

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Прогрессивные технологии обработки сплавов на основе магния, алюминия и
титана

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Двухдуговая наплавка купридов титана на титан

Обучающийся

Ю. А. Исаков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

Д-р. техн. наук, профессор А.И. Ковтунов

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

Тольятти 2024

Содержание

Введение.....	4
1 Свойства купридов титана и способы формирования покрытий на их основе	6
1.1 Диаграмма системы медь-титан	6
1.2 Анализ способов получения покрытий на основе	7
купридов титана	7
1.2.1 Диффузионная металлизация.....	8
1.2.2 Сварка взрывом	10
1.2.3 Аргонодуговая наплавка неплавящимся электродом	12
1.3 Выводы к разделу 1 и постановка задач исследования.....	13
2 Методика проведения исследований процессов наплавки купридов титана на титан	15
2.1 Методика исследования процессов аргонодуговой наплавки.....	15
неплавящимся электродом купридов титана легированных алюминием.....	15
2.2 Методика исследования процессов дуговой наплавки купридов титана с электродной проволокой системы Cu-Al.....	18
2.3 Методика исследования процессов двухдуговой наплавки купридов титана.....	19
2.4 Методика исследования структуры и химического состава наплавленных сплавов	20
2.5 Методика исследования твердости, жаростойкости и износостойкости наплавленных купридов титана.....	22
3 Исследование процессов аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом и свойств купридов титана,	25
3.1 Исследование процессов аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом купридов титана.....	25
3.2 Структура, химический и фазовый состав наплавленного металла	28

3.3 Исследование механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла	54
4 Исследование процессов аргодуговой наплавки купридов титана плавящимся электродом и свойств наплавленных покрытий	57
4.1 Аргодуговая наплавка с применением медной электродной проволоки CuAl8	57
4.1.1 Исследование процессов наплавки плавящимся электродом	57
4.1.2 Структура, химический и фазовый состав наплавленного металла ...	61
4.1.3 Исследование механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла.....	64
4.2 Аргодуговая наплавка с применением медно-марганцевой и титановой электродных проволок.....	68
4.2.1 Исследование процессов двухдуговой наплавки плавящимися электродами	68
4.2.2 Исследование механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла.....	71
Заключение	76
Список используемых источников.....	77

Введение

В настоящее время широко развивается химическая промышленность, продукция которой оказывает большое влияние на материал, из которого выполнены резервуары для хранения и перемещения и для изготовления, которых требуются материалы устойчивые перед агрессивными химическими средами.

Металлургическая промышленность так же набирает обороты в производительности изделий. Для высокой производительности необходимо использовать оснастку, которая будет выдерживать те условия эксплуатации, под которые они предназначены, но в большинстве случаев в производстве используют оснастку из основного металла, которая имеет высокую стоимость, металла и изготовления, поэтому одной из главных задач является повышение срока эксплуатации изделий, а так возможность ремонта оснастки в случае поломки.

Одним из способов решения, является поверхностного слоя, с легирующими элементами, повышающими эксплуатационные свойства изделий, на основной металл. Однако существующие аналоги данного способа имеют сложную конструкцию и дорогостоящее оборудование.

В последние десятилетия так же широко применяются интерметаллидные сплавы на основе купридов титана, которые отличаются уникальным комплексом эксплуатационных свойств: высокая жаростойкость, износостойкость, коррозионная стойкость. Повышенная устойчивость к агрессивным средам позволяет использование купридов титана в химической промышленности. Высокая жаростойкость и износостойкость позволяет применение купридов титана в двигателестроении в частности для нанесения поверхностного слоя на лопатки газотурбинных двигателей, а так же в литейном производстве для нанесения поверхностного слоя на кристаллизаторы.

В наше время встречаются несколько аналогов, которые позволяют наносить поверхностный слой, а именно: «самораспространяющийся высокотемпературный синтез» [19], «насыщение в порошковых средах» [23], «лазерная обработка» [15], «контактное эвтектическое плавление» [4], «электролитическое осаждение с последующей термической обработкой и электроискровое осаждение с лазерной обработкой» [18,21,29].

Представленные способы позволяют получить качественное интерметаллидное покрытие на основе купридов титана на поверхности изделий.

Однако выше представленные аналоги подразумевают, использование дорогостоящего оборудования, а так же высоких затрат при производстве готовых изделий.

После анализа недостатков известных аналогов, которые позволяют наносить поверхностный слой на основе купридов титана, были предложены способы аргонодуговой наплавки купридов титана, которые имеют отличия по возбуждению сварочной дуги, такие как: способ аргонодуговой наплавки не плавящимся электродом с применением присадочных проволок из алюминия и меди, способ аргонодуговой наплавки с применением электродной проволоки из меди и способ аргонодуговой наплавки с применением электродных проволок из медно-алюминиевой бронзы и титана.

Данные способы позволяют добиваться, необходимой геометрии наплавленных валиков, а также управлять химическим и фазовым составом наплавленных слоев.

Применение предложенных способов подразумевает использование сварочного оборудования, которое применяется в широких масштабах по всему миру и натребует высоких затрат при изготовлении.

Цель магистерской диссертации: Повышение эксплуатационных свойств деталей из титана и его сплавов путем исследования и разработки способов наплавки интерметаллидных сплавов на основе купридов титана.

1 Свойства купридов титана и способы формирования покрытий на их основе

1.1 Диаграмма системы медь-титан

На рисунке 1 представлена двухфазная диаграмма состояния, по которой определялись фазы наплавленных образцов имеющих содержание меди, превосходящее во много раз содержание алюминия на столько, что процентное содержание алюминия не влияло на свойства наплавленных валиков.

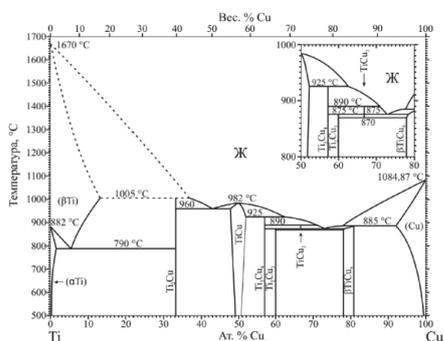


Рисунок 1 – Диаграмма состояния титан медь [25]

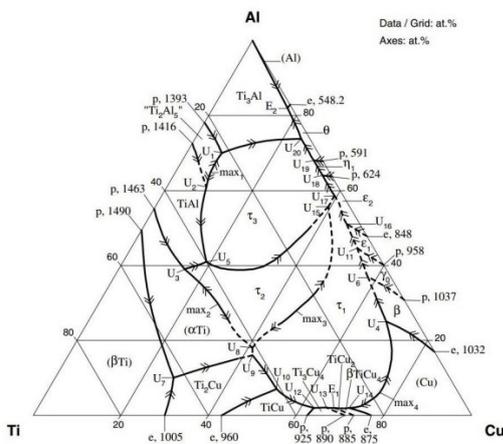


Рисунок 2 – Равновесная фазовая диаграмма тройной системы Al-Cu-Ti, построенная по точкам ликвидуса [26]

«В сплавах Ti-Cu-Al в интервале температур 1280-550 °С наблюдается 21 четырех фазное нонвариантное превращение с участием жидкой фазы и 2 четырехфазные реакции, включающие только твердые фазы» [8]

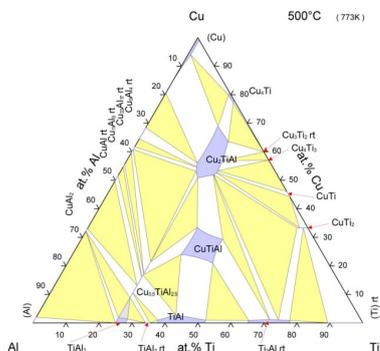


Рисунок 3 – Изотермический срез фазовой диаграммы состояния Ti-Cu-Al при температуре 500 °С [24]

1.2 Анализ способов получения покрытий на основе купридов титана

«Исходя из высокой разницы в температуре плавления и электропроводности титана и меди, получать интерметаллидные покрытия обычными газотермическими (расплавление и распыление под действием горючего газа и сжатого воздуха) и гальваническими (осаждение одного металла на поверхности другого с помощью электрического тока) методами довольно трудно» [27].

«Поэтому интерметаллидные покрытия на основе купридов титана получают преимущественно диффузионными методами, к которым относится: самораспространяющийся высокотемпературный синтез» [19], «насыщение в порошковых средах» [23], «лазерная обработка» [15], «контактное эвтектическое плавление» [14]. «Также существуют комбинированные методы, а именно: электролитическое осаждение с последующей термической обработкой и электроискровое осаждение с лазерной обработкой» [18,21,29].

1.2.1 Диффузионная металлизация

«Основу покрытий получаемых данным способом на поверхности медных изделий составляет порошковая смесь хлорида аммония, титана и оксида алюминия в пропорции 5, 7 и 89% соответственно. После нанесения порошковой смеси на поверхность медного изделия производится диффузионная металлизация при температуре 800°C в течение 6 часов» [23]. Микроструктура получаемого покрытия представлена (на рисунке 4).

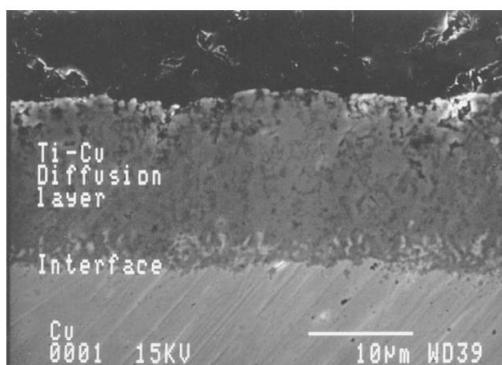


Рисунок 4 – Микроструктура Cu-Ti покрытия, полученного методом диффузионной металлизации

«Микротвердость полученного покрытия (рисунок 5) возрастает в направлении от подложки к поверхности покрытия. Такое повышение микротвердости обусловлено образованием интерметаллидов $TiCu_4$, $TiCu$ и Ti_2Cu , и твердого раствора» [22].

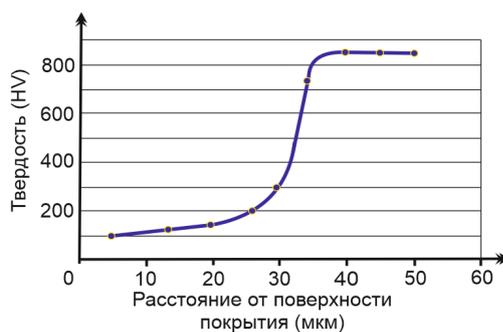


Рисунок 5 – Распределение значений твердости по сечению покрытия [15]

«Также отмечается значительное повышение износостойкости (рисунок 6) образцов с покрытием по сравнению с медными образцами.» [17].

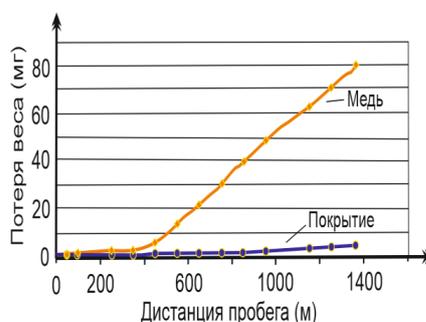
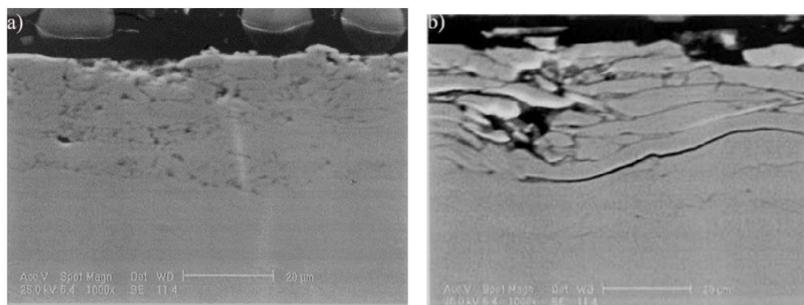


Рисунок 6 – Изменение веса образцов с покрытием и без покрытия при испытании на износостойкость [15]

«Несмотря на высокие показатели твердости, и износостойкости, данное покрытие обладает существенным недостатком – образование микротрещин в подповерхностном слое покрытия (рисунок 7, а). При длительном износе данные микротрещины распространяются по покрытию с последующим образованием обломков и расслоений покрытия (рисунок 7, б)» [17].



а)

б)

а) – микротрещины под поверхностью покрытия;

б) – образование обломков и расслоений при длительном износе покрытия

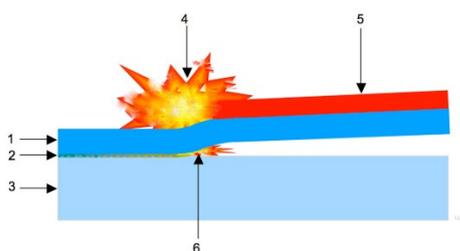
Рисунок 7 – Микроструктура подповерхностного слоя покрытия [15]

«В работе [28] для получения покрытий производился отжиг порошковой смеси Cu-Ti при различных температурах. Полученные экспериментальные результаты показали, что было получено интерметаллическое соединение TiCu со средним размером зерна 8 нм. и высоким значением твердости 634 HV. «Данное повышение твердости может быть связано с образованием большого количества фазы TiCu» [28].

«Таким образом, к недостаткам метода диффузионной металлизации можно отнести расслоение получаемого покрытия, высокую трудоемкость и низкую производительность» [28].

1.2.2 Сварка взрывом

«Сущность способа заключается в использовании энергии взрыва для создания неразъемного соединения, которое достигается за счет совместной деформации свариваемых деталей. Привариваемая деталь приводится в движение управляемым взрывом и соударяется с неподвижной деталью, образуя неразъемное соединение вследствие совместной пластической деформации (рисунок 10)» [17].



1 – подвижная деталь; 2 – сплавленная поверхность; 3 – неподвижная деталь;
4,5 – заряд взрывчатого вещества; 6 – кумулятивная струя

Рисунок 8 – Схема сварки взрывом

«В работе [17] формировали покрытие, нанося на стальную подложку при помощи сварки взрывом медные и титановые слои разной толщины (рисунок 9). На рисунке 11 представлены микроструктуры полученных покрытий» [17].

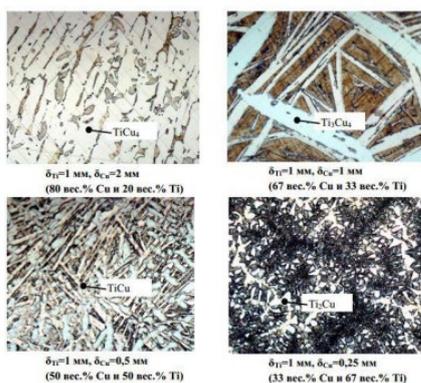


Рисунок 9 – Микроструктуры покрытий полученных сваркой взрывом [20]

«Наибольшей твердостью 8 – 10 ГПа (рисунок 10) обладает покрытие, содержащее 50 вес. % Cu и 50 вес. % Ti. В основе данного покрытия содержится фаза TiCu. Прочность на отрыв данного покрытия находится в пределах 30 – 40 МПа» [14].

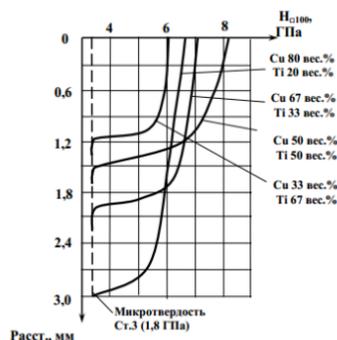


Рисунок 10 – Твердость покрытий, полученных сваркой взрывом [17]

«Износостойкость покрытий полученных сваркой взрывом значительно выше износостойкости стали 40 (рисунок 11)» [13].

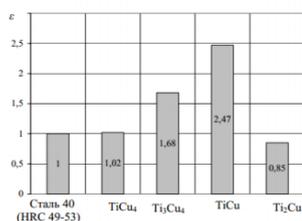


Рисунок 11 – Износостойкость покрытий полученных сваркой взрывом [17]

«Несмотря на высокие эксплуатационные свойства покрытий нанесенных сваркой взрывом, данный метод нанесения обладает рядом недостатков:

- необходимость в тщательных подготовительных операциях,
- высокая чувствительность способа к чистоте свариваемых поверхностей;
- ограниченная номенклатура изделий, к которым возможно применить данный способ» [17];
- «необходимость применения опасных взрывчатых веществ» [1].

1.2.3 Аргонодуговая наплавка неплавящимся электродом

«Сущность данного способа нанесения покрытий заключается в локальном расплавлении поверхности основного металла с помощью электрической дуги, горящей между основным металлом и неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона, введении в расплавленную ванну присадочной проволоки и вступлении основного и присадочного металла в химическую связь с последующей кристаллизацией» [17].

«В работе [11] описывается технология автоматической аргонодуговой наплавки алюминиевой бронзы CuAl8 на поверхность титана BT1-0.

«Жаростойкость наплавленного слоя Cu-Ti при температуре 800оС во много раз превышает жаростойкость чистого титана. После цикла испытаний образцы теряют не более 7% собственной массы» [11].

«Метод аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом имеет ряд преимуществ:

- отсутствие необходимости в тщательных подготовительных операциях перед наплавкой,
- простота и доступность технологического оборудования,
- высокая производительность процесса,
- возможность управлять в широком спектре характеристиками покрытия изменяя параметры процесса наплавки» [11].

«Однако, известно, что «легирование зоны взаимодействия, алюминием приводит, в сравнении с бинарной системой медь М1+титан ВТ1-0:

- к интенсификации диффузионного взаимодействия за счет понижения температуры образования жидкой фазы,
- к повышению твердости полученного на поверхности меди, на основе купридов титана» [2].

«Леглирующие элементы влияют на образование соединений и укрепляют твердые растворы» [30].

Поэтому нами предложен способ повышения содержание алюминия путем применения второй присадочной проволоки из алюминия Св А7» [5].

Выводы к разделу 1 и постановка задач исследования

Изделия из купридов титана широко применяются в различных отраслях машиностроения, работающих при высоких температурах, прочности и деформации. Помимо коррозионной стойкости, титановые и купридные сплавы обладают высокой теплопроводностью, поэтому их зачастую используют в изделиях, работающих при высоких температурах.

Проанализированные методы нанесения поверхностного слоя купридов титана, такие как диффузионная металлизация, сварка взрывом, аргонодуговая наплавка не плавящимся электродом имеют такие недостатки, как стоимость капиталовложений, сложные технологические процессы, низкие эксплуатационные свойства получаемых изделий.

Для достижения цели магистерской диссертации поставлены следующие задачи:

- разработка методики исследования процессов аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом купридов титана легированных алюминием, аргонодуговой наплавки плавящимися электродными проволоками,

- исследования геометрических параметров, их фазового состава, структуры и механических свойств аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом купридов титана легированных алюминием,

- исследования геометрических параметров, их фазового состава, структуры и механических свойств аргонодуговой наплавки с применением плавящейся электродной проволоки марки CuAl8.

- исследования геометрических параметров, их фазового состава, структуры и механических свойств аргонодуговой наплавки с применением плавящихся электродных проволок CuMn13Al7 и титановой проволоки марки BT1-0.

2 Методика проведения исследований процессов наплавки купридов титана на титан

2.1 Методика исследования процессов аргодуговой наплавки неплавящимся электродом купридов титана легированных алюминием

Наплавку производили на специально сконструированной установке, которая имеет возможность перемещения по двум координатам X и Y. Установка состоит из рамы и поперечины. Поперечина имеет рельсы с основной частью, на которой расположены два механизма, подающих присадочную проволоку, сварочная горелка AUT-TIG 400W фирмы AbicorBinzel с жидкостным охлаждением, металлические трубки для подачи присадочной проволоки.



Рисунок 12 – Установка для автоматической аргодуговой наплавки неплавящимся электродом с подачей двух присадочных проволок УК-2

Для крепления сварочной горелки и выставления зазора между основным металлом и сварочной горелкой использовали кронштейн и затяжным болтом в средней части сварочной горелки приваренный к основной части конструкции и кронштейн с болтом и гайкой в форме цилиндра с

возможностью упругого расширения и стяжки болтом.

Регулировку режимов наплавки осуществляли с помощью панели управления подключенной к двухкоординатному порталу. Панель управления позволяет изменять скорость наплавки, направления движения по оси X и Y, а также имеет возможность изменять скорости подачи проволок с возможностью одновременной подачи проволок в сварочную дугу

«Исследования аргонодуговой наплавки проводилось с использованием медной и алюминиевой проволок. В качестве основного материала использовались пластины из титана BT1- 0 10 миллиметров. Присадочные проволоки, выполняли роль наплавочного материала, были выбраны следующих марок: CuAl8 диаметром 0,8 мм; Св. А7 диаметром 1 мм» [17].
Ниже представлен химический состав используемых проволок (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав присадочных проволок

Марка проволоки	Cu,%	Al,%	Mn,%	Ni,%	Mg,%	Si,%	Sn,%	Ti,%	Fe,%
CuAl8	основа	7,5-8,0	0,1-0,3	0,1-0,5	---	---	---	---	---
Св А7	до 0.01	min 99.7	до 0.03	---	до 0.02	до 0.15	---	до 0.01	до 0.016



Рисунок 13 – Сварочный инвертор Сварог 315P AC/DC

Аргодуговая наплавка выполнялась неплавящимся вольфрамовым электродом легированный торием марки WT-20 диаметром 2,4 мм. В качестве наплавочных материалов применяли медную CuAl8 и алюминиевую Al7 присадочные проволоки 1,2 мм. Силу тока при наплавке устанавливали 270А. Режимы наплавки были сведены в таблицу (таблица 2).

«Для проведения исследования из наплавленных валиков вырезались образцы (рисунок 14)» [5].

Таблица 2 – Режимы наплавки исследуемых образцов

Наименование образцов	I, А	V п/п Al м/мин	V п/п Cu м/мин	V _{св} м/мин
1	270		1,00	0,18
2	270		3,00	0,18
3	270		5,00	0,18
4	270	1,50	1,00	0,18
5	270	1,50	3,00	0,18
6	270	1,50	5,00	0,18
2.1	270	2,00	1,00	0,18
2.2	270	2,00	3,00	0,18
2.3	270	2,00	5,00	0,18
2.4	270	2,50	1,00	0,18
2.5	270	2,50	3,00	0,18
2.6	270	2,50	5,00	0,18



Рисунок 14 – Вырезанные образцы для проведения исследований

2.2 Методика исследования процессов дуговой наплавки купридов титана с электродной проволокой системы Cu-Al

«Для расширения области исследований было принято решение наплавить образцы дуговым способом с применением электродной проволоки CuAl8 на пластины из титана марки ВТ1-0, изменяя скорость сварки» [5].

Наплавка осуществлялась на установке УК- 3, которая состоит из двухкоординатного портала с возможностью перемещения по оси X и Y, панели управления с возможностью изменения скорости наплавки, пульта для управления подачей электродных проволок. Для подачи и возбуждения дуги на электродных проволоках был использован сварочный полуавтомат марки КЕМРРІ, Финляндия. Пульт управления подачей электродных проволок под подключался к полуавтомату, и подача проволоки запускалась с помощью него. Такое управление запуском электродных проволок позволяет запускать как одну электродную проволоку, так и одновременно сразу две электродные проволоки. Режимы наплавки были сведены в таблицу (таблица 3).

«Наплавку производили в среде аргона на образцах из титана марки ВТ1-0 размером 120x120 мм и толщиной 10 мм. В качестве электродной проволоки использовали проволоку CuAl8 диаметром 0,8мм» [11].

Таблица 3 – Режимы наплавки исследуемых образцов

Наименование образцов	U, В Cu	V п/п Cu	V св м/мин
1,1	20	5,5	0,15
1,2	20	6	0,15
1,3	20	6,5	0,15
1,4	20	7	0,15
1,5	20	7,5	0,15
2,1	20	5,5	0,2
2,2	20	6	0,2

Продолжение таблицы 3

Наименование образцов	U, В Cu	V п/п Cu	V св м/мин
2,3	20	6,5	0,2
2,4	20	7	0,2
2,5	20	7,5	0,2
3,1	20	5,5	0,1
3,2	20	6	0,1
3,3	20	6,5	0,1
3,4	20	7	0,1
3,5	20	7,5	0,1

«Геометрические параметры наплавленных валиков измерялись при помощи программы UniversalDesktopRuler » [6].

С помощью метода визуально-измерительного контроля (ВИК) увеличивающих изображение приборов и измерительных инструментов определялось количество образовавшихся трещин после полного остывания наплавленных валиков, а также качество полученных.

2.3 Методика исследования процессов двухдуговой наплавки купридов титана

Для расширения области исследований было принято решение наплавить образцы двухдуговым способом с применением электродных проволок CuMn13Al7 и Ti маркой BT1-0 на титановые пластины марки BT1-0.

Наплавка осуществлялась на установке УК- 3, которая состоит из двухкоординатного портала с возможностью перемещения по оси X и Y, панели управления с возможностью изменения скорости наплавки, пульта для управления подачей электродных проволок. Для подачи и возбуждения дуги на электродных проволоках был использован сварочный полуавтомат марки КЕМРР1, Финляндия. Пульт управления подачей электродных проволок под

подключался к полуавтомату, и подача проволоки запускалась с помощью него. Такое управление запуском электродных проволок позволяет запускать как одну электродную проволоку, так и одновременно сразу две электродные проволоки. Режимы наплавки были сведены в таблицу (таблица 4).

«Наплавку производили в среде аргона на образцах из титана марки ВТ1-0 размером 120x120 мм и толщиной 10 мм. В качестве электродных проволок использовали проволоку из сплава CuMn13Al7 диаметром 1,2мм и титановую проволоку маркой ВТ1-0 диаметром 1,2 мм» [9].

Таблица 4 – Режимы наплавки исследуемых образцов

Наименование образцов	U,В Ti	U,В Cu	V П/П Cu	V П/П Ti	V св м/мин
1.1	15	19	3	3,5	0,15
1.2	15	19	5	3,5	0,15
1.3	15	19	7	3,5	0,15
2.1	15	19	3	4,5	0,15
2.2	15	19	5	4,5	0,15
2.3	15	19	7	4,5	0,15
3.1	15	19	3	5,5	0,15
3.2	15	19	5	5,5	0,15
3.3	15	19	7	5,5	0,15

2.4 Методика исследования структуры и химического состава наплавленных сплавов

«Исследование химического состава и микроструктуры наплавленного металла будет проводиться методами растровой электронной микроскопии на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) (рисунок 15)» [10].



Рисунок 15 – сканирующий электронный микроскоп LEO 1455 VP

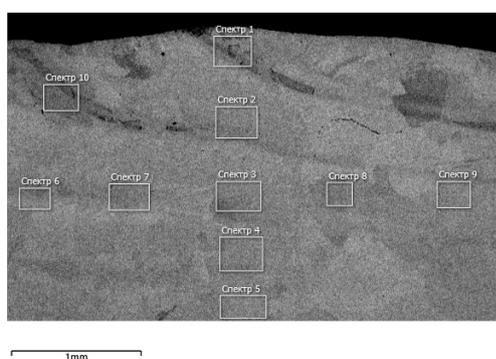


Рисунок 16 – Схема выбора точек для исследования структуры и химического состава наплавленных слоев

«Рентгенофазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance Eco (Bruker AXS GmbH) с вертикальным θ - θ гониометром (рисунок 17)» [5].



Рисунок 17 - рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Advance Eco
(Bruker AXS GmbH)

2.5 Методика исследования твердости, жаростойкости и износостойкости наплавленных купридов титана

«Твердость наплавленных образцов измеряется по методу Роквелла с применением шкалы HRC, с применением алмазного наконечника, имеющего конусную форму. Сам метод основан на измерении глубины проникновения наконечника в материал» [5]. Для проведения исследований твердости наплавленных образцов применялся твердомер HBRV-187.5 (рисунок 18).



Рисунок 18 - стационарный универсальный твердомер HBRV-187.5 [16]

На установке в зажимных тисках закрепляются ранее вырезанные из наплавленных валиков образец покрытия и никелидов титана и подогнанные под размер 5x10 мм грани, затем тиски вместе с образцом опускаются на работающую шлиф машинку со шкур лентой шероховатостью Р100, образец стачивался под действием силой тяжести механизма в течении 30 секунд, после процесс повторяли уже для образца из титана марки ВТ1-0, а затем по результатам 2-х испытаний определяли относительную износостойкость образцов.



Рисунок 19 – Установка для испытания на износостойкость наплавленных образцов на износостойкость УХ-11 [14]

Испытания жаростойкости наплавленных образцов проводились при выдержке в печи при 800 °С в течение 100 -200 часов (рисунок 20).



Рисунок 20 – Муфельная печь СНОЛ 30/1300

Выводы к разделу 2

В результате анализа выбранной методики для проведения исследования были сделаны следующие выводы:

- подобрана методика исследований по результатам, которой будет произведен анализ эксплуатационных характеристик, а так же определён химический и фазовый состав наплавленных валиков,
- проанализированы участки наплавленного валика наиболее подходящие для проведения исследований,
- определены геометрические размеры образцов для проведения испытания на износостойкость,
- определён режим для исследования жаростойкости,
- определен метод, по которому будет проводиться исследование твердости наплавленных образцов.

3 Исследование процессов аргодуговой наплавки неплавящимся электродом и свойств купридов титана,

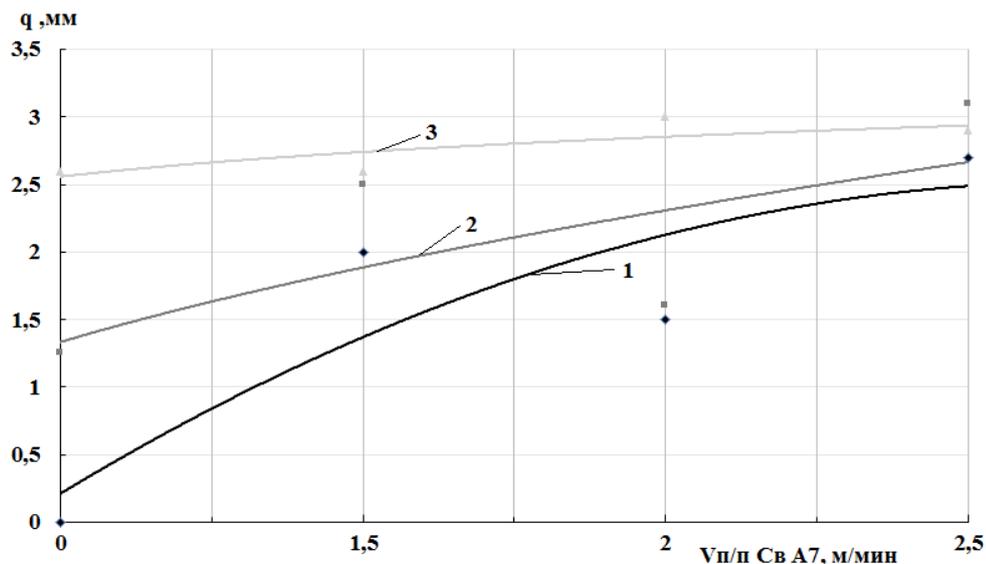
3.1 Исследование процессов аргодуговой наплавки неплавящимся электродом купридов титана

По результатам визуального осмотра наплавленных валиков аргодуговым способом, не плавящимся электродом, было определено, что валики имеют удовлетворительное качество без критических отклонений (рисунок 21).



Рисунок 21 – Образцы наплавленных валиков аргодуговым способом с применением двух присадочных проволок

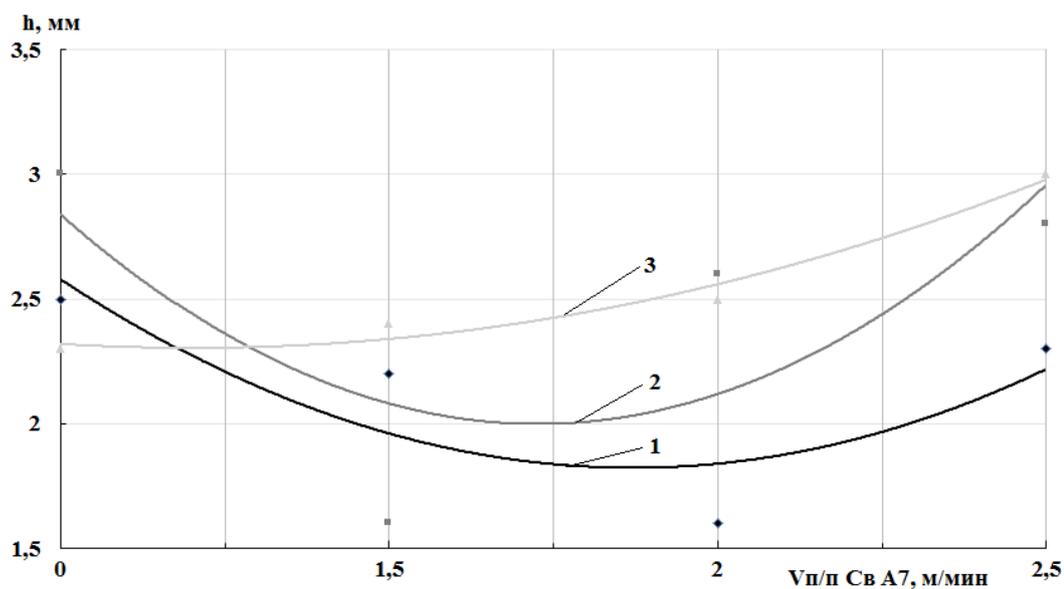
На основании полученных данных после замеров геометрических параметров наплавленных валиков была определена зависимость высоты валика от скорости подачи алюминиевой проволоки, представленная в графической форме (рисунок 22). На графике прослеживается резкое увеличение высоты валика при скоростях подачи медной проволоки 1 м/мин и 3 м/мин, а при 5 м/мин прослеживается более плавное повышение высоты валиков.



1 – $V_{п/п}$ CuAl8 = 1 м/мин, 2 – $V_{п/п}$ CuAl8 = 3 м/мин, 3 – $V_{п/п}$ CuAl8 = 5 м/мин

Рисунок 22 – Зависимость высоты наплавленного валика от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

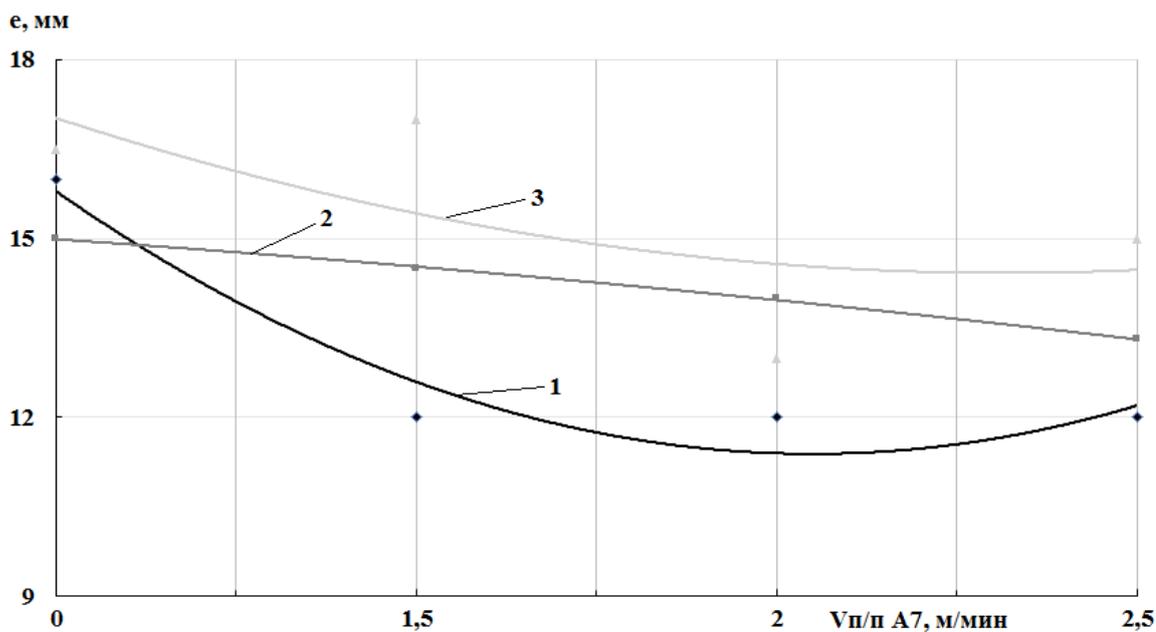
На основании полученных данных был построен график зависимости глубины проплавления от скорости подачи алюминиевой проволоки на котором пролеживается снижение глубины проплавления при скоростях подачи медной проволоки 1 м/мин и 3 м/мин, а при 5 м/мин наблюдается повышение глубины проплавления (рисунок 23). Это может быть связано со снижением температуры плавления наплавленного металла.



1- $V_{п/п} \text{ CuAl8} = 1 \text{ м/мин}$, 2 - $V_{п/п} \text{ CuAl8} = 3 \text{ м/мин}$, 3 - $V_{п/п} \text{ CuAl8} = 5 \text{ м/мин}$

Рисунок 23 - Зависимость глубины проплавления от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

«По результатам анализа ширины валика, было определено, что ширина наплавленного валика изменяется в меньшую сторону с повышением скорости подачи алюминиевой проволоки (рисунок 24). «Это может быть связано с увеличением доли тепла источника нагрева расходуемого на плавление присадочной проволоки» [5].

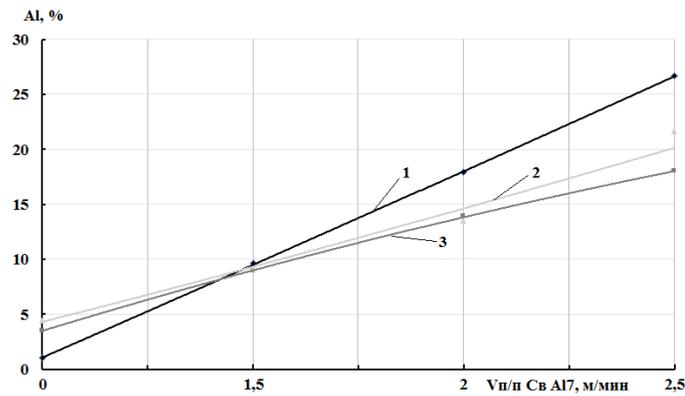


1- $V_{п/п} CuAl8 = 1$ м/мин, 2 - $V_{п/п} CuAl8 = 3$ м/мин, 3 - $V_{п/п} CuAl8 = 5$ м/мин

Рисунок 24 - Зависимость ширины валика от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

3.2 Структура, химический и фазовый состав наплавленного металла

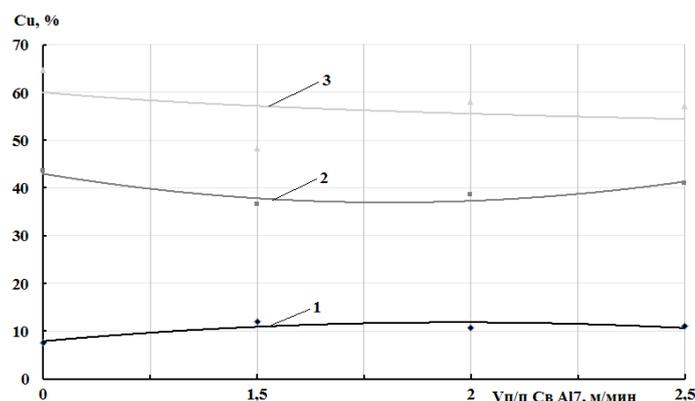
По результатам спектрального анализа было выявлено, что повышение содержания алюминия на прямую зависит от увеличения скорости подачи проволоки AL7 (рисунок 25), что связано с увеличением весового расхода присадочного материала.



1- $V_{п/п} CuAl8 = 1$ м/мин, 2- $V_{п/п} CuAl8 = 3$ м/мин, 3- $V_{п/п} CuAl8 = 5$ м/мин

Рисунок 25 - Зависимость содержания алюминия в наплавленном валике от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

По результатам спектрального анализа был построен график зависимости процентного содержания меди от скорости подачи проволоки AL7, который показал минимальную изменчивость независимо от скоростей подачи (рисунок 26).



1- $V_{п/п} CuAl8 = 1$ м/мин, 2- $V_{п/п} CuAl8 = 3$ м/мин, 3- $V_{п/п} CuAl8 = 5$ м/мин

Рисунок 26 - Зависимость процентного содержания меди в наплавленном валике от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

На макроструктуре образца №1 после химического травления хорошо видна однородность по всей площади наплавленного валика (рисунок 27). Исходя из процентного содержания, представленного на спектре 1 по диаграмме состояния, были определены следующие фазы: αTi и Ti_2Cu (рисунок 28, 29).



Рисунок 27 – Макроструктура наплавки образца № 1

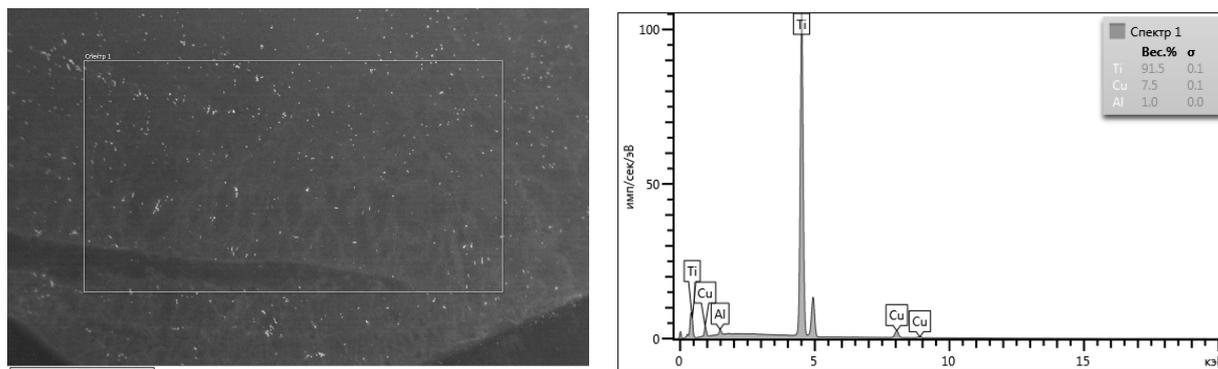


Рисунок 28 - Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником (Спектр 1).

Образец № 1

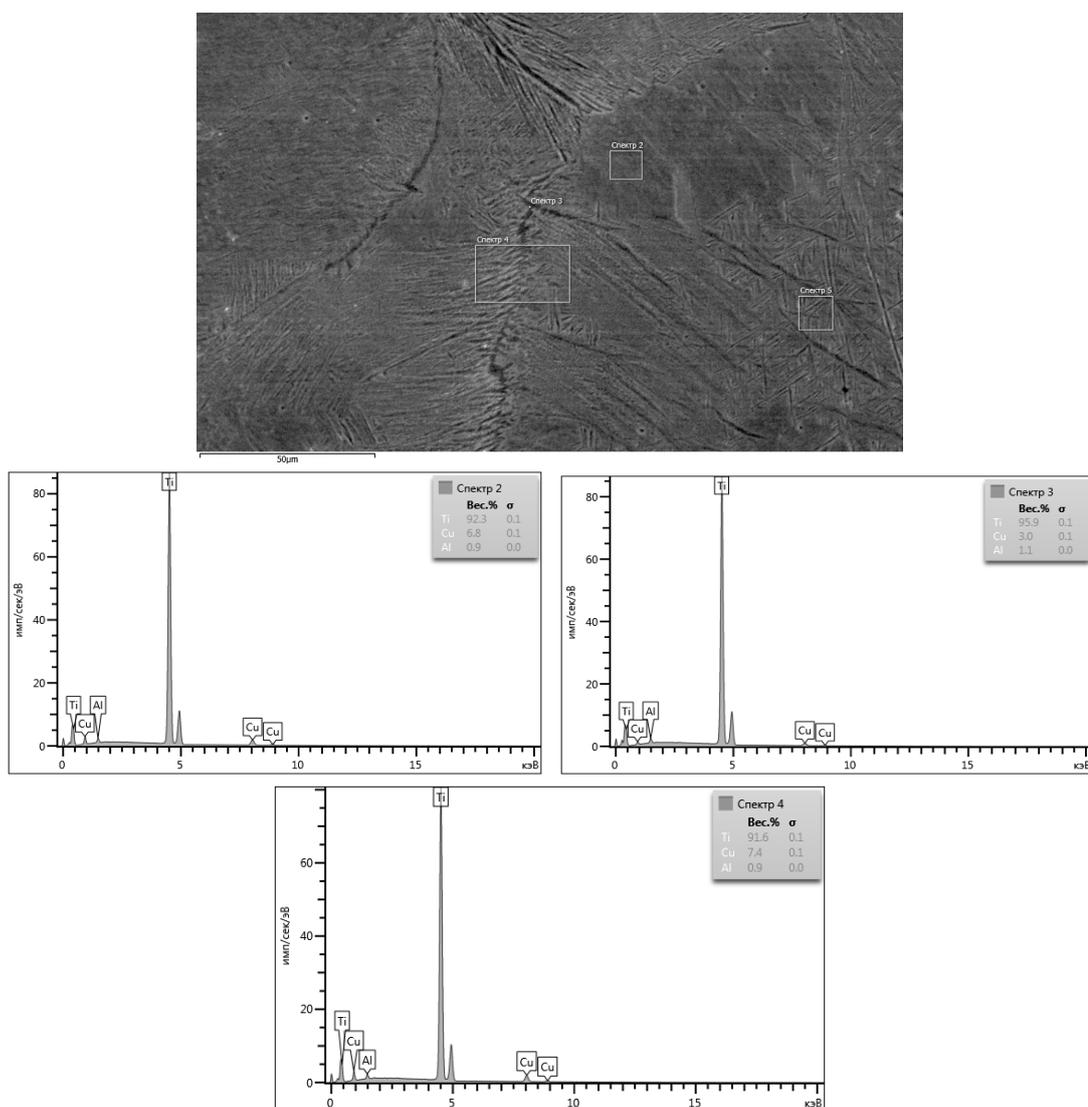


Рисунок 29 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 2», «Спектр 3»). Образец № 1

На макроструктуре образца № 2 после химического травления хорошо видно игольчатое строение, количество которого увеличивается при отдалении от границ (рисунок 30). Микроструктура представлена фазами: $TiCu$ и Ti_2Cu (рисунок 31).



Рисунок 30 – Макроструктура наплавки образца № 2

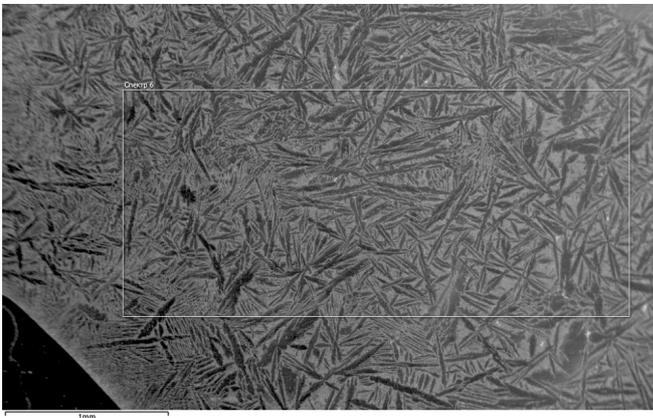
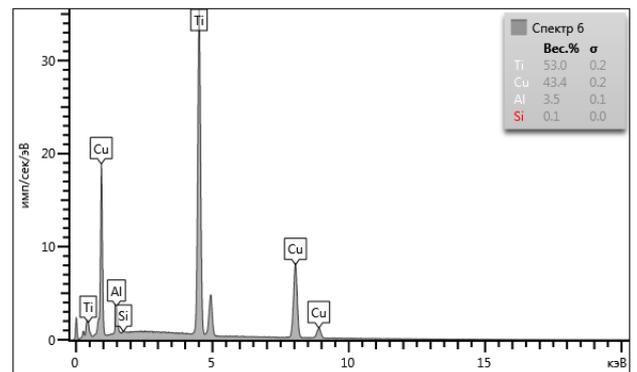


Рисунок 31 – Микроструктура и Результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 6»). Образец № 2

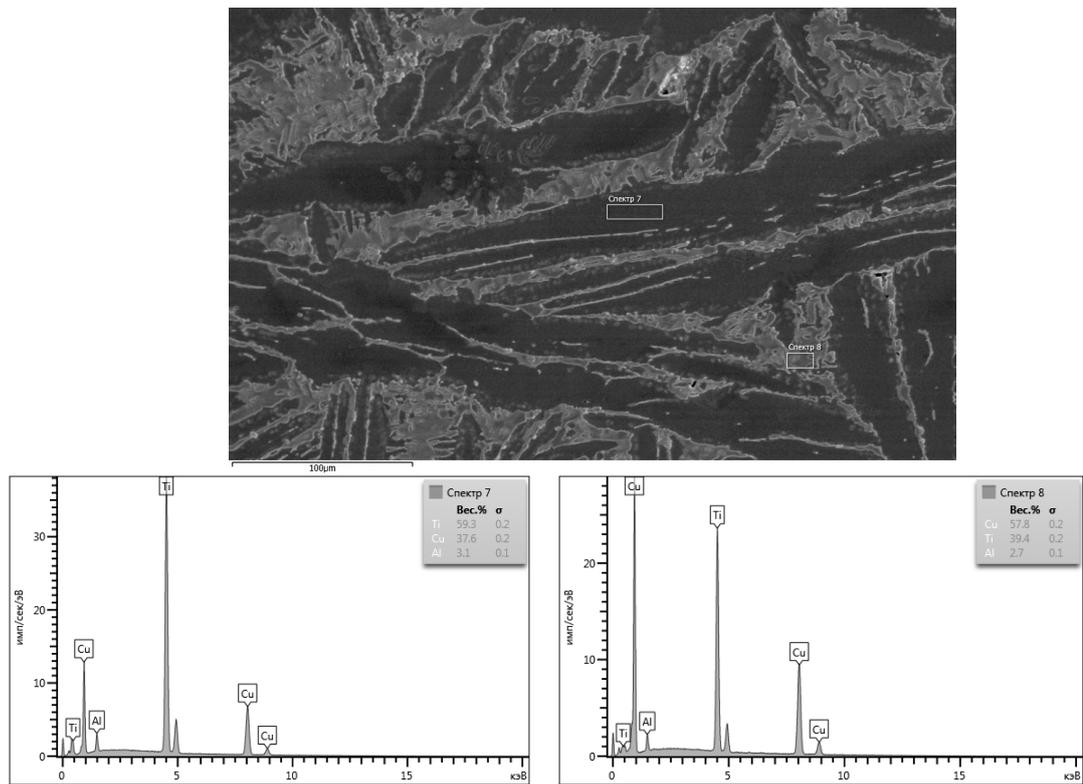


Рисунок 32 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками наплавки («Спектр 7», «Спектр 8»). Образец № 2

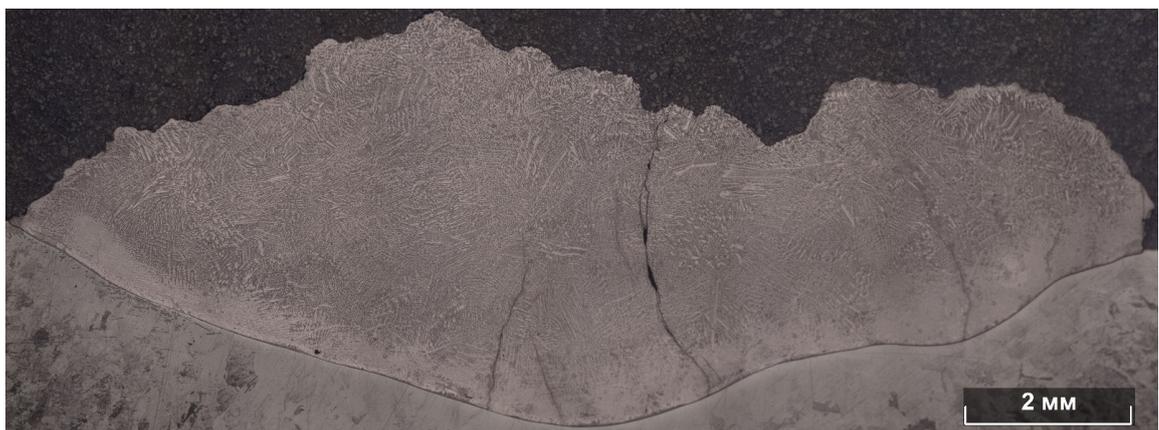


Рисунок 33 – Макроструктура наплавки образца № 3

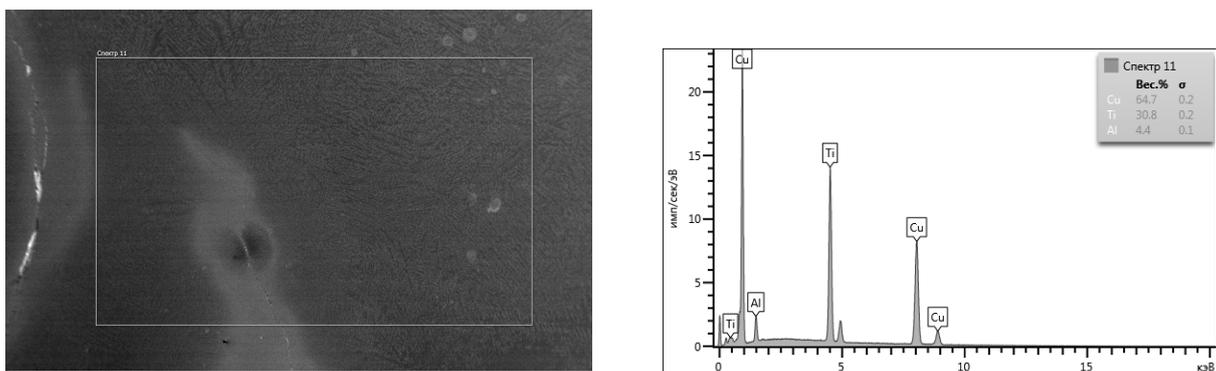


Рисунок 34 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 8»).

Образец № 3

«Анализ макроструктуры образца № 3 показал, смешанную структуру (рисунок 33). Матрица наплавленного валика представлена двумя фазами: $TiCu$ и Ti_3Cu_4 легированной алюминием до 4,4% с содержанием меди в области 64% (рисунок 34). Исследование химического состава отдельных фаз (рисунок 35) показывает, что «темная» фаза содержит около 70% меди и 7% алюминия, что исходя из тройной диаграммы состояния, соответствует области существования тройной фазы τ_1-TiCu_2Al . Вторая фаза «светлая» содержит меди около 58%, а алюминия всего 0,9%, что отвечает области существования двойной фазы $TiCu$, легированной алюминием» [5].

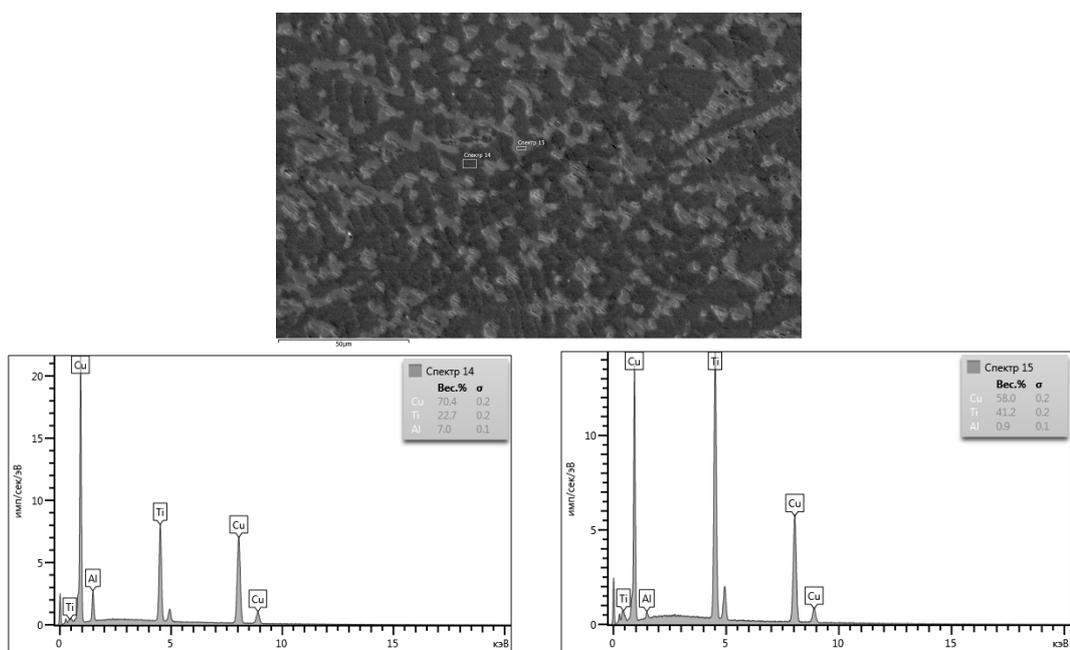


Рисунок 35 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 14», «Спектр 15»). Образец № 3



Рисунок 36 – Макроструктура наплавки образца № 4

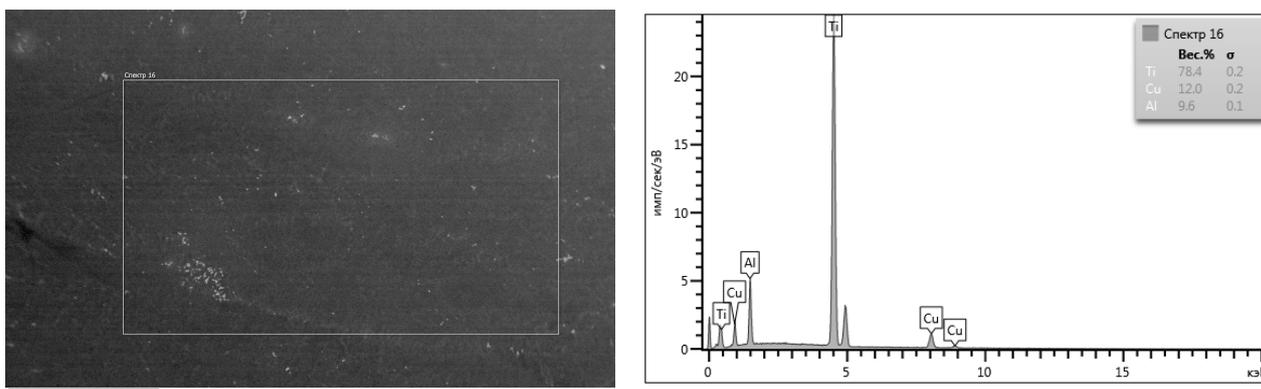


Рисунок 37 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 16»).

Образец № 4

«Анализ макроструктуры образца №4 показал равноосную структуру (рисунок 36). Среднее содержание меди в образце около 12%, а алюминия до 9,6% (рисунок 37). Исходя из тройной диаграммы состояния (рисунок 2) эта область твердого раствора меди и алюминия в α Ti, что так же было подтверждено исследованием химического состава отдельных фаз (рисунок 39).» [5].

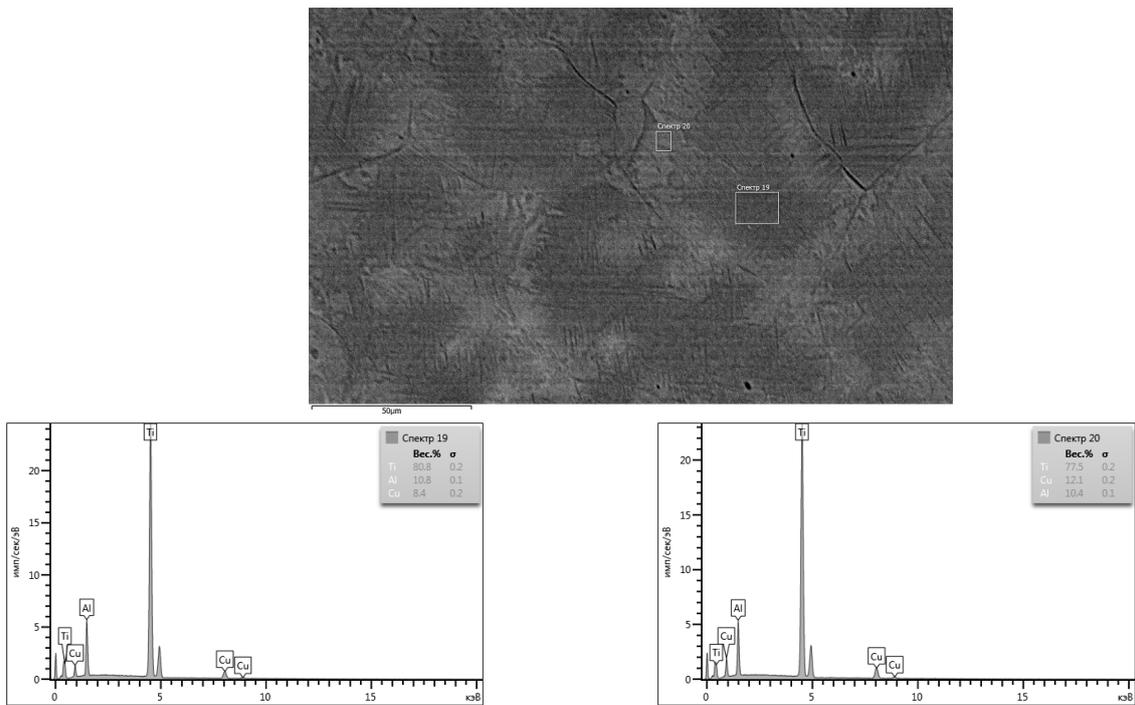


Рисунок 38 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 19», «Спектр 20»). Образец № 4



Рисунок 39 – Макроструктура наплавки образца № 5

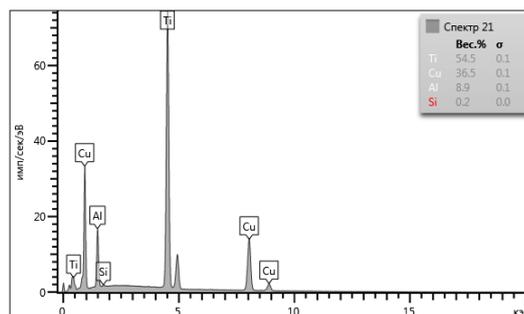
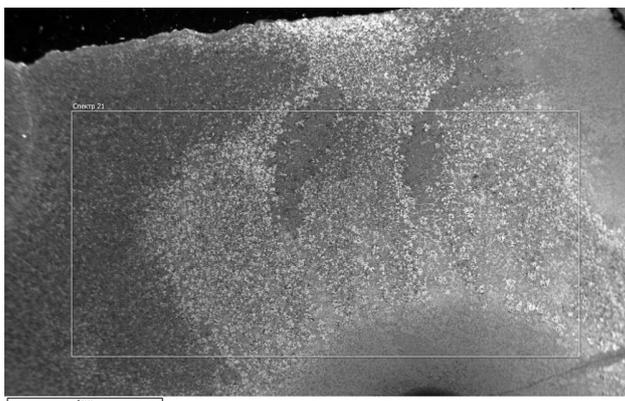


Рисунок 40 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником, («Спектр21»).

Образец № 5

«Анализ макроструктуры образца № 5 показал равноосную структуру (рисунок 39). Среднее содержание алюминия около 8,9%, а меди 36,5% (рисунок 40). Структура наплавленного металла, представлена двумя фазами: α Ti и Ti_2Cu (рисунок 41). Микроструктура представлена как минимум тремя различными структурными составляющими: фаз Ti_3Al , легированной медью до 4,5% -черные включения; фаз Ti_2Cu , легированной алюминием в количестве 5,5% -темные зерна; фаза $TiCu$ – серые зерна. Размер зерна черных включений равен от 2 до 15 микрон, темных зерен от 5 до 17 микрон, серых зерен от 9 до 47 микрон» [5].

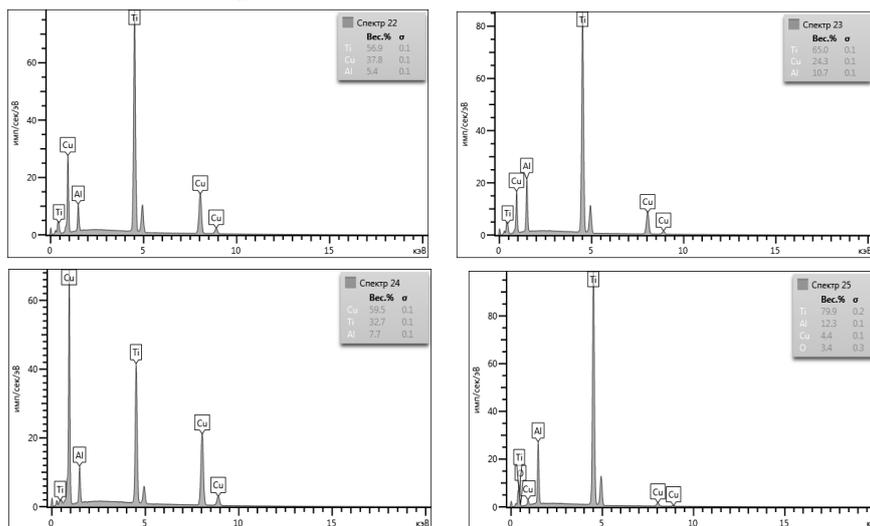
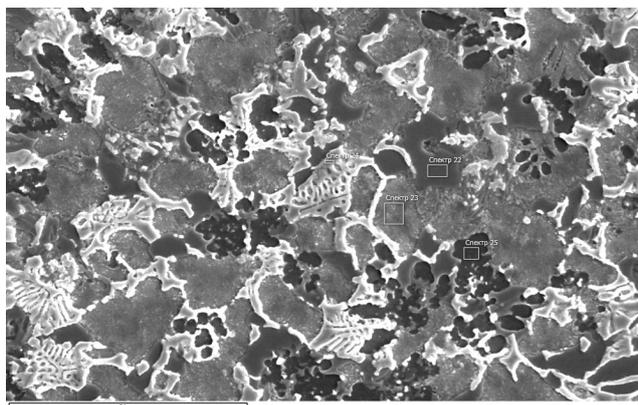


Рисунок 41 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками наплавки.

Образец № 5



Рисунок 42 – Макроструктура наплавки образца № 6

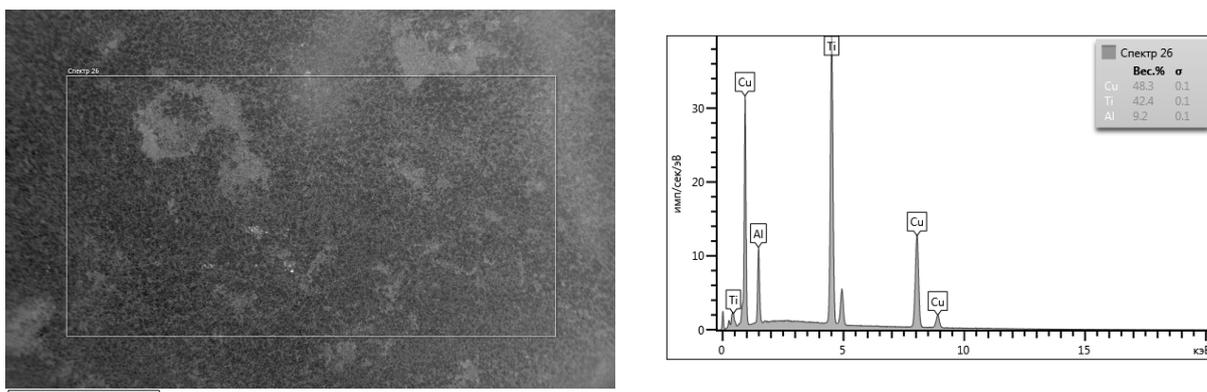


Рисунок 43 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 26»).

Образец № 6

«Анализ макроструктуры № 6 показал равноосную структуру (рисунок 43). Среднее содержание меди в наплавленном металле составляло 48,3%, а алюминия 9,2% (рисунок 43). Структура наплавленного металла, представлена двумя фазами: Ti_2Cu и $TiCu$. (рисунок 44). Исходя из тройной диаграммы состояния $Ti-Cu-Al$ (рисунок 2) структура представлена фазами: τ_1-TiCu_2Al – серые зерна; $TiCu$ -темные зерна и фаза Ti_3Al -черные включения (рисунок 45)» [5].

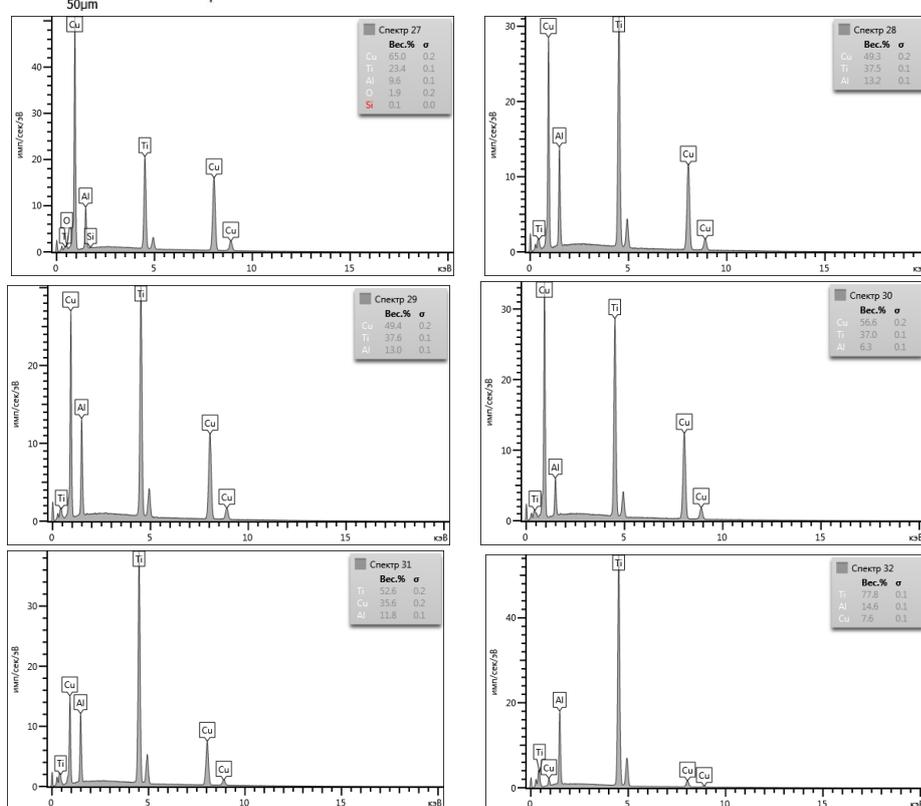
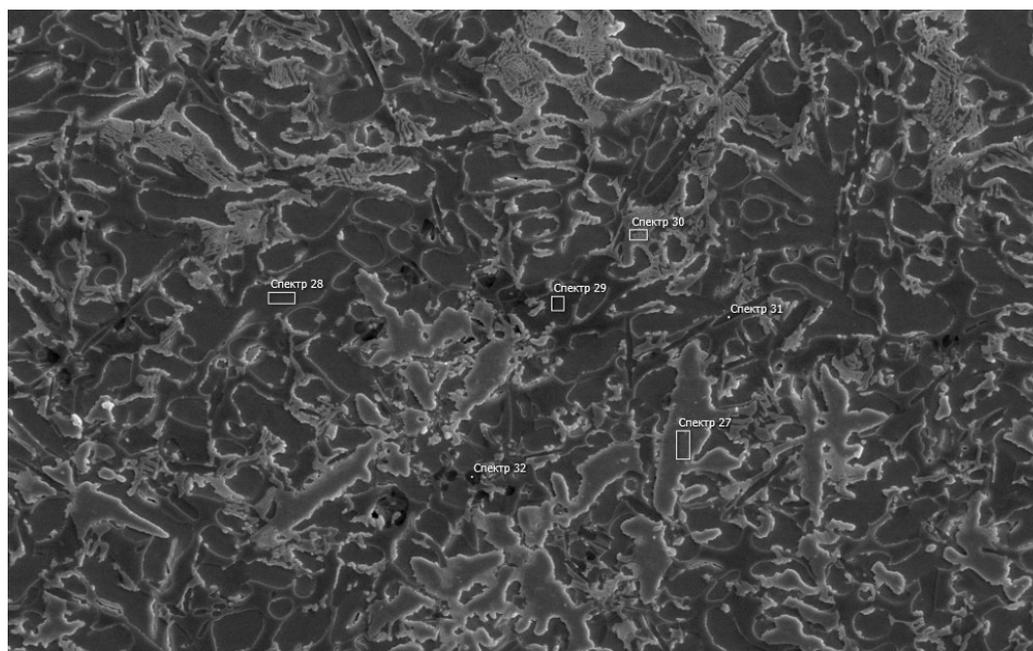


Рисунок 44 –Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 27», «Спектр 28», «Спектр 29», «Спектр 30», «Спектр 31», «Спектр 32»).

Образец № 6

«Анализ макроструктуры образца 2-1. показал равновесную структуру (рисунок 45). Среднее содержание меди в наплавленном металле составляло 10,7%, а алюминия 17,9% (рисунок 46)» [5].



Рисунок 45 – Макроструктура наплавки образца № 2-1

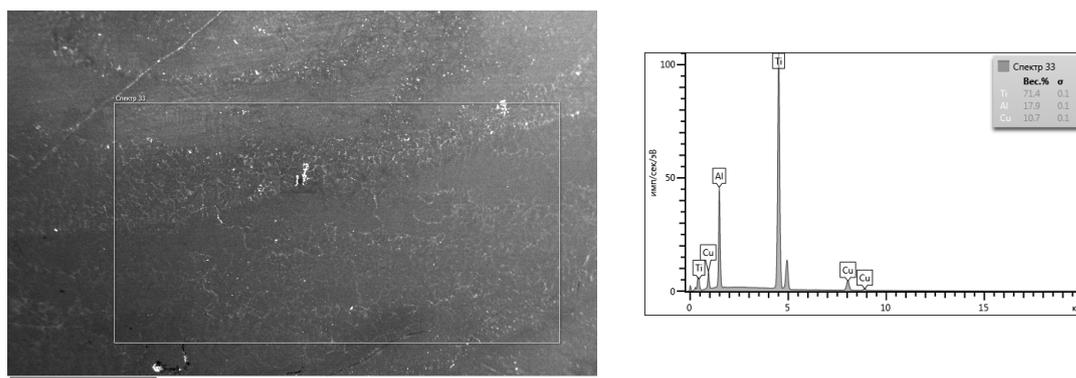


Рисунок 46 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 33»).

Образец № 2-1

«В результате исследования микроструктуры образца №4 определили что, структура наплавленного металла, представлена фазами: Ti_3Al и эвтектикой $TiCu + Ti_3Al + \tau_1-TiCu_2Al$ (рисунок 47)» [5].

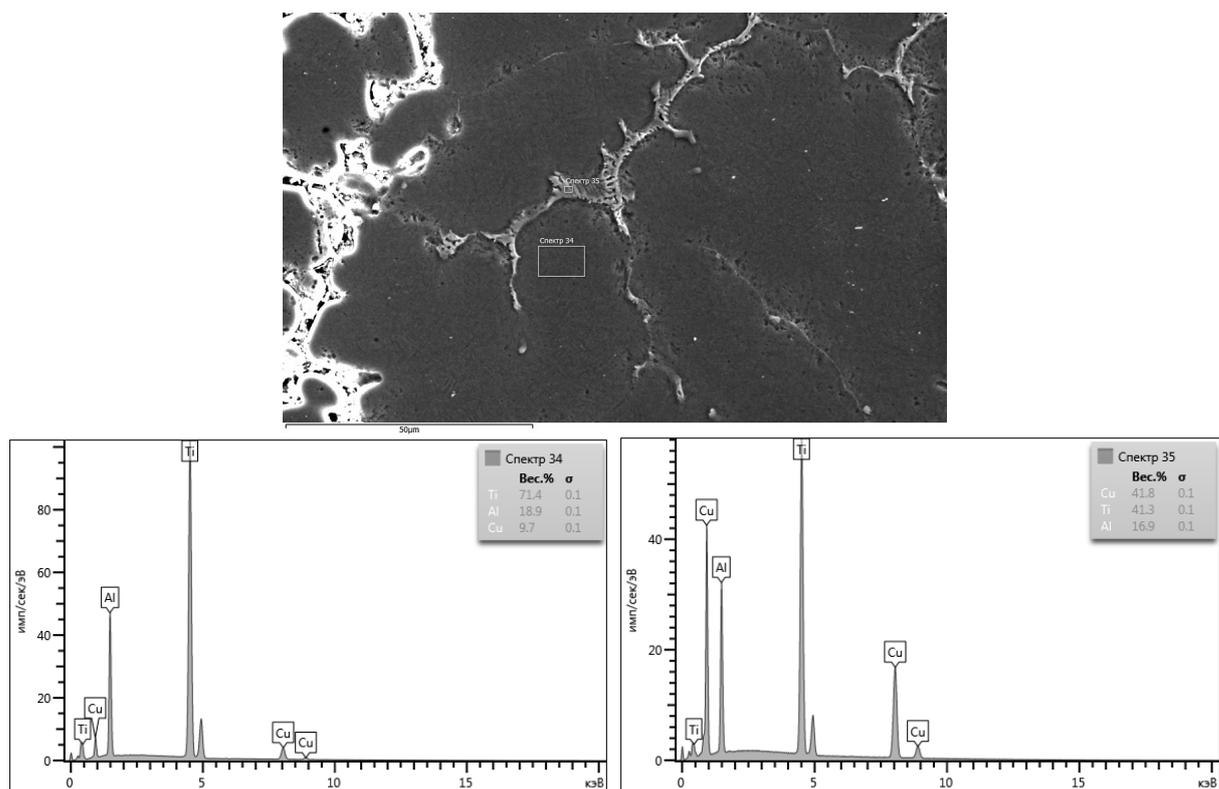


Рисунок 47 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 34», «Спектр 35»). Образец № 2-1

«Макроструктура образца № 2-2 имеет равноосный характер, но на макрошлифе явно выделяются продольные трещины и заметно отслоение от основного металла (Рисунок 48)» [5].

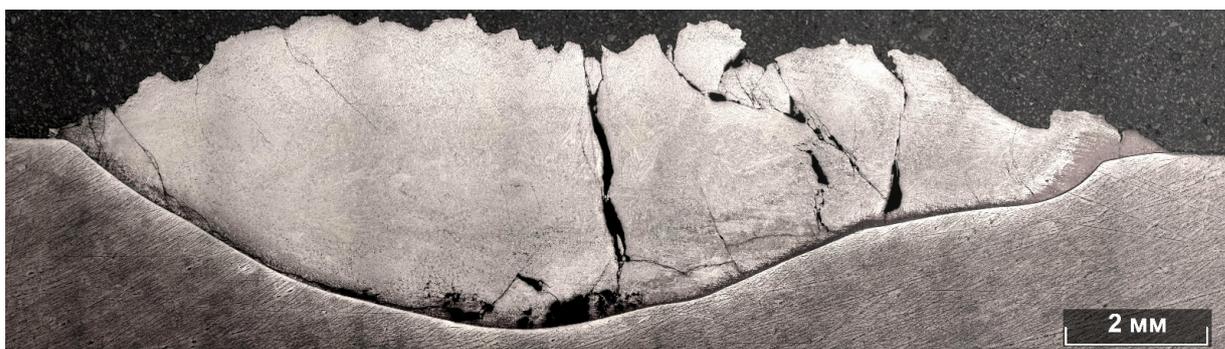


Рисунок 48 – Макроструктура наплавки образец 2-2

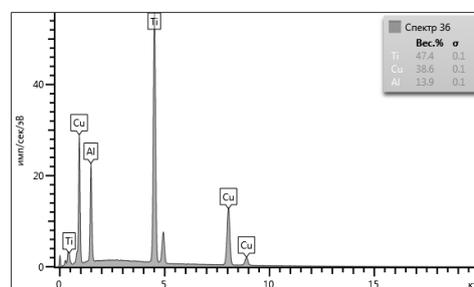
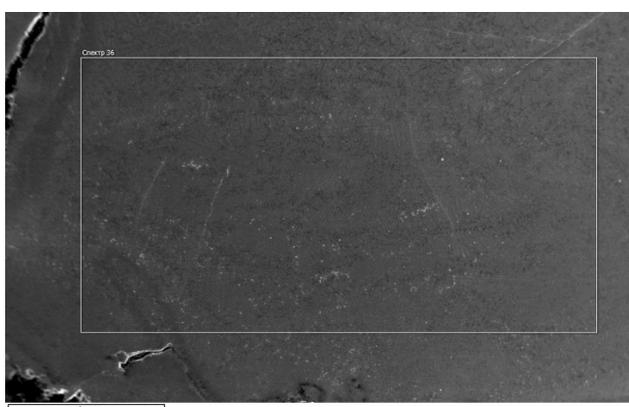


Рисунок 49– Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 36»).

Образец № 2-2

В результате исследования образца № 2-2 было определено среднее содержание титана 47,4%, меди 38,6% и алюминия 13,9%. Исследование микроструктуры показывает наличие в структуре трех явно выделенных фаз. Незначительное количество включений 10-20% занимает фаза Ti_3Al (черные включения на микрошлифе) (рисунок 50). Остальная область занята эвтектикой состоящей из фаз: $Ti_2Cu + TiCuAl$ » [5].

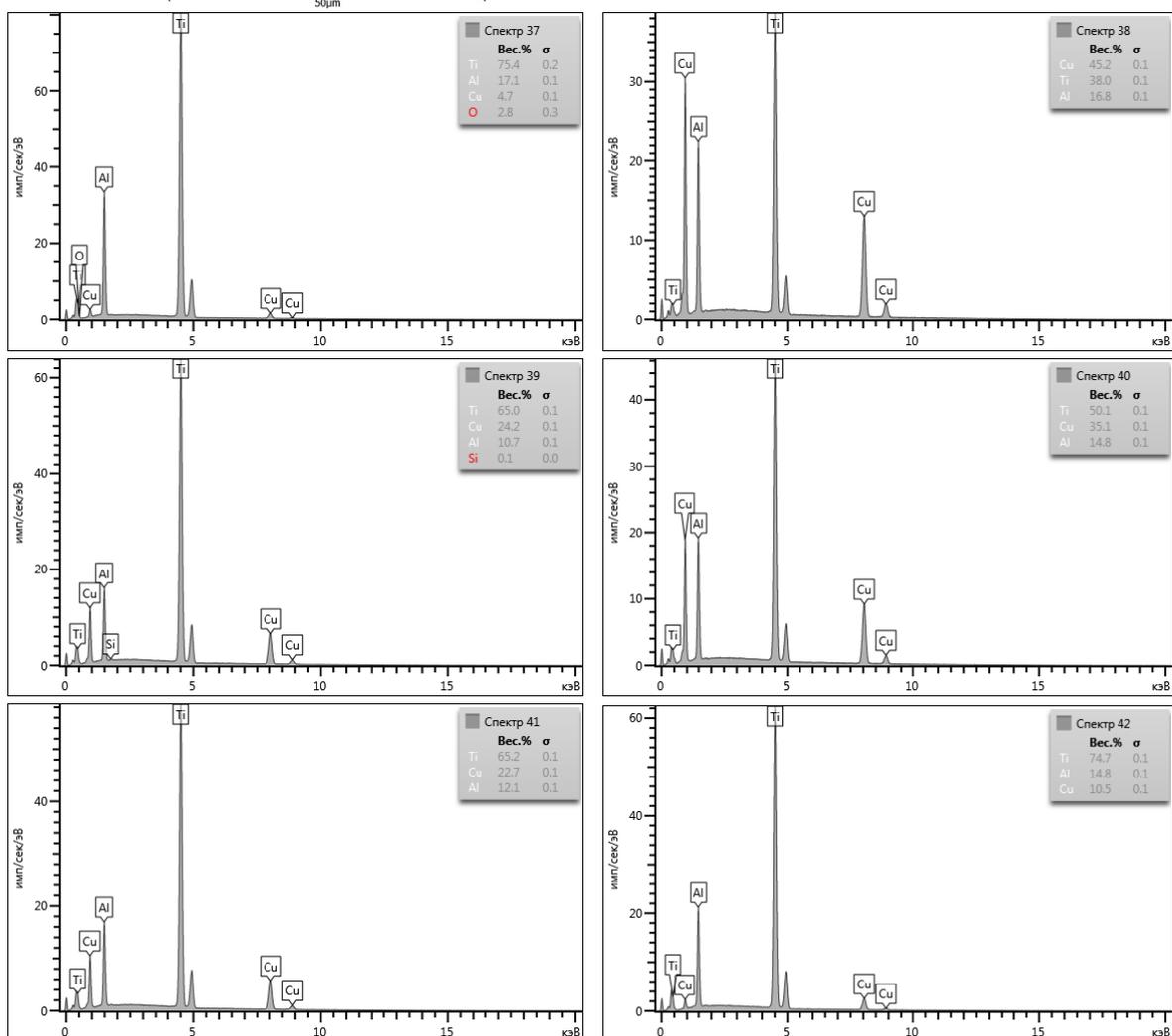
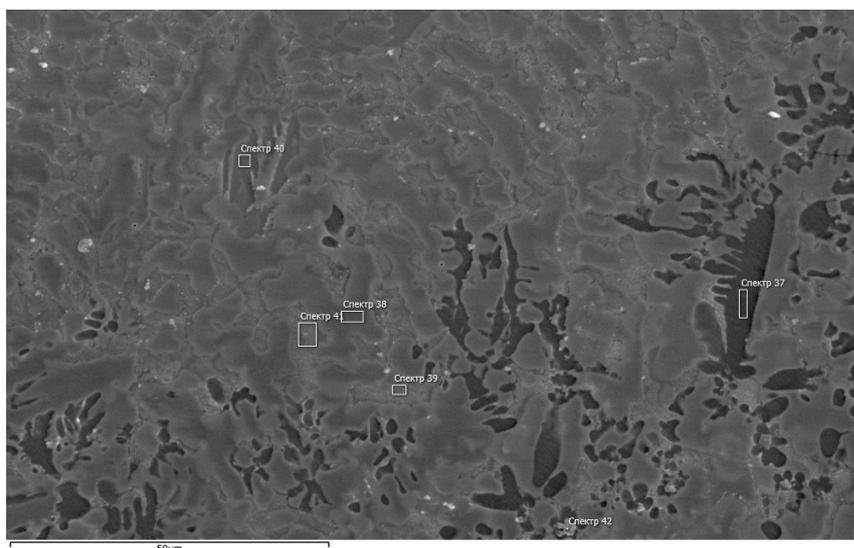


Рисунок 50 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 37», «Спектр 38», «Спектр 39», «Спектр 40», «Спектр 41», «Спектр 22»). Образец № 2-2

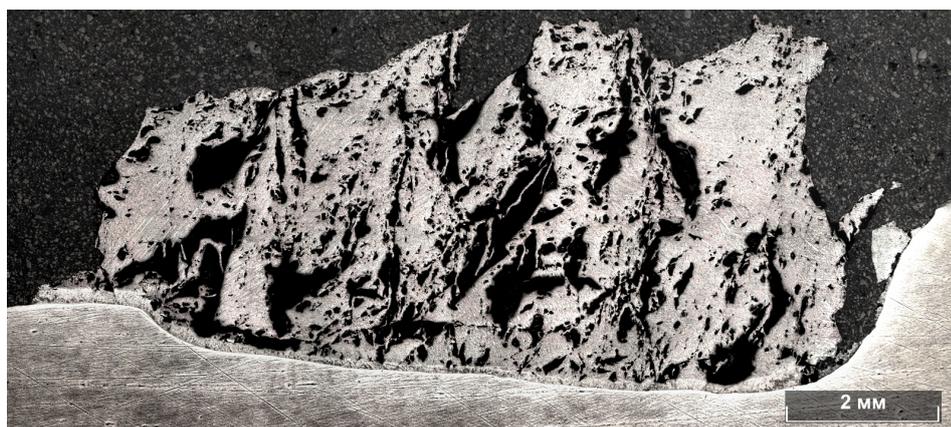


Рисунок 51 – Макроструктура наплавки образца № 2-3

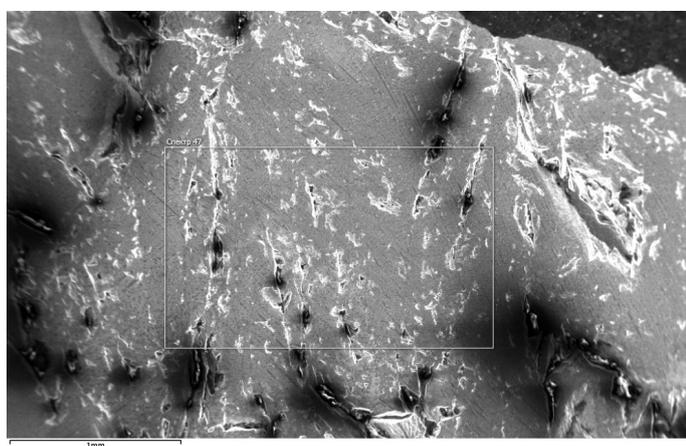
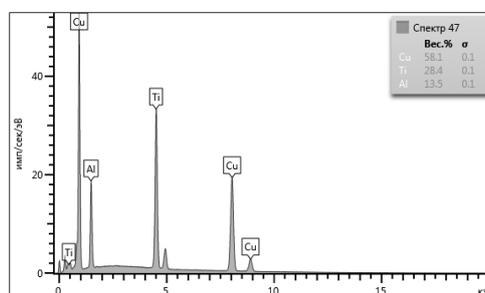


Рисунок 52 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 47»).

Образец № 2-3

Макроструктура образца № 2-3. показывает, что наплавленный металл обладает высокой хрупкостью, что подтверждается наличием большого

количества трещин и выкрашиванием микрообъемов из наплавленного валика (рисунок 51).

« Содержание меди составляет в среднем 58,1%, а алюминия до 13,5% (рисунок 52). Исследование микроструктуры и проведенный микрорентгеноспектральный анализ показывают наличие в структуре двух явно выделенных тройных фаз τ_1 -TiCu₂Al – черные зерна и τ_2 -TiCuAl – серые зерна. Размер черных зерен равен от 5 до 63 микрон (рисунок 53)» [5].

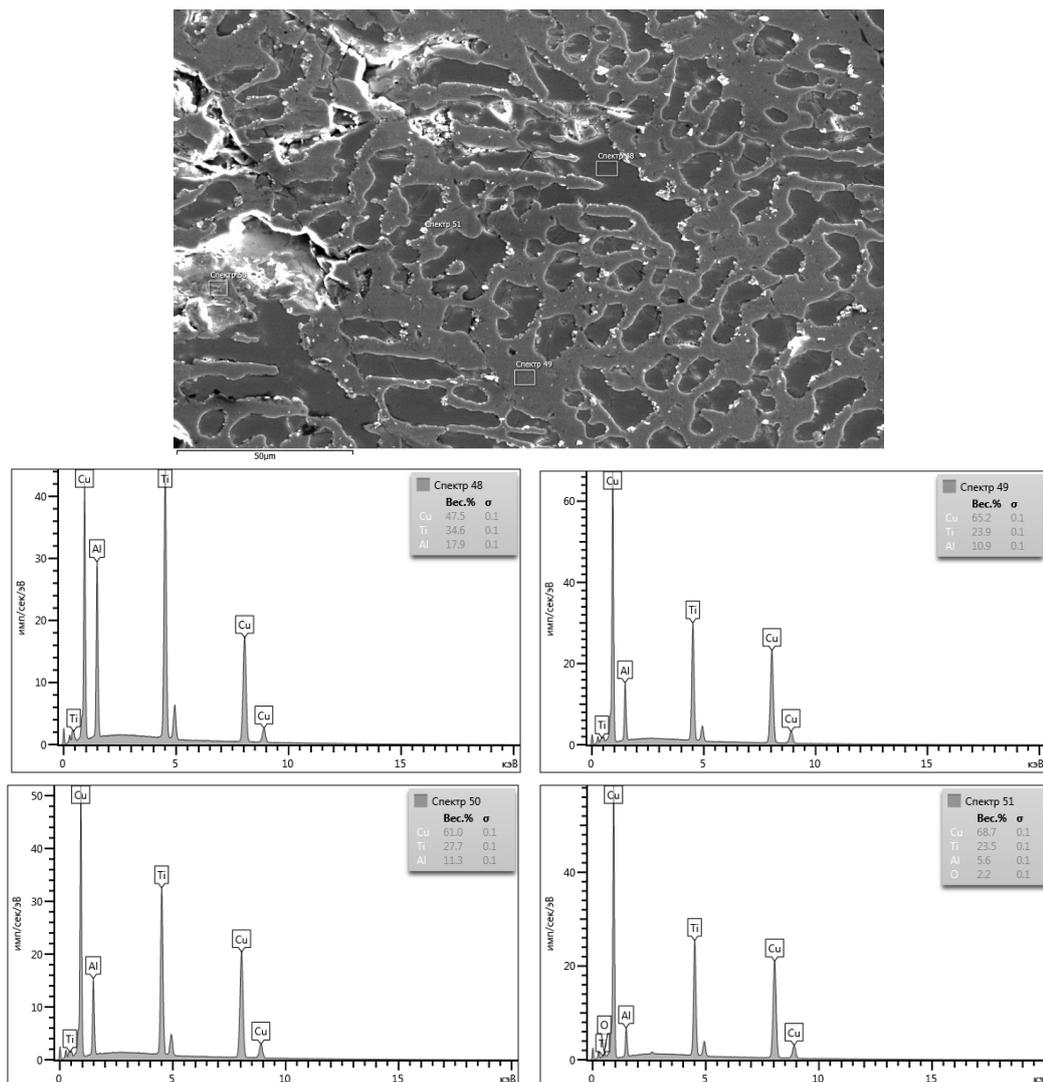


Рисунок 53 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 48», «Спектр 49», «Спектр 50», «Спектр 51»). Образец № 2-3



Рисунок 54 – Макроструктура наплавки образца № 2-4

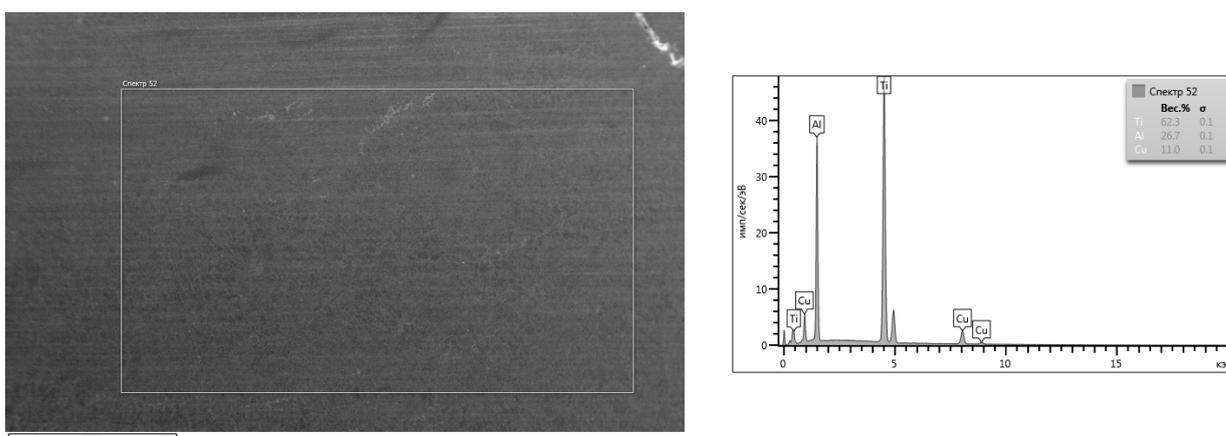


Рисунок 55 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 52»).

Образец № 2-4

«Анализ макроструктуры образца № 2-4 показал, что склонность к образованию трещин этого сплава ниже (рисунок 54), чем у предыдущего образца № 2-3 (рисунок 53). При скоростях подачи медной 1 м/мин с применением алюминиевой присадочной проволоки 2,5 м/мин содержание меди в наплавленном металле составляет 11%, а алюминия 26,7% (рисунок 1). Структура представлена первичной фазой Ti_3Al , легированной медью и эвтектикой $Ti_3Al + \tau_2-TiCuAl$, расположенной между первичными зёрнами. Размер зёрен первичной фазы равен от 2,5 и более 50 микрон (рисунок 55)» [5].



Рисунок 56 – Микроструктура наплавки образца 2-4

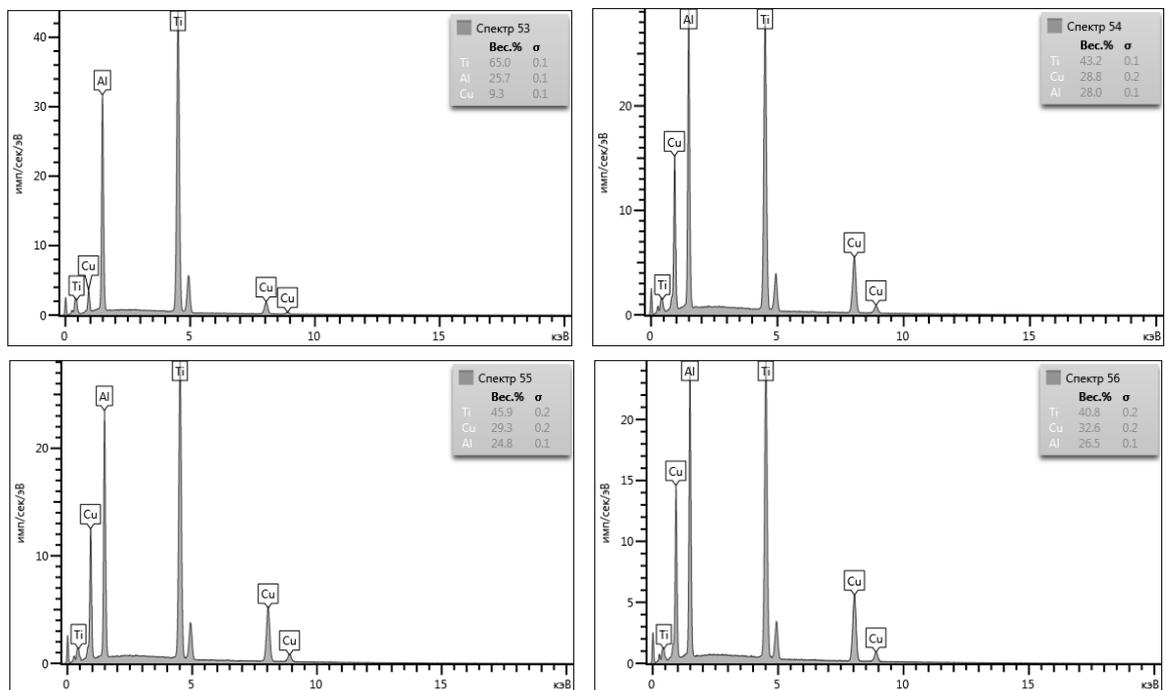


Рисунок 57 – Результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками

(«Спектр 53», «Спектр 54», «Спектр 55», «Спектр 56»). Образец № 2-4

«Структура образца № 2-5 аналогична структуре образцов № 2-3. Наплавленные валики содержат большое количество трещин (рисунок 58). Среднее содержание меди до 41%, а алюминия 18% (рисунок 60). Основная фаза этого сплава τ_2 - TiCuAl. По границам фазы τ_2 - TiCuAl расположена фаза τ_1 -TiCu₂Al (рисунок 60,61)» [5].

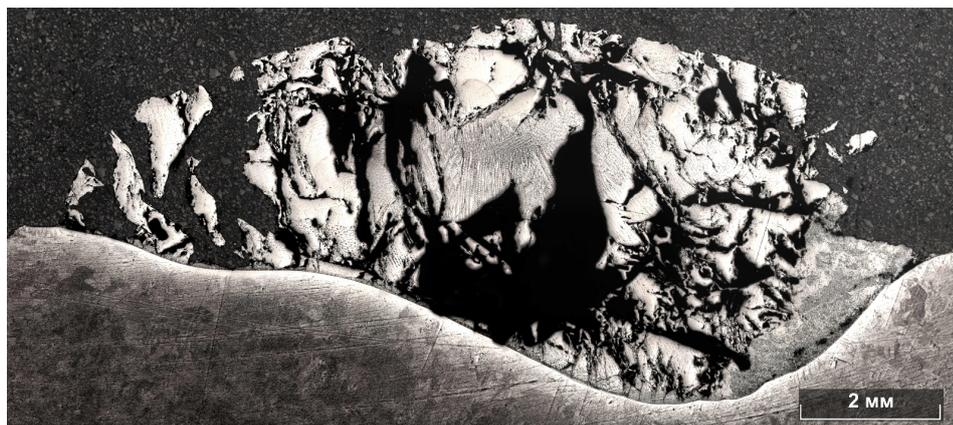


Рисунок 58 – Макроструктура наплавки образца 2-5

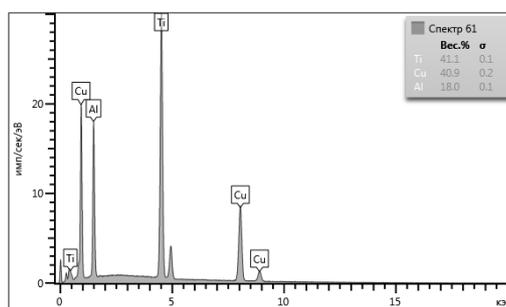
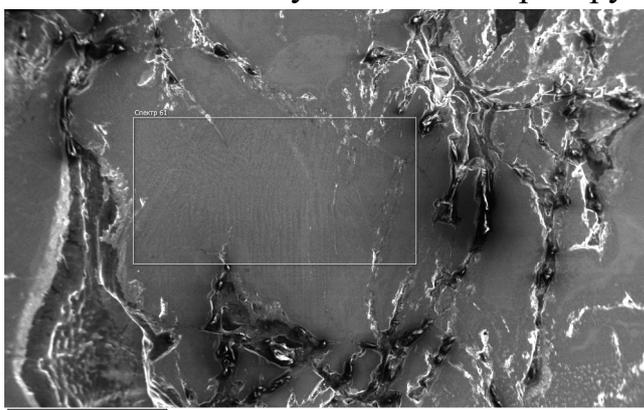


Рисунок 59 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 61»).

Образец № 2-5

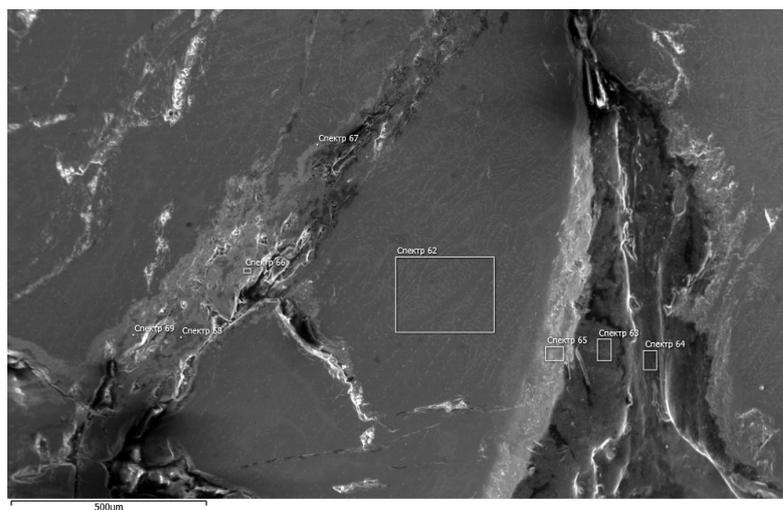


Рисунок 60 – Микроструктура наплавки образца № 2-5

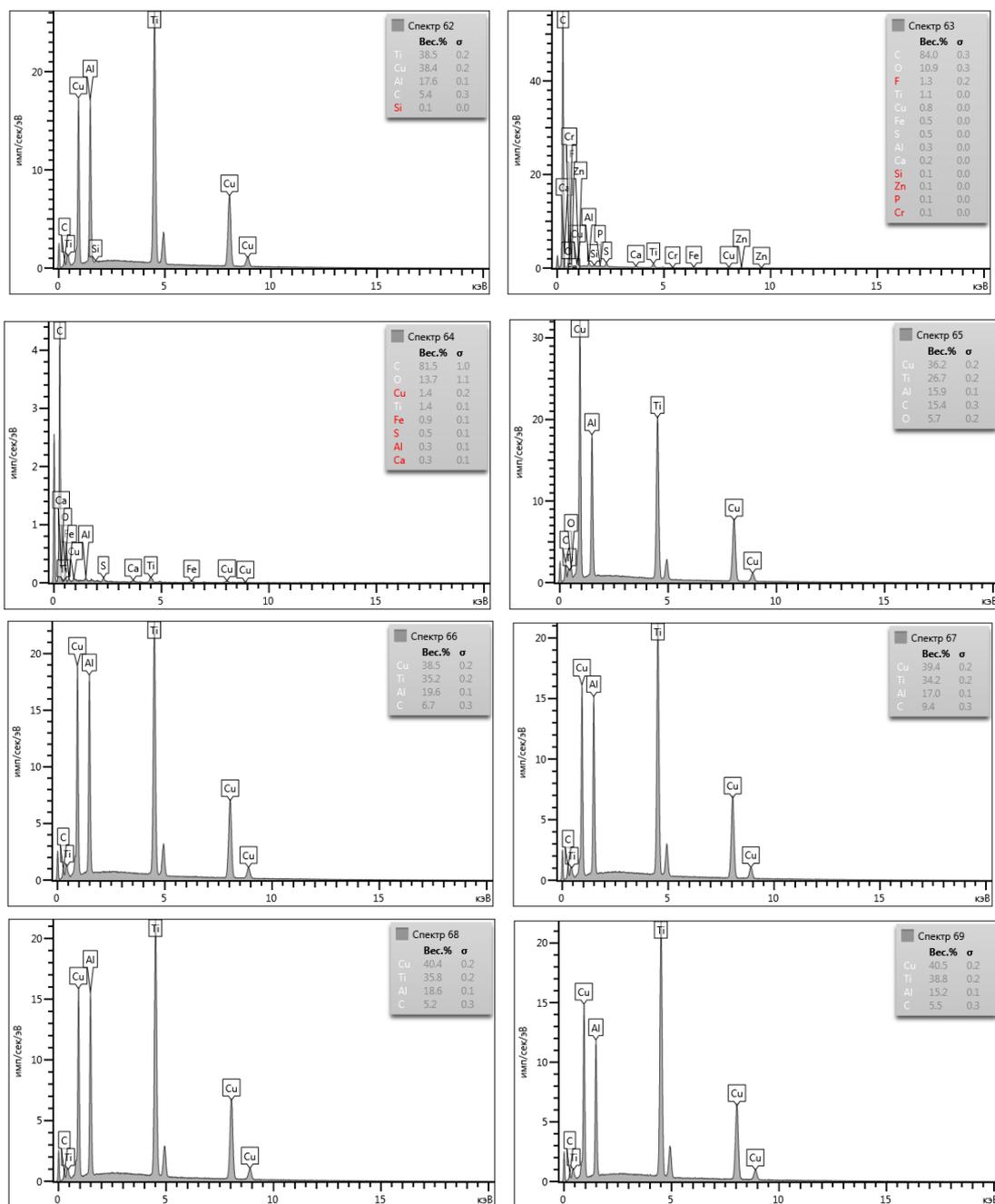


Рисунок 61 – Результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных («Спектр 66», «Спектр 67», «Спектр 68», «Спектр 69»).



Рисунок 62 – Макроструктура наплавки образца 2-6

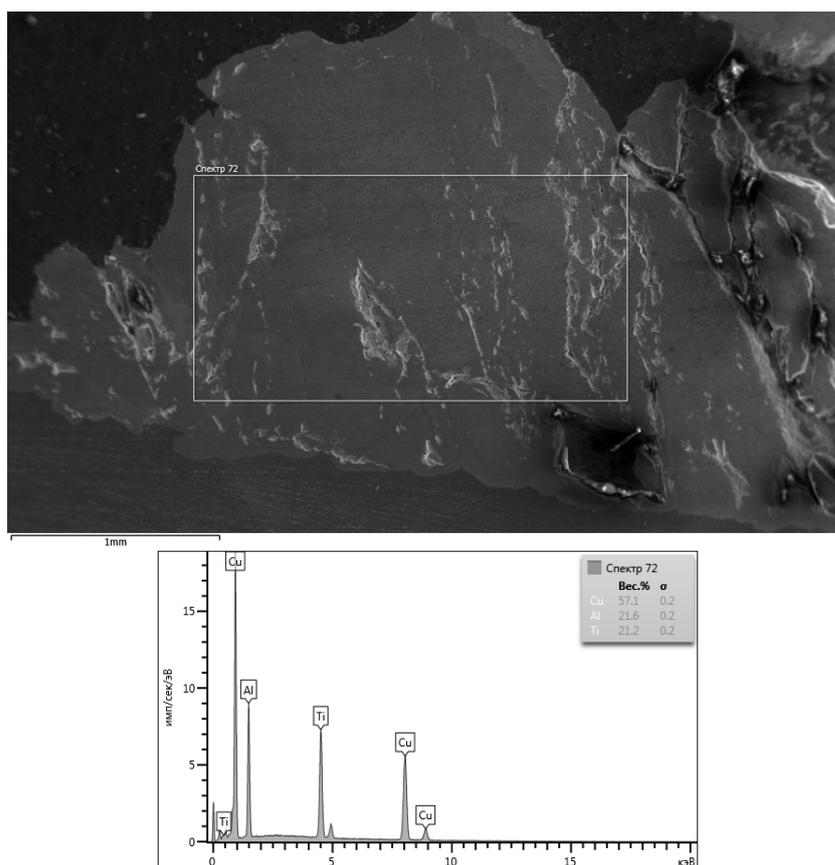


Рисунок 63 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 72»). Образец № 2-6

«Образец 2-6 так же разрушился при подготовке шлифа (рисунок 62). Химический состав отличается большим содержанием меди до 57,1 % и содержанием алюминия до 21,25% (рисунок 63). Структура практически однофазная с небольшим размером зерна. Фазовый состав представлен фазой τ_1 -TiCu₂Al (рисунок 64,65)» [5].

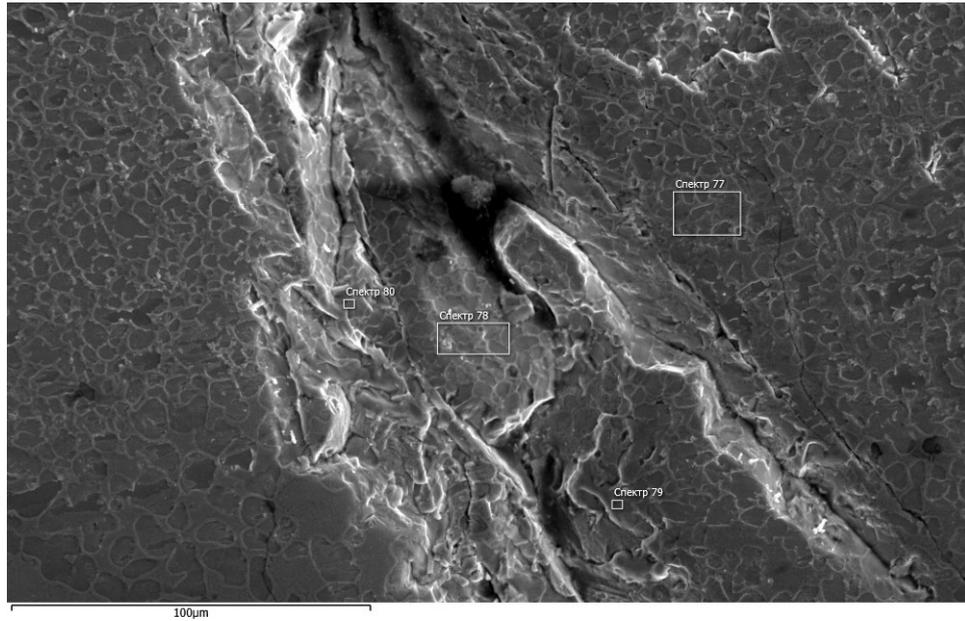


Рисунок 64 – Микроструктура наплавки образец 2-6

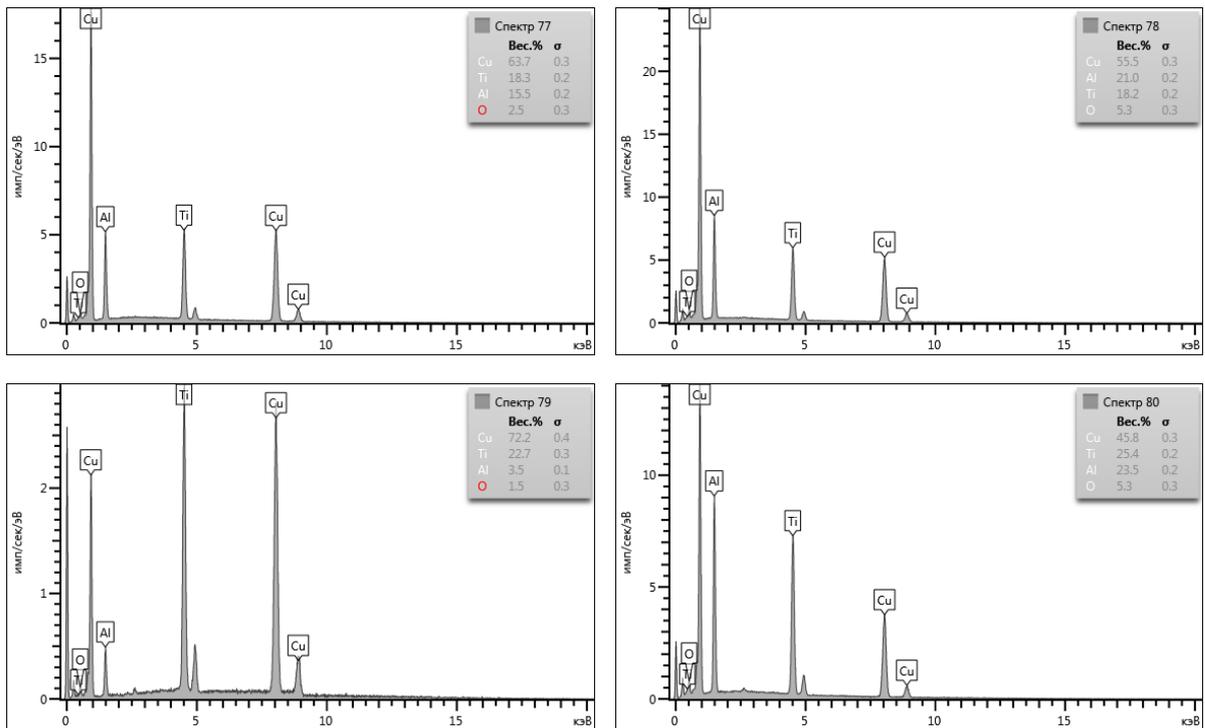
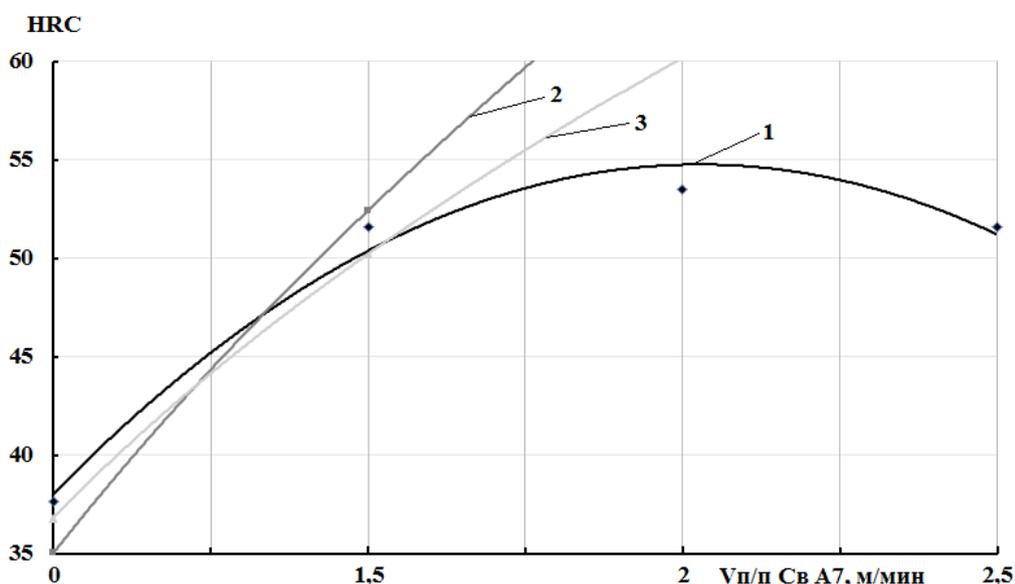


Рисунок 65 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 77», «Спектр 78», «Спектр 79», «Спектр 80»).

Образец 2-6

3.3 Исследование механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла

Твердость купридного покрытия наплавленного двухдуговой наплавкой с использованием медной и алюминиевой присадочными проволоками изменяется в зависимости от химического и фазового состава в пределах 51-54,8 HRC. Твердость в связи с увеличением процентного содержания алюминия и увеличения объемов более хрупких фаз τ_1 -TiCu₂Al и τ_2 -TiCuAl уменьшалась (рисунок 66).



1- $V_{п/п} CuAl8 = 1$ м/мин, 2- $V_{п/п} CuAl8 = 3$ м/мин, 3 = $V_{п/п} CuAl8 = 5$ м/мин

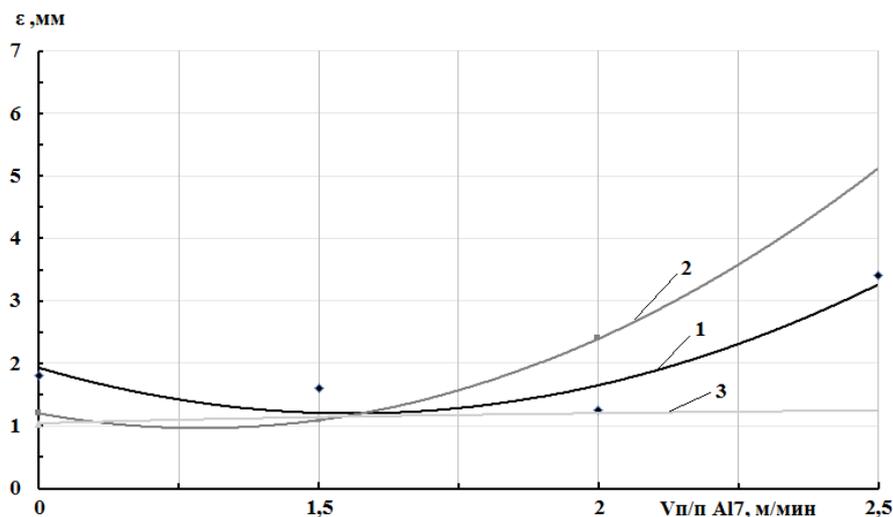
Рисунок 66 - Зависимость твердости наплавленных образцов от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки:

«На основании данных полученных в результате исследований жаростойкости образцов было определено, что жаростойкость образцов при 100 часах выдержки в печи показалоизменялась в интервале от 0,5 до 7 %. Увечение массы эталона составляло 14 %, это говорит о том что, увеличение массы наплавленных образцов от 2 до 28 раз меньше по сравнению с эталоном (таблица 5)» [5].

Таблица 5 – Исследование жаростойкости

Наименование образцов	До зачистки	После зачистки	%
1	0,327	0,346	5,8104
2	0,306	0,326	6,53595
3	0,558	0,561	0,53763
4	0,43	0,449	4,4186
5	0,471	0,513	8,9172
2,1	0,33	0,354	7,27273
2,2	0,204	0,196	3,921569
2,4	0,543	0,522	3,867403
Титан (эталон)	0,265	0,303	14,3396

По результатам данных полученных при исследовании износостойкости, был построен график в котором отмечается увеличении резкое повышение износостойкости на 1 и 2 графиках при скорости подачи 1,5 м/мин проволоки А17. На 3 графике наблюдаются постоянные величины износостойкости (рисунок 67).



1- $V_{п/п CuAl8} = 1$ м/мин, 2- $V_{п/п CuAl8} = 3$ м/мин, 3- $V_{п/п CuAl8} = 5$ м/мин

Рисунок 67 - Зависимость износостойкости от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

Выводы к разделу 3

В результате проведенных исследований двухдуговой наплавки покрытий из сплавов системы титан-медь с применением медной и алюминиевой электродных проволок в среде аргона были определены геометрические характеристики от скорости подачи никелевой электродной проволоки, получены зависимости химического состава от скорости подачи никелевой присадочной проволоки, определен фазовый состав покрытий и построены зависимости твердости и износостойкости никелидных покрытий от химического и фазового состава.

4 Исследование процессов аргодуговой наплавки купридов титана плавящимся электродом и свойств наплавленных покрытий

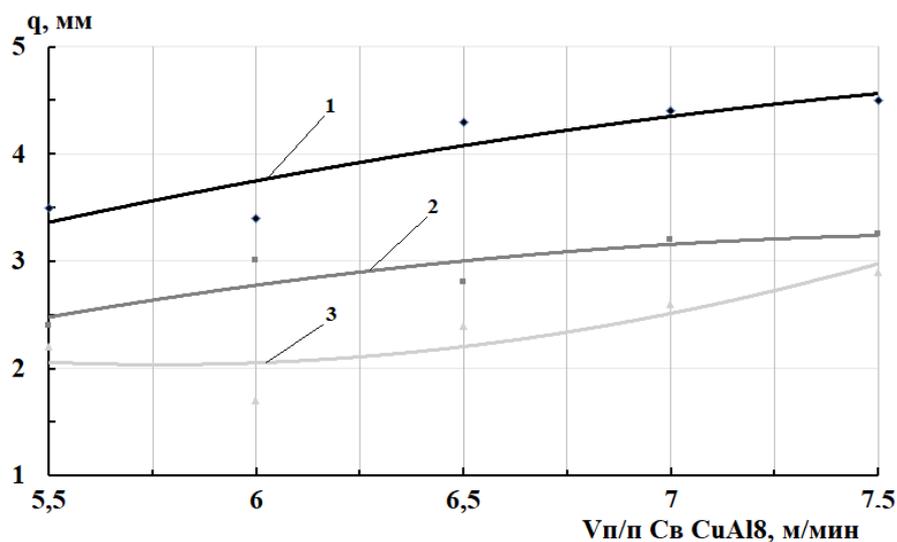
4.1 Аргодуговая наплавка с применением медной электродной проволоки CuAl8

4.1.1 Исследование процессов наплавки плавящимся электродом

По результатам визуального осмотра наплавленных валиков аргодуговым способом, не плавящимся электродом, было определено, что валики имеют удовлетворительное качество без критических отклонений (рисунок 68).



Рисунок 68 - Образцы наплавленных валиков дуговым способом, плавящимся электродом с применением электродной проволоки марки CuAl8

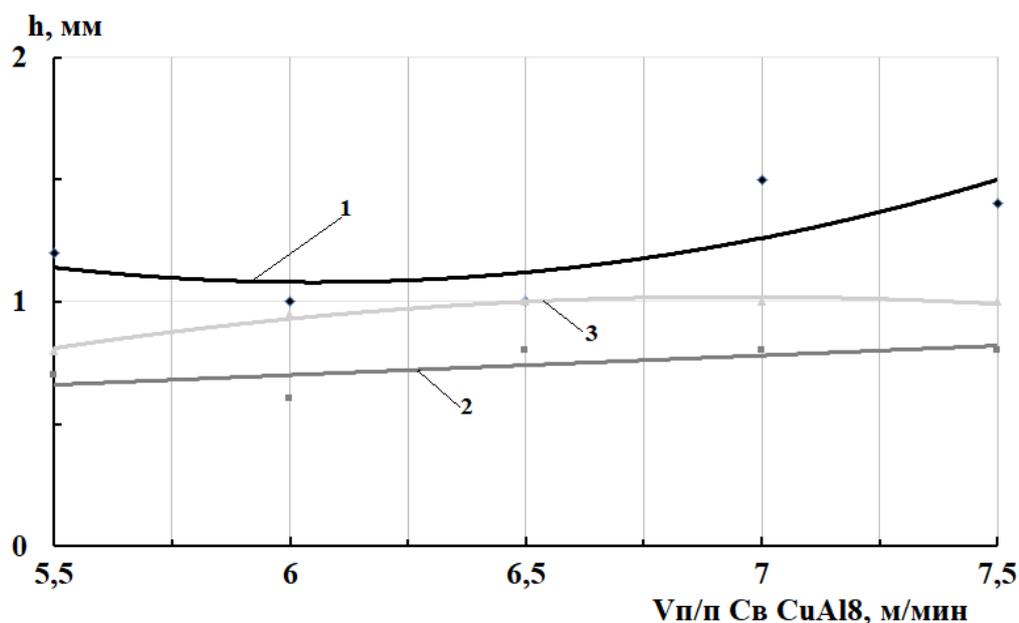


1 – $V_{св.} = 0.1$ м/мин, 2 – $V_{св.} = 0.15$ м/мин, 3 – $V_{св.} = 0.2$ м/мин

Рисунок 69 - Зависимость высоты наплавленного валика от скорости наплавки

На основании полученных данных после замеров геометрических параметров наплавленных валиков была определена зависимость высоты валика от скорости подачи алюминиевой проволоки, представленная в графической форме (рисунок 69).

Проведенные исследования показали, что глубина проплавления изменялась не значительно, плавно повышаясь, что связано с увеличением весового расхода присадочного материала. Повышение варьировалось в интервале от 0.7 мм до 1,5 мм (рисунок 70).

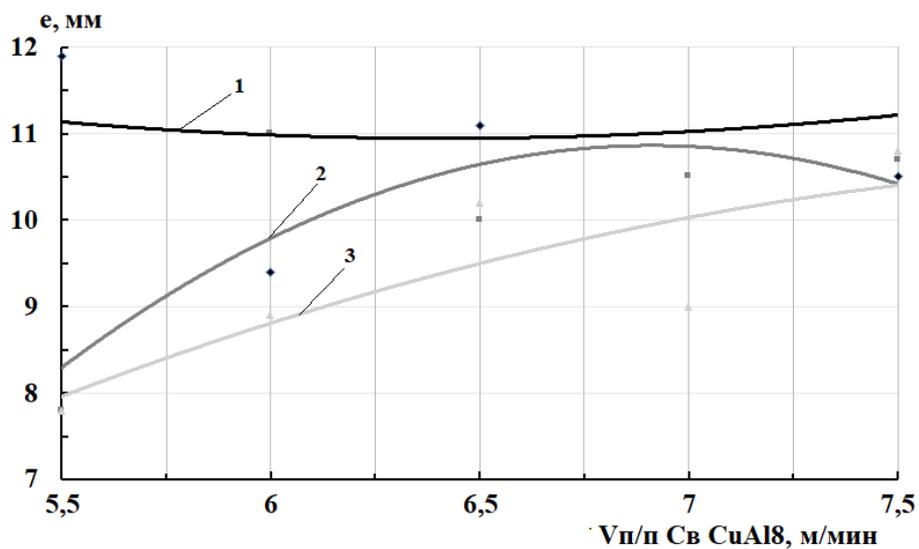


1 – $V_{св.} = 0.1$ м/мин, 2 – $V_{св.} = 0.15$ м/мин, 3 – $V_{св.} = 0.2$ м/мин

Рисунок 70 - Зависимость глубины наплавленного валика от скорости наплавки

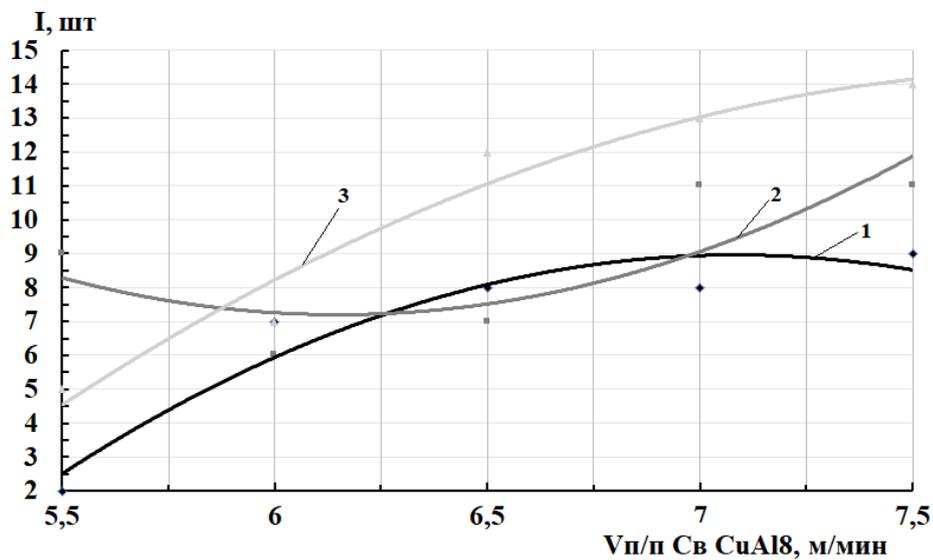
По результатам анализа ширины валика, было определено, что ширина наплавленного валика изменяется в большую сторону с повышением скорости подачи алюминиевой проволоки (рисунок 71).

Проведенные исследования показали, что при увеличении скорости подачи медно-алюминиевой электродной проволоки и увеличении скорости наплавки количество трещин возрастает, наибольшее количество трещин на 3 графике при скоростях подачи медно-алюминиевой проволоки в интервале от 5,5 м/мин до 7,5 м/мин и с скорости наплавки 0,2 м/мин (рисунок 72), что связано образованием хрупких интерметаллидных фаз.



1 – $V_{св.} = 0.1$ м/мин, 2 – $V_{св.} = 0.15$ м/мин, 3 – $V_{св.} = 0.2$ м/мин

Рисунок 71 - Зависимость ширины наплавленного валика от скорости наплавки

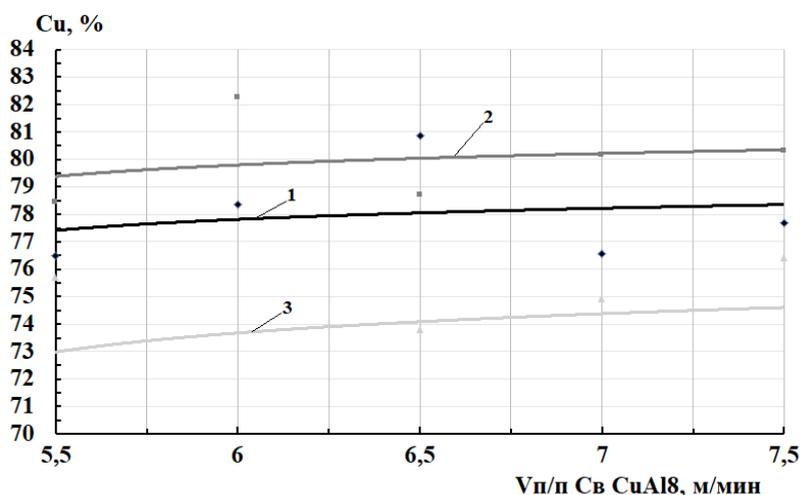


1 – $V_{св.} = 0.1$ м/мин, 2 – $V_{св.} = 0.15$ м/мин, 3 – $V_{св.} = 0.2$ м/мин

Рисунок 72 – Зависимость количества трещин наплавленного валика от скорости наплавки

4.1.2 Структура, химический и фазовый состав наплавленного металла

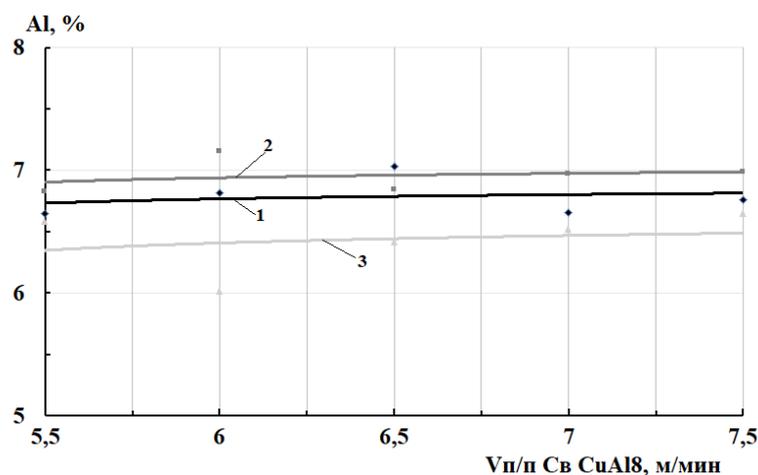
На основании полученных данных после замеров геометрических параметров наплавленных валиков была определена зависимость высоты валика от скорости подачи алюминиевой проволоки, представленная в графической форме (рисунок 73), что связано с увеличением весового расхода присадочного материала. Наибольшее содержание меди в наплавленном валике прослеживается в 3 графике $V_{п/п}$ CuAl8 в интервале от 5,5 м/мин до 7,7 м/мин и скорости наплавки 0,2 м/мин.



1- $V_{св.} = 0,1$ м/мин, 2- $V_{св.} = 0,15$ м/мин, 3- $V_{св.} = 0,2$ м/мин

Рисунок 73 - Зависимость процентного содержания меди в наплавленном валике от скорости сварки

При увеличении скорости подачи медно-алюминиевой проволоки и скорости наплавки процентное содержание алюминия изменялось не значительно в пределах от 6,7 до 7,2% (риунок 74).



1- $V_{св.} = 0,1$ м/мин, 2- $V_{св.} = 0,15$ м/мин, 3- $V_{св.} = 0,2$ м/мин

Рисунок 74 - Зависимость процентного содержания алюминия в наплавленном валике от скорости сварки

«Химический состав наплавленного металла определялся скоростью подачи электродной проволоки. Содержания меди в наплавленных валиках составляло 73-83% (рисунок 73), а алюминия 2-5% в зависимости от скорости подачи проволоки (рисунок 74). По сечению валика наблюдалась значительная неоднородность по химическому и фазовому составу в образцах, наплавленных со скоростью 5,5 и 6 м/мин. На шлифах явно выделяются макровключения с различной травимостью с основной матрицей, которые отличались по химическому и фазовому составу (рисунок 75). Указанные включения имеют более высокое содержание титана и, исходя из химического состава, представлены фазами: α (Ti) + Ti_2Cu , легированными алюминием (рисунок 75 а). Основная матрица, наплавленных со скоростями подачи проволоки 5,5 и 6 м/мин, валиков представлена фазами: Ti_2Cu ; $TiCu$, легированными алюминием и фазой $TiCu_2Al$ (рисунок 75 б)» [9].

«При скоростях подачи проволоки 6,5-7 м/мин содержание меди по сечению валика изменялось не более чем на 1-2%. На шлифах образцов отсутствовали явно заметные макронеоднородности (рисунок 75 б). Исходя из химического состава отдельных фаз структура валиков, наплавленных со

коростью подачи 6,5; 7 м/мин представлена основной фазой Ti_2Cu и фазами: $TiCu$; $TiCu_2Al$. При скорости подачи электродной проволоки 7,5 м/мин структура наплавленных валиков представлена фазой $TiCu$ с равноосными включениями фазы $TiCu_2Al$ и одиночными включениями фазы Ti_2Cu (рисунок 76 в)» [9].

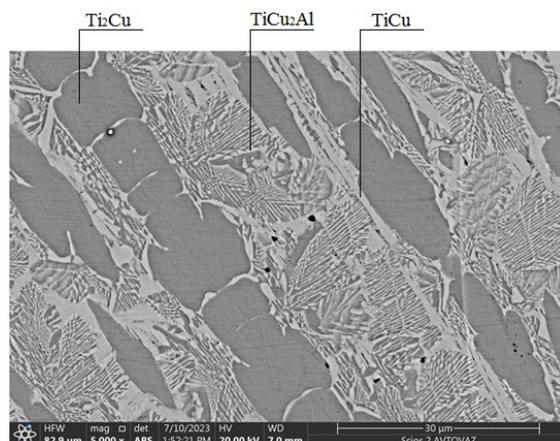
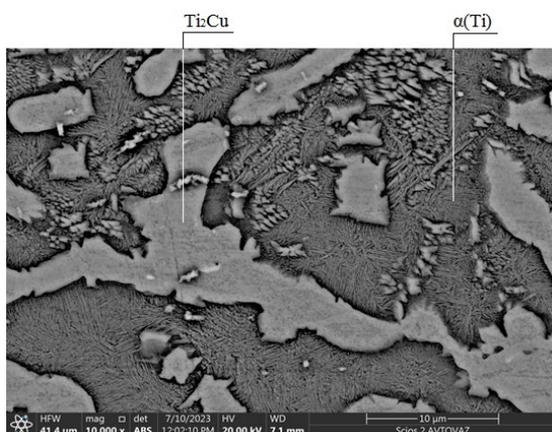


а)



б)

Рисунок 75 - Макроструктура наплавленных валиков при скоростях подачи электродной проволоки: а) 6 м/мин; б) 7 м/мин



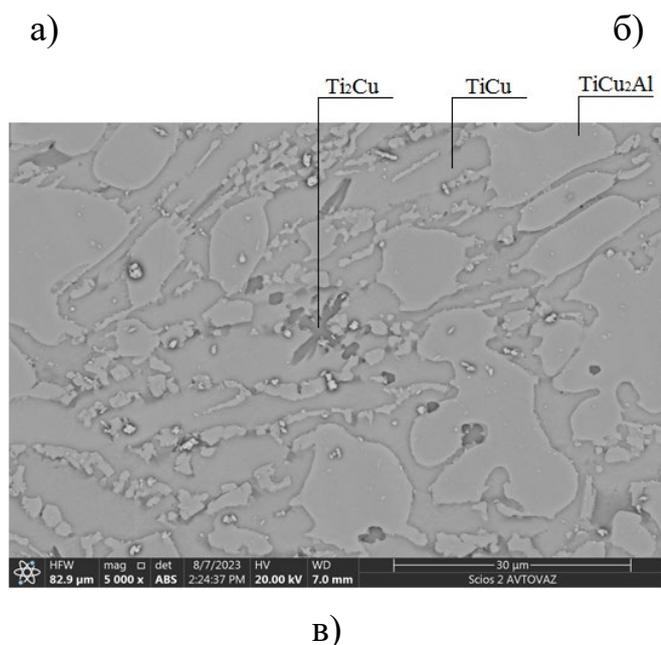
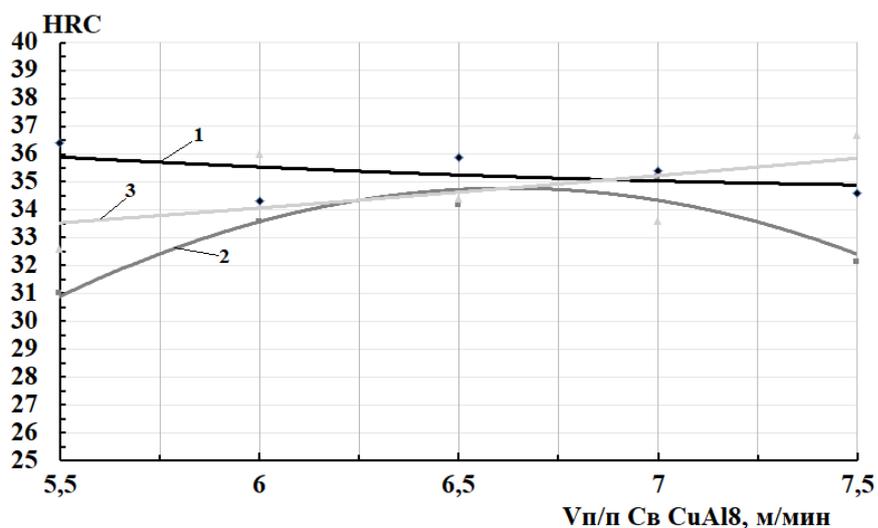


Рисунок 76 - Структура наплавленных сплавов при скоростях подачи электродной проволоки: а) 6 м/мин; б) 7 м/мин; в) 7,5 м/мин [7]

4.1.3 Исследование механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла

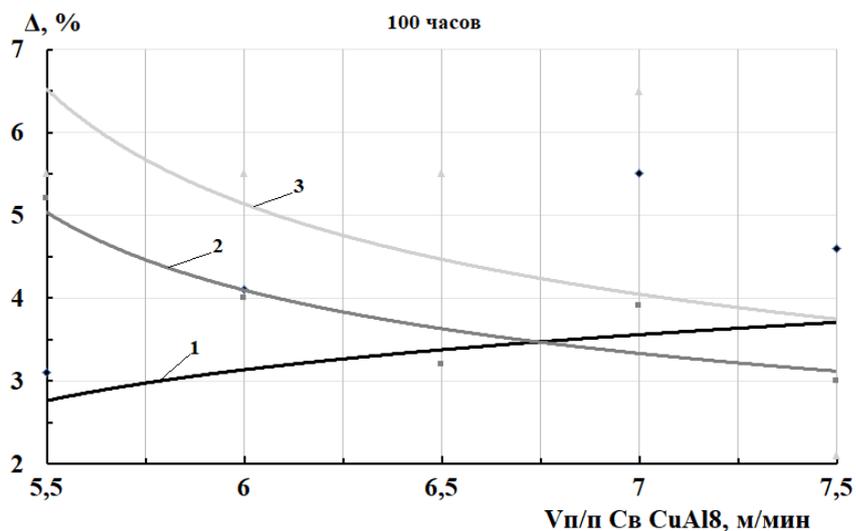
При проведении исследований образцов на твердость показатели изменялись незначительно, наибольший показатель твердости отмечается на 3 графике при скорости подачи медно-алюминиевой проволоки 7,5 м/мин - 36,9 HRC (рисунок 77).



1 – $V_{св.} = 0.1$ м/мин, 2 – $V_{св.} = 0.15$ м/мин, 3– $V_{св.} = 0.2$ м/мин

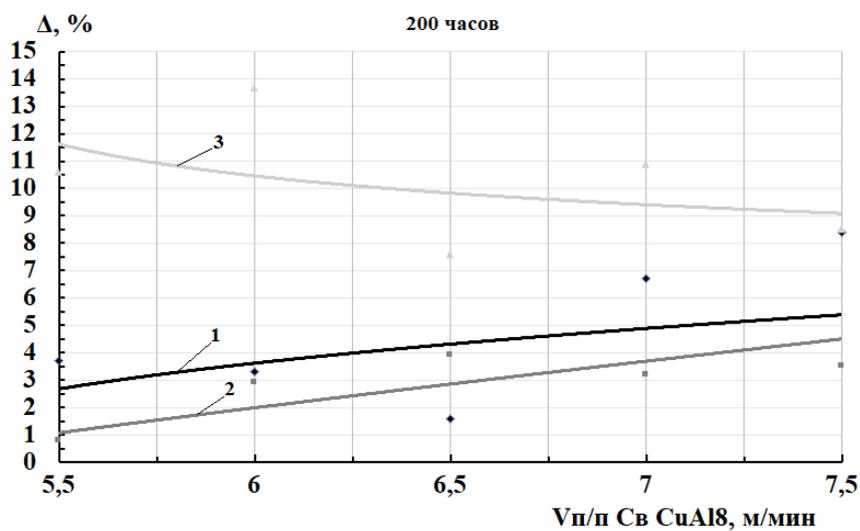
Рисунок 77 – Зависимость твердости наплавленного валика от скорости наплавки

Исследования образцов на жаростойкость при 100 часов выдержки в печи показало, что на 2 и 3 графике с увеличением подачи медно-алюминиевой проволоки процент потери массы образцов резко снижается, что может быть обусловлено образованием жаростойких фаз (рисунок 78). Процент потери массы эталона из титана марки ВТ1-0 составил 27,6%



1 – $V_{св.} = 0.1$ м/мин, 2 – $V_{св.} = 0.15$ м/мин, 3 – $V_{св.} = 0.2$ м/мин

Рисунок 78 – Зависимость процентов потери массы наплавленного валика от скорости наплавки при 100 часах выдержки в печи

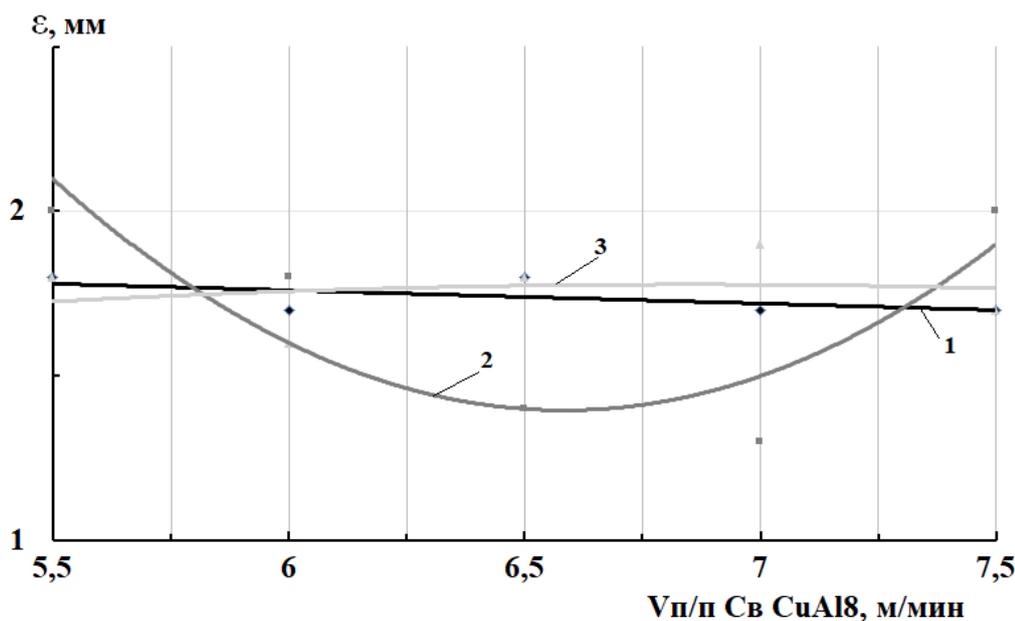


1 – $V_{св.} = 0.1$ м/мин, 2 – $V_{св.} = 0.15$ м/мин, 3 – $V_{св.} = 0.2$ м/мин

Рисунок 79 – Зависимость процентов потери массы наплавленного валика от скорости наплавки при 200 часах выдержки в печи

При дальнейших исследованиях жаростойкости образцов после 200 часов выдержки в печи на 3 графике прослеживается плавное снижение процента потери массы при увеличении скоростей подачи электродных проволок. На 2 и 3 графиках прослеживается плавное увеличение процента потери массы (рисунок 79). Потеря массы эталона составляло 40 %

При увеличении скоростей подачи электродных проволок на 2 и 3 графике показатели износа материала изменяются незначительно пределах 1,7 мм до 2 мм. На 3 графике при скорости подачи медно-алюминиевой электродной проволоки 6,5 м/мин и скорости наплавки 0,15 м/мин прослеживается резкое повышение износостойкости материала, что может быть обусловлено образованием твердой фазы (рисунок 80).



1 – $V_{св.} = 0,1$ м/мин, 2 – $V_{св.} = 0,15$ м/мин, 3 – $V_{св.} = 0,2$ м/мин

Рисунок 80 – Зависимость износостойкости наплавленного валика от скорости наплавки

4.2 Аргодуговая наплавка с применением медно-марганцевой и титановой электродных проволок

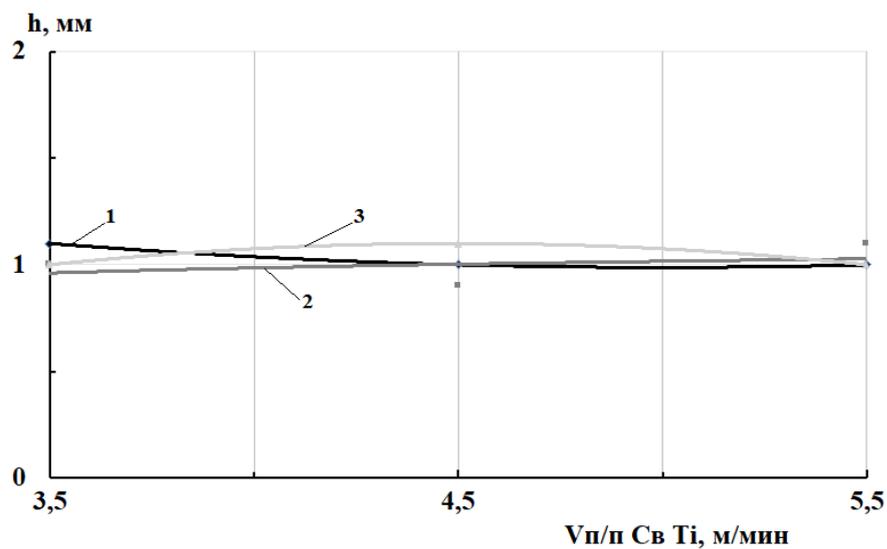
4.2.1 Исследование процессов двухдуговой наплавки плавящимися электродами

По результатам визуального осмотра наплавленных валиков аргодуговым способом, не плавящимся электродом, было определено, что валики имеют удовлетворительное качество без критических отклонений (рисунок 81).



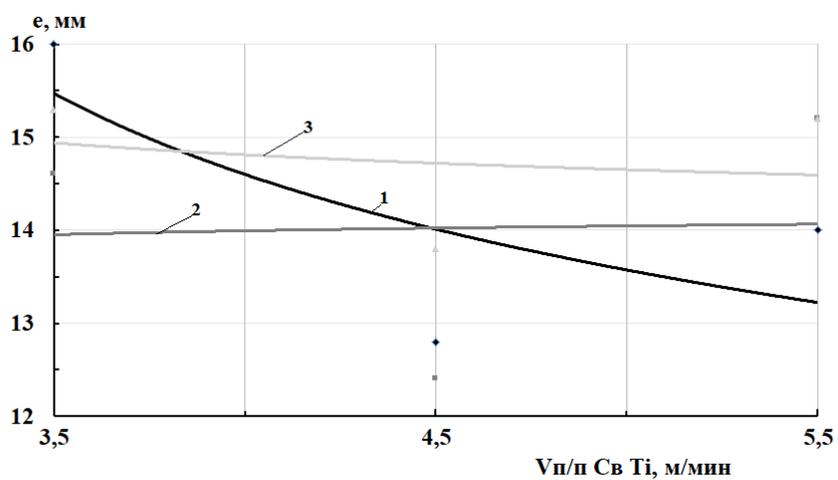
Рисунок 81 - Образцы наплавленных валиков дуговым способом, плавящимся электродом с применением электродных проволок марки CuMn13Al7 и титановой проволоки марки BT1-0 [12]

В результате проведения геометрических параметров валиков, выяснилось, что при повышении скоростей подачи электродных проволок глубина проплавления изменялась не значительно в диапазоне от 1 мм до 1,2 мм (рисунок 82).



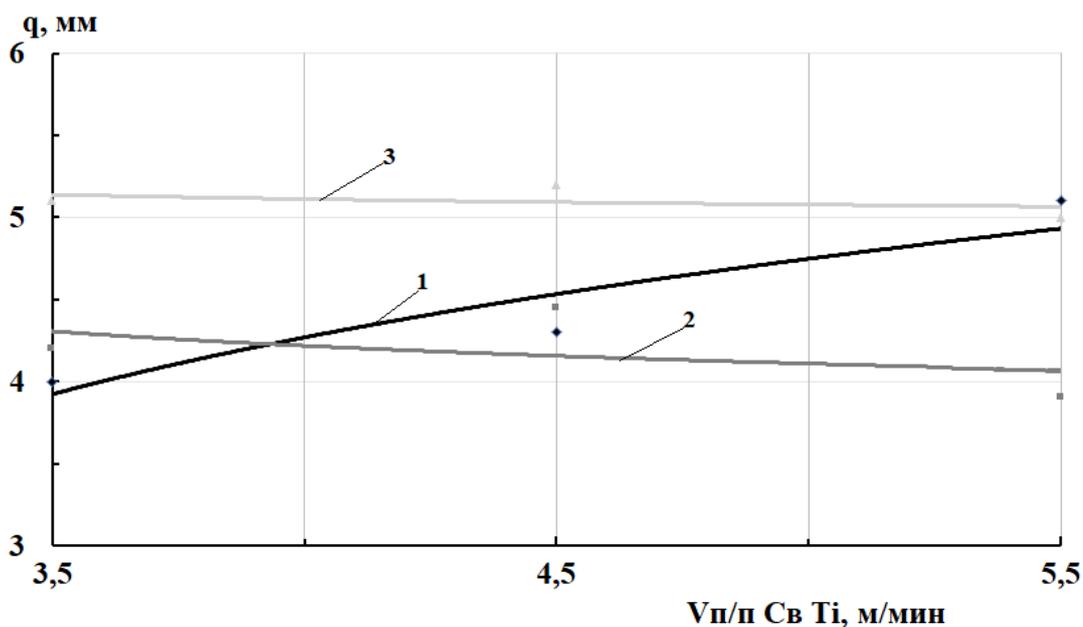
1- Vп/п CuMn13Al7 - 3 м/мин, 2 - Vп/п CuMn13Al7 - 5 м/мин,
3- Vп/п CuMn13Al7 - 7 м/мин

Рисунок 82 - Зависимость глубины проплавления валика от скорости подачи титановой электродной проволоки



1- Vп/п CuMn13Al7 - 3 м/мин, 2 - Vп/п CuMn13Al7 - 5 м/мин,
3- Vп/п CuMn13Al7 - 7 м/мин

Рисунок 83 - Зависимость ширины валика от скорости подачи титановой электродной проволоки

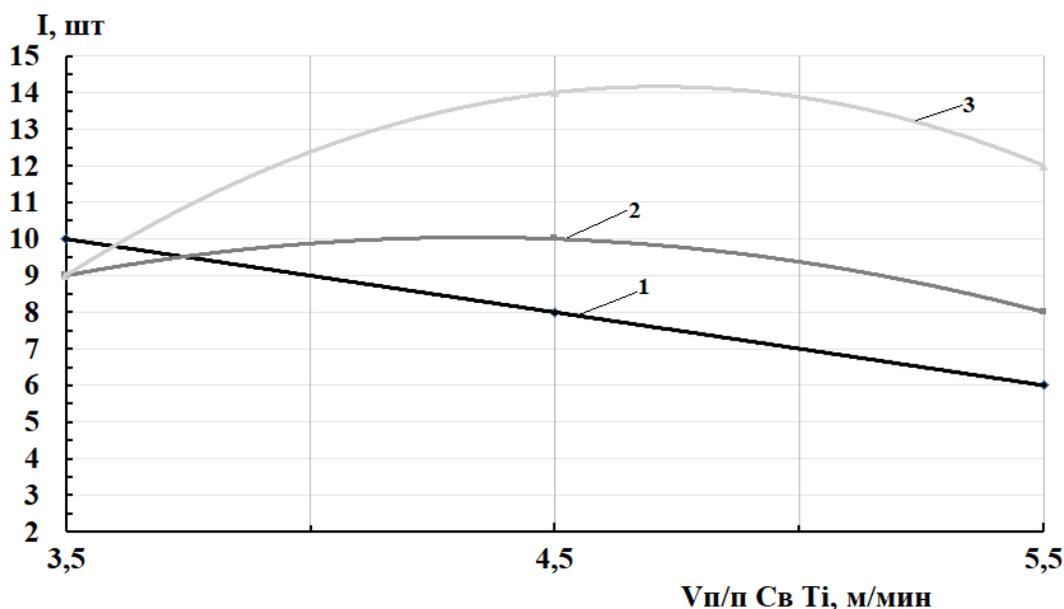


1- Vп/п CuMn13Al7 - 3 м/мин, 2 - Vп/п CuMn13Al7 - 5 м/мин,
3- Vп/п CuMn13Al7 - 7 м/мин

Рисунок 84 - Зависимость высоты валика от скорости подачи титановой электродной проволоки

Результаты измерения геометрии высоты и ширины валика показали обратную зависимость, при увеличении скорости подачи электродных проволок на 1 графике ширина валика резко снижается (рисунок 83), однако высота валика резко увеличивается (рисунок 84). На 2 и 3 графике показатели ширины и высоты валика изменялись не значительно.

Исследования наплавленных валиков на количество трещин в образцах показало, что с увеличением электродных проволок на 1 и 2 графиках количество трещин снижается (рисунок 85). На 3 графике прослеживается резкое повышение количества трещин, максимальное количество трещин отмечается на образце со скоростью подачи титановой проволоки 4,5 м/мин и скоростью подачи медно-бронзовой проволоки 7 м/мин. Повышение количества трещин может быть связано с образованием твердой фазы.

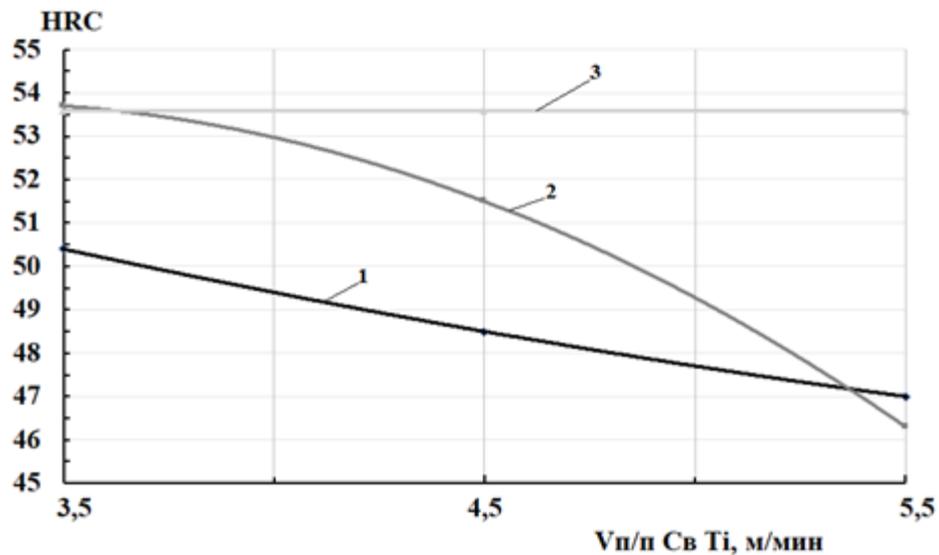


1- Vп/п CuMn13Al7 - 3 м/мин, 2 - Vп/п CuMn13Al7 - 5 м/мин,
3- Vп/п CuMn13Al7 - 7 м/мин

Рисунок 85 - Зависимость количества трещин валика от скорости подачи титановой электродной проволоки

4.2.2 Исследование механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла

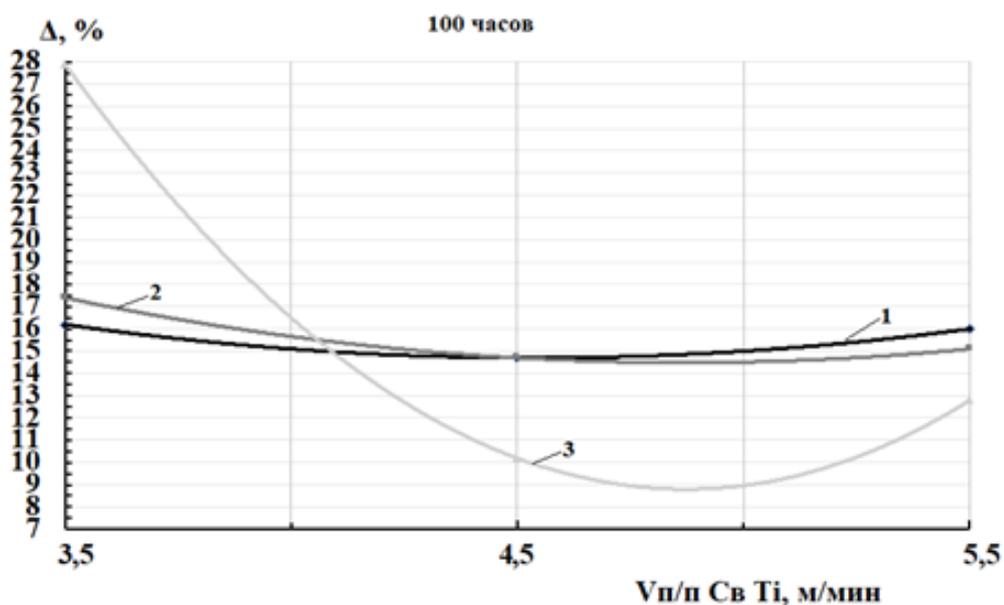
Измерение твердости образцов показало, что при увеличении скорости подачи электродных проволок на 1 и 2 графиках твердость образцов резко снижается. На 3 графике твердость образцов изменяется незначительно, но также образцы со скоростью подачи медно-марганцевой электродной проволокой имеют самый высокий показатель твердости в серии исследований – 53,9 HRC (рисунок 86). Высокая твердость образцов представленных на 3 графике может быть связано с образованием твердой фазы.



2- Вп/п CuMn13Al7 – 3 м/мин, 2 – Вп/п CuMn13Al7 – 5 м/мин,
 3- Вп/п CuMn13Al7 – 7 м/мин

Рисунок 86 - Зависимость твердости валика от скорости подачи титановой электродной проволоки [3]

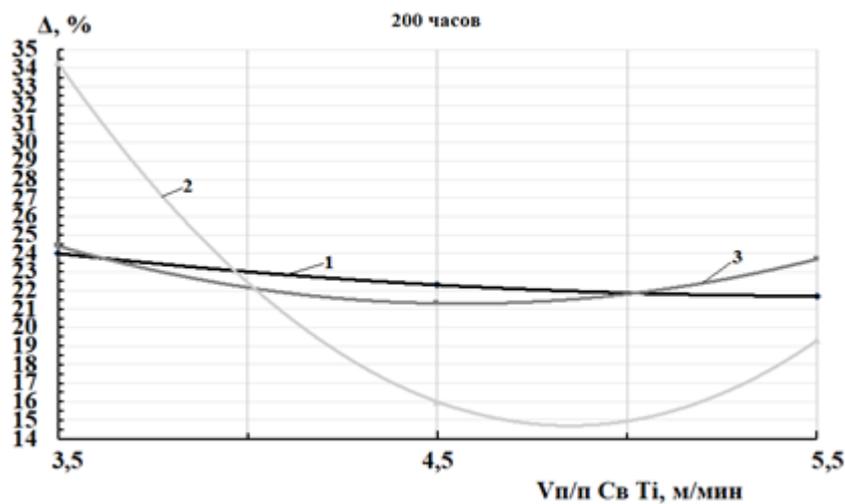
В результате проведения исследования образцов на жаростойкость при 100 часов выдержки в печи выяснилось, что на 1 и 2 графике доля потери массы образцов изменялась с незначительными отклонениями. Однако на 3 графике отмечается резкое снижение доли потери массы, это может быть связано образованием твердой и жаростойкой фазы. Наименьшее значение наблюдается при скорости подачи титановой проволоки 4,5 м/мин – 10 % (рисунок 87). Доля потери массы эталона составляла 18%



1- Vп/п CuMn13Al7 - 3 м/мин, 2 - Vп/п CuMn13Al7 - 5 м/мин,
3- Vп/п CuMn13Al7 - 7 м/мин

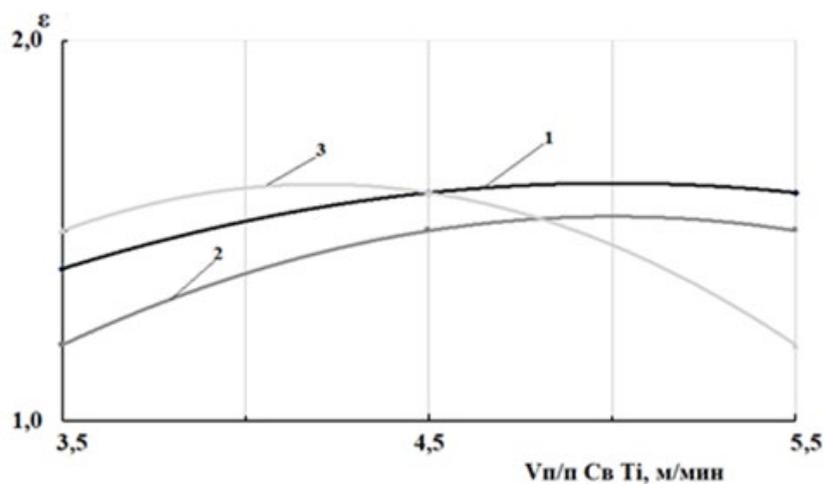
Рисунок 87 – Зависимость процентов потери массы наплавленного валика от скорости подачи титановой проволоки при 100 часах выдержки в печи

При 2 00 часов выдержки в печи образцы имеют схожие по построению графики. Однако доля потери массы увеличилась, на 1 и 2 графиках в 1,5 раза, на 3 графике в 0,5 раза (рисунок 88). Доля потери массы эталона составляла 24%.



1- Vп/п CuMn13Al7 - 3 м/мин, 2 - Vп/п CuMn13Al7 - 5 м/мин,
3- Vп/п CuMn13Al7 - 7 м/мин

Рисунок 88 – Зависимость процентов потери массы наплавленного валика от скорости подачи титаной проволоки при 200 часах выдержки в печи



1- Vп/п CuMn13Al7 - 3 м/мин, 2 - Vп/п CuMn13Al7 - 5 м/мин,
3- Vп/п CuMn13Al7 - 7 м/мин

Рисунок 89- Зависимость износостойкости валика от скорости подачи титановой электродной проволоки [7]

Исследование износостойкости образцов показало, что на 1 и 2 графике износостокось плавно снижается. На 3 графике износотойкость образцов возрастает с увеличением скорости подачи титановой электродной проволоки. Максимальные показатели износостойкости отмечаются при скорости подачи медно-марганцевой проволоки 7 м/мин и скорости подачи титановой электродной проволоки 5,5 м/мин (рисунок 89).

Выводы к разделу 4

При проведении испытаний, исследований и анализа дуговой наплавки с применением медной электродной проволоки CuAl8 и двухдуговой наплавки с применением медно-марганцевой и титановой электродных проволок сплавов на основе купридов титана были получены зависимости:

- твердости и износостойкости от фазового и соответственно от химического состава,
- построена зависимость химического состава от соотношения скоростей подач никелевой и титановой электродных проволок,
- установлены зависимости геометрических составляющих нанесенных купридных покрытий от режимов их нанесения.

Заключение

В ходе проведенных исследований была доказана возможность получения покрытий из купридов титана всеми дуговыми способами, такими как аргонодуговая наплавка, неплавящимся электродом с применением медной и алюминиевой присадочных проволок, дуговой наплавки с применением медной электродной проволокой и двухдуговой наплавкой с использованием медно-марганцевой и титановой электродных проволок.

Заключение по дуговым способам получения покрытий из купридов титана:

– диапазон возможного получения химического состава при использовании разных дуговых способов наплавки варьируется от метода к методу, в то время как аргонодуговой наплавкой с применением присадочных проволок из меди и алюминия можно получать покрытия с содержанием меди в пределах от 10 % до 60 %, а алюминия от 1% до 27%, дуговой наплавкой с применением медной электродной проволоки можно получать от 73,2 % до 81 % меди,

– твердость покрытий из купридов титана полученных дуговыми способами доходит до 54 HRC в зависимости от химического и фазового состава, наличие тройных фаз τ_1 -TiCu₂Al и τ_2 -TiCuAl вызывает повышенную хрупкость наплавленного металла,

– износостойкость также как и твердость зависит от химического и фазового состава и составляет от 1,1 до 3,5 износостойкости титана, наличие тройных фаз способствует выкрашиванию кусочков из наплавленного валика.

– повышенная жаростойкость наблюдается у образцов наплавленных аргонодуговым способом и в зависимости от содержания меди и алюминия в покрытии варьируется в интервале от 1,5 до 28 раз выше титана марки BT1-0.

Список используемых источников

1. Горина Л.Н., Фесина М.И. Раздел бакалаврской работы «Безопасность и экологичность технического объекта». Уч.-методическое пособие (2-е изд. Доп.). - Тольятти: изд-во ТГУ, 2021. –22 с.
2. Евстропов Д.А. Формирование структуры и свойств композиционных покрытий системы Cu-Ti на поверхности медных деталей. [Текст]: диссертация канд. техн. наук: 05.16.09: защищена 15.11.16: утв. 15.11.16 /Евстропов Дмитрий Анатольевич. - Волгоград, 2016. -199 с.
3. Егоров А.С. Методические указания по оформлению выпускных квалификационных работ по программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры [Текст]: // Метод. указ. ТГУ.-2020.
4. Захаров А.М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем.[Текст] / А.М. Захаров. –М.:Металлургия.-1990.
5. Исаков Ю. А. Исследование процессов и разработка технологии аргонодуговой наплавки купридов титана// Исаков Ю. А. [Текст]: бакалаврская выпускная квалификационная работа – 2022 г/ Исаков Юрий Алексеевич.
6. Инструкция по визуальному и измерительному контролю (РД 03-606–03). Серия 03. Выпуск 39[Текст] / Кол л. авт. — М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2006. — 104 с.
7. Климов, А.С. Выпускная квалификационная работа бакалавра: Учебно-метод. пособие по выполнению выпускной квалификационной работы бакалавра по направлению подготовки 150700.62 «Машиностроение» / А.С. Климов. – Тольятти: ТГУ, 2014. – 52с.
8. Клопотов В.Д. Тройные диаграммы на основе алюминидов титана. Анализ и построение [Текст] / В.Д. Клопотов, А.И. Потекаев, А.А. Клопотов. // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – №. 2.

9. Ковтунов. А. И. Свойства наплавленных купридов титана с применением титановой и бронзовой электродных / Ковтунов А. И. Исаков Ю. А. Вершинин Л. В./ Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции - г. Петрозаводске - 2024.- С. 111-120.

10. Ковтунов А. И. Структура и свойства наплавленных купридов титана / Ковтунов. А. И., Исаков Ю. А., Вершинин Л. В., // Сварочное производство, 2024. №1 – С. 17-22.

11. Ковтунов А.И. Технология аргодуговой наплавки и свойства сплавов системы титан-медь [Текст] / А.И. Ковтунов, Т.В. Семистенова, А.М. Острянко, Д.И. Плахотный // Сварка и диагностика.-2017.-№6.-С. 43–46.

12. Краснопевцева И. В. Методическое пособие по выполнению курсовой работы по дисциплине «Организация и планирование машиностроительного производства». Уч.-методическое пособие. – Тольятти: изд-во ТГУ 2013 – 23с.

13. Крашенинников С.В. Исследование особенностей формирования и свойств интерметаллидных покрытий систем Ti-Cu и Ti-Ni на поверхности стальных деталей [Текст]: канд. техн. наук: 05.02.01 Волгоград, 2006 129 с. РГБ ОД, 61:07-5/59

14. Крашенинников С.В. Исследование процессов формирования покрытий методом диффузионной интерметаллизации [Текст] / С.В. Крашенинников, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвузовский сборник научных трудов / ВолгГТУ.- Волгоград, 2002.- С.102- 110.

15. Морозова Е. А. Лазерное легирование поверхности титана медью [Текст] / Е.А. Морозова, В.С. Муратов // Успехи современного естествознания. – 2009. – №. 11.

16. Моторин К.В. Методическое указание по курсовому проектированию бакалавров очного и заочного обучения. / К.В. Моторин. – Тольятти: ТГУ, 2021. – 7 с.

17. Острячко А. М. Исследование процессов наплавки сплавов системы титан медь// А.И. Ковтунов, Т.В. Семистенова, Плахотный Д.И. [Текст]: магистерская диссертация: защищена 08.09.2018: утв. 08.09.2018/ Острячко Алексей Михайлович

18. Радюк А.Г. Формирование диффузионных слоев на поверхности меди и ее сплавов [Текст] / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, А.Е. Украинцев // Цветные металлы. – 2007. – №5. – С. 95–97.

19. Серeda, Б.П. Диффузионное титанирование как метод повышения износостойкости латуни и бронзы в агрессивных средах/ Б.П. Серeda, И.В. Кругляк, В.П. Падалкаидр. // [Электронный ресурс]:http://www.zgia.zp.ua/gazeta/METALURG_26_14.pdf

20. Серeda Б.П. Исследование физико-механических свойств многокомпонентных защитных покрытий на медных сплавах/ Б.П. Серeda, И.В. Кругляк, Д.О. Кругляк, Ю.В.Бондаренко // [Электронный ресурс]: http://www.zgia.zp.ua/gazeta/METALURG_24_17.pdf

21. Шморгуn В.Г. Диффузионные процессы на межслойной границе сваренного взрывом трёхслойного композита системы Cu-Ti [Текст] / В.Г. Шморгуn, О.В. Слаутин, Д.А. Евстропов, А.О. Таубе // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. - 2014. - № 4. - С. 36-39.

22. Bateni M.R. et al. Oxidation behaviour of titanium coated copper substrate [Текст] // Surface and Coatings Technology. – 2001. –. vol. 139, pp.192-199.

23. Bateni M.R. et al. The effect of novel Ti-Cu intermetallic compound coatings on tribological properties of copper [Текст] // Annals. – 2003. – Т. 24. – Р. 26.

24. Guedes A. Et al. Microstructural characterization of γ -TiAl joints // Key Engineering Materials. – 2002. – Т. 230. – С. 27-30.

25. Elrefaey A. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer [Текст] / A. Elrefaey, W. Tillmann // Journal of materials processing technology. – 2009. – Т. 209. – №. 5. – P. 2746-2752.
26. Landolt-Bornstein Ternary alloy system (Phase diagram, crystallographic and thermodynamic data) [Текст] // Materials Science and International Team, MSIT –P.156-173.
27. Marek M.I., 1987, Metals Handbook, 9th Edition, ASM International, Materials Park, OH, U.S.A, Vol.13, pp. 20-21.
28. M.R. Akbarpour Characterization and hardness of TiCu–Ti₂Cu₃ intermetallic material fabricated by mechanical alloying and subsequent annealing[Текст] / M.R. Akbarpour, F.A. Hesari// Materials Research Express. – Vol.3. –№4. –P. 45-55.
29. Radek N. Experimental investigations of the Cu-Mo and Cu-Ti electrospark coatings modified by laser beam [Текст] // Advances in Manufacturing Science and Technology. – 2008. – Т. 32. – №. 2. – P. 53-68.
30. Salehi M. Structuralcharacterisation of novel Ti-Cu intermetallic coatings [Текст] / M Salehi., R Hosseini // Surface engineering.– 1996. – Т. 12. – №. 3. – P. 221-224.