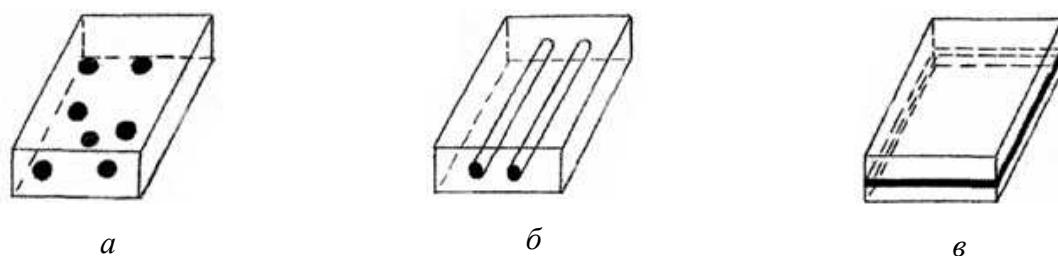
В качестве наполнителя используют более прочное вещество: металлы компактные, порошковые и чешуйчатые, ткани из различных материалов, картон, бумага, волокна асбеста, волокна растений, графит, тальк, технический углерод, силикаты, кварц, стекло, полимеры, нитевидные кристаллы и усы, вольфрам, бор.

Композиционные материалы классифицируются на 2 группы: с металлической и неметаллической матрицей. Металлические матрицы: алюминий, магний, медь, железо, никель, вольфрам, кобальт, титан и различные сплавы. Неметаллические матрицы: полимерные (эпоксидные, фенолформальдегидные, полиамидные и др.), углеродные и керамические материалы, глины [1].

Композиционные материалы классифицируются:

1 По форме наполнителей:

- нульмерные (зернистые) – армирование древесной мукой, графитом, слюдой, гравием, асбестом и др., с помощью которых получают дисперсно-упрочненные композиты (рис. 1, *a*);
- одномерные – одномерное армирование, например, непрерывными или прерывистыми борными, стеклянными или углеродными волокнами лент, пластин, листов, которые используют для создания волокнистых композитов (рис. 1, *б*);
- двумерные – армирование волокнами, которые образуют чередующиеся перпендикулярные слои; использование тканевых слоев; использование сплошных слоев из бумаги, картона, шпона, используемые при получении слоистых композитов (рис. 1, *в*, *г*, *д*) [1].



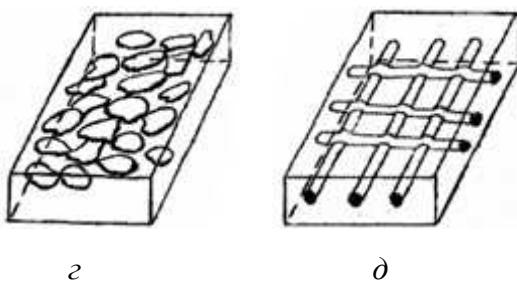


Рисунок 1 – Классификация наполнителей по форме: *a* – нульмерные (зернистые);
b – одномерные; *c*, *d* – двумерные

Форма наполнителя оказывает существенное влияние на свойства композиционных материалов.

2 По типу наполнителя:

- дисперсно-упрочненные;
- волокнистые;
- слоистые композиционные материалы.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы, это материалы, которые представляют собой металлическую матрицу с мелкодисперсными частицами второго компонента. Упрочнение достигается за счет образования барьеров, которые препятствуют перемещению дислокаций. Наибольшее торможение перемещению дислокаций может быть вызвано, если использовать в качестве упрочняющей фазы частицы химических соединений (карбидов, боридов, оксидов), которые обладают высокими показателями прочности и твердости.

Наиболее распространенными матрицами, которые используются в промышленности, являются композиты на основе алюминия, магния, никеля, кобальта, вольфрама, титана и т. д. [2].

Композиционные материалы на алюминиевой основе типа САП – это спеченные алюминиевые порошки. Упрочнение происходит за счет оксидных частиц Al_2O_3 в алюминиевой матрице. Основное преимущество САП по сравнению с алюминиевыми сплавами является высокие значения прочности при высоких температурах. Например, при температуре 500 °С предел прочности

САП достигает 80–120 МПа, что в несколько раз больше, чем у алюминиевых сплавов [2].

Упрочняющей фазой композиционных материалов на основе бериллия является оксид или карбид бериллия, основной матрицей которого является бериллий. Эти композиты предназначены для длительных работ при достаточно высоких температурах. Прочность этого композита по сравнению с чистым бериллием при температуре 650 °С и 100–часовой работе выше в 3 раза.

Композиционные материалы на основе магния обладают малой массой, т. к. низкая плотность, повышенной длительной прочностью и высоким сопротивлением ползучести при высоких температурах. Небольшая растворимость кислорода в магнии позволяет упрочнять магниевую матрицу оксидами. При введении около 1 % оксида магния в матрицу прочность возрастает примерно в 2 раза по сравнению с чистым магнием и достигает 300 МПа [2].

Композиционные материалы на основе никеля и кобальта упрочняются введением оксидов тория или гафния (2–4 %) в матрицу, которая может быть из чистых металлов никеля и кобальта или их сплавов. Эти композиты предназначены для работ, где температура достигает 1000 °С и выше. Например, в качестве матрицы используется никром, содержащий примерно 80 % никеля и 20 % хрома, который обладает более высокой прочностью, чем чисто никелевый композиционный материал.

Волокнистые композиционные материалы, это материалы, которые представляют собой матрицу, армированную высокопрочными волокнами из стекла, бора, углерода, нитевидных кристаллов, металлической проволоки и т. д. Упрочнение композиционного материала достигается за счет перераспределения нагрузки на волокна [2].

Волокнистые композиты делятся на несколько видов в зависимости от материала матрицы:

- пластики (матрица на основе полимерных соединений);
- металлокомпозиты (металлическая матрица);
- композиты с керамической матрицей;

– композиты с матрицей из углерода.

Название композиционного материала формируется из материала матрицы и волокна. Например, стеклопластик – это композит, матрицей которого является пластмасса, а упрочняющим компонентом служит стекловолокно.

Существуют различного рода волокнистые композиты, которые образуются из слоев, либо армируются непрерывными параллельными волокнами или тканями. При этом расположение волокон может быть односторонним или многонаправленным, или хаотичным, а также пространственным.

1. 2 Слоистые материалы

Слоистые композиционные материалы нашли широкое применение в строительстве, машиностроении, приборостроении, авиастроении, химической, нефтехимической промышленности и др. [3].

Снижение металлоемкости при производстве изделий и оборудования, сокращение расходов высоколегированных сталей, дорогостоящих и дефицитных цветных сплавов (никель, хром, медь, молибден и др.), а также повышение надежности и долговечности деталей обусловлено применением слоистых композиционных материалов на металлической основе.

В настоящее время слоистые композиты по функциональным признакам подразделяются на следующие виды (рис. 2) [4].

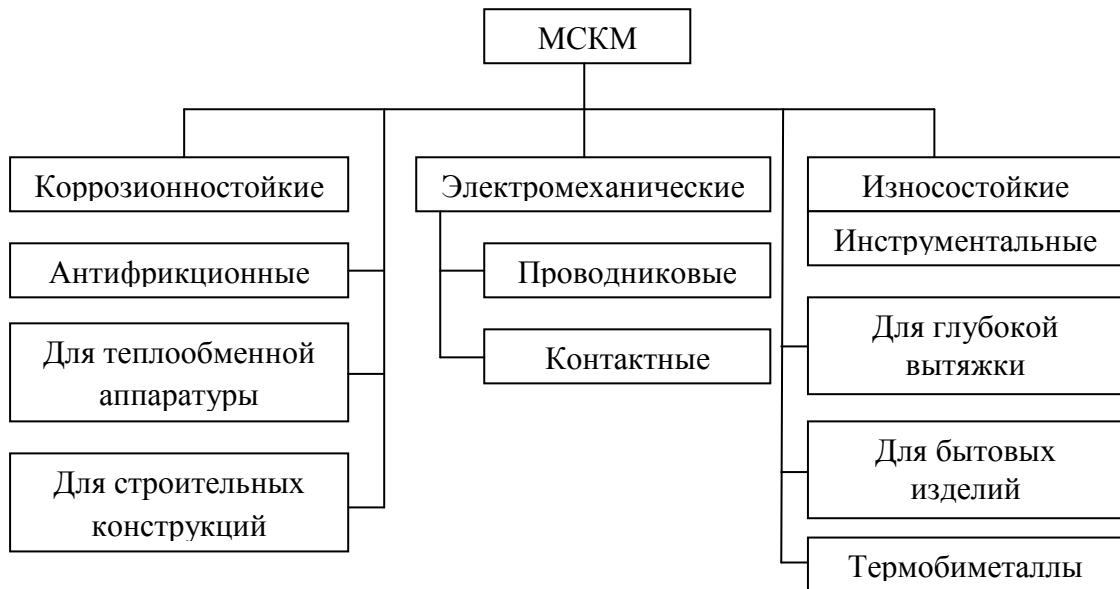


Рисунок 2 – Виды металлических слоистых композиционных материалов

Коррозионностойкие слоистые композиты изготавливают из углеродистой стали, являющейся основным слоем, а в качестве плакирующего слоя используют нержавеющие стали ферритного и аустенитного классов различного состава [5–7].

Важными свойствами коррозионностойких биметаллов является теплопроводность и технологичность (способность к сварке, штамповке, гибке). Теплопроводность двухслойной стали с плакирующим слоем из коррозионностойкой стали несколько ниже, чем основного слоя, и в 2–3 раза выше теплопроводности коррозионностойкой стали, что существенно при изготовлении теплообменной аппаратуры.

Способность биметалла, в первую очередь его плакирующего слоя, противостоять коррозии в той или иной среде, что позволяет определить области его применения [4].

В износостойких и инструментальных биметаллов в качестве плакирующего слоя используют высокоуглеродистые инструментальные стали, содержащие 0,60–1,3 % углерода, а также износостойкие инструментальные и кар-

бидные стали типа 6ХС, 85ХФ, 3Х5ВФ, 65Г, Х12М и др. Основной слой обычно изготавливают из низкоуглеродистой стали. Сочетание твердой и мягкой стали придает изготавливаемым из этих биметаллов лезвиям почвообрабатывающих машин самозатачиваться, и позволяет также увеличить срок службы.

Электротехнические биметаллы обладают высокими электрическими и прочностными свойствами, требуют минимального расхода дорогостоящих проводниковых материалов (меди, алюминия, серебра и др.), имеют, как правило, меньшую массу и более высокую коррозионную стойкость. Их используют в качестве проводников и деталей электронных приборов в электротехнике и электронике.

Антифрикционные биметаллы используются для производства подшипников скольжения (свертных и неразъемных втулок, упорных колец, сферических опор и т. д.) [4].

Биметаллы для глубокой вытяжки должны сочетать в себе ряд свойств. Наряду с высокой прочностью и пластичностью должны иметь хорошую теплопроводность и коррозионную стойкость. Основное назначение плакирующего слоя заключается в обеспечении высокой коррозионной стойкости и достаточной пластичности при штамповке. Кроме того, плакирующий слой является своего рода смазкой в операциях листовой штамповки. Основной слой при этом должен обеспечить требуемую пластичность при вытяжке, прочность, стойкость к ударным нагрузкам и т. д. [8–9].

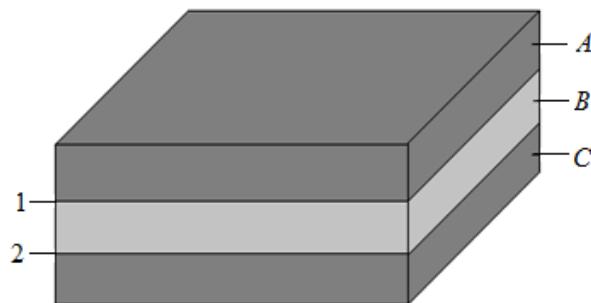
Термобиметаллы применяют для изготовления чувствительных элементов тепловых приборов, автоматических регуляторов температуры, сигнализационных устройств и т. п. Эти биметаллы являются термочувствительными, то есть способны изменять свою форму при нагреве. Они должны обладать стабильными физико-механическими свойствами, поэтому химический состав составляющих строго регламентирован.

Слоистые композиционные металлические материалы широко применяются при изготовлении электроприборов, посуды, деталей внутренней отделки автомобилей, фурнитуры и т. д. Посуда из слоистых металлов, состоящих из

коррозионностойкой стали в сочетании с низкоуглеродистой сталью, медными и алюминиевыми сплавами, обладает высокой коррозионной стойкостью. Она обеспечивает быстрый и равномерный нагрев приготовления пищи, уменьшая возможность ее пригорания.

Биметаллы, у которых основной слой состоит из низкоуглеродистой стали, а плакированный из коррозионностойких сталей или алюминия, обладают хорошей коррозионной стойкостью, высокой пластичностью и высокой теплопроводностью [4].

Структура слоистых композиционных материалов представлена в виде чередующихся слоев, которые жестко связаны между собой по всей поверхности (рис. 3). У данных композиционных материалов свойства различаются в зависимости от направления приложения нагрузки, то есть композиты в этом случае называются односторонними.



A, B, C – чередующиеся слои; 1, 2 – поверхности раздела

Рисунок 3 – Схематичное представление слоистого композиционного материала

Чередующиеся слои в слоистых композитах могут быть изготовлены как из одного материала, так и из различных. Если композит представлен в виде слоев из одного материала, то в данном случае прочность связи между слоями осуществляется за счет диффузии атомов материала через границу раздела в процессе термической обработки при получении композита. Если изготовлен из различных материалов, то прочность связи обеспечивается за счет образования новых соединений по границе их раздела, т. е. продуктов реакции между соседними слоями в результате гетеродиффузии [10].

Исходя из свойств подложки и формируемого слоя, слоистые композиционные материалы классифицируют:

- 1 На материалы с твердой подложкой и мягким слоем.
- 2 На материалы с мягкой подложкой и твердым слоем.
- 3 На материалы, в которых слои имеют резко отличающиеся физико-химическими свойства.

Материалы с твердой подложкой и мягким слоем используют, как жаростойкие композиты, имеющие высокую вязкость, а материалы с мягкой подложкой и твердым слоем применяют в качестве теплостойких [11].

1. 3 Технологии получения слоистых материалов

В настоящее время используются различные способы получения слоистых композиционных материалов. Исходя из свойств исходных материалов, формы получаемой продукции, условий эксплуатации и методов обработки изделий, применяют один из различных способов получения композиционных материалов.

Способы получения слоистых композиционных материалов можно классифицировать, отталкиваясь из условий протекания процессов, происходящих на границе соединения составляющих. Различают три сочетания агрегатных состояний металлов в зоне контакта: жидкое с жидким, твердое с жидким и твердое с твердым [12].

Из этого следует, что способы получения слоистых композиционных материалов и биметаллов можно разделить на газофазные, жидкофазные, твердофазные и комбинированные (рис. 4) [13].



Рисунок 4 – Общая классификация процессов получения и обработки композитов с металлической матрицей

Для решения задач повышения эксплуатационных показателей и увеличения срока службы деталей машин используют различные способы поверхностного упрочнения, в частности наплавку [14], которая является одним из видов получения слоистых композитов. Также процесс наплавки позволяет получить необходимые механические и физико-химические свойства детали, как следствие, повысить надежность и снизить себестоимость. Наплавка осуществляется с участием жидкой и твердой фазы. Её производят путем нанесения расплавленного присадочного материала на поверхность изделия. Для того, чтобы наплав-

ляемый материал был прочно соединен с поверхностью основного металла, он не должен содержать пор, шлаковых включений, трещин и др. дефектов [15].

Одной из важных назначений наплавки состоит в восстановлении изношенных (поврежденных) участков изделия или получении функциональных покрытий [14].

Восстановительная наплавка применяется в случаях, когда требуется вернуть первоначальные размеры изношенных или поврежденных деталей. В данном случае наплавляемая шихта по своему составу и механическим свойствам схожа с основным металлом.

Наплавку функциональных покрытий используют для получения на поверхности основного металла, который обладает необходимой конструкционной прочностью, слоя с необходимыми свойствами, например, жаропрочности, жаростойкости, износостойкости, коррозионной стойкости и т. д.

Требования, которые предъявляются к наплавке:

1 Минимальное проплавление основного металла.
2 Минимальное перемешивание наплавленного материала с основным металлом.

3 Минимальное значение остаточных напряжений и деформаций металла в зоне наплавки.

4 Небольшие припуски на последующую обработку деталей [14].

1.4 Виды наплавки

В настоящее время существует достаточно большое количество разнообразных способов наплавки, которые в частности зависят от выбора наплавочного материала.

Наиболее распространенные виды наплавок представлены на рис. 5.

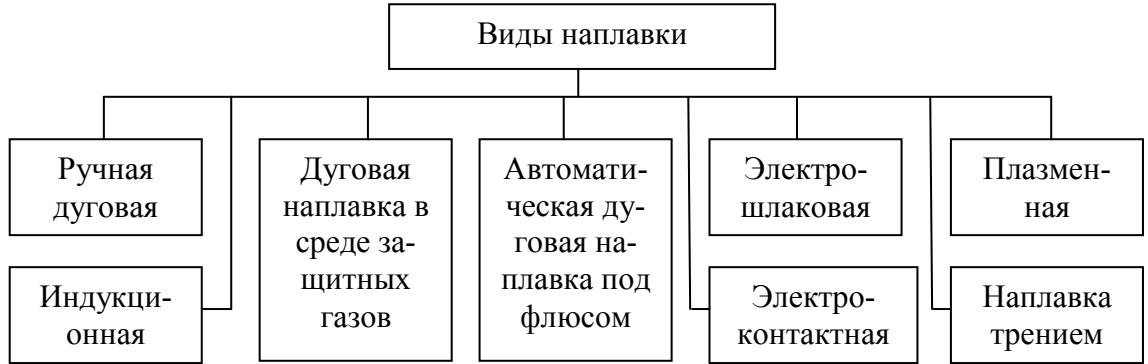
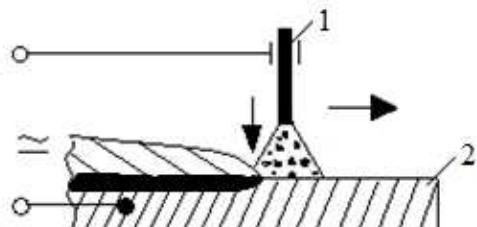


Рисунок 5 – Виды наплавок

Ручная дуговая наплавка. Ручная дуговая наплавка – это наплавка, основанная на использовании электродов в виде стержней с покрытием, которая осуществляется вручную (рис. 6). Из-за простоты и возможности наплавления любой формы детали этот способ является наиболее распространенным среди других видов наплавок. В данном случае используют электроды диаметром от 3 до 6 мм требуемого состава. Наплавку ведут короткой дугой на минимальном токе [15, 16].



1 – наплавочный электрод; 2 – изделие

Рисунок 6 – Схема ручной дуговой наплавки покрытым электродом

Ручная дуговая наплавка имеет следующие преимущества:

- простота технологии;
- доступность оборудования;
- возможность получения металла практически любой системы легирования.

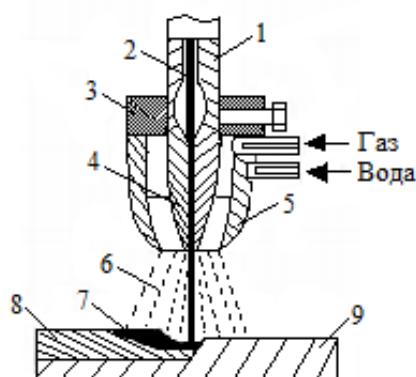
Также имеется ряд недостатков:

- значительное проплавление основного металла;

- низкая производительность;
- тяжелые условия труда;
- нестабильное качество металла.

Дуговая наплавка в среде защитных газов. Данная наплавка заключается в использовании плавящегося электрода в среде защитного газа (рис. 7) [17]. Подача газового потока осуществляется со стороны электродной проволоки (наплавочного материала), который позволяет защитить зоны дуги от воздуха. В качестве защитных газов используются углекислый газ и инертные газы: аргон, гелий. В зависимости от выбора используемого газа данная наплавка подразделяется на наплавку в среде углекислого газа и в среде инертных газов.

Наплавка в среде углекислого газа – это наплавка плавящимся электродом в среде углекислого газа. Основное преимущество этого способа состоит в возможности повышения производительности процесса за счет его осуществления в автоматическом и полуавтоматическом режиме. Недостатком является невозможность работы на открытом воздухе из-за влияния ветра на процесс технологии наплавки [18].



- 1 – мундштук, 2 – электродная проволока, 3 – горелка, 4 – наконечник, 5 – сопло горелки,
 6 – электрическая дуга, 7 – сварочная ванна, 8 – наплавляемый валик,
 9 – восстанавливаемое изделие

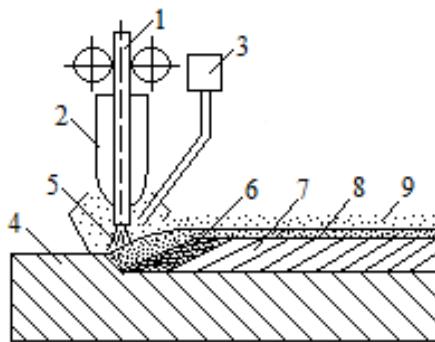
Рисунок 7 – Схема наплавки в среде углекислого газа

Наплавка в среде инертного газа состоит в дуговой наплавке при защите зоны дуги аргоном, гелием или другим инертным газом. Данную наплавку

осуществляют в двух вариантах: плавящимся и вольфрамовым электродами. Применение инертного газа исключает необходимость использования флюса, поэтому данный способ эффективен при наплавке цветных металлов, высоколегированных сталей и других материалов, чувствительных к окислению и азотированию. Высокое качество наплавляемого металла обеспечивается при широком выборе наплавочных материалов. Стабильная дуга образуется в широком диапазоне силы тока, что обеспечивает спокойное формирование сварочной ванны и ровный валик наплавленного металла с гладкой поверхностью. Этот способ уступает наплавке плавящимся электродом по производительности из-за высокой концентрации энергии и низкой эффективности использования теплоты дуги [19].

Автоматическая дуговая наплавка под флюсом. Сущность этой наплавки заключается в автоматической подаче электродной проволоки и сыпучего флюса в зону горения дуги (рис. 8). В результате под действием высоких температур часть флюса плавится, тем самым образуя вокруг дуги оболочку из жидкого флюса, которая защищает расплавленный металл от окисления. Флюс благоприятно влияет на формирование наплавленного металла, т. к. образуется однородный и плотный наплавленный слой с хорошими механическими свойствами, уменьшается количество шлаковых и газовых включений.

Характерной особенностью одноэлектродной наплавки под флюсом является глубокий провар, примерно составляющий 1 мм на каждые 100 А силы сварочного тока, что определяет значительную долю участия основного металла (до 60–70 %) в металле наплавленного валика [14].



1 – электродная проволока; 2 – токоподводящая втулка; 3 – бункер; 4 – наплавляемая деталь;
5 – сварочная дуга; 6 – сварочная ванна; 7 – наплавленный валик; 8 – шлаковая корка;
9 – флюс

Рисунок 8 – Схема автоматической дуговой наплавки под флюсом

Данная наплавка имеет ряд преимуществ:

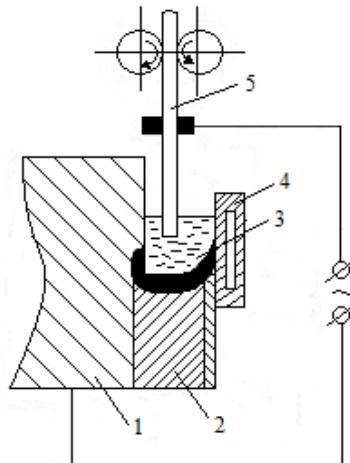
- универсальность;
- высокая производительность;
- возможность получения наплавленного металла любой системы легирования.

Недостатками является:

- большое проплавление основного металла;
- высокая стоимость флюсов, необходимых для получения слоя большей твердости.

Электрошлаковая наплавка. Сущность этой наплавки заключается в том, что между наплавляемым изделием 1 и кристаллизатором 4, который охлаждается водой, формируется ванна расплавленного шлака 3, куда подается электродная проволока 5. В результате ток, который проходит между электродом и изделием, нагревает шлаковую ванну до температуры выше 2000 °C, тем самым оплавляя электрод и основной металл. Впоследствии образуется металлическая ванна, которая при охлаждении затвердевает и формирует наплавленный слой 2.

В качестве присадочного металла, наряду с проволочными и пластинчатыми электродами, могут применяться электроды сложной формы.



1 – изделие, 2 – наплавленный слой, 3 – шлак, 4 – кристаллизатор,
5 – электродная проволока

Рисунок 9 – Схема электрошлаковой наплавки

Электрошлаковой наплавкой [20] можно получить наплавленный слой любого заданного химического состава на плоских деталях и телах вращения.

Данная наплавка имеет следующие преимущества:

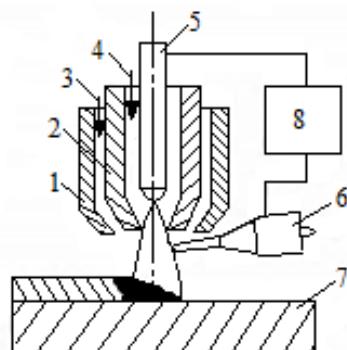
- высокая производительность;
- высокая защита наплавляемой ванны от воздуха;
- возможность наплавки за один проход слоев большой толщины;
- возможность наплавки высокоуглеродистых и других материалов, обладающих высокой чувствительностью к образованию трещин, что обеспечивается низкой скоростью охлаждения наплавленного слоя;
- относительная простота процесса наплавки.

Однако имеется и ряд недостатков:

- большая погонная энергия процесса, что обуславливает перегрев основного металла в зоне термического влияния;
- сложность и уникальность оборудования;
- невозможность получения слоев малой толщины.

Плазменная наплавка. Это нанесение на поверхность детали слой металла с помощью сжатой дуги. Сущность данной наплавки состоит в том, что присадочный и основной металл расплавляется с помощью высококонцентрированного электродугового разряда, т. е. плазменного потока (рис. 10). Существует плазма прямого и косвенного действия. Если плазменный поток формируется между электродом плазматрона и изделием, то этот процесс относится к плазме прямого действия, а если возникает между электродом и водоохлаждаемым соплом плазматрона, то плазма косвенного действия. При этом присадочный материал может быть электрически нейтральным по отношению к струе плазмы или наоборот.

В качестве присадочного материала используют проволоки, прутки, сыпучие порошковые материалы [17].



1 – защитное сопло; 2 – сопло плазматрона; 3 – защитный газ; 4 – плазмообразующий газ; 5 – электрод; 6 – присадочная проволока; 7 – изделие; 8 – источник питания косвенной дуги

Рисунок 10 – Схема плазменной наплавки косвенной дуги

К основным преимуществам плазменной наплавки относят:

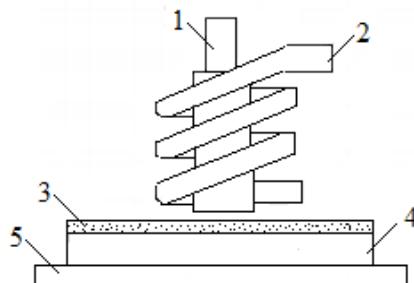
- высокое качество наплавленного металла;
- плазменный поток имеет очень высокую температуру, благодаря чему может расплавлять тугоплавкие металлы;

- допускается регулировать энергетические свойства плазменной дуги в широких границах, так как она считается самым гибким источником тепла;
- возможность наплавки тонких слоев.

К недостаткам относятся:

- относительно невысокая производительность;
- необходимость в сложном оборудовании.

Индукционная наплавка. За счет теплового действия индуцируемого тока происходит расплавление основного металла и наплавляемого материала. Наплавочный материал может применяться в виде самофлюсующегося порошка, в состав которого введен бор или наплавочной шихты, которая состоит из требуемого металлического порошка (70–80 %) и флюса (20–30 %). Флюс добавляют в порошок с целью удаления примесей в шлак, а также защищает металлический порошок при нагреве и расплавленный металл от окисления [14].



1 – ферритный сердечник; 2 – индуктор; 3 – наплавляемый материал;
4 – основной металл; 5 – стол

Рисунок 11 – Схема индукционной наплавки

Индукционная наплавка позволяет восстанавливать поверхности изделий. Для этого шихту наносят на разогретую до 300–400 °C поверхность изделия, спекают её флюсовой частью, формируя конфигурацию изделия. В процессе наплавки жидкую сварочную ванну сохраняют в горизонтальном направлении.

Преимущества индукционной наплавки:

- малая глубина проплавления основного металла;
- возможность наплавки тонких слоев;

– высокая эффективность в условиях серийного производства.

Недостатки данного процесса:

– низкий КПД процесса;

– перегрев основного металла;

– необходимость использования для наплавки только тех материалов, которые имеют температуру плавления ниже температуры плавления основного металла.

В настоящее время индукционный нагрев ТВЧ применяют при следующих способах наплавки:

1 Заливке жидкого присадочного металла на подогретый основной металл.

2 Армировании расплавленного поверхностного слоя основного металла тугоплавкой и трудно-растворимой присадкой.

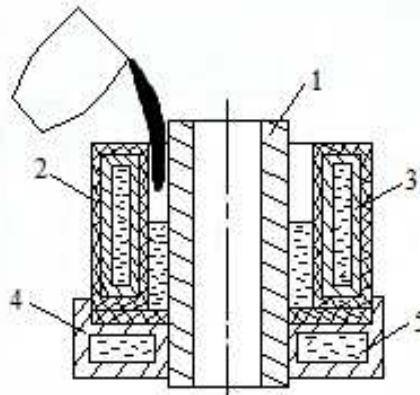
3 Расплавлении брикетированного или монолитного материала на основном металле.

4 Погружении подогретой детали в форму-тигель с расплавленным сплавом.

5 Центробежной наплавке деталей цилиндрической формы.

6 Расплавлении порошковой шихты, нанесенной на наплавляемую поверхность изделия [21].

Заливка жидкого присадочного металла на подогретый основной металл. В индуктор 2, поверхность которого защищена оgneупорным составом 3, помещают наплавляемую поверхность детали 1, покрытую слоем флюса (рис. 12). После того, как деталь нагреется до нужной температуры, напряжение отключают и снизу к индуктору подводят медное водоохлаждаемое кольцо 4. В образовавшуюся своеобразную форму из ковша заливают порции металла 5, расплавленного в индукционной печи или в другом плавильном оборудовании [21].



1 – наплавляемая поверхность детали; 2 – индуктор; 3 – огнеупорный состав;
4 – водоохлаждаемое кольцо; 5 – металл

Рисунок 12 – Схема индукционной наплавки заливкой жидкого присадочного металла на подогретый основной металл

Данный метод широко используется для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, например, опорных катков тракторов, пальцев ковшовых цепей экскаваторов и др.

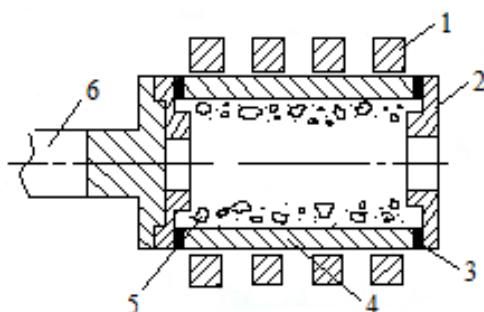
Армирование расплавленного поверхностного слоя основного металла тугоплавкой и трудно-растворимой присадкой. В данном методе присадкой служит зерновой релит (карбид вольфрама) или крупка измельченных металлокерамических сплавов. На наплавляемую поверхность детали наносят присадку вместе с флюсом (борная кислота). Далее деталь вводят в индуктор, где поверхностный слой нагревается до температуры плавления и оплавляется. Карбид вольфрама при этом не расплывается, а внедряется в оплавленный поверхностный слой. При этом закрепление зерен релита, то сеть карбида вольфрама, с матрицей осуществляется за счет их частичного растворения и смачивания расплавом.

Армированный поверхностный слой представляет собой литую стальную матрицу с вплавленными в нее зернами тугоплавкого компонента. При таком способе наплавки тугоплавкие частицы практически не изменяют свою структуру и твердость [21].

Этот способ отличается своей простотой и обеспечивает высокие эксплуатационные свойства наплавленных деталей.

Центробежная наплавка деталей цилиндрической формы. Наибольшее распространение данный способ получил при изготовлении различных втулок.

Существуют два варианта данной наплавки, которые отличаются применением присадочного материала. Присадочный материал используют как в твердом состоянии, например, в виде металлических порошков, стружки и др., так и в жидким состоянии. В первом случае присадочный материал плавится за счет теплопередачи от основного металла нагреваемого ТВЧ (рис. 13). Во втором присадочный металл плавят в отдельной емкости и заливают в расплавленном состоянии внутрь вращающегося цилиндра [21].



1 – индуктор; 2 – крышка; 3 – прокладка; 4 – наплавляемая деталь;
5 – шихта; 6 – шпиндель центробежной машины

Рисунок 13 – Схема индукционной наплавки центробежной заливкой с использованием твердого присадочного материала

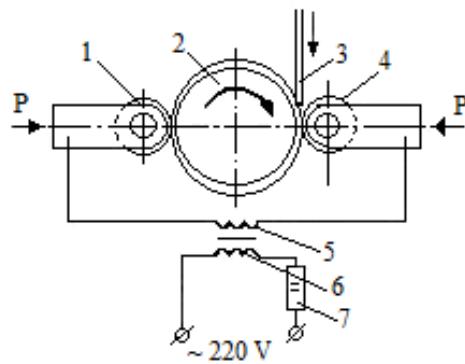
Особенностью является формирование наплавленного слоя под действием центробежных сил, которые способствуют более равномерному распределению расплава на основном металле и удалению вредных примесей, но усугубляют ликвационные явления. Поэтому при наплавке следует придерживаться технологических мер: регламентировать количество заливаемого металла, температуру и продолжительность нагрева, число оборотов центробежной машины, скорость охлаждения металла и др. С помощью данной наплавки произво-

дят центробежную наплавку гильз автомобильных двигателей, гильз гидроцилиндров и червячных машин [21].

Электроконтактная наплавка. Сущность данного процесса заключается в наматывание на поверхность детали проволоки. Проволока приваривается электроконтактным способом импульсами тока большой силы, при этом происходит одновременное деформирование её до требуемой толщины слоя покрытия детали [17].

В качестве присадочного материала используют ленту, проволоку, порошки и т. д.

В патроне токарного станка устанавливают деталь 2. Контактный 1 и наплавочный ролик 4 устанавливают на суппорте станка. В процессе наплавки проволока 3 деформируется до заданной толщины с помощью прижимного механизма наплавочным роликом 4. В качестве источника питания используют сварочный трансформатор. От вторичного контура трансформатора 5 подается ток с ролика. Прерыватель обеспечивает подачу тока импульсами и установлен в первичном контуре 6. Во вторичном контуре ток достигает до 20 000 А при напряжении до 7 В.



1 – контактный ролик; 2 – деталь; 3 – проволока; 4 – наплавочный ролик; 5 – вторичная обмотка трансформатора; 6 – первичная обмотка; 7 – прерыватель

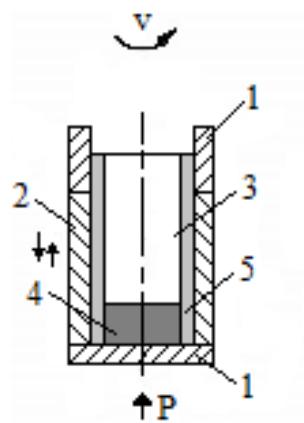
Рисунок 14 – Схема электроконтактной наплавки

Электроконтактная наплавка имеет ряд преимуществ:

- высокая производительность;

- незначительная зона термического влияния;
- незначительные потери присадочного материала.

Наплавка трением. Сущность наплавки трением заключается в плавлении наносимого металла теплотой, которая выделяется при трении инструмента, или самого наплавляемого металла о деталь с последующим соединением его с деталью при определенном усилии (рис. 15). Трение обеспечивается вращением наплавляемой детали или инструмента относительно массы наносимого металла или сплава [17].



1 – приспособление; 2 – деталь; 3 – инструмент;

4 – наплавляемый металл до наплавки; 5 – наплавленный металл

Рисунок 15 – Схема наплавки трением на внутреннюю поверхность

Чтобы обеспечить плавление наносимого металла или сплава, требуется выбирать наплавляемые заготовки или детали из материалов с более высокой температурой плавления по сравнению с температурой плавления наносимого металла.

2 Принцип работы устройства оборудования для индукционной наплавки

2.1 Назначение установки ИЗ 25/40-80

Установка ИЗ 25/40-80 индукционная закалочная многофункциональная предназначена для выполнения различных технологических процессов при термической обработке и наплавки деталей из черных и цветных металлов путем индукционного нагрева токами высокой частоты.



Рисунок 16 – Индукционная закалочная установка ИЗ 25/40-80

В частности, такими технологическими процессами могут быть:

- соединения 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. [22];
- процесс индукционно-металлургического способа упрочнения плоских поверхностей деталей, испытывающих в работе повышенные нагрузки на уда-

ры и истирание (зубья экскаваторов, бульдозерные ножи, молотки дробильных мельниц и т. д.);

– плавка металлов и сплавов в диэлектрическом и графитовом тиглях.

Установка ИЗ 25/40-80 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.

2.2 Технические характеристики установки ИЗ 25/40-80

Установка ИЗ 25/40-80 включает в себя следующие характеристики:

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

2 Максимально генерируемая в нагрузку высокочастотная мощность – 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 водопроводной сети с давлением 1,5–2,0 кг/см³, 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) [23].

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

2.3. Устройство и принцип работы составных частей установки ИЗ 25/40-80

Установка ИЗ 25/40–80 состоит из:

- 1 Генератора УВГ–2–25.
- 2 ВНК.

Функционально в установке ИЗ 25/40–80 генератор УВГ–2–25 является источником высокочастотной энергии. Выносной нагрузочный контур ВНК выполняет функцию согласования выходных параметров генератора с параметрами нагруженного индуктора [23].

2.4 Технические характеристики блока охлаждения

Блок охлаждения установки ИЗ 25/40–80 имеет следующие технические характеристики:

- 1 Блок охлаждения питается от сети 220 В ± 10 %, 50 Гц.
- 2 Потребляемая мощность, не более 1 кВт.
- 3 Количество воды в заполненной системе 120 л.
- 4 Номинальная производительность прокачки воды, не менее 2,4 м³/ч.
- 5 Номинальная производительность продува воздуха 1680 м³/ч при давлении потока воздуха 59 Па.
- 6 Температура охлажденной воды при максимальной мощности генератора в течении 4 ч не более 30 °С на выходе блока охлаждения.
- 7 Блок охлаждения предназначен для работы в следующих условиях:
 - предельное значение температуры окружающего воздуха от плюс 15 до плюс 35 °С;
 - верхнее значение относительной влажности воздуха 65 % при температуре окружающей среды плюс 20 °С;
 - высота над уровнем моря не более 1000 м;
 - давление окружающего воздуха от 0,086 до 0,106 МПа;

– окружающая среда – невзрывоопасная, не содержащая агрессивных газов, паров и пыли, в том числе токопроводящей.

8 Габаритные размеры 720x520x875.

9 Масса блока без охлаждающей жидкости, не более 70 кг.

2.5 Назначение блока охлаждения АШХ 2.964.035

Блок охлаждения АШХ 2.964.035 входит в состав комплексов индукционных технологических КИТ и предназначен для их охлаждения.

Охлаждение осуществляется прокачкой воды через соответствующие устройства и теплообменник – радиатор, который продувается потоком воздуха от вентиляторов [22].

2.6 Указание мер безопасности

Эксплуатация установки ИЗ 25/40–80 сопряжена с наличием следующих опасных факторов для обслуживающего персонала:

- поражение электрическим током;
- получение теплового ожога;
- облучение электромагнитным полем.

1 Для предотвращения поражения электрическим током должны соблюдаться следующие меры безопасности.

1.1 К обслуживанию комплекта должен допускаться персонал, имеющий практические навыки по обслуживанию электрических установок на напряжение до 1000 В, изучивший материальную часть и получивший допуск к работе в установленном порядке.

1.2 Все работы должны проводиться по распоряжению начальника участка.

1.3 Перед началом работы необходимо проверить:

- исправность штатного заземления всего оборудования комплекса;
- исправность систем охлаждения воздушной и водянной;

– наличие и состояние средств защиты (диэлектрические перчатки, резиновые коврики).

2 Для предотвращения получения теплового ожога обслуживающий персонал должен применять соответствующую спецодежду.

3 Во избежание возникновения пожара необходимо применять негорючие теплоизоляционные подставки под детали подготовленные для дальнейшей обработки.

В помещении размещения установки ИЗ 25/40–80 должны быть предусмотрены огнетушительные средства (ящик с песком, огнетушители) [23].

4 При эксплуатации высокочастотных установок возникает опасность воздействия на организм электрического и магнитного полей. С уменьшением расстояния до индуктора степень воздействия полей возрастает и находится в прямой зависимости от времени.

4.1 При работе на установке ИЗ 25/40–80 обслуживающий персонал (термист) должен находиться на расстоянии не менее 0,5 м индуктора и ВЧ-кабелей.

5 Любое обслуживание оборудования установки ИЗ 25/40–80, связанное с проведением осмотров, настройки или ремонтных работ, должно производиться при включенном напряжении сети и последующем отключением сетевого кабеля от генератора.

3 Экспериментальная часть

3.1 Механизм индукционного нагрева

Индукционный нагрев нашел широкое применение в термической обработке, впоследствии он был усовершенствован и стал применяться для процессов наплавки.

Для обеспечения высоких эксплуатационных свойств наплавленных слоев необходимо создать условия для получения неравновесных структур, вызванные высокими скоростями нагрева и охлаждения, применяя индукционную технологию. Помимо того, высокие скорости нагрева и охлаждения позволяют снизить деформации и иные негативные результаты наплавки, благодаря уменьшению нагреваемого объема подложки [24].

Таким образом, индукционный нагрев заключается в следующем. Индуктор, который представляет собой один или несколько витков медной трубы, с ферритным усилителем устанавливают над деталью, на которую нанесли наплавляемый порошок. С помощью генератора УВГ-2-25 и согласующего устройства в индуктор подается ток заданной частоты, за счет чего возникает переменное электромагнитное поле, формирующее в заготовке токи Фуко, которые приводят к нагреву порошка и подложки. При таком нагреве возникает поверхностный эффект, который выражается в возникновении токов Фуко в поверхностных слоях нагреваемых изделий (скин-слой). Глубина проникновения тока зависит от частоты переменного тока, удельного электросопротивления металла и магнитной проницаемости [25].

Таблица 1 – Глубина проникновения индукционного тока в различные материалы в зависимости от температуры и частоты тока

Материал	Температура, °C	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

Факторы, которые определяют условия нагрева, важно учитывать при изучении процессов, идущих при нагреве и плавлении порошковой шихты. При этом оценивают, как частота тока влияет на кинетику нагрева и плавления частиц порошка. Толщина скин-слоя зависит главным образом от величины частоты тока [22], с увеличением которой толщина скин-слоя уменьшается и определяется по формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \mu_0 \sigma}}, \quad (1)$$

где Δ – толщина скин-слоя, мкм;

ω – циклическая частота генератора, кГц;

μ – магнитная проницаемость вещества;

μ_0 – магнитная постоянная, Ф/м;

σ – удельная проводимость вещества, См/м.

Также толщина скин-слоя зависит и от магнитной проницаемости вещества (для парамагнетиков $\mu = 1$). Скорость нагрева ферромагнитных материалов намного больше, чем парамагнитных. При достижении температуры выше точки Кюри ферромагнитное состояние металла переходит в парамагнитное.

Так как поглощаемая мощность пропорционально величине $\sqrt{\rho \mu}$ (ρ – удельное сопротивление материала подложки) [25], то изначально подложка нагреется быстрее и начнет плавиться. При достижении температуры 768 °С и выше скорость нагрева уменьшится.

3.2 Материалы используемые для наплавки

Жаростойкость – это способность металлов и сплавов противостоять окислению при повышенных температурах в течение длительного времени.

Жаростойкость сплавов повышают путем легирования, в результате чего снижается скорость окисления сплавов за счет образования защитных пленок окислов на поверхности изделия, которые препятствуют проникновению ки-

слорода вглубь металла, т. е. тормозит процесс окисления. Например, жаростойкость стали достигается введением никеля, хрома, кремния или алюминия, которые в процессе нагрева образуют защитные пленки оксидов.

Сплавы, обладающие наиболее жаростойкими свойствами, являются сплавы на основе никеля. Они обладают высоким электрическим сопротивлением, малым температурным коэффициентом, поэтому их применяют в нагревательных элементах электрических печей, работающих в воздушной среде при температурах, достигающих 1200 °C.

Значительное распространение среди жаростойких сплавов на никелевой основе получили нихромы, это сплавы никеля с хромом. Они обладают хорошими технологическими свойствами (хорошо деформируются и свариваются), высоким удельным электросопротивлением. Сплавы этой группы используют в арматуре для теплоэнергетики, в защитных трубках термопар, также делают тепловые трубы, находящихся в миксерах для приготовления алюминия и его сплавов, и других деталей.

Также стоит отметить, что фехраль тоже обладает достаточно высокой жаростойкостью. Это сплав железа, состоящий из хрома и алюминия. При этом низкое содержание никеля в сплаве (не более 0,6 %) делает фехраль намного дешевле по сравнению с нихромом. Этот сплав имеет высокое электрическое сопротивление и обладает высокой твердостью. Применяется он в нагревательных элементах печей, в бытовой технике и т. д.

Таблица 2 – Химический состав материалов

Элементы, %	Ni	Fe	Cr	B	Si	Al	Mn	C
Самофлюсующий порошок	остальное	до 5	14–16	1,8–2,3	2,8–3,5	–	–	0,35–0,6
Нихром	55–80	1,5	13–23	–	–	–	До 1,5	–
Фехраль	–	70–72	12–27	–	1	3,5–6	0,7	–

В качестве примера будет рассмотрена тепловая труба, которая является защитным экраном для нагревателей, находящаяся в миксере. При получении алюминиевых сплавов в миксер добавляют различные элементы, в зависимости от того какой сплав нужно получить, это может быть хром, марганец, магний и др. Алюминий, как и некоторые другие элементы, имеют большое сродство к кислороду, поэтому в жидкий сплав добавляют флюсы для того, чтобы не произошло окисление. В результате в устройстве возникает активная среда газов, которая неблагоприятно влияет на нагреватели, в конечном итоге может разъесть их. Тепловую трубу для нагревателей обычно изготавливают из никрома, так как он сам по себе дорогой материал, предложено наплавлять никелевый самофлюсующийся порошок, что существенно снизит стоимость самого устройства. А фехраль в данном случае будет иметь хуже окалиностойкость в этой атмосфере по сравнению с предложенным материалом.

Существующие методы защиты наплавки в основном подразделяются на 2 группы: за счет флюсов, которые находятся в жидким состоянии (рафинируют металл подложки и наплавленный материал); а также за счет защиты инертных газов, таких как аргон, азот, углекислый газ, которые подаются в зону наплавки при помощи специальных устройств.

В нашем случае используется самофлюсующийся порошок, выгодно отличающийся тем, что в процессе плавления происходит рафинирование за счет наличия в составе бора, кремния.

Известно, что самофлюсующиеся сплавы на основе никеля обладают совокупностью высоких свойств. Никель обладает достаточно высокими показателями прочности [26]. Введение хрома в никель повышает стойкость к окислительным средам, а также жаростойкость. Небольшое количество добавки бора и углерода обеспечивают образование химических соединений в никелевой матрице, что способствует повышению твердости и износстойкости. Помимо того, введение бора и кремния снижает температуру плавления сплавов и улучшает самофлюсующиеся свойства.

3.3 Технология процесса наплавки

Наплавку производили на образец, который представлял собой подложку из низкоуглеродистой стали 20. В качестве наплавляемого материала применялся самофлюсующийся порошок ПР-Н77Х15С3Р2-4. Поверхность подложки предварительно подготавливалась с целью уменьшения загрязнения на её поверхности. Подложка подвергалась шлифованию на плоско-шлифовальном станке, что обеспечивало удалению с поверхности окислов, которые присутствовали на заготовке.

Первоначально на подложку помещается шихта, которая может быть в виде порошка или брикетов определенной толщины (рис. 17).



1 – индуктор, 2 – наплавляемый порошок, 3 – заготовка

Рисунок 17 – Подготовка к проведению наплавки

В промышленных условиях это может реализовываться при помощи специального дозатора находящегося перед индуктором. Заготовка устанавливается под индуктором на подвижный столик, который может перемещаться с различными скоростями. На индуктор подается напряжение, и по мере нагрева и плавления шихты происходит перемещение столика со скоростью, обеспечивающей стабильный процесс наплавки (рис. 18).



1 – индуктор, 2 – наплавляемый порошок, 3 – заготовка,
4 – согласующее устройство

Рисунок 18 – Процесс наплавки порошковой шихты

После наплавки производится отключение индукционной установки, охлаждение заготовки осуществляется на спокойном воздухе.

После наплавки из образцов изготавливались темплеты для проведения комплексных исследований.

Для исследования кинетики наплавки были выполнены 3 образца с разными толщинами наплавленных слоев, которые составляли в пределах 1 мм, 3 мм, 6мм.

3.4 Оборудование применяемое для исследований

1 Металлографические исследования проводились на оптическом металлографическом микроскопе *Carl Zeiss*.



Рисунок 19 – Металлографический микроскоп *Carl Zeiss*

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

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

3 Измерение твердости выполнялись на приборе по методу Роквелла ТР 5014, а по методу Бринеля ТБ–5004. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3.



Рисунок 20 – Прибор для измерения микротвердости ПМТ-3

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

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

3.5 Исследования наплавленных слоев

Для того чтобы провести металлографические исследования необходимо подготовить микрошлифы наплавленных образцов.

Микроструктура наплавленного слоя и зоны сплавления наплавленного металла с подложкой вызывает наибольший интерес при исследовании слойстых образцов. Поэтому плоскость шлифовки выбиралась перпендикулярно наплавленному слою. Процесс производили на шлифовальной машине, при этом образцы зажимались в струбцину, чтобы не было «заваливания» краев. Далее проводим механическую зачистку образцов на наждачной бумаге, начиная с более крупной зернистости и заканчивая более мелкой, в нашем случае заканчивали P2500 размером зерна. При этом при каждой смене наждачной бумаги направление шлифования менялось на 90 ° для полного удаления рисок на исследуемом образце.

Полировка является заключительной механической обработкой, которая заключается в получении более качественной поверхности. Она выполняется на алмазной пасте с нанесением на плотную бумагу. После полирования образцы протирают спиртом.

После проведения шлифования и полировки производили травление шлифов, чтобы выявить структурные составляющие. Процесс травления осуществлялся по стандартной методике.

Предварительно перед измерениями микротвердости образцы подвергались легкому травлению 4 % HNO₃ в этиловом спирте для четкого выявления границы сплавления между подложкой и наплавленным слоем [27].

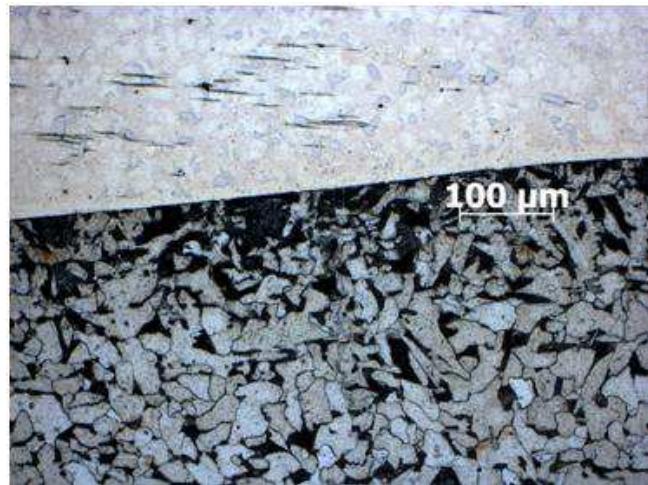


Рисунок 21 – Структура слоистого композиционного материала после травления
4 % HNO_3 в этиловом спирте

Микроструктура подложки представляет ферритно-перлитное строение, а наплавленный слой аустенитную структуру с промежуточными фазами (рис. 21).

Для выявления структуры наплавленного слоя использовался травитель, состоящий из 75 мл HCl , 25 мл HNO_3 и добавки CuCl_2 до насыщения. Этот раствор используют для аустенитных сталей, при этом достигается равномерное выявление структуры [27].

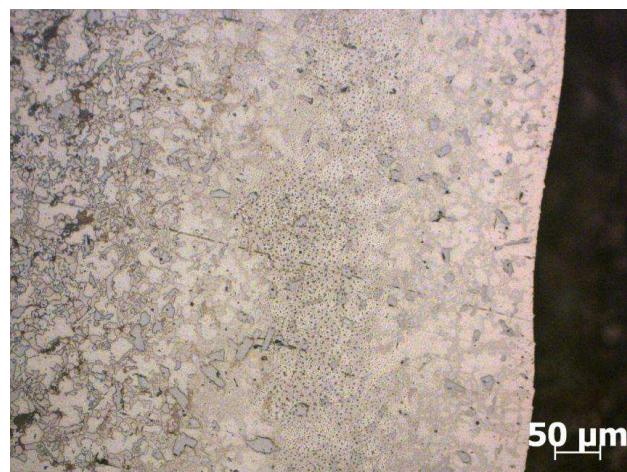


Рисунок 22 – Структура слоистого композиционного материала после травления:
слева – наплавленный слой, справа – подложка

Микротвердость наплавленного слоя определялась на микротвердометре ПМТ-3 с нагрузкой 100 г.

Можно наблюдать, что микротвердость наплавленного слоя сильно отличается от подложки. Такое различие объясняется различием химического и фазового составов наплавленного слоя и подложки.

Для изучения природы наплавленного слоя выполнялись исследования на микроскопе *JEOL JSM-7001F*, с помощью энергодисперсионного анализа было установлено соответствие химического и фазового составов.

3.5.1 Исследования микротвердости наплавленного слоя толщиной 1 мм

Данные измерения микротвердости на ПМТ-3 приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Данные микротвердости образца №1

Расстояние, мм	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
HV , МПа	1510	1350	1430	1350	1280	1600	1510	5220	4830	4640	4640

Анализ данных указывает на значительные различия микротвердости подложки и наплавленного слоя. Микротвердость подложки составляет примерно 1350 МПа, а наплавленного слоя около 4800 МПа.

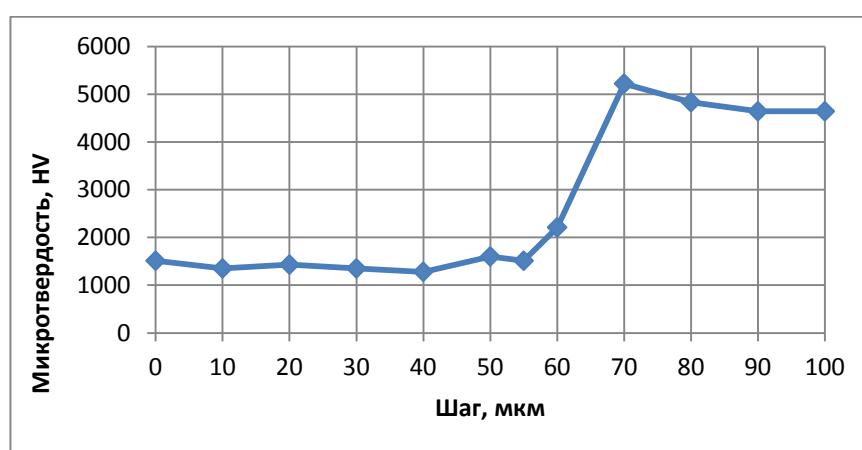


Рисунок 23 – Изменение микротвердости при переходе от подложки к наплавленному слою на образце

По данным измерениям микротвердости можно сделать вывод о том, что протяженность зоны сплавления составляет около 10 мкм. Для более детально-го исследования зоны сплавления был проведен энергодисперсионный анализ с целью изучения химического состава в подложке, в зоне сплавления, в наплавленном слое (рис. 24).

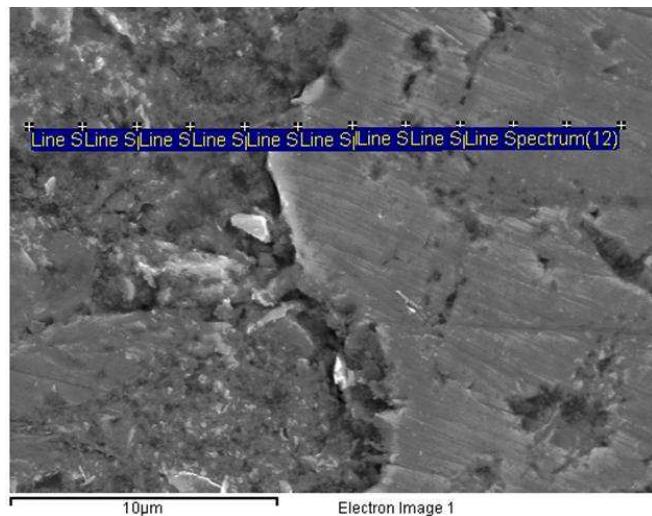


Рисунок 24 – Изображение структуры с маркерами линейного спектра, x5000,
шаг 2 мкм

По данным полученным по результатам энергодисперсионного анализа (табл. 4) был построен график изменения элементного состава в зоне сплавления (рис. 25).

Таблица 4 – Элементный состав линейного спектра наплавленного слоя толщиной 1 мм, результаты в атомных %

Spectrum	C	Si	Cr	Fe	Ni
Line Spectrum (1)		1.31		98.69	
Line Spectrum (2)		33.45		66.55	
Line Spectrum (3)		5.91		94.09	
Line Spectrum (4)				100.00	
Line Spectrum (5)				100.00	
Line Spectrum (6)	26.68	2.09	0.66	68.10	2.48
Line Spectrum (7)		1.20	2.37	78.48	17.95
Line Spectrum (8)		7.75	9.28	16.23	66.74
Line Spectrum (9)	28.95	16.53	6.18	6.32	42.04

Line Spectrum (10)		8.82	11.01	8.60	71.57
Line Spectrum (11)		7.97	11.27	7.21	73.56
Line Spectrum (12)		7.10	11.11	6.94	74.85

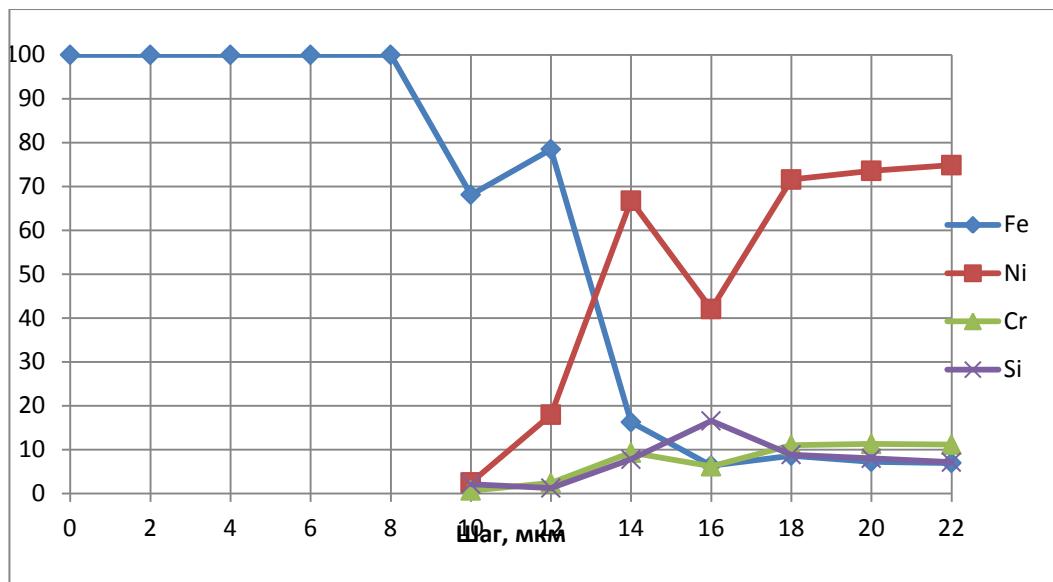


Рисунок 25 – График изменения элементного состава линейного спектра наплавленного слоя толщиной 1 мм , x5000, все результаты в атомных %

Анализируя график изменения химического состава можно сделать вывод о наличии карбидов хрома, которые способствуют повышению твердости наплавленного слоя.

Анализ графика линейного спектра также указывает на толщину зоны сплавления около 10 мкм.

На основании выполненных исследований можно сделать вывод о том, что зона сплавления имеет небольшую протяженность около 10 мкм при наплавке слоя толщиной 1 мм.

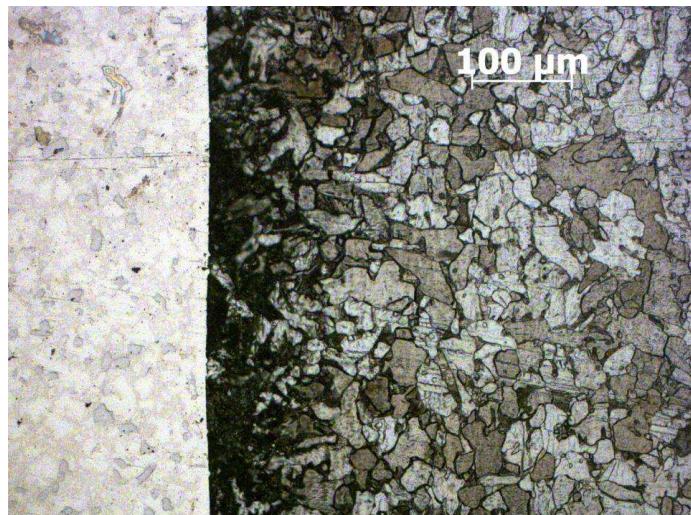


Рисунок 26 – Зона сплавления с плоской областью взаимодействия

При малой толщине наплавленного слоя время контакта расплавленного металла с подложкой небольшое. Это не приводит к значительному взаимодействию наплавленного слоя с подложкой, что отражается в формировании плоской области взаимодействия (рис. 26).

3.5.2 Исследования микротвердости наплавленного слоя толщиной 3 мм

Измерения микротвердости образца №2 приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Данные микротвердости образца №2

Расстояние, мм	0	10	20	30	40	50	60	65	70	80	90	100	110
HV , МПа	135 0	170 0	135 0	116 0	128 0	181 0	297 0	350 0	452 0	480 0	472 0	461 3	473 2

Анализ данных таблицы 4 указывает, что разница микротвердости между наплавленным слоем и подложкой по сравнению с первым образцом менее значительна. Микротвердость подложки составляет примерно 1800 МПа, а наплавленного слоя 4700 МПа.

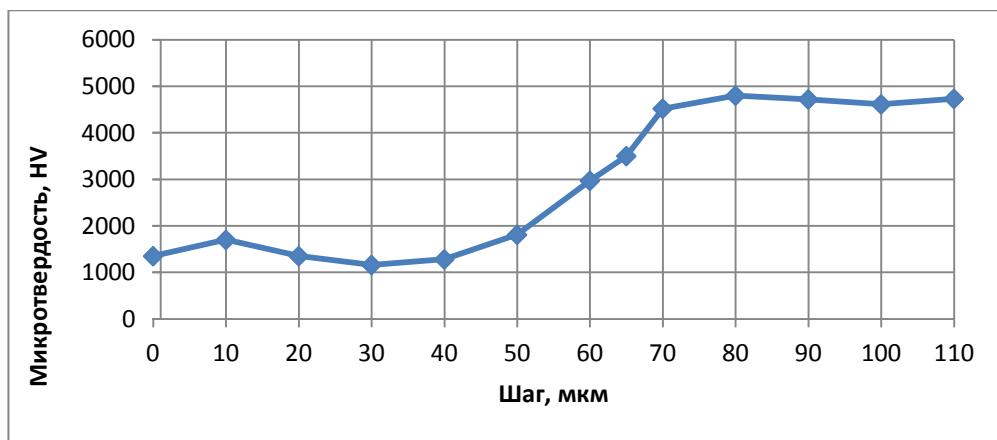


Рисунок 27 – График изменения микротвердости на образце с толщиной наплавленного слоя 3 мм

По данным измерениями микротвердости можно сделать вывод, что протяженность переходной зоны составляет 20–30 мкм. Примерно в 2 раза больше, чем у первого образца.

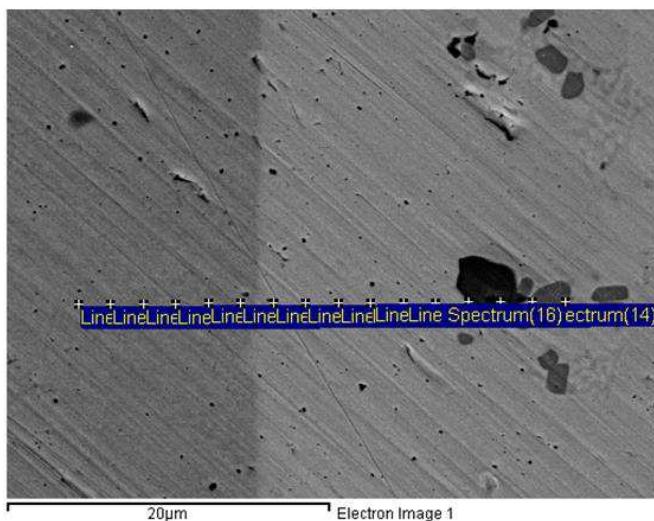


Рисунок 28 – Изображение структуры с маркерами линейного спектра наплавленного слоя толщиной 3 мм, х3000, шаг 2 мкм

Таблица 6 – Элементный состав линейного спектра наплавленного слоя толщиной 3 мм, результаты в атомных %

Spectrum	C	Si	Cr	Fe	Ni
Line Spectrum (1)				100.00	
Line Spectrum (2)				100.00	
Line Spectrum (3)				100.00	
Line Spectrum (4)				100.00	

Line Spectrum (5)				100.00	
Line Spectrum (6)			0.83	99.17	
Line Spectrum (7)		2.67	5.72	50.78	40.83
Line Spectrum (8)		7.20	11.36	10.45	71.00
Line Spectrum (9)		6.84	11.43	8.64	73.09
Line Spectrum (10)		6.81	11.49	8.07	73.63
Line Spectrum (11)		7.36	11.53	8.24	72.87
Line Spectrum (12)	13.57	7.05	7.98	6.40	65.00
Line Spectrum (13)	22.12	6.55	6.50	5.60	59.22
Line Spectrum (14)		6.35	34.95	4.69	54.01
Line Spectrum (15)		10.46	15.80	5.25	68.49
Line Spectrum (16)	19.05	9.54	12.64	2.32	56.45

По данным таблицы 6 был построен график линейного спектра элементного состава (рис. 29).

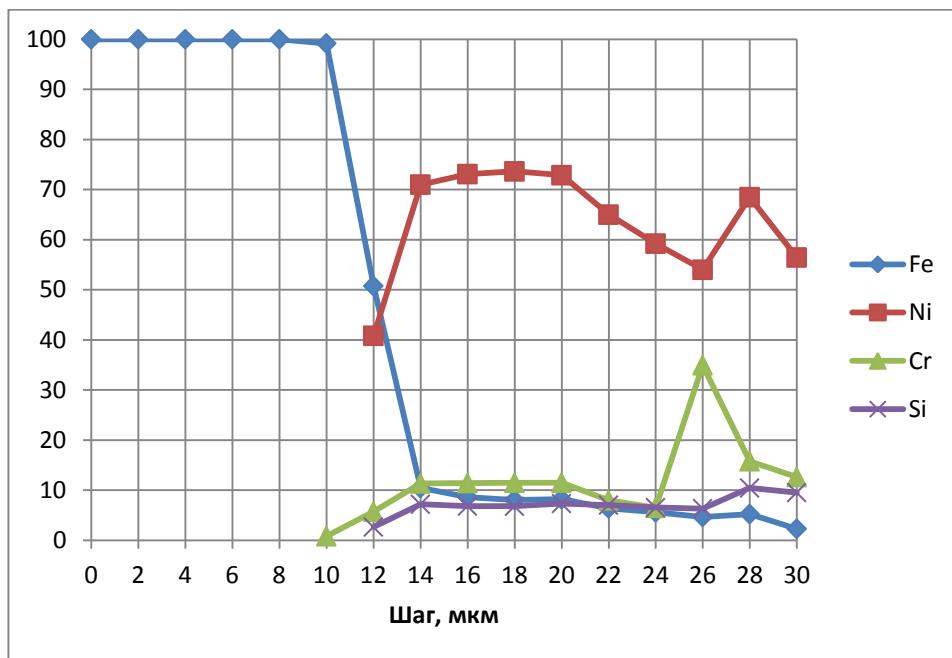


Рисунок 29 – График изменения элементного состава линейного спектра наплавленного слоя толщиной 3 мм, x3000, все результаты в атомных %

Анализ графика элементного состава линейного спектра указывает на толщину зоны сплавления около 20–30 мкм.

На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что зона сплавления имеет значительную протяженность около 20–30 мкм при наплавке слоя толщиной 3 мм.

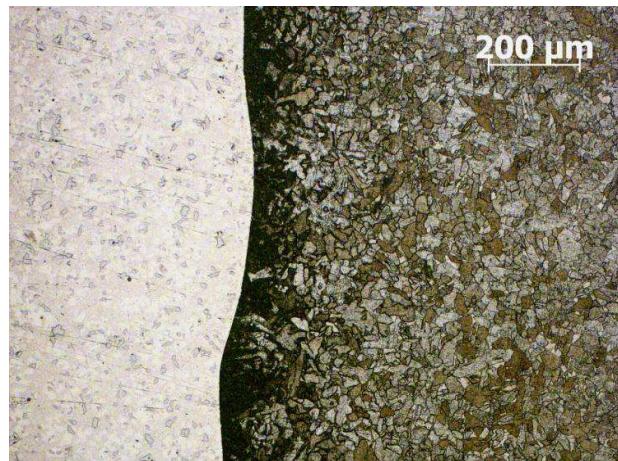


Рисунок 30 – Микроструктура зоны сплавления имеющая криволинейный характер

При наплавке слоев значительной толщины 4–6 мм время взаимодействия значительно увеличивается, что способствует образованию неоднородного взаимодействия, которое определяется в наличии криволинейной зоны контакта (рис. 30).

3.5.3 Исследования микротвердости наплавленного слоя толщиной 6 мм

Данные микротвердости образца №3 записаны ниже в табл. 7.

Таблица 7 – Данные микротвердости образца №3

Расстояние, мм	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
HV , МПа	151 0	110 0	135 0	122 0	143 0	135 0	322 0	383 0	410 0	490 0	480 0	471 2	465 0

Анализируя данные микротвердости образца с толщиной наплавленного слоя 6 мм можно сделать вывод, что различия микротвердости подложки и наплавленного слоя значительны. Микротвердость наплавленного слоя около 1300 МПа, а подложки 4800 МПа.

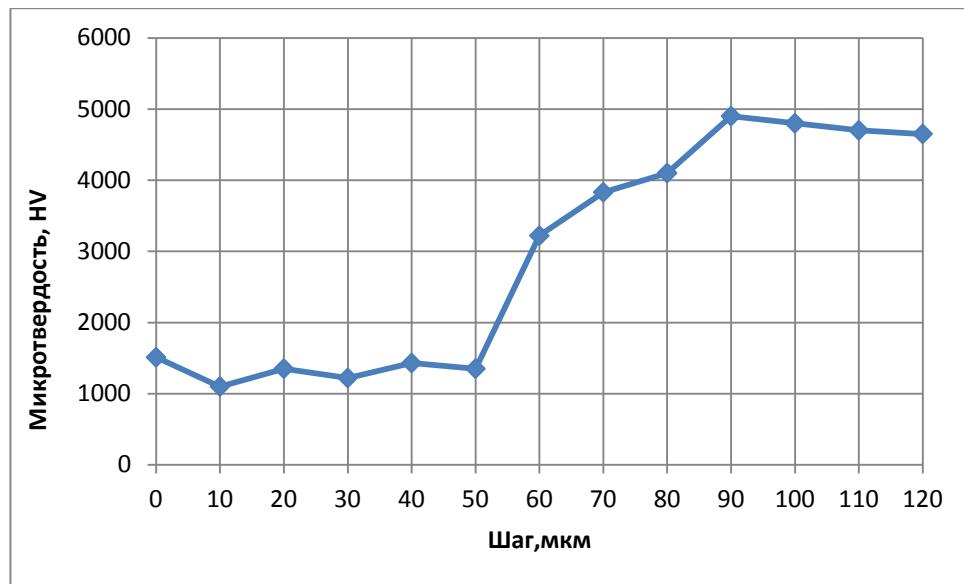


Рисунок 31 – График изменения микротвердости на образце с толщиной наплавленного слоя 6 мм

По данным измерениям микротвердости образца №3 видно, что протяженность зоны сплавления составляет 40 мкм. Что в несколько раз больше, чем у предыдущих образов.

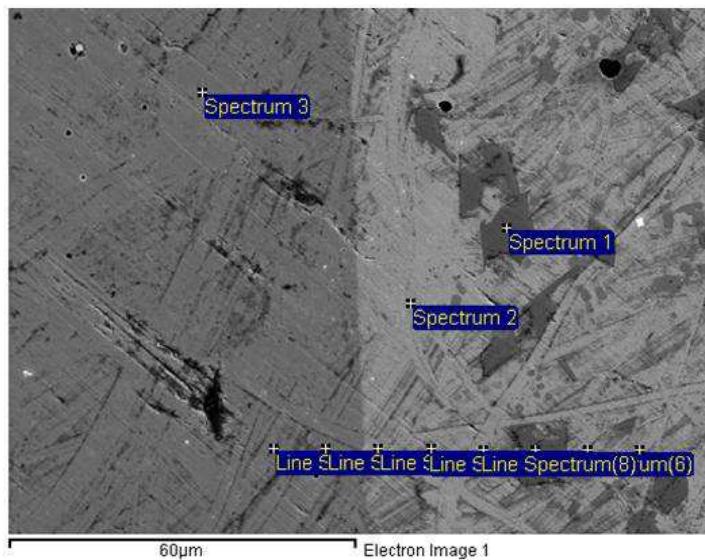


Рисунок 32 – Изображение структуры с маркерами точечного и линейного спектра наплавленного слоя толщиной 6 мм, x1000, шаг 9 мкм

Таблица 8 – Элементный состав точечного и линейного спектра наплавленного слоя толщиной 6 мм, результаты в атомных %

Spectrum	B	Si	Cr	Fe	Ni
Spectrum 1	54.25		44.06	0.73	0.96
Spectrum 2		8.22	8.58	7.20	76.00
Spectrum 3				100.00	
Line Spectrum (1)				100.00	
Line Spectrum (2)				100.00	
Line Spectrum (3)		7.27	11.68	11.44	69.60
Line Spectrum (4)		7.03	12.02	7.75	73.20
Line Spectrum (5)		7.29	11.74	7.64	73.33
Line Spectrum (6)	51.29		46.92	0.55	1.24
Line Spectrum (7)		7.52	11.03	7.27	74.18
Line Spectrum (8)		10.19	7.11	6.06	76.63

Исходя из данных таблицы 8, был построен линейный спектр (рис. 33).

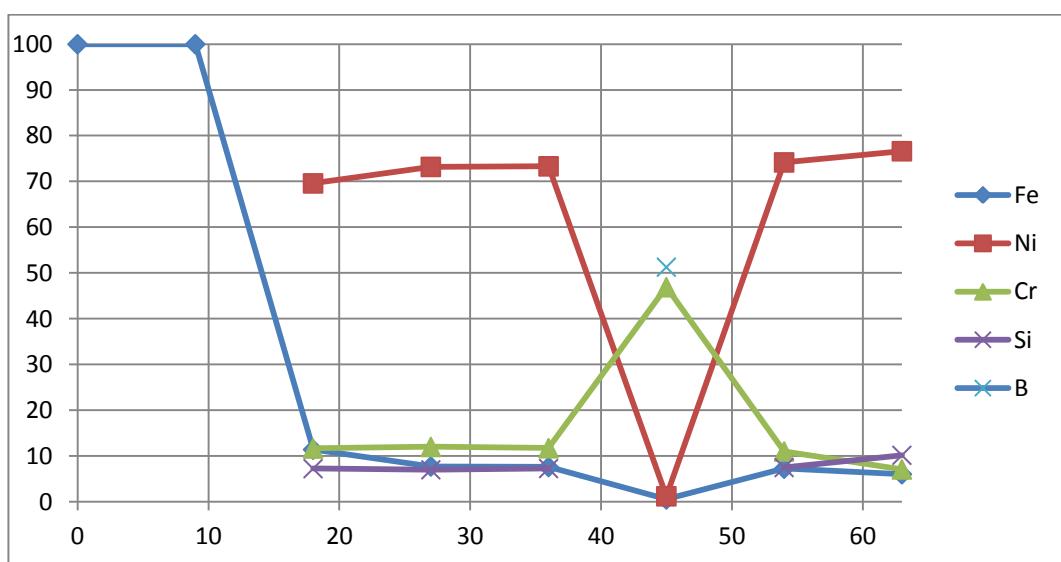


Рисунок 33 – График изменения элементного состава линейного спектра наплавленного слоя толщиной 6 мм, х1000, все результаты в атомных %

Анализируя график изменения химического состава образца (рис. 33), можно сделать вывод о наличии боридов хрома.

Наличие боридов хрома подтверждается не только энергодисперсионным анализом, но и отчетливо наблюдается фазовым контрастом (рис. 32). Бориды хрома обладают высокой твердостью, приводят к существенному повышению твердости наплавленного слоя, что отражается также и на повышение износосто-

стойкости, особенно в условиях абразивного, гидроабразивного и газоабразивного изнашивания. Следует отметить, что повышение твердости зависит не только от боридов, но и от карбидов.

Также анализ графика линейного спектра указывает на толщину зоны сплавления около 40 мкм.

На основании выполненных исследований можно сделать вывод о том, что зона сплавления имеет достаточно большую протяженность примерно 40 мкм при наплавке слоя толщиной 6 мм.

С целью определения фазового состава был проведен рентгенофазовый анализ (рис. 34).

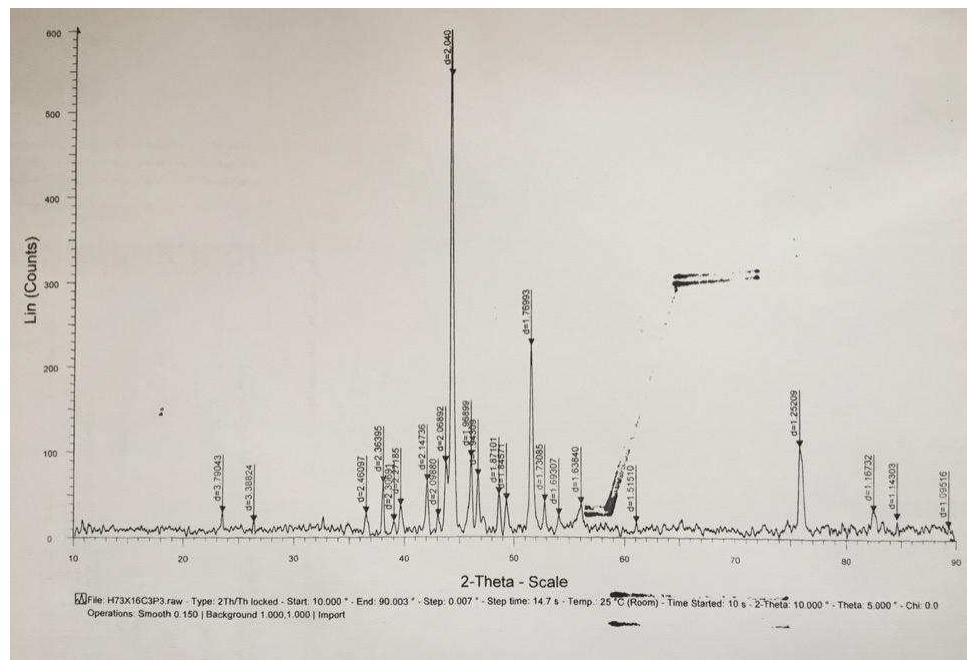


Рисунок 34 – Рентгенофазовый анализ

По данным рентгенофазового анализа также наблюдается наличие боридов хрома, а также присутствуют карбиды хрома. Основная структурная составляющая представляет собой аустенит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе дипломной работы были получены следующие результаты:

1 Показана возможность получения композиционного материала на индукционной установки ИЗ 25/40–80, обладающего высокой износостойкостью и жаростойкостью.

2 Проведены исследования влияния на режимы наплавки, на структуру и свойства наплавленных слоев, и зоны сплавления.

3 Установлено, что в процессе индукционной наплавки, фазовый состав наплавляемого порошка и полученного слоя практически идентичны.

4 Применение энергодисперсионного анализа позволило выявить закономерность распределения элементов в зоне перехода подложки к наплавленному слою.

5 Установлена закономерность изменения микротвердости переходной зоны и наплавленного слоя в зависимости от толщины наплавляемого слоя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Евстифеев, В. В. Композиционные материалы в машиностроении : метод. указания / В. В. Евстифеев, В. И. Матюхин, В. В. Акимов. – Омск : СибАДИ, 2012. – 16 с.
- 2 Адаскин, А. М. Материаловедение и технология материалов : учеб. пособие / А. М. Адаскин, В. М. Зуев. – Москва : Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2016. – 336 с.
- 3 Ковтунов, А. И. Слоистые композиционные материалы : учеб. пособие / А. И. Ковтунов, С. В. Мямин, Т. В. Семистенова. – Тольятти : Изд–во ТГУ, 2017. – 75 с.
- 4 Кобелев, А. Г. Производство слоистых композиционных материалов : науч. изд. / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышов. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2002. – 496 с.
- 5 Голованенко, С. А. Производство биметаллов : учеб. пособие / С. А. Голованенко, Л. В. Меандров. – Москва : Металлургия, 1966. – 304 с.
- 6 Меандров, Л. В. Двухслойные коррозионностойкие стали : учебник / Л. В. Меандров. – Москва : Металлургия, 1970. – 232 с.
- 7 Коррозионностойкий биметалл для сельскохозяйственного машиностроения : учебник / Ю. А. Конон, В. Н. Федоров, Л. Б. Первухин, А. А. Быков. – Москва : Машиностроение, 1984. – 112 с.
- 8 Кобелев, А. Г. Технология слоистых металлов : учебник / А. Г. Кобелев, И. Н. Потапов, Е. В. Кузнецов. – Москва : Металлургия, 1981. – 248 с.
- 9 Потапов, И. Н. Слоистые металлические композиции : учеб. пособие / И. Н. Потапов, В. Н. Лебедев, А. Г. Кобелев. – Москва : Металлургия, 1986. – 216 с.
- 10 Арзамасов, Б. Н. Материаловедение : учебник для технических вузов / Б. Н. Арзамасов. – Москва : Изд–во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2001. – 648 с.
- 11 Батаев, А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение : учеб. пособие / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – Москва : Университетская книга, Логос, 2002. – 400 с.
- 12 Материаловедение и технология композиционных материалов : учебник для вузов / А. Г. Кобелев [и др.]. – Москва: Интермет Инжиниринг, 2006. – 368 с.
- 13 Рыбин, В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов / В. В. Рыбин. – Москва: Металлургия, 1986. – 224 с.
- 14 Технология конструкционных материалов : учебник / Е. А. Астафьева, Ф. М. Носков, О. А. Масанский, В. С. Казаков. – Красноярск : Сиб. федер. ун–т, 2017. – 476 с.
- 15 Хромченко, Ф. А. Сварочные технологии при ремонтных работах : справ. изд. / Ф. А. Хромченко. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2005. – 368 с.
- 16 Чвертко, А. И. Оборудование для дуговой и шлаковой сварки и наплавки / А. И. Чвертко, В. Г. Пичак. – Киев : Наукова думка, 1983. – 56 с.

- 17 Ельцов, В. В. Восстановление и упрочнение деталей машин : учеб. пособие / В. В. Ельцов. – Тольятти : Изд–во ТГУ, 2015. – 335 с.
- 18 Разиков, М. И. Автоматическая наплавка в среде углекислого газа : учебник / М. И. Разиков. – Москва : Машиностроение, 1962. – 212 с.
- 19 Потапьевский, А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Сварка в защитных газах : учеб. пособие / А. Г. Потапьевский. – Киев : Экотехнология, 2007. – 192 с.
- 20 Чугункин, С. В. Методы нанесения на оправку износостойкого слоя для повышения ее работоспособности / С. В. Чугункин. – Новосибирск : СиБАК, 2013. – 112 с.
- 21 Рябцев, И. А. Индукционная наплавка / И. А. Рябцев // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2005. – № 11. – С. 181–190.
- 22 Слухоцкий, А. Е. Индукторы для индукционного нагрева : учебник / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин. – Ленинград : Энергия, 1974. – 264 с.
- 23 Русак, О. Н. Безопасность жизнедеятельности в техносфере : учеб. пособие / О. Н. Русак, В. Я. Кондрасенко. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2001. – 431 с.
- 24 Токмин, А. М. Исследование структуры и свойств слоя, полученного индукционной наплавкой металлических порошков / А. М. Токмин, С. Г. Теремов, О. А. Масанский // Заготовительное производство. – 2008. – № 9. – С. 15–18.
- 25 Влияние параметров высокочастотного нагрева при закалке на микроструктуру и свойства углеродистой стали : метод. указания для студентов / Г. Ю. Зубрилов, В. С. Казаков, И. К. Макаревич, Ю. П. Шаулина. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2003. – 16 с.
- 26 Колачев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов : учебник / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. – Москва : МИСиС, 2005. – 432 с.
- 27 Беккерт, М. Способы металлографического травления : справочник / М. Беккерт, Х. Клемм. – Москва : Металлургия, 1988. – 400 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра Материаловедения и технологий обработки материалов

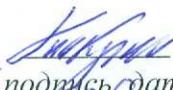
УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
/ Темных В. И.
(подпись)
« _____ » _____ 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Направление 22.03.01.07 «Материаловедение и технологии
материалов в машиностроении»

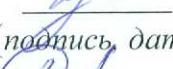
Применение индукционной технологии для получения слоистых композиционных материалов

Научный Руководитель


(подпись, дата)

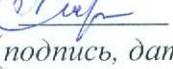
Токмин А. М.

Выпускник


(подпись, дата)

Жмак Е. Г.

Нормоконтроль


(подпись, дата)

Свечникова Л. А.

Красноярск 2019