


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

Политехнический институт
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В. И. Темных
«28» 06 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Направление: 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Влияние технологических режимов на структурообразование композиционных материалов, полученных методом индукционной наплавки

Научный руководитель


(подпись, дата)

О. А. Масанский

Выпускник


(подпись, дата)

Ю. И. Калущкий

Нормоконтролер

25.06.21 
(подпись, дата)

Л. А. Свечникова

Красноярск 2021

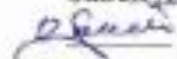
Красноярск 2021

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

Политехнический институт
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В. И. Темных

« ____ » _____ 2021 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

Студент: Калуцкий Юрий Иванович.

Группа: МТ17-01Б.

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

Профиль: 22.03.01.07 Материаловедение и технологии материалов в машиностроении.

Тема ВКР: Влияние технологических режимов на структурообразование композиционных материалов, полученных методом индукционной наплавки, утверждённая приказом по университету № 307/с, от 15.01.21 г.

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

Перечень разделов ВКР:

1 Современное представление о технологических режимах, влияющих на структурообразование композиционных материалов, полученных методом индукционной наплавки.

2 Технология получения слоистых композиционных материалов.

3 Экспериментальное оборудование и методы проведения исследований.

4 Экспериментальные исследования.

Перечень графического материала: Презентационный материал.

Руководитель


подпись, дата

доцент, канд. тех. наук
должность, учение степень

О. А. Масанский
инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению


подпись, дата

Ю. И. Калущкий
инициалы, фамилия

АННОТАЦИЯ

В настоящее время уровень развития машиностроения представляет собой совокупность применения всевозможных инновационных разработок в области технологий, материалов и оборудования. Одной из таких технологий является технология получения износостойких композиционных материалов методом индукционной наплавки. Сущность метода заключается в нанесении на поверхность детали слоя специального материала – металлического порошка с необходимыми для обеспечения требуемых свойств компонентами, который, в дальнейшем, расплавляется путём индукционного нагрева для восстановления первоначальной формы детали или придания поверхности особых свойств. Поскольку основой для наплавляемого металла часто являются низколегированные образцы изделий, метод также позволяет в значительной степени экономить дорогостоящие материалы, а многократное повторное восстановление изношенных деталей машин и механизмов позволяет уменьшить расход металла в целом.

Износостойкость – не единственное свойство, которое представляется возможным обеспечить методом индукционной наплавки. В зависимости от состава наплавляемого металла в виде металлического порошка имеют место быть так же такие свойства как жаростойкость, кислотоупорность и т.д.

В данной выпускной квалификационной работе представлены результаты исследования различных технологических режимов на структурообразование композиционных материалов, полученных методом индукционной наплавки, изучено влияние скорости наплавки и толщины наплавляемого слоя на формирование структуры СКМ, установлена кинетика взаимодействия частиц наплавляемой шихты, так же был получен износостойкий композиционный материал, путем применения метода индукционной наплавки.

Ключевые слова: наплавка, структурообразование, металлография, упрочнение.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Влияние технологических режимов на структурообразование композиционных материалов, полученных методом индукционной наплавки», содержит 51 страницу, 25 рисунков, 4 таблицы и 24 источника литературы.

Цель работы: изучение влияния различных технологических режимов на структурообразование композиционных материалов, полученных методом индукционной наплавки.

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

- 1 Провести литературный обзор рассматриваемой проблемы.
- 2 Получить опытные образцы для проведения исследований.
- 3 Исследовать кинетику взаимодействия частиц наплавляемой шихты.
- 4 Установить влияние технологических режимов на кинетику взаимодействия частиц наплавляемой шихты и свойства СКМ.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Современное представление о индукционной наплавке	8
1.1 Технология индукционной наплавки.....	8
1.2 Режимы индукционной наплавки металла.....	11
1.3 Влияние структурного состава на свойства СКМ.....	12
1.4 Материалы, применяемые для индукционной наплавки.....	14
1.5 Процессы, протекающие при индукционной наплавке.....	19
2 Технология получения слоистых композиционных материалов	22
2.1 Экспериментальное оборудование и оснастка	22
2.2 Технология получения СКМ на установке УВГ 2 – 25	25
3 Методы проведения исследований	28
3.1 Металлографические исследования	29
3.2 Определение твердости и микротвердости	30
4 Экспериментальные исследования	32
4.1 Металлографические исследования	32
4.2 Энергодисперсионный и химический анализ	44
4.3 Анализ твердости и микротвердости	47
Выводы и результаты работы:	49
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	50

ВВЕДЕНИЕ

Многие стальные или чугунные детали в машиностроении должны иметь износостойкую поверхность при сохранении вязкой и прочной сердцевины изделия, что часто достигается традиционными методами поверхностного упрочнения, например, поверхностной закалкой, химико-термической обработкой или пластическим деформированием [1]. Как правило, эти методы отличаются повышенными энергетическими затратами и невысокой производительностью.

Состояние структуры поверхностного слоя оказывает существенное влияние на механические и эксплуатационные свойства деталей. Одним из эффективных направлений упрочнения рабочих поверхностей, восстановления и увеличения срока эксплуатации изнашиваемых деталей наряду с известными методами является нанесение на них износостойких покрытий различными способами: лазерная наплавка, плазменное напыление, индукционная наплавка и др. Применение наплавочных технологий позволяет повысить технико-экономические показатели за счет экономии дорогостоящих материалов, а многократное повторное восстановление изношенных деталей машин и механизмов позволяет уменьшить расход металла в целом.

1 Современное представление о индукционной наплавке

В настоящее время индукционная наплавка внедрена на многих предприятиях страны как вариант упрочнения всевозможных рабочих органов сельскохозяйственной техники (долота лемехов, лапы культиваторов), железнодорожной техники, горнодобывающего оборудования, строительной техники, дорожно-ремонтной техники, деталей машин и механизмов, автомобилей и тракторов. Так же стоит отметить, что для всевозможного ряда целей и задач используются, соответственно, различные решения в плане обеспечения процессов индукционной наплавки.

Применение данной технологии, в первую очередь, обусловлено финансовой выгодностью процесса в целом. Именно упрочнение изношенных деталей, непосредственно, позволяет экономить дорогостоящие материалы, которые могли быть задействованы в производстве новых рабочих органов всевозможных машин и механизмов. Так же нельзя упускать из виду возможность получения требуемого ряда свойств, необходимых для эффективной работы конкретной детали в определённых условиях.

1.1 Технология индукционной наплавки

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. 1.1). Наплавленный слой отличается особой прочностью, что обеспечивает повышение износостойкости наплавляемых элементов, а следовательно, увеличивает их долговечность [1].

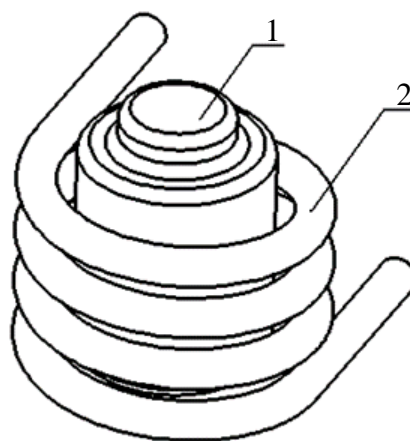


Рисунок 1.1 – Витковой индуктор с ферритным сердечником:

1 – водоохлаждаемая кварцевая колба с ферритным сердечником;

2 – витковый индуктор

Полученные этим способом слоистые 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. 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 объёмной массой и уменьшенным количеством флюса.

Индукционный нагрев ТВЧ осуществляется за счет приближения к по-

верхности обрабатываемой детали индуктора, присоединенного к генератору ТВЧ. В основном металле детали или в компактной присадке индуцируются вторичные переменные токи той же частоты, распределяющиеся в поверхностных слоях металла и нагревающие эти слои до оплавления. Толщина нагретого ТВЧ слоя обратно пропорциональна частоте тока.

Для стальных деталей преимущественный нагрев ТВЧ поверхностных слоев металла сохраняется вплоть до точки Кюри (768 °С). После того как металл нагреется выше точки Кюри, глубина проникновения индуктированных токов увеличивается в 10–20 раз (зависит от частоты), поэтому распределение температуры в нагреваемом металле становится более равномерным.

Основные способы для наплавки ТВЧ [5]:

- армирование расплавленного поверхностного слоя основного металла тугоплавкой и труднорастворимой присадкой;
- заливка присадочного металла на подогретый основной металл;
- расплавление брикетированного или монолитного металла, или расплавление шихты на основном металле;
- наплавка в огнеупорной среде;
- центробежная наплавка деталей цилиндрической формы.
- расплавление порошковой шихты, нанесенной на наплавляемую поверхность детали.

1.2 Режимы индукционной наплавки металла

От правильно выбранных технологических режимов получения слоистого композиционного материала в условиях высокоэнергетического индукционного нагрева во многом зависит получаемая структура и, свойства полученного изделия

Использование генератора УВГ-2-25 с выносным нагрузочным контуром позволяет реализовать получение слоистого композиционного материала, который обладает высоким комплексом физико-механических свойств в условиях износа. Прежде всего, это связано с возможностью контроля ввода поступающей энергии путем изменения рабочей частоты генератора в широком диапазоне и, следовательно, управлять тепловыми и фазовыми процессами в период плавления, кристаллизации и последующего охлаждения.

Продолжительность нагрева является основным параметром, определяющим не только качество и свойства слоистого композиционного материала, но и производительность и экономичность процесса. Продолжительность нагрева, которая определяется скоростью перемещения изделия относительно индуктора, зависит от частоты тока, мощности высокочастотной установки, толщины формируемого слоя и физическими свойствами шихты.

При получении слоистого композиционного материала необходимо достигнуть минимального прогрева компонента основы. Слой порошковой шихты имеет очень низкий коэффициент теплопередачи, поэтому для достижения температуры плавления в верхних слоях шихты потребуется тем больше времени, чем толще слой шихты.

Оптимальные режимы для данного генератора определены недостаточно четко, поэтому для решения данной задачи, получение слоистого композиционного материала производили при постоянной толщине слоя со скоростью от 5 до 8 м/ч, дальнейшее исследование которых позволило определить оптимальные режимы технологического процесса.

1.3 Влияние структурного состава на свойства СКМ

Одним из важнейших факторов, определяющих сопротивление металлических сплавов изнашиванию, является их структурно-фазовое состояние, а также свойства, взаимное расположение, количественное соотношение и характер связи отдельных составляющих структуры.

Сопротивление изнашиванию легированного металла обычно характеризуется двумя главными параметрами: способностью металлической матрицы и карбидной фазы претерпевать превращения в поверхностных слоях, приспособляться к условиям трения и иметь минимальный износ.

Основными видами износа, которым подвергаются рабочие органы строительно-дорожной и горнодобывающей техники в процессе эксплуатации, являются абразивный, ударно-абразивный и ударный износ. Стойкость изделий к износу определяется их структурно-фазовым составом.

При абразивном изнашивании ведущими, являются процессы многократного деформирования поверхности скользящими по ней частицами и микрорезание. Степень развития этих процессов зависит от давления и соотношения твердости материала и абразивных частиц. Поэтому основным требованием к структуре износостойких сплавов является гетерогенность. Поскольку мягкие структуры в процессе абразивного износа изнашиваются сильнее, удельная нагрузка увеличивается на износостойкие. Основным вкладом в сопротивление материалов к абразивному изнашиванию вносят более твердые фазы, которыми чаще всего являются карбиды. Повышение износостойкости рабочих органов в условиях абразивного износа, за счет формирования значительного количества (до 50 %) высокодисперсной карбидной фазы, обеспечивается введением в состав сплава сильных карбидообразующих элементов Cr, W, Ti, V и 1,5–3,0 % углерода. Увеличение карбидной фазы дает положительный эффект в доэвтектических сплавах. В заэвтектических сплавах хрупкие массивные карбиды могут откалываться и выкрашиваться, увеличивая износ детали.

Измельчение карбидной фазы за счет ускорения кристаллизации, модифицирования и т. д., способствует повышению твердости и износостойкости. Значительное влияние оказывает и форма карбидов. Формирование в структуре сплава изолированных тригональных карбидов повышает стойкость к износу.

Большое значение для получения требуемой износостойкости имеет матрица. Высокая сопротивляемость абразивному износу может быть достигнута путем создания структуры, матрица которой способна прочно закреплять и удерживать карбидную фазу. Наличие пластичной ферритной матрицы оказывает слабое сопротивление абразивному износу. Высокой абразивной износостойкостью обладают сплавы с мартенситной основой. Мартенситная матрица выгодна в тех случаях, когда характер износа приближается к эрозии. При высоких давлениях, больших углах атаки абразива и наличии ударов целесообразно формирование метастабильной аустенитной матрицы.

При условии ударного или ударно-абразивного износа высокая твердость сплава способствует его охрупчиванию и снижению износостойкости. В связи с этим, для изделий, эксплуатация которых сопровождается значительными ударными нагрузками, количество карбидной фазы ограничивается 10–20 %. Стойкость изделия к такому виду износа, в основном, определяется структурно-фазовым составом матрицы. Аустенит больше, чем феррит, упрочняется при деформации и способен к превращению с образованием мартенсита деформации. При таком сочетании свойств аустенит превосходит феррит и по способности удерживать частицы карбидной фазы. При сравнении с мартенситом, аустенит имеет меньшую стойкость к износу. Однако, обладая большей вязкостью, способствует прочному закреплению и удержанию карбидов.

Сплавы с нестабильной аустенитной матрицей позволяют повысить износостойкость сплавов в условиях ударно-абразивного и ударного износа. Высокое сопротивление изнашиванию объясняется превращениями, проте-

кающими в аустените. При воздействии ударных нагрузок, в поверхностных слоях протекают структурно-фазовые превращения аустенита, вызванные энергией удара: образование мартенсита деформации, выделение дисперсных карбидов по плоскостям скольжения, перераспределение структурных составляющих и т. д., что способствует повышению износостойкости. Формирование метастабильной аустенитной матрицы достигается путем легирования сплава Ni и Mn, которые способствуют подавлению $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

1.4 Материалы, применяемые для индукционной наплавки

Компонентами композиционных материалов, получение которых представляется возможным, благодаря технологии индукционной наплавки, являются материалы, имеющие значительную разницу как по свойствам, так и по химическому составу. В качестве компонента основы используют, как правило, дешевые низколегированные, малоуглеродистые конструкционные стали. Наносимый же материал, как правило, относится к высоколегированным сплавам с повышенным содержанием углерода, что говорит о его высокой стоимости. Сохранить исходный химический состав и дать вразумительный прогноз относительно структуры и свойств полученного наплавленного слоя, возможно только путем жидко-твердофазного взаимодействия компонентов, при отсутствии факта расплавления компонента основы и перемешивания его с расплавом металлического порошка.

Получение композиционных материалов с применением индукционного нагрева, осуществляется в обычной атмосфере, где, разумеется, протекают процессы взаимодействия с кислородом, азотом, парами воды и т. д. Для защиты расплавленного и находящегося при высоких температурах исходного и кристаллизовавшегося металла необходимо обеспечить соответствующую защиту. Для этой цели, как известно, используют всевозможные флюсы, которые защищают металл от окисления на всех этапах получения композици-

онного материала. В составе шихты, как правило, содержится 70–80 % металлического порошка и 20–30 % флюса.

При использовании метода армирования расплавленного поверхностного слоя основного металла тугоплавкой и труднорастворимой присадкой в качестве последней, как правило, используют зерновой релит – эвтектическую смесь карбидов вольфрама WC и W₉C. Можно также использовать дробленую крупку твердых сплавов типа ВК или ТК (карбиды вольфрама и титана с кобальтовой связкой).

Для индукционной наплавки клапанов применяли литые кольца из сплава на основе никеля ЭП616 (масс. доля, %: С – 1,2; Si – 3,0; Mn – 0,4; Cr – 17,0; Ti – 0,2; Al – 0,6; Fe – 3,0; В – 1,5; Cu – 0,25; Ni – остальное).

Для индукционной наплавки рабочих органов сельскохозяйственных, дорожных и строительных машин используют порошки сплавов и наплавочные смеси на основе железа (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Порошки сплавов и наплавочные смеси на основе железа для индукционной наплавки рабочих органов сельскохозяйственных, дорожных и строительных машин

Марка (условное наименование)	Массовая доля элементов, %								Твёрдость наплавленного металла, HRC
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	B	Mo	
Порошки сплавов на основе железа (ГОСТ 21448–75)									
ПГ-С1	3,0	1,2	3,5	29,0	4,0	–	–	–	49–52
ПГ-С27	3,8	1,2	1,5	26,5	1,8	0,3	–	0,15	51–54
ПГ-УС25	5,0	2,5	2,0	38,0	1,5	–	–	–	53–56
ПГ-ФБХ 6-2	4,5	3,0	1,8	35,0	–	–	1,6	–	55–60
Наплавочные смеси на основе железа									
С-2М	8,0	7,5	2,0	25,0	–	–	–	–	54
КБХ	5,0	0,5	1,3	47,0	–	–	–	–	60
БХ	0,7	0,5	1,0	40,0	–	–	8,0	–	63
ФБХ 6-2	4,5	4,0	2,0	32,0	–	–	1,7	–	53

Порошковая шихта для индукционной наплавки в общем виде представляет собой смесь металлических порошков с флюсом. В шихте содержится 82–85 % (по массе) металлического порошка, остальное – флюс [10].

Среди флюсов, используемых при индукционном методе, наиболее распространена система $B_2O_3-Na_2B_4O_7$, соотношение компонентов в которой главным образом зависит от температуры процесса: чем выше температура, тем больше рекомендуется вводить борного ангидрида. Борный ангидрид, плавящийся при температуре 570 °С, малолетуч, однако летучесть его значительно возрастает при наличии воды или щелочных окислов. С окислами никеля и железа борный ангидрид образует легкоплавкие бораты, метабораты и другие соединения типа B_2O_3 , Me_2O_3 , $4MeO$. Окислы хрома и кремния мало растворимы в борном ангидриде, поэтому последний в чистом виде не пригоден в качестве флюса при использовании сплавов, легированными этими элементами. Кроме того, расплав борного ангидрида имеет высокую вязкость, что, очевидно, зависит от атомной структуры триоксида бора, которая достаточно стабильна.

Плавляная бура $Na_2B_4O_7$ действует более энергично, чем борный ангидрид, она весьма устойчива по отношению к нагреванию. В жидком состоянии бура распадается на натрий метаборат и борный ангидрид: $Na_2B_4O_7 \rightarrow 2NaBO_2 + B_2O_3$. Бура способна взаимодействовать с окислами металлов, образуя относительно легкоплавкие бораты, которые при нагревании склонны к улетучиванию. При высокой температуре бура недостаточно хорошо защищает жидкий металл от окисления. Низкая вязкость не обеспечивает необходимую толщину слоя шлака, что, в свою очередь, способствует дополнительному окислению жидкого металла.

Материал компонента основы должен иметь температуру плавления на 100–150 °С выше температуры плавления металлического порошка. Данное условие позволит определять механизм взаимодействия компонентов слоистого композиционного материала и глубину проплавления компонента основы. Соответственно температура плавления компонента основы должна

составлять 1 350–1 400 °С. Компонент основы должен обладать высокой прочностью, достаточной жесткостью, хорошей теплопроводностью, свариваемостью и обработкой резаньем, низкой себестоимостью. Основываясь на поставленные требования, в качестве компонента основы слоистого композиционного материала, для проведения экспериментальных исследований была выбрана конструкционная низколегированная строительная сталь 10 ГОСТ 1577-93.

Данная сталь легирована марганцем и кремнием, имеет низкое содержание углерода, что располагает эту сталь к хорошей свариваемости. ЛКТР стали 10 составляет $13,8 \times 10^{-6}$. Температура плавления, соответствует исходящим требованиям.

Самофлюсующиеся материалы используются для напыления и наплавки покрытий, стойких против коррозии, к изнашиванию трением и абразивными частицами. Покрытия устойчивы против газовой коррозии вплоть до температур 700–850 °С, стойки в пресной и морской воде, солевых растворах, нефтесодержащих средах, аммиаке и в др. агрессивных средах. Не стойки или слабостойки в растворах минеральных кислот. Сплавы плавятся в диапазоне температур, характерном для материалов с эвтектикой в структуре. Основная структурная фаза покрытий из сплавов: γ - твердый пересыщенный раствор на основе никеля; упрочняющие фазы: бориды хрома и никеля переменного состава, карбиды хрома типа Cr_{23}C_6 и карбобориды хрома; в порошках с повышенным содержанием углерода дополнительно присутствуют частицы более прочного карбида Cr_7C_3 . Твердость и износостойкость покрытий увеличивается по мере увеличения в никелевых сплавах содержания хрома, бора, кремния и углерода. Бор и кремний образуют с никелем легкоплавкие эвтектики с температурой плавления 950–1 080 °С, а также восстанавливают окисные пленки на поверхности подложки с образованием боросиликатных шлаков (самофлюсование) в присутствии жидкой фазы и улучшают смачиваемость подложки жидким металлом.

Таблица 1.2 – Самофлюсующиеся порошки сплавов на основе железа и никеля для индукционной наплавки

Марка сплава	Химический состав, %						
	C	B	Si	Ni	Cr	Fe	Mn
ПР-Н73Х16СЗР3	0,6–0,9	2,3–3,0	2,7–3,7	Основа	15,0–17,0	До 5,0	–
ПГС-27	2,5–3,5	–	2,8–4,2	3,0–5,0	25,0–31,0	Основа	0,5–1,5

Дилатометрические исследования напыленных покрытий из базовых сплавов НХ13СР, НХ15СР2, НХ16СР3 (таблица 1.2), НХ17СР4 показывают отсутствие в них фазовых превращений при охлаждении в диапазоне температур от 960 °С до 20 °С. Поэтому, фазовые превращения, протекающее в системе железо-углерод с изменением объема создает опасность растрескивания покрытия на стальных и чугунных подложках при охлаждении. В связи с этим, охлаждение изделий с нанесенным покрытием из самофлюсующихся сплавов рекомендуется проводить в замедленном темпе. Интервал рекомендуемых скоростей охлаждения составляет, например, для стали 10 – менее 100 °С/с, для стали 45 – менее 35 °С/с, для стали 70 – менее 5 °С/с.

К общим характеристикам Ni–Cr–B–Si–C сплавов относится также свойство сохранять твердость и сопротивление абразивному изнашиванию после отпуска с нагревом до 600 °С. Твердость же сплавов при повышенных температурах («горячая» твердость), например, при 650 °С может составить 50–70 % от измеренной при комнатной температуре.

Область применения порошков из никелевых сплавов: износостойкие покрытия на деталях металлургического, горно-нефтедобывающего, энергетического, стекольного и химического оборудования, штампового и прессового инструмента, деталях автомобильного, железнодорожного и судового транспорта, газоперекачивающих установок, сельскохозяйственной техники

и др. Сплавы применяются также для получения смесей с другими материалами для покрытий: карбидами, интерметаллидами и другими материалами.

1.5 Процессы, протекающие при индукционной наплавке

Наиболее важным отличием получения слоистых композиционных материалов в условиях высокоэнергетического индукционного нагрева, с технологической и энергетической точки зрения, является способ подвода тепла и кинетика индукционного нагрева. Расплавление нанесенной шихты за счет теплопередачи от основного металла компонента основы обуславливает определенные особенности процесса и, в частности, вызывает отставание роста температуры металлического порошка от температуры компонента основы.

В период нагрева до точки Кюри (768 °С) индуктируемый ток ввиду поверхностного эффекта распределяется главным образом в наружном слое (около 0,1 мм) компонента основы. Этот период характеризуется опережающим нагревом компонента основы и усиливающимся температурным градиентом. После перехода через точку Кюри глубина проникновения тока в металл компонента основы увеличивается (в зависимости от частоты) в 10–20 раз, благодаря чему распределение температуры в металле компонента основы становится более равномерным. Когда слой шихты прогреется до температуры 600–750 °С (в зависимости от состава флюса), начинается плавление флюсов, оседание частиц металлического порошка, всплывание и удаление газовых пузырей. К моменту начала плавления флюсов градиент температур между компонентом основы и шихтой особенно велик и достигает 250–300 °С. После образования жидкой фазы, скорость теплопередачи в присадочном материале значительно возрастает и температурный градиент резко уменьшается. Расплавленный флюс активно смачивает окисленную поверхность стали и частиц металлического порошка, окутывая их сплошной оболочкой. По мере дальнейшего нагрева поверхностное натяжение на границе флюс – металл

снижается, условия смачивания улучшаются, увеличивается химическая активность флюса.

При температуре около 800 °С расплавленный флюс вступает во взаимодействие с окисными пленками и тонким поверхностным слоем компонента основы, переводя их в жидкий шлак, предохраняя взаимодействующие материалы от дальнейшего окисления. Этим самым создаются необходимые предпосылки для образования прочной металлической связи между компонентами слоистого композиционного материала.

При достижении температуры солидуса металлического порошка начинает плавиться металлическая часть шихты, при этом жидкий шлак, имеющий значительно меньший удельный вес, вытесняется на поверхность расплавленной ванны.

Расплавленные капли металлического порошка хорошо смачивают окисленную поверхность металла компонента основы, растекаются и сливаются друг с другом, уменьшая тем самым свободную энергию системы.

Сложный комплекс процессов, происходящих при формировании слоистого композиционного материала в условиях высокоэнергетического индукционного нагрева, можно разделить на следующие этапы:

- нагрев компонента основы до температуры плавления флюсовой части шихты;
- расплавление флюсов;
- нагрев и расплавление металлической части шихты;
- взаимодействие компонента основы, флюсов и расплава металлического порошка между собой;
- формирование наплавочного слоя из расплавленного металла во время кристаллизации;
- охлаждение в верхнем интервале температур, сопровождаемое диффузионными процессами;
- охлаждение в нижнем интервале температур, когда диффузионные процессы полностью приостановлены.

Основные закономерности, характеризующие направление физико-химических процессов каждой стадии, во многом схожи с аналогичными закономерностями при газоплазменном или электродуговом методе.

В случае индукционного нагрева, при котором происходит высокоэнергетическое воздействие на материал, далекое от условий равновесной термодинамики, скорость роста температуры составляет около 800 °C/с, и определяющую роль в кинетике нагрева частицы будут играть неравновесные процессы. Толщина скин-слоя частицы, которая для конкретного материала во многом определяется частотой тока в индукторе и параметрами материала, может существенно изменяться в зависимости от режимов нагрева. При этом слой порошка сормайт греется мало, т. к. частицы порошка электрически изолированы друг от друга оксидным слоем на их поверхности и флюсовой частью шихты. Вследствие этого каждая частица греется независимо от других, глубина проникновения волны δ_c в сормайт составляет при температуре 18–20 °C составляет около 0,16 мм, что совпадает со средним размером частиц металлического порошка. В случае применения парамагнитных порошков, у которых магнитная проницаемость $\mu=1$, возможно управление толщиной скин-слоя за счет изменения частоты тока. Это позволяет управлять кинетикой плавления частиц в широком диапазоне:

- с частичным растворением карбидов в жидкой фазе;
- с полным растворением;
- с полным расплавлением и изотермической выдержкой в течение определенного времени.

На основании проведенного анализа для получения экспериментальных образцов слоистого композиционного материала методом индукционной наплавки с применением высокочастотного генератора УВГ 2-25 были использованы следующие материалы: порошок Сормайт – 50 %, порошок ПР-Н73Х16СЗРЗ – 50 %, флюс АН-20, сталь 10.

2 Технология получения слоистых композиционных материалов

В данной главе рассмотрено экспериментальное оборудование и оснастка. Представлена технология получения слоистых композиционных материалов, изложены физико-химические процессы, протекающие при индукционном нагреве.

2.1 Экспериментальное оборудование и оснастка

Получение экспериментальных образцов слоистого композиционного материала осуществляли при помощи высокочастотной индукционной установки типа УВГ 2-25, с генератором ГНОМ-25М1, разработанного в ЦКБ «Геофизика» г. Красноярска (рис. 2.1). Данный генератор позволяет в значительной степени уменьшить количество возможных негативных факторов, возникающих при использовании данного метода.

Генератор установки УВГ 2-25 питается от обычной трехфазной сети 380/220 В, с частотой 50 Гц и полностью выполнен на полупроводниковых элементах. Поэтому он компактен, долговечен и имеет высокий промышленный коэффициент полезного действия. При максимально возможной мощности 25 кВт генератор потребляет не более 30 кВт мощности. Электрическая схема генератора на транзисторах преобразует выходную частоту 50 Гц в рабочие частоты 44 или 66 кГц, питающие индуктор. Генератор снабжен надежной системой ограничения тока, которая предохраняет электронные компоненты от перегрузок исключая при этом выход его из строя.

Габаритные размеры генератора 720 × 500 × 470 мм, масса 60 кг. К согласующему устройству генератор подсоединяется гибким кабелем, а к системе охлаждения – водоохлаждающими шлангами. Охлаждение осуществляется обычной проточной водой с давлением на выходе 2–5 атм. И расходом не более 10 л/мин. При отсутствии воды может использоваться автономная

емкость жидкостного охлаждения, обеспечивающая замкнутый круг циркуляции охлаждающей жидкости.



a



б

Рисунок 2.1 – Установка УВГ 2-25;

a – индукционный генератор ГНОМ-25М1; *б* – выносной нагрузочный контур

Конструкция индуктора представляет собой четырехвитковую спираль с ферритовым концентратором внутри (рис. 2.2).

Вертикальное и горизонтальное перемещение детали относительно индуктора осуществляется при помощи стола (рис. 2.3). Вертикальное перемещение стола обеспечивается при помощи рукоятки 13 и ходового винта 10, которые приводят в действие рычаги 3 и 4, обеспечивая перемещение в вертикальном направлении среднего стола 1. На средний стол, крепится ходовая гайка 8 с ползуном 7. Ползун приводится в действие при помощи рукоятки 12 и ходового винта 11, перемещая при этом, в горизонтальном направлении, стол 6.

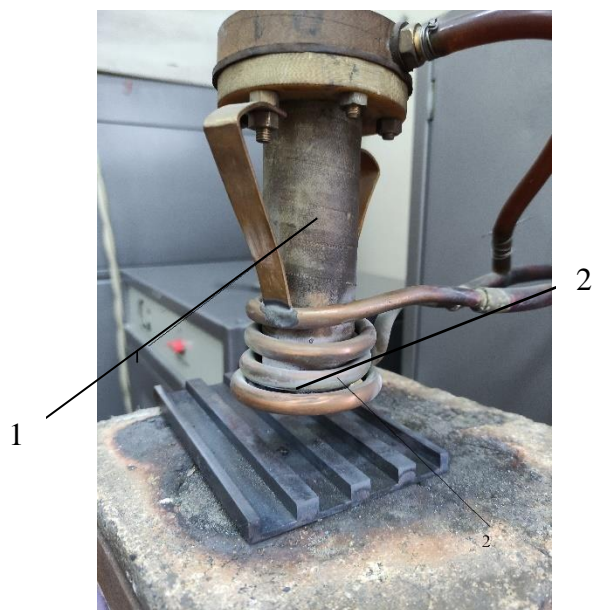


Рисунок 2.2 – Витковый индуктор с ферритным сердечником:
 1 – водоохлаждаемая кварцевая колба с ферритным сердечником;
 2 – витковый индуктор.

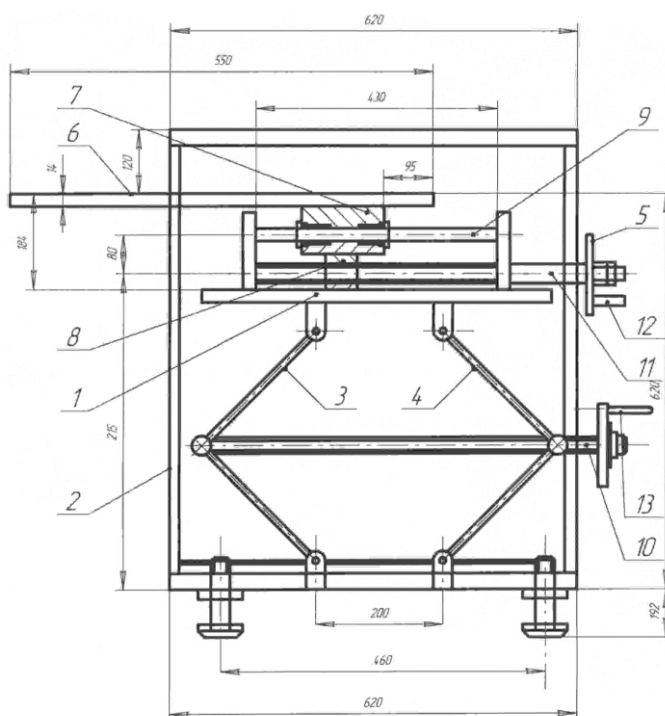


Рисунок 2.3 – Стол для перемещения детали
 1 – стол средний; 2 – каркас; 3, 4 – рычаг; 5 – колонка; 6 – стол верхний; 7 – ползун;
 8 – гайка ходовая; 9 – направляющая; 10, 11 – винт ходовой; 12, 13- рукоятка.

Шихта наносится на поверхность компонента основы в виде порошка равномерным слоем при помощи дозатора, либо выравниванием при помощи лопатки до нужной высоты. Отсутствие ферромагнитных свойств применяемого металлического порошка позволяет несколько упростить технологический процесс получения слоистого композиционного материала, так как нет необходимости предварительного брикетирования порошка с целью устранения электромагнитного взаимодействия порошинок с индуктором.

2.2 Технология получения СКМ на установке УВГ 2 – 25

1 Подготовка шихтовых материалов. На данном этапе производится составление шихтового материала в строгой пропорции, при помощи весового или дозирующего оборудования. Затем осуществлялось смешивание компонентов шихты в специальных смесителях пальцевого типа, либо вручную (при получении экспериментальных образцов), для достижения высокой степени однородности. Полученная шихта обладает парамагнитными свойствами, производить брикетирование полученного наплавочного материала или его защиту от электромагнитных полей индуктора не обязательно.

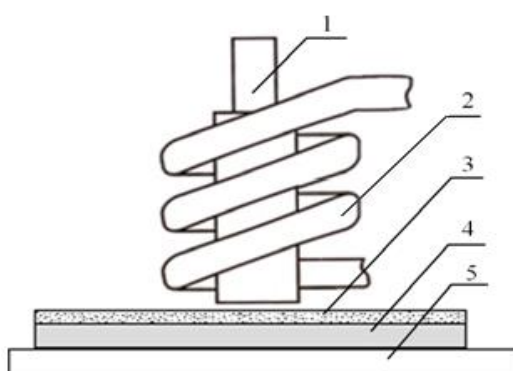
2 Подготовка компонента основы. Компонент основы слоистого композиционного материала представляет собой пластины размером $100 \times 200 \times 10$ мм. С целью определения влияния качества подготовленной поверхности, на формирование границы раздела, были использованы пластины с различной подготовкой:

- механически не обработанные, с наличием ржавчины и других загрязнений;
- механически обработанные, без наличия загрязнений, жировых пленок и ржавчины;
- механически обработанные на фрезерном станке с рельефной поверхностью шагом $3,0 \times 1,0$ и $4,0 \times 1,5$ мм.

3 Подбор флюса. Для получения слоистого композиционного материала с бездефектной границей раздела и максимальным сохранением химического состава исходного металлического порошка, необходимо правильно определить состав и количество флюса, добавляемого в шихту. Получение экспериментальных образцов с содержанием флюса в количестве 15 %, 20 %, 25 % и 30 % позволило правильно определить это соотношение.

4 Метод последовательного нанесения слоев. После получения первого слоя и удаления шлаковой корки, наносится второй слой, аналогичного состава.

5 Высокоэнергетический индукционный нагрев. На поверхность пластины компонента основы (рис. 2.4), наносится слой шихты при помощи дозатора или вручную, с последующим выравниванием при помощи лопатки, толщиной 1,5–10,0 мм.



а

б

1 – ферритный сердечник; 2 – витковый индуктор; 3 – шихта;
4 – компонент основы; 5 – стол

Рисунок 2.4 – Схема получения слоистого композиционного материала на установке УВГ 2 – 25: *а* – схема; *б* – общий вид

Соотношение толщины получаемого слоя к толщине слоя шихты составляет 1 : 2. После нанесения шихтового материала, образец подводился под индуктор таким образом, чтобы зазор между плоскостью индуктора и

шихтой составлял не более 3–5 мм и включался высокоэнергетический индукционный нагрев.

Скорость перемещения образца слоистого композиционного материала относительно индуктора варьировалась от 5 до 8 м/ч.

Для проведения исследований были отобраны образцы, полученные при различных технологических режимах, различной толщины полученного слоя, а также с разным качеством подготовки поверхности компонента основы.

3 Методы проведения исследований

Полученные образцы слоистого композиционного материала, для проведения дальнейших исследований, при необходимости, разрезались до нужного размера при помощи армированного абразивного круга.

Исследование границы раздела, химического и фазового состава, механических и эксплуатационных свойств слоистого композиционного материала, проводилось с применением следующих методик и научного оборудования:

- металлографические – методом оптической микроскопии с применением светового микроскопа "*Carl Zeiss Axio Vision*", оснащенного устройством визуализации изображения, электронной микроскопии с применением растровых электронных микроскопов "*HITACHI TM-1000*", РЭМ-100У и *JEOL JSM 7001F*;

- энергодисперсионный и химический анализ в растровом электронном микроскопе *JEOL JSM 7001F*, оснащенный энергодисперсионным спектрометром фирмы *Oxford Instruments*;

- анализ твердости на приборе ТК-2М по методу Роквелла в соответствии с ГОСТ 2999-75;

- анализ микротвердости на приборе ПМТ-3М в соответствии с ГОСТ 9450-76.

3.1 Металлографические исследования

Проведение металлографических исследований позволяет установить взаимосвязь между структурно-фазовым составом, механическими и эксплуатационными свойствами материалов.

Для проведения металлографических исследований из отобранных образцов были приготовлены шлифы. Наибольший интерес при исследовании полученных образцов представляет микроструктура слоя, полученная в условиях высокоэнергетического индукционного нагрева и граница раздела слоистого композиционного материала. В связи с этим плоскость шлифовки осуществлялась перпендикулярно образцу (рис. 3.1).

Шлифовку производили на шлифовальной машине по стандартной методике, при этом во избежание «заваливания» образцы зажимались в струбцину.

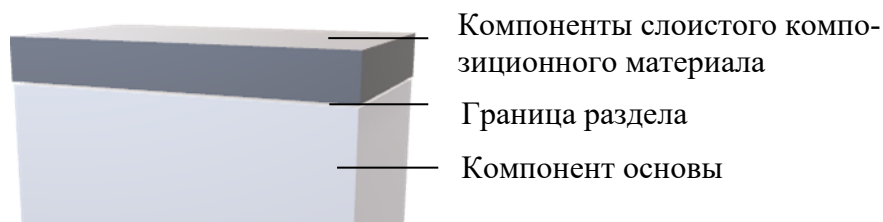


Рисунок 3.1 – Модель слоистого композиционного материала

Окончательно для полного выравнивания и сглаживания плоскости шлифа производили полировку. В качестве полирующего материала применяли минеральные порошки в виде водных суспензий с окончательной полировкой на Ватмановской бумаге.

Выявление структурных составляющих после шлифования и полировки производили путем травления полученных микрошлифов. Травление осуществлялось по стандартной методике. Выявление микрострукту-

ры компонента основы производилось с использованием одно-молярного раствора HNO_3 в $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Для выявления микроструктуры полученного слоя использовали свежеприготовленную смесь (реактив) определённого состава (табл. 3.1).

Условия травления: продолжительность от 3 до 5 мин., с нагревом до температуры 50–60 °С.

Исследования проводили методом оптической микроскопии с применением светового микроскопа «*Carl Zeiss Axio Vision*», с помощью фотокамеры, встроенной в микроскоп. По полученным изображениям микроструктуры, увеличение составляло от 500 до 5000 раз, проводилось исследование по изменению размеров и формы присутствующих фаз и структур в зависимости от технологических режимов.

Таблица 3.1 – Состав реактива

Химический реактив	Объём, мл
Серная кислота	8,5
Азотная кислота	5,5
Вода	до 100

3.2 Определение твердости и микротвердости

Одним из основных критериев оценки износостойкости является твердость. Измерение твердости проводили по методу Роквелла – ГОСТ 2999–75 на приборе ТК -2, шкала «С». При измерении твердости по этому методу в образец вдавливается алмазный наконечник, имеющий форму конуса при нагрузке 150 кг, с выдержкой 4 секунды.

Измерения микротвердости проводили на приборе ПМТ-3, в соответствии с ГОСТ 9450–91. Суть испытания заключается в нанесении на испытываемую поверхность образца отпечатка под действием статической

нагрузки 200 г, приложенной к четырехгранной алмазной пирамиде в течении 3 с. После снятия нагрузки измеряется длина каждой диагонали полученного отпечатка и подсчитывается число твердости, согласно имеющейся методики. Шаг измерения микротвердости составлял 100–150 мкм.

4 Экспериментальные исследования

После получения экспериментальных образцов было проведено их комплексное исследование, для наиболее полного представления о влиянии режимов и параметров высокоэнергетического индукционного нагрева на формирование структурно-фазового состава и свойств слоистого композиционного материала. Исследования образцов проводились в соответствии с методиками, представленными в главе 3.

4.1 Металлографические исследования

Проведение металлографических исследований полученных образцов слоистого композиционного материала позволяет определить влияние технологических режимов и толщины получаемого слоя на формирование структурно-фазового состава. Наибольший интерес представляет размер и количественное соотношение фаз, которые характеризуют влияние технологических режимов.

Исследование границы раздела слоистого композиционного материала металлографическим методом позволяет определить влияние времени высокоэнергетического индукционного нагрева и качества подготовки поверхности компонента основы на ее формирование.

4.1.1 Влияние подготовки поверхности компонента основы

Наличие на поверхности компонента основы СКМ 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, так и в объеме металла полученного слоя (рис 4.1).

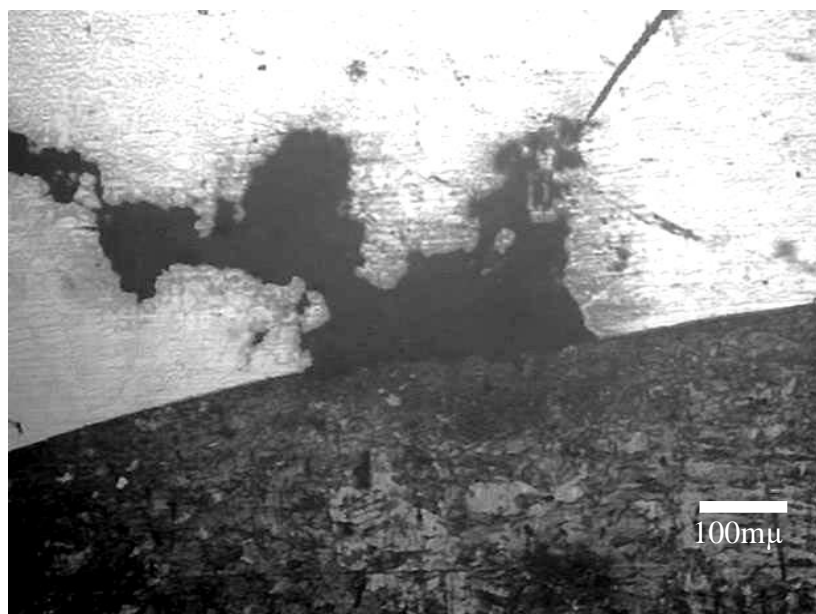


Рисунок 4.1 – Пора на границе раздела слоистого композиционного материала

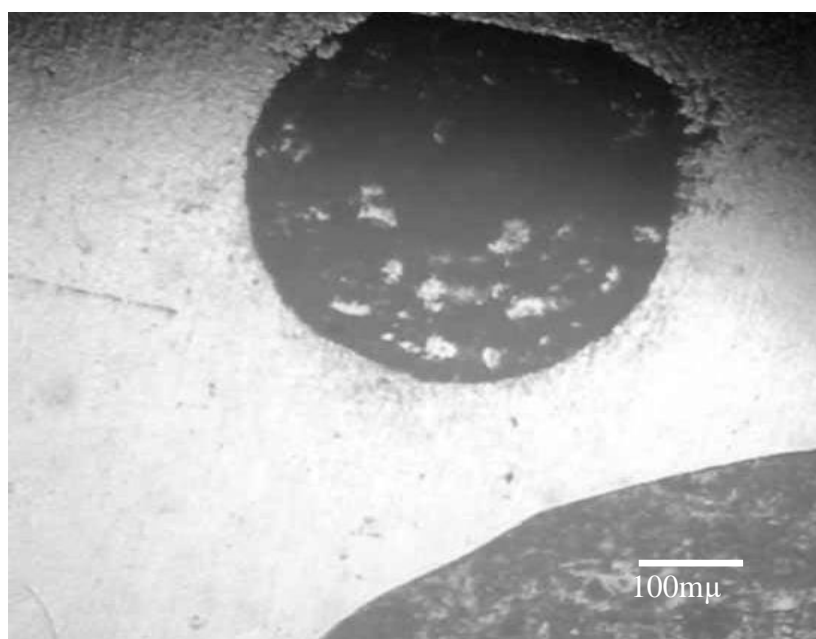
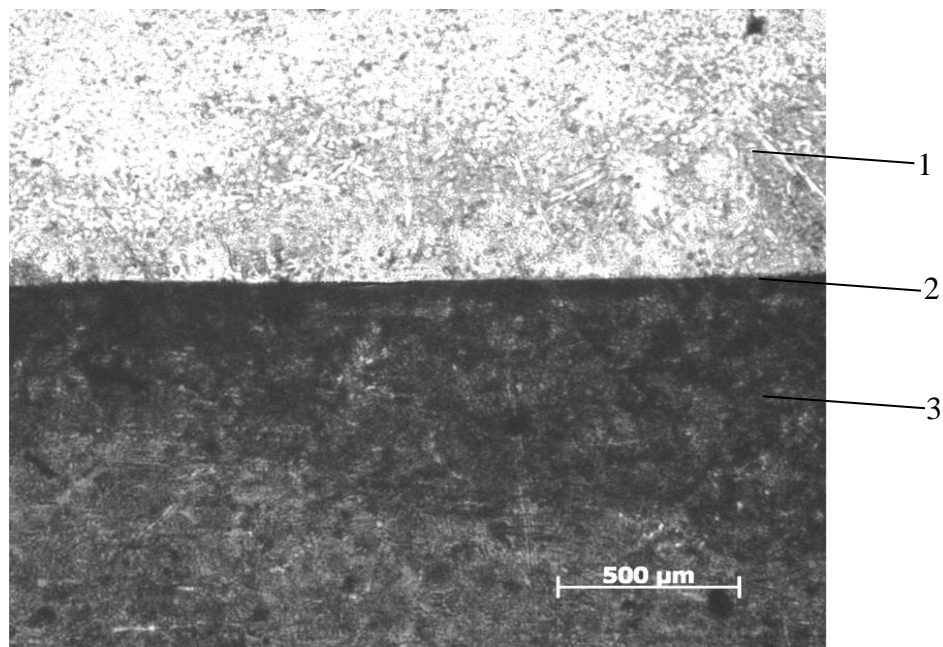


Рисунок 4.2 – Газовый пузырь объеме полученного слоя

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. В данном случае граница раздела приобретает четко выраженную линию без наличия дефектов подобного рода (рис. 4.4).



1 – наплавляемый материал, 2 – граница раздела, 3 – компонент основы

Рисунок 4.4 – Микроструктура границы раздела после обработки поверхности компонента основы

Предварительная механическая обработка представляла собой подготовку полученного образца путём «выравнивания» поверхности с помощью фрезерного станка и абразивного шлифования с постепенно возрастающей дисперсностью применяемого абразива. Это позволяет избавиться от окислов и загрязнений на поверхности компонента основы.

4.1.2 Влияние технологических режимов на формирование границы раздела слоистого композиционного материала

Скорость перемещения получаемого СКМ относительно индуктора, определяет продолжительность воздействия высокоэнергетического индукционного нагрева.

Получение слоистого композиционного материала со скоростью 8–9 м/час, сопровождается образованием дефектных участков на границе раздела слоистого композиционного материала (рис. 4.5). Образование подобно рода дефектов обусловлено не достаточным временем жидко-твердофазного взаимодействия компонентов, что препятствует адгезии компонентов и протеканию диффузионных процессов

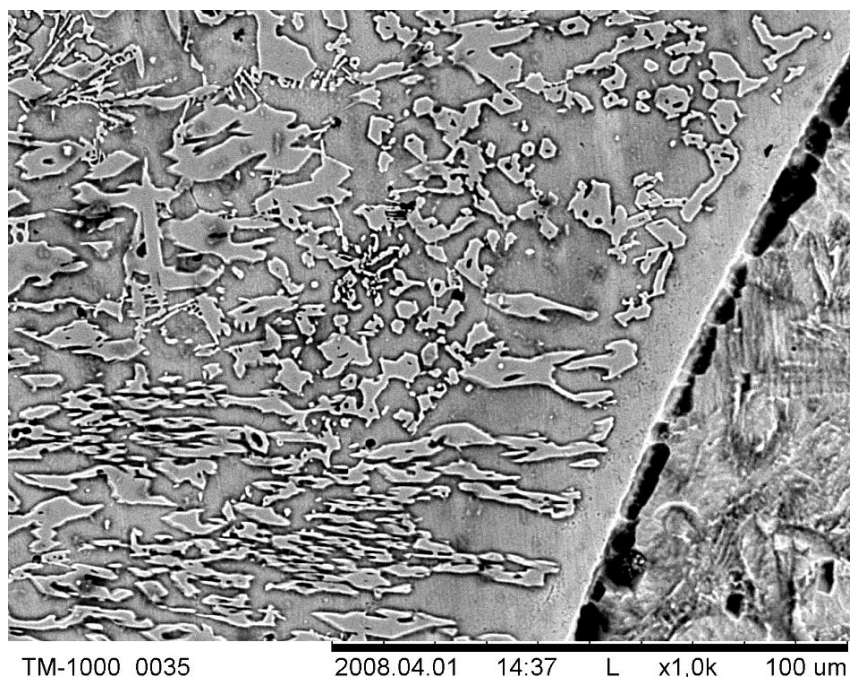
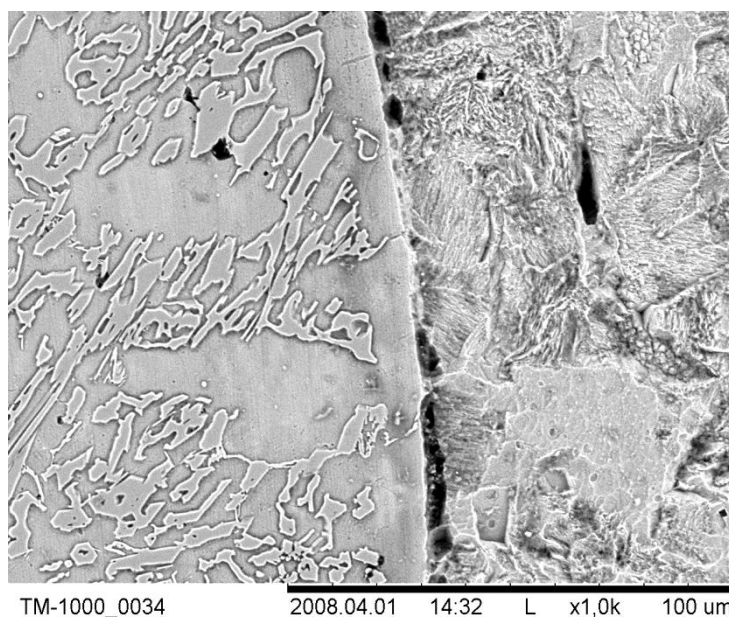


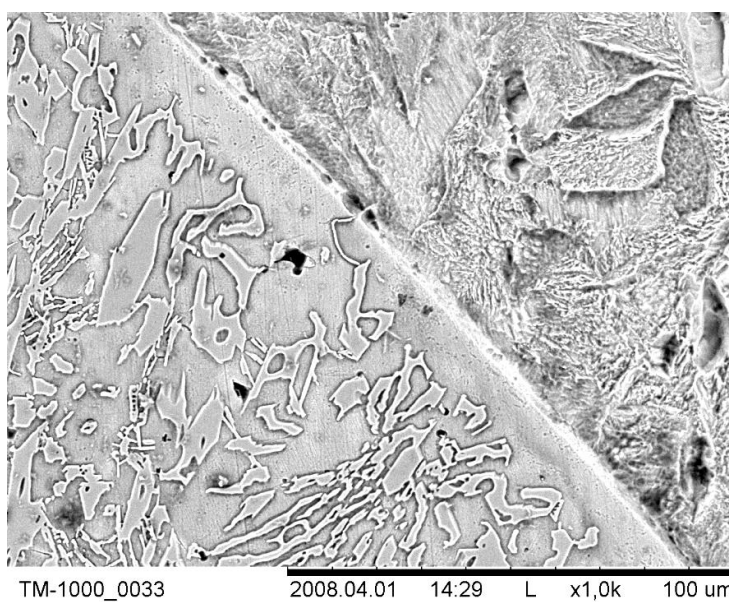
Рисунок 4.5 – Дефекты на границе раздела, при скорости наплавки 8-9 м/час

Снижение скорости до 7 м/час, позволят уменьшить протяженность дефектных участков границы раздела (рис. 4.6 а, б). Из данных снимков можно наблюдать уменьшение длины таких участков (рис. 4.6 а), а в неко-

торых местах дефекты границы раздела выражены в виде совокупности отдельных пор (рис. 4.6 б).



a



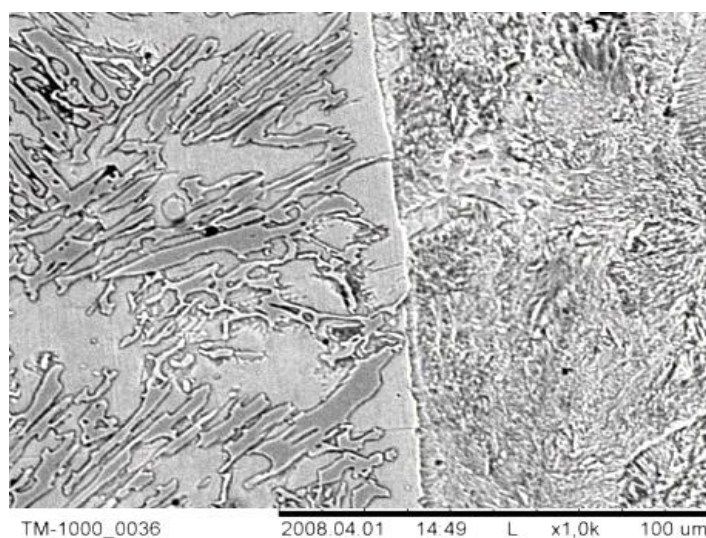
б

Рисунок 4.6 – Дефекты на границе раздела, при скорости наплавки 7м/час:

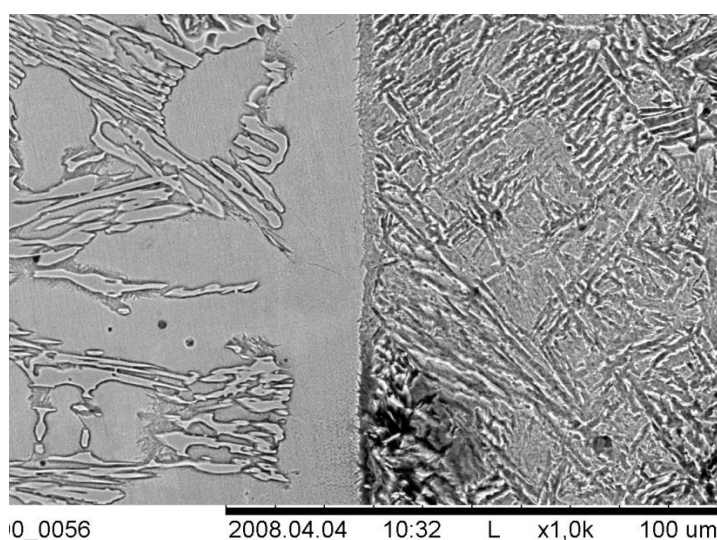
a – дефектные участки; *б* – образование пор

При получении слоистого композиционного материала со скоростью 6,5 м/час, граница раздела практически вырождена в линию, без образования

дефектных участков, а образующаяся карбидная фаза имеет дисперсное строение (рис. 4.7, *а*). При снижении скорости до 5 м/час наблюдается некоторое увеличение толщины границы раздела (рис. 4.7, *б*) и обеднение участка полученного слоя, приближенного к границе раздела, карбидной фазой.



а



б

Рисунок 4.7 – Граница раздела композиционного материала (микроструктура полученного слоя слева)

а – со скоростью 6,5 м/час; *б* – со скоростью 5 м/час

Такая разница в структуре очевидна, и связана с увеличением времени воздействия высокоэнергетического индукционного нагрева, что приводит к более сильному прогреву компонента основы и снижению скорости охлаждения.

4.1.3 Влияние технологических режимов и толщины слоя на формирование структурно-фазового состава

Закономерности формирования структурно-фазового состава полученного слоя определяются скоростями нагрева и охлаждения. Проведенные металлографические исследования показали влияние скорости формирования слоя на дисперсность и распределение фаз в структуре полученного слоя. Увеличение скорости до 7,5 м/ч, способствует формированию высокодисперсной структуры полученного слоя (рис. 4.8).

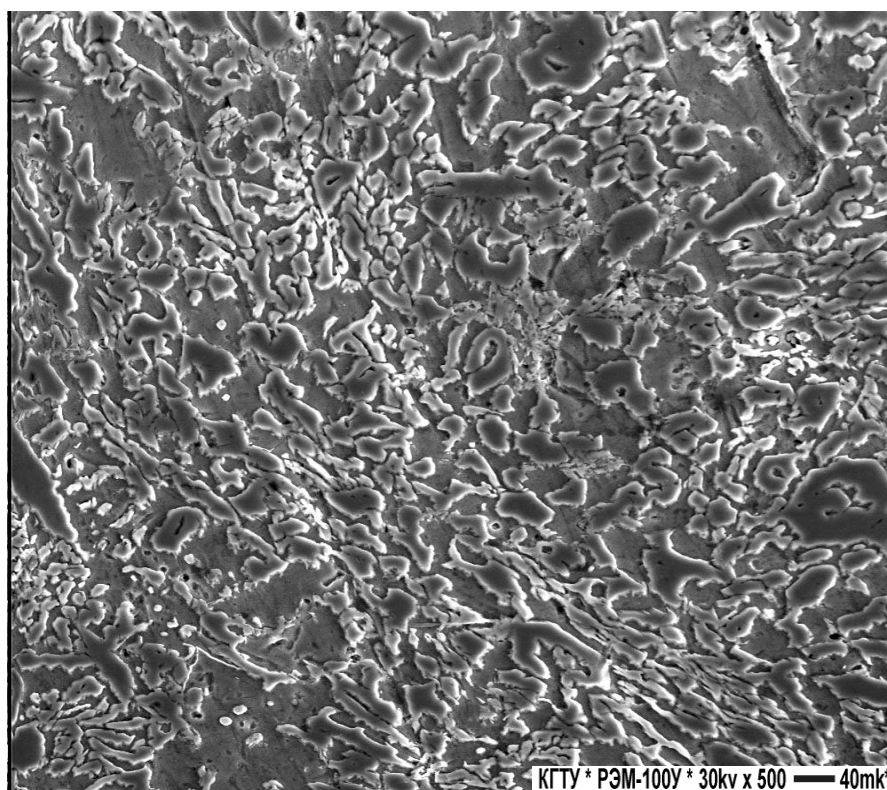


Рисунок 4.8 – Микроструктура полученного слоя, при скорости 7,5 м/ч

Образование такой структуры характерно для высоких скоростей охлаждения и реализации процесса с частичным растворением карбидов в жидкой фазе.

Высокодисперсное строение структуры повышает износостойкость при абразивном износе. Полученная микроструктура имеет строение близкое к структуре исходного металлического порошка.

Снижение скорости формирования слоя до 5 м/ч, приводит к большему прогреву компонента основы и полному растворению карбидов в жидкой фазе, скорость охлаждения снижается. Формирующаяся структура характеризуется увеличением метастабильного аустенита и огрублением карбидной фазы (рис. 4.9). Применение таких режимов для получения слоистых композиционных материалов, способствует повышению износостойкости при условии ударно-абразивного износа.

Повышение толщины слоя, как и в случае снижения скорости, приводит к увеличению времени воздействия высокоэнергетического индукционного нагрева, полному растворению карбидов в жидкой фазе и более сильному прогреву компонента основы. После прохождения индуктором зоны плавления металлического порошка, охлаждение идет с меньшими скоростями, что приводит к увеличению размера карбидной фазы (рис. 4.10). При условии частичного растворения карбидов в жидкой фазе, за счет уменьшения толщины слоя, формируется высокодисперсная структура (рис. 4.11), которая свойственна частицам металлического порошка Сормайт.

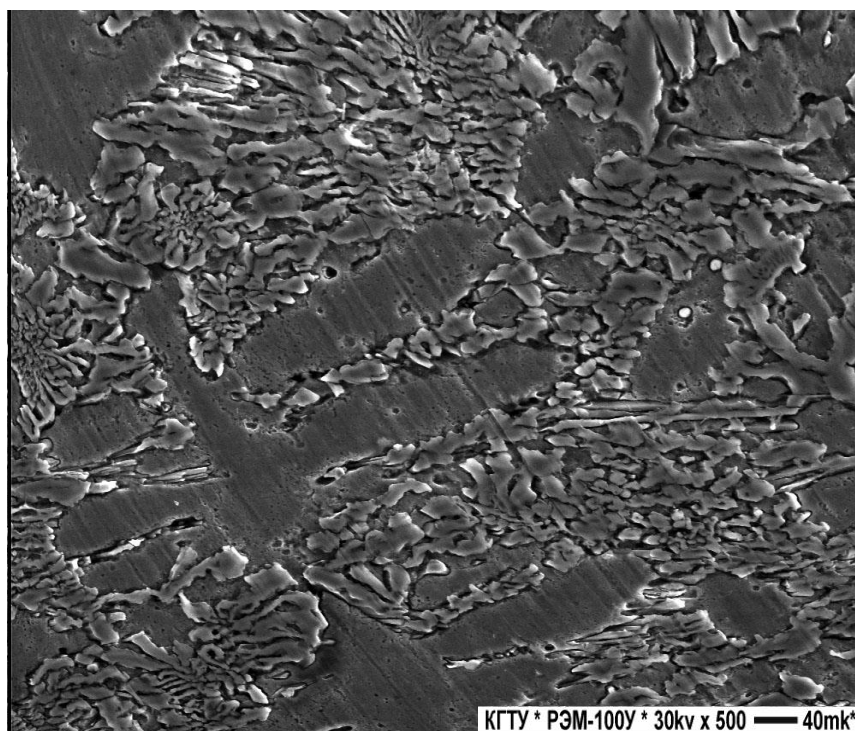


Рисунок 4.9 – Микроструктура полученного слоя, при скорости 5 м/ч

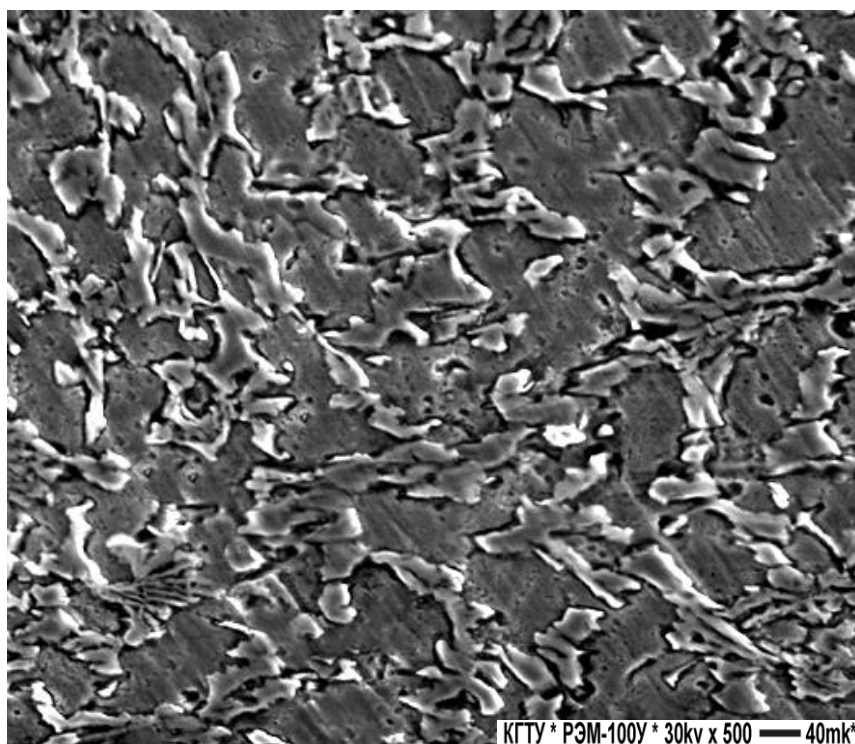


Рисунок 4.10 – Структура слоя толщиной 4 мм.
Расстояние от поверхности 0,5 мм.

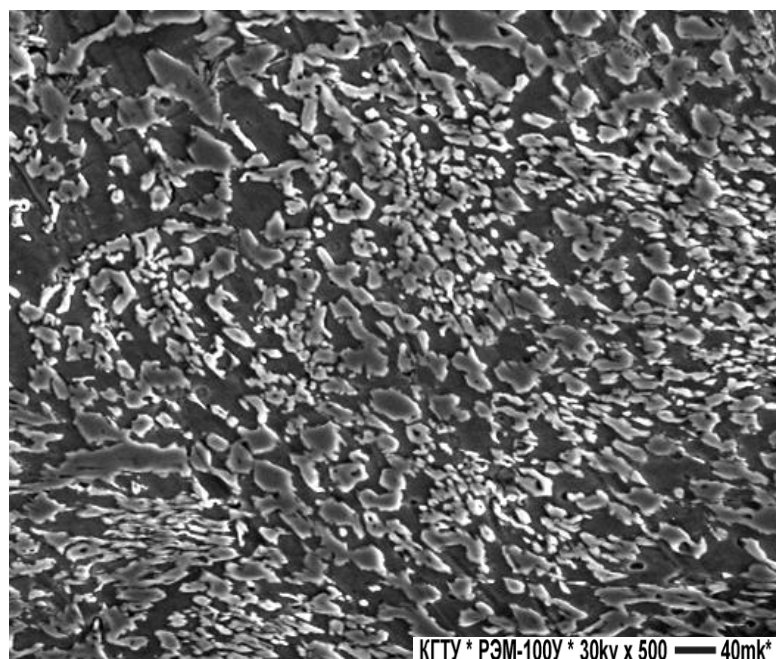
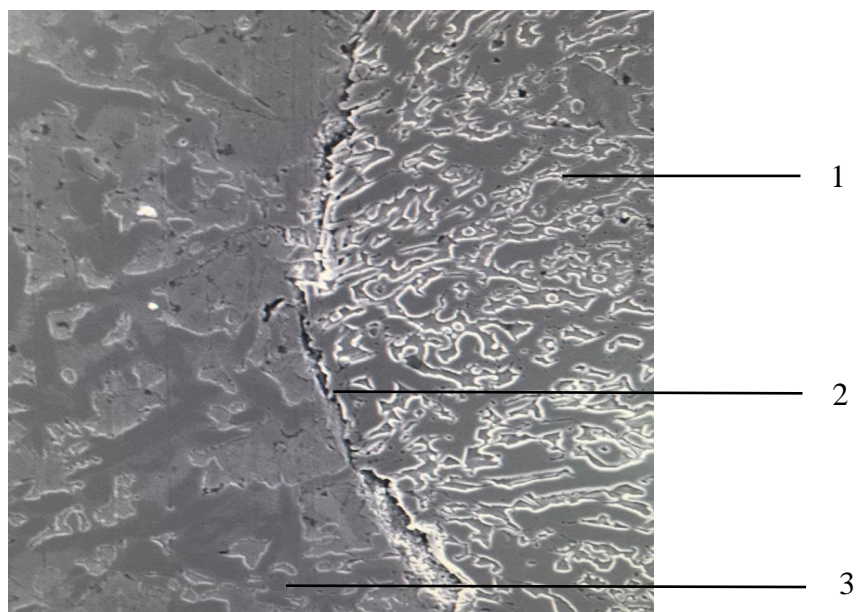


Рисунок 4.11 – Структура слоя толщиной 2 мм.
Расстояние от поверхности 0,5 мм

4.1.4 Влияние технологических режимов на кинетику взаимодействия частиц наплавляемой шихты

Условия взаимодействия частиц наплавляемого материала определяются, в первую очередь, скоростями нагрева и охлаждения. Проведенные металлографические исследования позволяют определить кинетику взаимодействия частиц металлического порошка наплавляемой шихты состава № 2, состоящей из 50 % порошка Сормайт и 50 % порошка ПР-Н73Х16СЗРЗ.

Получение СКМ со скоростью 8–9 м/ч приводит к формированию в структуре наплавленного слоя нерастворенных частиц порошка Сормайт на фоне порошка ПР-Н73Х16СЗРЗ (рис. 4.12). Это свидетельствует о том, что данная скорость индукционной наплавки является завышенной, так как при таком режиме отсутствует взаимодействие между расплавленной частью порошка ПР-Н73Х16СЗРЗ и частицами порошка Сормайт, что выражено в зону отсутствия взаимодействия.



1 – порошок Сормайт, 2 – зона отсутствия взаимодействия,
3 – порошок ПР-N73X16C3P3

Рисунок 4.12 – Микроструктура дефектного участка по границе взаимодействия частиц наплавляемой шихты, при скорости 8–9 м/час, × 750

Снижение скорости формирования слоя до 7,5 м/ч, приводит к частичному растворению порошка Сормайт (рис 4.13)

Зона частичного
растворения ча-
стицы порошка
Сормайт

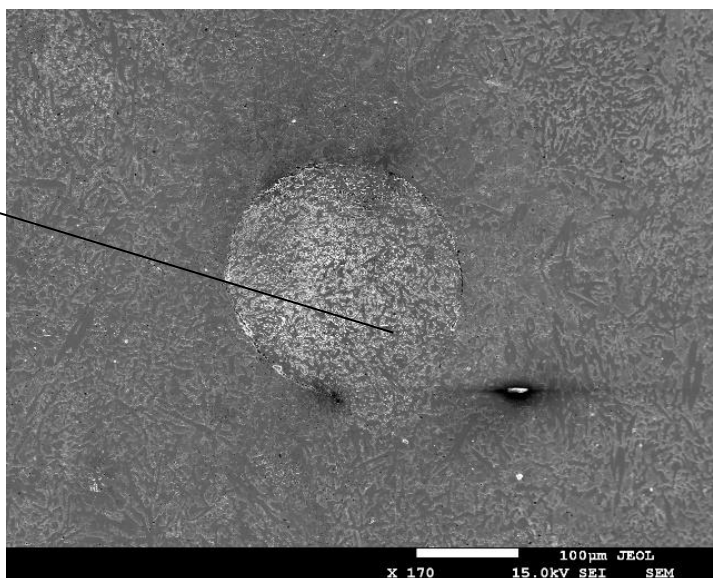
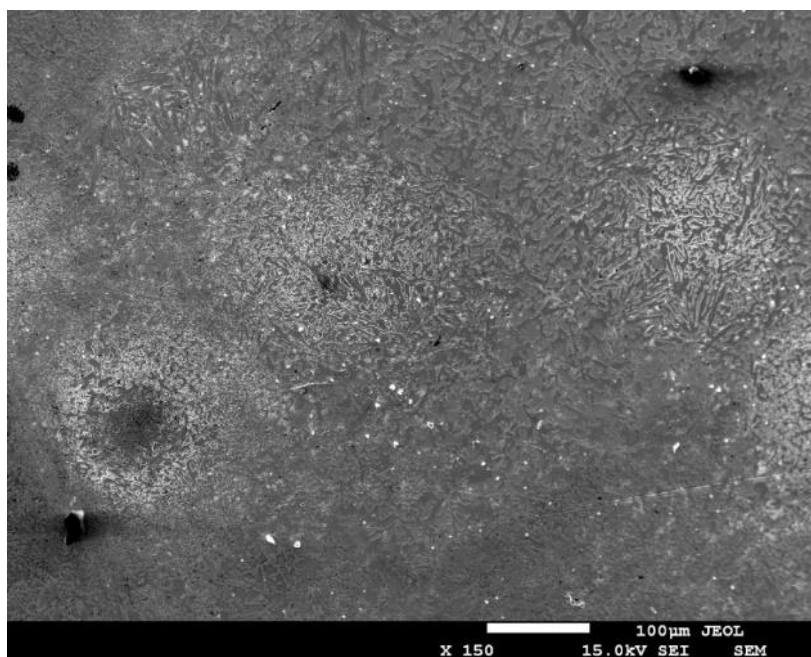
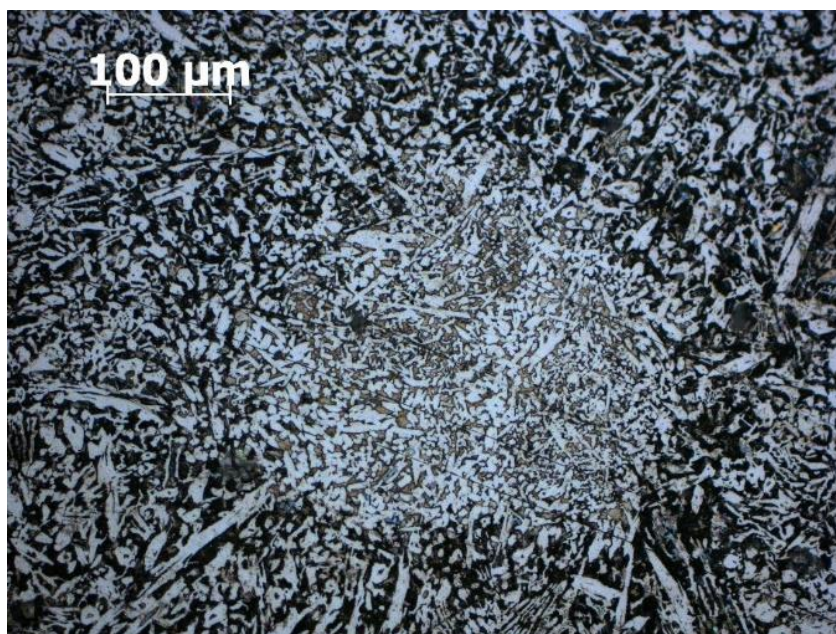


Рисунок 4.13 – Микроструктура взаимодействия частиц наплавленной шихты, при скорости 7,5 м/ч

Получение СКМ со скоростью формирования слоя 5–6 м/ч способствует частичному растворению порошка Сормайт, что отчетливо наблюдается на рисунке 4.14. При такой скорости наплавки формируется бездефектная граница взаимодействия частиц наплавляемой шихты.



a



б

Рисунок 4.14 – Микроструктуры частиц наплавленной шихты с частичным растворением, при скорости 5-6 м/ч: *a* – $\times 150$; *б* – $\times 300$

Механизм взаимодействия частиц наплавляемой шихты обусловлен тем, что плавление наплавляемой шихты начинается именно с плавления металлического порошка ПР-Н73Х16С3Р3, так как данный порошок является самофлюсующимся, чего не скажешь о порошке Сормайт. Поэтому отдельный флюс в составе шихты отсутствует. Следовательно, плавление порошка Сормайт без плавления ПР-Н73Х16С3Р3 невозможно, и именно данный факт позволяет частицам порошка Сормайт при определённых технологических режимах лишь оплавляться, сохраняя свою структуру и свойства.

4.2 Энергодисперсионный и химический анализ

Энергодисперсионный анализ СКМ полученного с применением шихты, в составе которой 50 % порошка Сормайт и 50 % ПР-Н73Х16С3Р3, дает возможность проследить изменение химического состава наплавленного слоя в плоскости поперечного сечения, что позволяет определить кинетику взаимодействия компонентов наплавляемой шихты.

На рисунке 4.15 представлена линия, по которой осуществлялось проведение энергодисперсионного анализа. Расстояние между спектрами измерения составляет 1 мкм. Результаты химического состава исследуемых спектров приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Химический состав исследуемых спектров

№ п/п спектра	Количество легирующих элементов, %						
	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni
1	23.42		0.58	41.44		25.96	42.01
2	15.63	6.95		4.29		31.12	42.02
3	11.45	7.62		4.00	0.82	29.03	44.08
4	30.19	3.36	0.49	23.98		22.35	35.63
5	12.34	3.40		14.62		39.75	29.89
6	26.39	4.28		22.07		23.64	26.62
7	29.98	1.78	0.76	28.19		25.17	22.13
8	27.03		0.49	37.18		29.68	20.62

9	32.41		1.01	38.32		26.91	19.35
10	32.19	3.02		17.89		29.63	17.27
11	34.94	3.72		6.93		32.04	15.38
12	34.09	1.00	0.92	27.54		30.80	14.65
13	25.56	2.88		14.59		46.91	13.06
14	28.40		0.98	32.14	1.46	37.02	12.38
15	22.86		0.91	35.38		38.98	11.86
16	38.91		1.03	33.72		26.34	9.22
17	27.42	3.61	0.79	20.53		45.78	6.88
18	27.28		1.29	33.73	1.51	36.18	1.22
19	27.60	5.46		6.41	0.89	54.76	0.87
20	16.96	5.64		8.65	1.01	64.20	2.67
21	37.35	1.85	0.57	24.90		34.12	8.22
22	37.35		1.01	34.59		27.05	14.21
23	34.88		1.06	33.49		29.70	19.87
24	32.40		0.92	30.15	1.13	33.18	20.22
25	6.27	3.35		15.06		43.99	24.32
26	31.48	6.01	1.23	35.64		25.64	28.96
27	8.98	5.52		6.20		42.50	31.80
28	8.09	6.08		5.85		40.79	35.19
29	34.55		1.11	36.24		27.11	39.27
30	9.73	4.95		10.72	1.04	32.94	40.62
31	33.64			38.99		26.02	42.31

Химический состав Сормайта характеризуется содержанием большого количества хрома (25–28 %), а порошок ПР-Н73Х16С3Р3 – содержанием никеля более 70 %. Такая разница химических составов дает возможность предположить механизм взаимодействия компонентов наплавляемой шихты. По результатам энергодисперсионного анализа был построен график изменения основных компонентов – хрома и никеля, по толщине наплавленного слоя.

Анализ изменения легирующих элементов позволяет наблюдать (см. рис. 4.15) снижение концентрации никеля в диапазоне 9–24 спектров. Концентрация хрома, в свою очередь, подверглась изменениям незначительно. Полученные результаты позволяют предположить, что взаимодействие частиц порошка Сормайт и ПР-Н73Х16С3Р3 путем частичного растворения Сормайта (см. раздел 4.1.4) в расплавленном порошке ПР-Н73Х16С3Р3 позволяют обоим компонентам шихты сохранить свои первоначальные структуру и свойства.

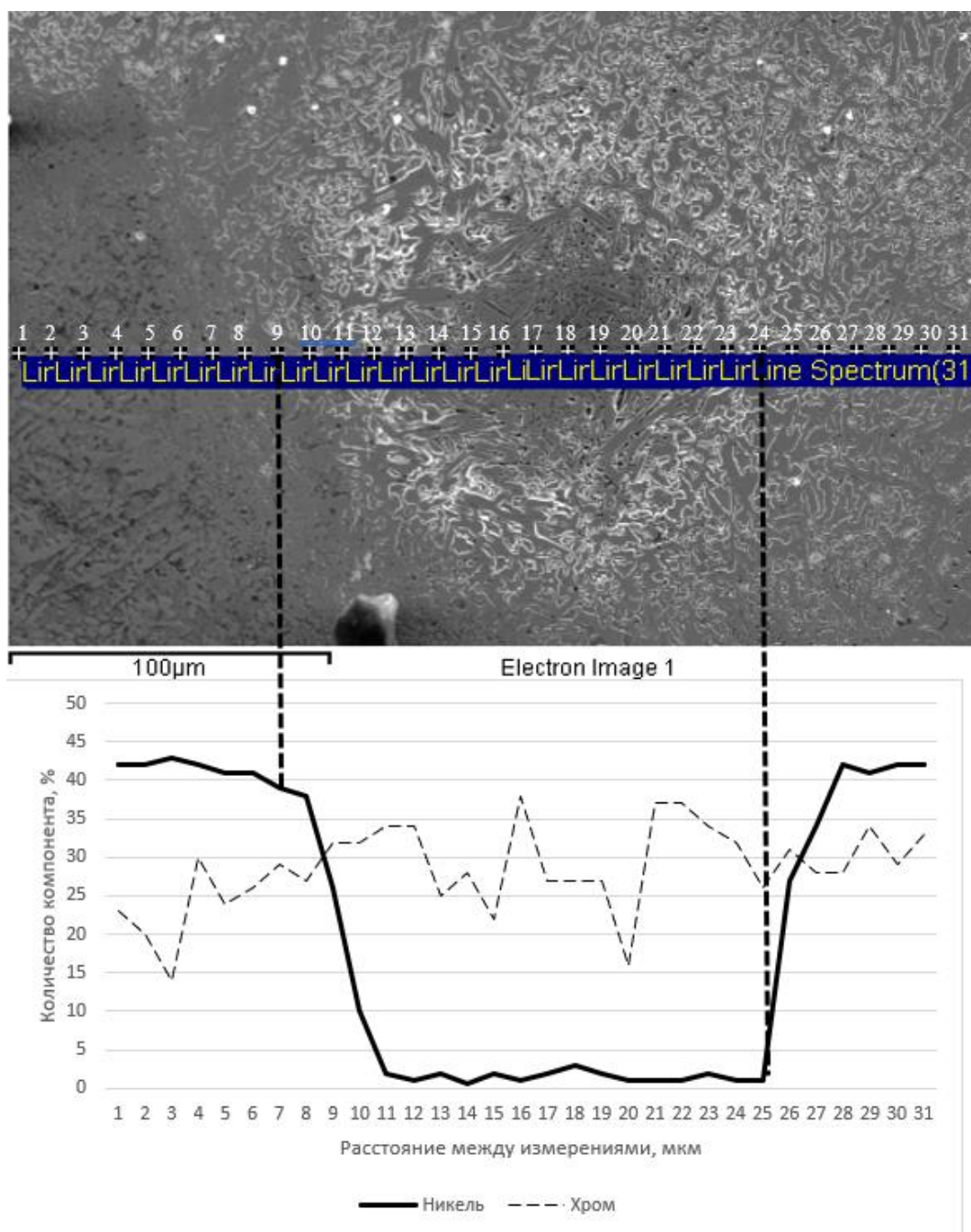


Рисунок 4.15 – Линия проведения энергодисперсионного анализа и изменение концентрации никеля с хромом в исследуемой зоне

При этом, особенность технологических режимов индукционной наплавки (скорость наплавки 5–6 м/час) позволяет обеспечить надёжное и прочное сцепление компонентов СКМ за счёт частичного растворения частиц порошка Сормайт и последующей поверхностной диффузией с частицами порошка ПР-Н73Х16С3Р3, так как он расплавляется раньше.

4.3 Анализ твердости и микротвердости

Для проведения анализа твердости и микротвердости были отобраны образцы слоистого композиционного материала, полученные в результате наплавки шихт разных составов:

- состав 1 – Порошок Сормайт (80 %), флюс АН-20 (20 %);
- состав 2 – Порошок Сормайт (50 %), порошок на никелевой основе ПР-Н73Х16С3Р3 (50 %);
- состав 3 – Порошок ПР-Н73Х16С3Р3 (100 %).

Применение анализа твердости обусловлено тем, что твердость является одним из возможных критериев оценки износостойкости в лабораторных условиях, которая в свою очередь является основным свойством, определяющим ресурс и условия эксплуатации рабочих органов горнодобывающей и строительной-дорожной техники.

Экспериментальные исследования показали, что твердость образца состава № 2 практически соответствует твердости порошка ПР-Н73Х16С3Р3, что представлено на рисунке 4.16.

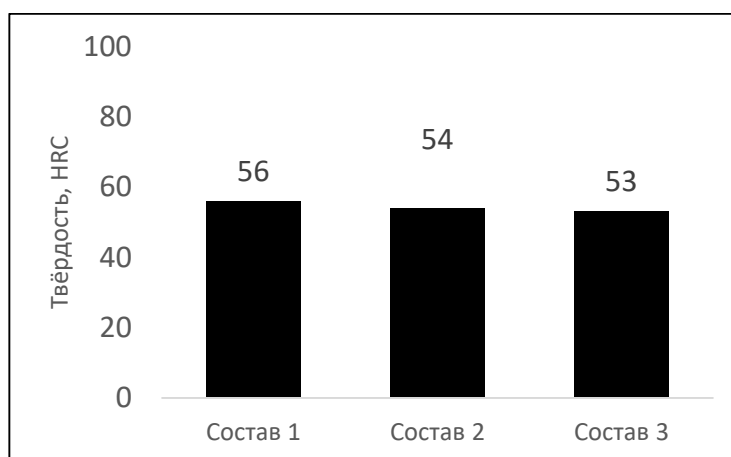


Рисунок 4.16 – Гистограмма изменения твердости образцов различного состава

Анализ микротвердости наплавленного слоя (рис. 4.17) показал, что микротвердость изменяется незначительно, что представлено на рисунке 4.18.

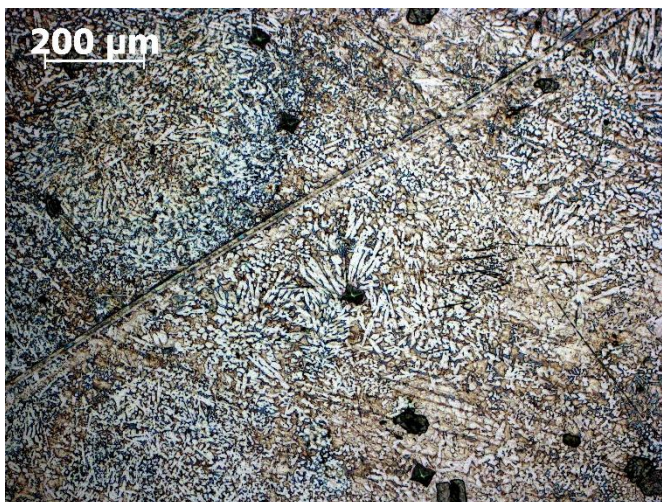


Рисунок 4.17 – Отпечатки алмазной пирамиды

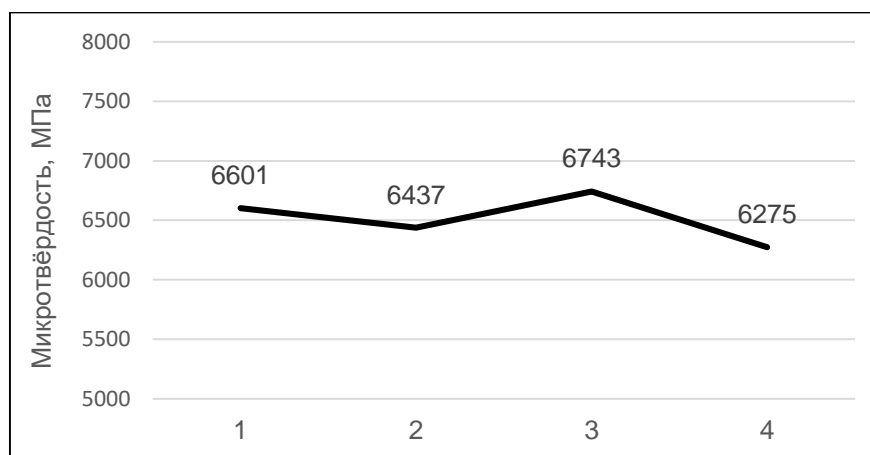


Рисунок 4.18 – График изменения микротвердости

Результаты исследования твердости и микротвердости доказывают, что параметры прочности наплавленных шихт находятся практически на одном уровне, следовательно, износостойкость образцов так же находится на одном уровне.

Выводы и результаты работы:

1 Получен износостойкий композиционный материал, путем нанесения расплава высоколегированного металлического порошка Сормайт на тугоплавком компоненте основы, выполненном из низколегированной конструкционной стали 10 с применением высокочастотного транзисторного генератора нового поколения УВГ 2-25.

2 Установлено влияние скорости наплавки и толщины наплавляемого слоя на формирование структуры наплавленного слоя и границы раздела СКМ. Увеличение скорости наплавки способствует повышению дисперсности структуры. Получение СКМ со скоростью более 8 м/ч приводит к формированию дефектной границы раздела.

3 Установлена кинетика взаимодействия частиц наплавляемой шихты, в составе которой 50 % порошка Сормайт и 50 % ПР-Н73Х16С3Р3, которая заключается в частичном растворении порошка Сормайт, что позволяет компонентам шихты сохранять свои структуру и свойства.

4 Практическое применение полученных результатов исследований состоит в том, что с их помощью можно определить технологические режимы, обеспечивающие следующее взаимодействие между частицами наплавляемой шихты состава № 2: частицы порошка Сормайт при индукционной наплавке не полностью растворяются в расплавленном порошке ПР-Н73Х16С3Р3, что обеспечивает сохранение химического состава и свойств обоих компонентов шихты. В таком случае, износостойкость компонентов шихты, ввиду высокой твердости наплавленного слоя, находится на высоком уровне, так же сохраняются свойства порошка ПР-Н73Х16С3Р3 – высокая жаропрочность и жаростойкость. Кроме того, порошок ПР-Н73Х16С3Р3 является достаточно дорогим материалом, а описанный метод наплавки шихты состава № 2 позволит снизить его расход, что влечет за собой очевидную и серьёзную экономическую выгоду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 extxe.com [Электронный ресурс] // Режим доступа:
<https://extxe.com/2834/naplavka-tokami-vysokoj-chastoty-indukcionnaja/>

2 www.booktech.ru[Электронный ресурс] // Режим доступа:
<https://www.booktech.ru/books/svarka/1944-indukcionnaya-naplavka-tvyordyh-splavov-1970-vn-tkachev.html>

4 Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Механическое изнашивание сталей и сплавов. - М.: Недра, 1996. - 364 с.

5 Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Казинцев Н.В., Алдырев Д.А. Индукционная наплавка твердых сплавов. - М. Машиностроение, 1970.-184 с.

6 yandex.ru [Электронный ресурс] // Режим доступа:
https://yandex.ru/patents/doc/RU2058866C1_19960427

7 rep.bntu.by[Электронный ресурс] // Режим доступа:
https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/54609/TEKHNOLOGICHESKIE_ASPEKTY_SOZDANIYA_KOMPOZICIONNYH_IZNOSOSTOJKIH_POKRYTIJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y

8 stanko-arena.ru[Электронный ресурс] // Режим доступа:
<https://stanko-arena.ru/article/indukcionnaya-naplavka.html>

9 Лившиц Л.С. Износостойкость наплавленного металла с различными принципами упрочнения в условиях ударно-абразивного воздействия. / Лившиц Л.С, Кушеков А.У., Левин СМ // Трение и износ.-Т.VII.- 1986.- №2.- с.365-371.

10 bstudy.net [Электронный ресурс] // Режим доступа:
https://bstudy.net/782008/tehnika/induktsionnaya_naplavka

11 элсит.рф[Электронный ресурс] // Режим доступа:
<https://элсит.рф/линии-нагрева/оборудование-для-индукционной-наплавки-клапанов-двигателей-внутреннего-сгорания>

12 www.freal.ru[Электронный ресурс] // Режим доступа:
<http://www.freal.ru/Site/pages/naplavka.html>

13 studopedia.ru[Электронный ресурс] // Режим доступа:
https://studopedia.ru/24_8064_tablitsa--psevdosplavi-dlya-induktsionnoy-naplavki.html

14 Косицина И.И. Влияние структуры на свойства белых хромистых чугунов / Косицина И.И., Сагарадзе В.В., Макаров А.В. // *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1996, №4.- с. 7-10.

10 helpiks.org[Электронный ресурс] // Режим доступа:
<https://helpiks.org/6-31894.html>

11 Рожкова Е.В. Влияние металлической основы на износостойкость хромистых чугунов / Рожкова Е.В. // *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1986, № 6. -с.30-32.

12 msd.com.ua[Электронный ресурс] // Режим доступа:
<https://msd.com.ua/zashhitnye-i-uprochnyayushhie-pokrytiya/vibrodogovaya-naplavka/>

13 Попов В.С. Влияние карбидов на абразивную износостойкость сплавов / Попов В.С., Нагорный П.Л.// *Литейное производство*, 1969 - №8.- с. 27-29.

14 www.tehnap.ru[Электронный ресурс] // Режим доступа:
<http://www.tehnap.ru/46-naplavka.html>

15 Камышина К.П. Износостойкие стали для различных условий эксплуатации / Камышина К.П., Петров Ю.Н., Смирнов Г.П.. // *Литейное производство*, 2000, №7.- с 4-5.

16 studwood.ru [Электронный ресурс] // Режим доступа:
https://studwood.ru/1492498/tovarovedenie/gazoplamnaya_naplavka

17 www.autowelding.ru[Электронный ресурс] // Режим доступа:
https://www.autowelding.ru/publ/professionalno_o_pajke/naplavka_sposoby_naplavki/termicheskie_sposoby_naplavki/31-1-0-480

18 Комаров О.С. Связь структуры со свойствами высокохромистых чугунов / Комаров О.С., Садовский В.М., Урбанович Н.И. // *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2003, №7.- с. 20-23.

19 ru.wikipedia.org[Электронный ресурс] // Режим доступа:
https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрошлаковая_наплавка

20 Львов П.Н. Основы абразивной износостойкости деталей строительных машин. - М.: Издательство литературы по строительству, 1970. -72 с.

21 Шубаев А., Мкртычан Я., Таран Ю. Н. О влиянии состава и структуры хромистых сплавов на абразивную стойкость / Шубаев А., Мкртычан Я., Таран Ю. Н. // Литейное производство, 1972, №3.- с. 28-29.

22 Гринберг Н.А. О влиянии легирования феррита и карбидной фазы на износостойкость сталей / Гринберг Н.А., Лившиц Л.С., Щербакова В.С // Металловедение и термическая обработка металлов, 1971, №9.- с.57-59.

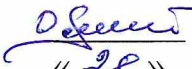
23 Ермолов Л.С, Кряжков В.М., Черкун В.Е. Основы надежности сельскохозяйственной техники. - М.: Колос, 1974. - 223 с.

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

Политехнический институт
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В. И. Темных
«28» 06 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Направление: 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Влияние технологических режимов на структурообразование композиционных материалов, полученных методом индукционной наплавки

Научный руководитель


(подпись, дата)


О. А. Масанский

Выпускник


(подпись, дата)

Ю. И. Калущкий

Нормоконтролер

25.06.21 
(подпись, дата)

Л. А. Свечникова

Красноярск 2021