

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)

15.03.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Современные технологические процессы изготовления деталей в машиностроении

(направленность (профиль)/специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Исследование процессов и разработка технологии аргодуговой наплавки  
купридов титана

Студент

Ю. А. Исаков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

д.т.н. профессор А. И. Ковтунов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант (ы)

к.э.н. доцент О. М. Сярдова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

доцент И. В. Дерябин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

## Аннотация

Исследованы условия формирования покрытий на основе куприда титана при аргодуговой наплавке с применением медной и алюминиевой присадочных проволок на титановые образцы.

Представлены результаты оценки качества формирования и геометрических параметров шва при аргодуговой наплавке. Установлена зависимость между соотношением скоростей подачи медной и алюминиевой проволок и химическим составом наплавленных покрытий. Проведены исследования структуры наплавленного металла в заданном диапазоне режимов наплавки. Показано, что при аргодуговой наплавке при установленном соотношении скоростей подачи медной и алюминиевой проволок формируются покрытия на основе интерметаллидных фаз:  $\alpha\text{Ti}$ ,  $\text{TiCu}$ ,  $\text{Ti}_2\text{Cu}$ ,  $\text{TiCu}_2\text{Al}$ .

Установлены механические и эксплуатационные свойства наплавленных покрытий: твердость, стойкость к абразивному изнашиванию, жаростойкость при 800 °С и склонность к образованию трещин. Установлено, что показатели относительной износостойкости наплавленных покрытий выше, чем у образцов из титана. Показана зависимость относительной износостойкости покрытий от химического и фазового состава. Установлена зависимость показателей жаростойкости наплавленных покрытий от режимов наплавки и химического состава металла шва.

## Abstract

Conditions of formation of coatings on the basis of titanium cupride during argon-arc cladding with the use of copper and aluminum filler wires on titanium samples have been investigated.

The results of evaluation of formation quality and geometric parameters of the weld during argon-arc cladding are presented. The correlation between the ratio of copper and aluminum wire feed rates and chemical composition of the clad coatings has been established. The structure of the deposited metal in a given range of surfacing modes has been studied. It is shown that during argon-arc cladding at the set ratio of copper and aluminum wire feed rates the coatings are formed on the basis of intermetallic phases  $\alpha\text{Ti}$ ,  $\text{TiCu}$ ,  $\text{Ti}_2\text{Cu}$ ,  $\text{TiCu}_2\text{Al}$ .

The mechanical and operational properties of the deposited coatings have been established: hardness, resistance to abrasion and heat resistance at 800 °C and tendency to cracking. It is established that indices of relative wear resistance of clad coatings are higher than those of titanium samples. Dependence of relative wear resistance of coatings on chemical and phase composition is shown. The dependence of the heat resistance characteristics of the clad coatings on the surfacing modes and the chemical composition of the weld metal has been established.

## Содержание

Введение.....	6
1 Способы получения покрытий на основе сплавов системы .....	8
титан-медь .....	8
1.1 Система титан-медь и ее диаграмма состояния.....	8
1.2 Анализ способов получения покрытий на основе .....	10
купридов титана .....	10
1.2.1 Диффузионная металлизация .....	11
1.2.2 Метод самораспространяющегося высокотемпературного .....	14
синтеза.....	14
1.2.3 Сварка взрывом.....	16
1.2.4 Аргонодуговая наплавка неплавящимся электродом .....	18
2 Методика проведения исследований и экспериментов .....	21
2.1 Методика исследования процессов аргонодуговой наплавки .....	21
неплавящимся электродом сплавов системы Ti-Cu-Al.....	21
2.2 Методика исследования химического состава и фазового .....	24
состава наплавленных покрытий.....	24
2.3 Методика исследования механических и эксплуатационных .....	26
свойств наплавленных покрытий .....	26
3 Исследование процессов формирования и свойств наплавленных .....	29
сплавов системы .....	29
3.1 Исследование процессов наплавки сплавов Ti-Cu-Al и.....	29
геометрических параметров наплавленных валиков .....	29
3.2 Структура, химический и фазовый состав наплавленного металла ...	36
3.3. Исследование механических и эксплуатационных свойств.....	63
наплавленного металла.....	63
4 Безопасность и экологичность.....	67
4.1 Технологическая характеристика объекта .....	67
4.2 Персональные риски, возникающие при реализации .....	68
технологического процесса.....	68
4.3 Технические и организационные предложения по уменьшению .....	70
выявленных при анализе проектной технологии .....	70
профессиональных рисков .....	70
4.4 Технические и организационные предложения по обеспечению .....	72
пожарной безопасности.....	72
4.5 Оценка безопасности для природной среды предлагаемых .....	<b>Ошибка!</b>

**Закладка не определена.**

технических решений .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
6 Оценка экономической эффективности.....	73
6.1 Состав затрат на проведение ВКР .....	73
6.2 Материальные затраты .....	73
Заключение .....	75
Список используемых источников.....	76

## Введение

С развитием технологий мы все чаще встречаемся с агрессивными средами, а так же с необходимостью повышения эксплуатационных свойств, Однако чаще всего основной металл не способен обеспечить необходимые требования, а производить сплав с необходимыми свойствами требует больших затрат. Для решения этой проблемы наносят поверхностный слой на основной металл для получения сплава с необходимыми свойствами. Однако существующие методы нанесения используют сложное и дорогостоящее оборудование.

Повышение срока эксплуатации изделий из титана, работающих в условиях повышенного износа, при воздействии высоких температур, а также в агрессивных средах всегда являлось актуальной задачей для металлургических, химических и авиационных отраслей промышленности.

Одним из передовых способов решения данной проблемы является нанесение поверхностного слоя на основе купридов титана. Сплавы на основе купридов титана обладают высокой жаростойкостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, а также способностью защищать поверхность изделия от воздействия агрессивной среды. А легирование алюминием позволяет повысить прочностные характеристики.

Существует несколько способов получения покрытий на основе купридов титана путем нанесения поверхностного слоя, а именно: «самораспространяющийся высокотемпературный синтез, насыщение в порошковых средах, лазерная обработка, контактное эвтектическое плавление, электролитическое осаждение с последующей термической обработкой и электроискровое осаждение с лазерной обработкой» [14].

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

Однако данные способы требуют высокой стоимости капиталовложений, а также наличие сложного технологического оборудования, имеют ограниченные способности к формообразованию в пределах готового изделия.

Исходя из выше перечисленных недостатков существующих способов получения покрытий на основе сплавов системы Ti-Cu, был предложен способ аргонодуговой наплавки купридов титана с использованием дополнительной присадочной проволокой из алюминия. Данный способ позволяет управлять геометрическими параметрами, а также химическим и фазовым составом наплавленных слоев. Кроме того данный метод не требует наличия сложного и дорогостоящего технологического оборудования по сравнению с имеющимися аналогами.

Поэтому целью работы является снижение себестоимости покрытий на основе сплавов системы титан-медь за счет проведения исследований процессов формирования, химического и фазового состава, структуры и свойств купридов титана, полученных аргонодуговой наплавкой неплавящимся электродом с применением присадочных проволок из меди и алюминия в среде защитного газа аргона.

# 1 Способы получения покрытий на основе сплавов системы титан-медь

## 1.1 Система титан-медь и ее диаграмма состояния

«В системе титан-медь образуется два конгруэнтно плавящихся соединения  $Ti_2Cu$  ( $\gamma$ ) и  $TiCu$  ( $\delta$ ). Температура плавления соединения  $Ti_2Cu$  составляет  $1005^\circ C$ , а температура плавления соединения  $TiCu$  составляет  $982^\circ C$ . Образование соединений  $Ti_3Cu_4$  ( $\epsilon$ ),  $Ti_2Cu_3$  ( $\theta$ ),  $TiCu_2$  ( $\lambda$ ),  $TiCu_4$  ( $\zeta$ ) происходит по перетектическим реакциям. Соединение  $Ti_3Cu_4$  ( $\epsilon$ ) образуется при взаимодействии жидкой фазы с  $\delta$ -фазой  $TiCu$  при  $925^\circ C$ . Образование соединения  $Ti_2Cu_3$  ( $\theta$ ) является результатом взаимодействия жидкой фазы с  $\epsilon$ -фазой  $Ti_3Cu_4$  при  $890^\circ C$ . Соединение  $TiCu_2$  ( $\lambda$ ) образуется при взаимодействии жидкой фазы с  $\theta$ -фазой  $Ti_2Cu_3$  при  $870^\circ C$ . Образование  $\zeta$ -фазы  $TiCu_4$  происходит при температуре  $875^\circ C$  при взаимодействии жидкой фазы и  $\lambda$ -фазы  $TiCu_2$ . Помимо перечисленных шести соединений в системе титан-медь имеют место три эвтектических превращения» [3].

«При взаимодействии титана с медью образуется ряд химических интерметаллидных соединений, а именно  $Ti_2Cu$ ,  $TiCu$ ,  $Ti_3Cu_4$ ,  $Ti_2Cu_3$ ,  $TiCu_2$ ,  $\beta TiCu_4$ » [3].

«Помимо образования интерметаллидных соединений в системе титан-медь при концентрации меди 43 и 73 ат. % образуются две легкоплавкие эвтектики. Температура плавления данных эвтектик составляет  $960^\circ C$  и  $875^\circ C$  соответственно» [3].



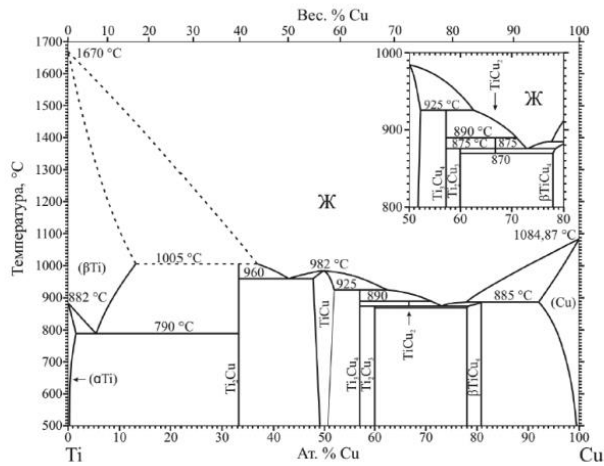


Рисунок 1 – Диаграмма состояния титан медь

«Применение многокомпонентных сплавов в качестве покрытий позволяет значительно повысить физико-механические и трибологические свойства поверхности изделий» [3].

«На фазовой диаграмме тройной системы Ti-Cu-Al (рисунок 2) построенной по точкам ликвидуса» [25], «существует 3 сложных химических соединения:  $\tau_1$  –  $TiCu_2Al$ ,  $\tau_2$  –  $TiCuAl$ ,  $\tau_3$  –  $Ti_2CuAl_5$ , в дополнение к существующим в бинарных системах (Cu-Ti, Al-Ti, Ti-Al)» [5].

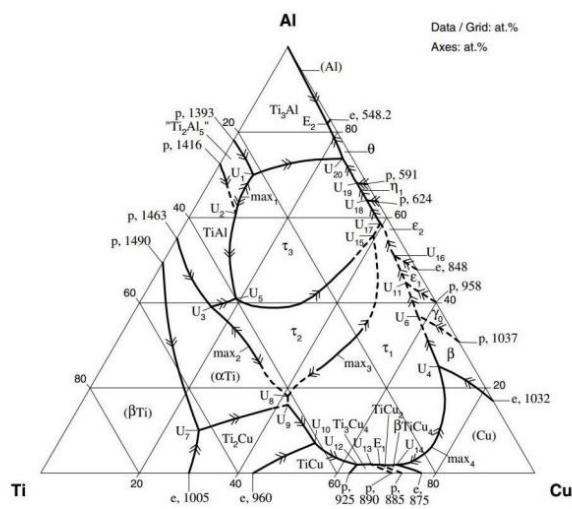


Рисунок 2 – Равновесная фазовая диаграмма тройной системы Al-Cu-Ti, построенная по точкам ликвидуса [8]

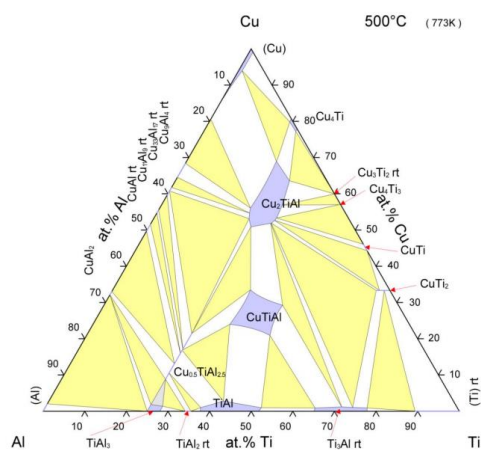


Рисунок 3 – Изотермический срез фазовой диаграммы состояния Ti-Cu-Al при температуре 500 °С [24]

«В сплавах Ti-Cu-Al в интервале температур 1280-550 °С наблюдается 21 четырех фазное невариантное превращение с участием жидкой фазы и 2 четырехфазные реакции, включающие только твердые фазы. Характерной особенностью системы является рост числа интерметаллических соединений внутри треугольника, которые не соприкасаются с его сторонами. Можно отметить, что практически все «внутренние» соединения обладают кубической или гексагональной сингонией» [8].

## 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» [26].

«Поэтому интерметаллидные покрытия на основе купридов титана получают преимущественно диффузионными методами, к которым относится: «самораспространяющийся высокотемпературный синтез» [3], «насыщение в

порошковых средах» [23], «лазерная обработка» [14], «контактное эвтектическое плавление» [13]. Также существуют комбинированные методы, а именно: электролитическое осаждение с последующей термической обработкой и электроискровое осаждение с лазерной обработкой» [17,21].

### 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» [3]. Микроструктура получаемого покрытия представлена (на рисунке 4).

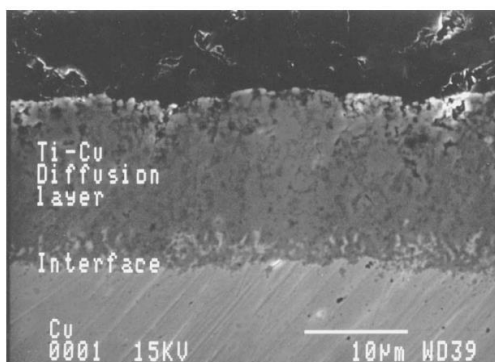


Рисунок 4 – Микроструктура Cu-Ti покрытия, полученного методом диффузионной металлизации

«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» [16].

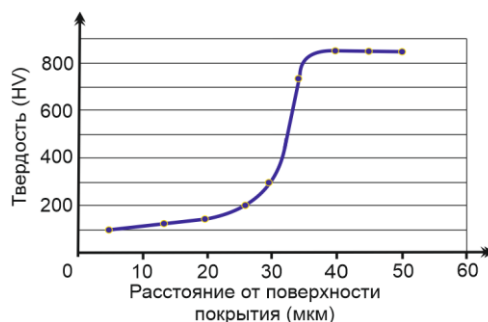


Рисунок 5 – Распределение значений твердости по сечению покрытия [7]

«Также отмечается значительное повышение износостойкости (рисунок б) образцов с покрытием по сравнению с медными образцами. Высокая износостойкость покрытия достигается благодаря высокой твердости интерметаллидных соединений и благодаря низкому коэффициенту трения» [16].

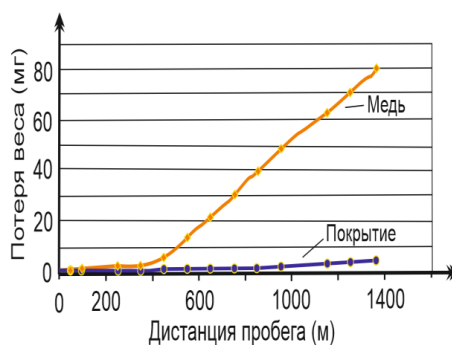
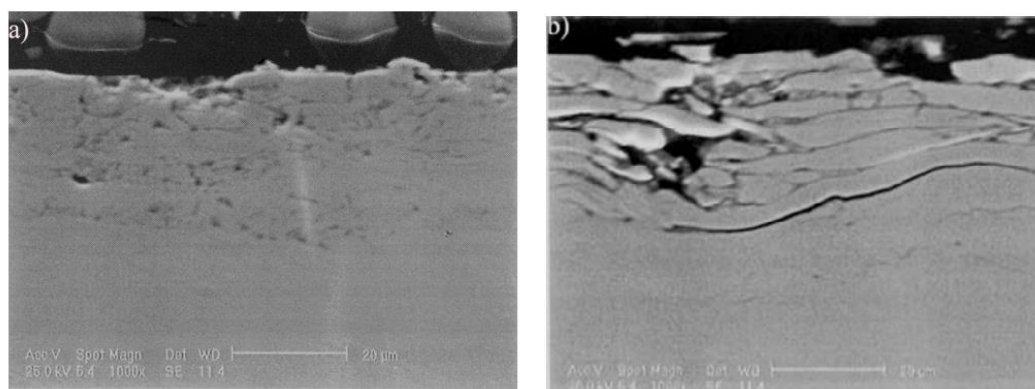


Рисунок 6 – Изменение веса образцов с покрытием и без покрытия при испытании на износостойкость [12]

«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)» [16].



а)

б)

а) – микротрещины под поверхностью покрытия;

б) – образование обломков и расслоений при длительном износе покрытия

Рисунок 7 – Микроструктура подповерхностного слоя покрытия

«В работе [16] 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. Отжиг измельченного порошка при разных температурах привел к образованию основных TiCu и Ti<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>, а также незначительных нанокристаллических фаз Ti<sub>2</sub>Cu и TiCu<sub>4</sub>, высвобождению внутренней деформации и огрублению зерен. Количество фазы TiCu и размер зерна увеличивались с увеличением температуры отжига» [16]. «Максимальное значение твердости 765 HV регистрировалось, когда измельченный порошок TiCu отжигался при 850°C. Данное повышение твердости может быть связано с образованием большого количества фазы TiCu» [27].

«Таким образом, к недостаткам метода диффузионной металлизации можно отнести расслоение получаемого покрытия, высокую трудоемкость и низкую производительность» [16].

## 1.2.2 Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

«Данная технология позволяет наносить тонкие покрытия (5–150 мкм) на поверхность меди и ее сплавов. Основу получаемого покрытия составляет порошковая смесь, которая наносится на поверхность медного изделия и содержит в себе следующие компоненты: титан, кремний, алюминий, оксиды хрома и алюминия, хлорид аммония и йод. После нанесения порошковой смеси проводится высокотемпературная термическая обработка при температуре 800 – 1000°C. Во время обработки нанесенный порошок начинает гореть, и часть продуктов горения образует на медной поверхности тонкое покрытие» [16].

«Управлять структурой и свойствам таких покрытий можно путем изменения скорости охлаждения СВС-продуктов, а также с помощью изменения концентраций реагентов в порошковых смесях» [18].

«Полученное данным методом покрытие имеет сплошную ровную поверхность светло-серого цвета (рисунок 8). Фазовый состав зоны насыщенной титаном может быть различным, так как он напрямую зависит от состава порошковой смеси и условий термической обработки. На рисунке 11 представлена микроструктура покрытия полученного на поверхности бронзы БрХ08. Данное покрытие имеет слой TiCu толщиной 30 – 50 мкм твердостью 4565 МПа и слой  $\alpha$ -Ti толщиной 15 – 20 мкм твердостью 6223 МПа» [18].

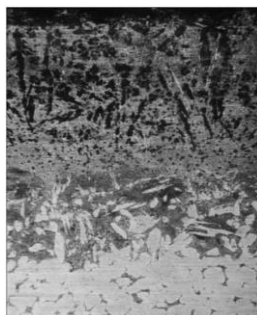


Рисунок 8 – Микроструктура покрытия на поверхности бронзы БрХ08

«На поверхности латуни ЛМцЖ-55-3-1,5 удалось получить покрытие (рисунок 9), содержащее фазы  $\alpha$ -Ti, TiCu, Ti<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>. Слой покрытия насыщенный Ti имеет толщину 20 – 35 мкм и твердость 5664 МПа. Слой с меньшей концентрацией Ti имеет толщину 55 – 70 мкм и твердость 4518 Мпа» [16].



Рисунок 9 – Микроструктура покрытия на поверхности латуни ЛМцЖ-55-3-1,5

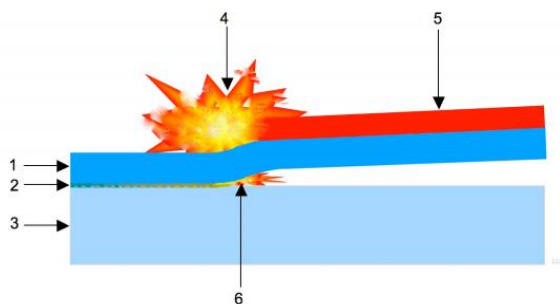
«Применение способа самораспространяющегося высокотемпературного синтеза позволяет повысить износостойкость изделия в 2,5–3 раза по сравнению с износостойкостью изделия без покрытия» [16].

«Совместное использование Ti, Al и Si при СВС методе позволяет получать покрытия, жаростойкость при температуре 800 – 900°С которых в 1,8 – 2,5 раза выше, чем жаростойкость материала подложки» [19].

«В качестве недостатков СВС метода можно назвать небольшую толщину наносимого покрытия (максимум 150 мкм); при горении на воздухе возможно увеличение веса из-за окисления; химическая реакция компонентов должна происходить с выделением большого количества тепла для поддержания реакции синтеза продуктов горения; высокая вероятность образования пор при нанесении покрытия» [16].

### 1.2.3 Сварка взрывом

«Сущность способа заключается в использовании энергии взрыва для создания неразъемного соединения, которое достигается за счет совместной деформации свариваемых деталей. Для получения соединения сваркой взрывом свариваемые поверхности необходимо зачистить до металлического блеска и обезжирить. Затем привариваемая подвижная деталь располагается параллельно либо под углом к неподвижной детали-мишени. Привариваемая деталь приводится в движение управляемым взрывом и соударяется с неподвижной деталью, образуя неразъемное соединение вследствие совместной пластической деформации (рисунок 10)» [16].



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

Рисунок 10 – Схема сварки взрывом

«Известно формирование покрытий, которые наносят на стальную подложку при помощи сварки взрывом медные и титановые слои разной толщины (рисунок 11). На рисунке 11 представлены микроструктуры полученных покрытий» [13].



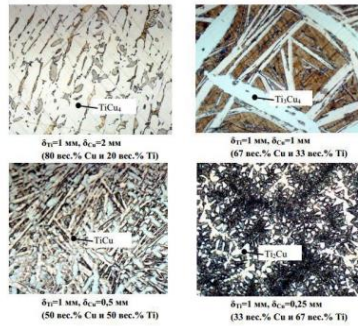


Рисунок 11 – Микроструктуры покрытий полученных сваркой взрывом

«Наибольшей твердостью 8 – 10 ГПа (рисунок 12) 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» [13].

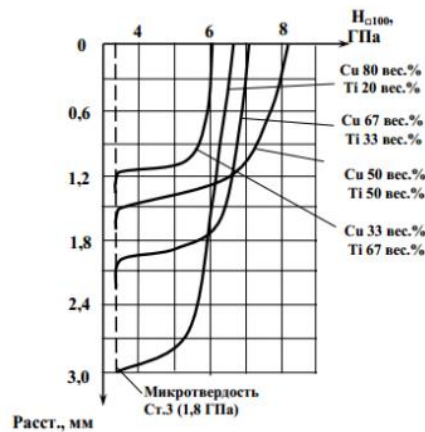


Рисунок 12 – Твердость покрытий, полученных сваркой взрывом

«Износостойкость покрытий полученных сваркой взрывом значительно выше износостойкости стали 40 (рисунок 13)» [10].

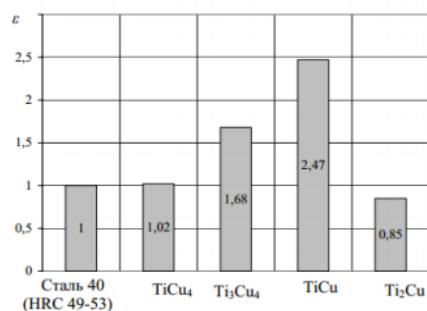


Рисунок 13 – Износостойкость покрытий полученных сваркой взрывом

«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;
- необходимость применения опасных взрывчатых веществ» [16].

#### 1.2.4 Аргонодуговая наплавка неплавящимся электродом

«Сущность данного способа нанесения покрытий заключается в местном 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» [16].

«Известно описание технологии автоматической аргонодуговой наплавки алюминиевой бронзы CuAl8 на поверхность титана BT1-0. Управляя режимами наплавки (сила тока, скорость подачи присадочной проволоки, скорость наплавки) можно управлять геометрическими характеристиками наплавленных слоев и их химическим составом. Исследование химического и структурного состава показали, что в составе наплавленного металла со-

держится пересыщенный твердый раствор меди и алюминия в титане и интерметаллид  $Ti_2Cu$ » [10].

«Жаростойкость наплавленного слоя Cu-Ti при температуре 800°C во много раз превышает жаростойкость чистого титана. После цикла испытаний образцы теряют не более 7% собственной массы» [10].

«Метод аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом имеет ряд преимуществ, а именно: 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» [10].

«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» [3].

Поэтому нами предложен способ повышения содержания алюминия путем применения второй присадочной проволоки из алюминия Св А7.

## Выводы по разделу и постановка задач исследования

1. Сплавы на основе куприда титана, обладающие высокой износостойкостью, твердостью. Наряду с высокой коррозионной стойкостью сплавы на основе титана и меди характеризуются высокими показателями жаростойкости, что делает перспективным их применение для изделий, работающих в условиях высоких температур.

2. Проанализированные способы получения купридов титана и покрытия на их основе, такие как самораспространяющийся высокотемпературный синтез, диффузионная металлизация, сварка взрывом, которые имеют следующие недостатки, высокая стоимость материалов для наплавки, сложность технологического оборудования, а также высокую энергоемкость.

Для достижения цели выпускной квалификационной работы поставлены следующие задачи:

1. Разработка методики исследования процессов аргонодуговой наплавки купридов титана легированных алюминием и их фазового состава, структуры и свойств.

2. Исследования процессов аргонодуговой наплавки купридов титана легированных алюминием.

3. Исследование структуры, химического и фазового состава, механических и эксплуатационных свойств наплавленных купридов титана легированных алюминием.

## 2 Методика проведения исследований и экспериментов

### 2.1 Методика исследования процессов аргодуговой наплавки неплавящимся электродом сплавов системы Ti-Cu-Al

«Исследования процессов наплавки купридов титана проводили на специальной автоматической двухкоординатной установке, состоящей из рамы с направляющими рельсами, механизма позиционирования, оборудования для подачи присадочной проволоки, источника питания (рисунок 14)» [16].



Рисунок 14 – Установка для автоматической аргодуговой наплавки неплавящимся электродом с подачей двух присадочных проволок УК-2

«Для наплавки использовали сварочную горелку AUT-TIG 400W фирмы AbicorBinzel с жидкостным охлаждением. Для изменения положения сварочной горелки использовали механизм, состоящий из специального исполнительного механизма линейного перемещения с небольшим люфтом передвижения. Рабочий ход составляет 150 мм. К механизму присоединяется кронштейн для изменения положения горелки с двумя осями, который позволяет во время подготовительных операций перед наплавкой выставить длину сварочной горелки и её положение относительно точки ввода присадочных проволок» [16].

«Исследования аргодуговой 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» [16].

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 15 – Сварочный инвертор Сварог 315P AC/DC

Источником питания для установки являлся Сварог 315P AC/DC (рисунок 15). «Для обеспечения стабильности формирования валика присадочная проволока с помощью подающего механизма будет вводиться в хвостовую часть наплавочной ванны. Исследование влияния режимов наплавки на процессы формирования наплавленных слоев производилось путем изменения режимов наплавки в небольших интервалах» [16]. Скорость наплавки исследования выбиралась 0,15 м/мин. Скорость подачи проволоки медной проволоки изменялась в интервале 1-3-5 м/мин, алюминиевой 0-1,5-2-2,5 м/мин

(таблица 2). Сила тока при наплавке устанавливали 270А. «Регулировку режимов наплавки производили с помощью панели управления источника питания и блока управления двух координатного портала» [16]. Для проведения исследования из наплавленных валиков вырезались образцы (рисунок 16).

Таблица 2 – Режимы наплавки исследуемых образцов

Номер образца	I, А	V п/п Al, м/мин	V п/п Cu, м/мин	V <sub>св</sub> , 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 16 – Вырезанные образцы для проведения исследований

«Геометрические параметры наплавленных валиков измерялись при помощи программы UniversalDesktopRuler с заданием масштаба на

фотографии макрошлифа и альнейшем измерении геометрических параметров наплавленных валиков по нормативному документу РД 03-606-них и других поверхностных дефектов оценивалась методом визуально-измерительного контроля с применением лупы, измерительных инструментов и шаблонов.

## **2.2 Методика исследования химического состава и фазового состава наплавленных покрытий**

Исследование химического состава и микроструктуры наплавленного металла будет проводиться методами растровой электронной микроскопии на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCA Wave-5009 (рисунок 16).

«Данный метод обладает высокой разрешающей способностью и позволяет изучать структуры наплавленных образцов, а так же элементный состав покрытий, поверхностей химического взаимодействия» [17].



Рисунок 17 – Сканирующий электронный микроскоп LEO 1455 VP

«Для проведения исследований были специально подготовлены макрошлифы поперечного сечения наплавленного слоя на основе интерметал-



лидного сплава титан-медь. Схема выбора точек при исследовании химического состава наплавленных купридов титана представлена (рисунок 18)» [16].

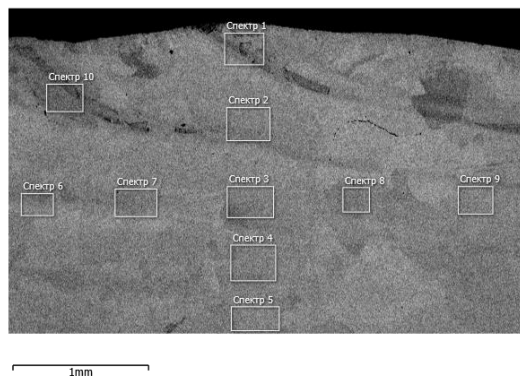


Рисунок 18 – Схема выбора точек для исследования структуры и химического состава наплавленных слоев

Рентгенофазовый анализ будет проводиться на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance Eco (Bruker AXS GmbH) с вертикальным  $\theta$ - $\theta$  гониометром (рисунок 19).



Рисунок 19 - Рентгенофазовый дифрактометр Bruker D8 Advance Eco (Bruker AXS GmbH)

Рентгенофазовый анализ позволит выявить фазы, при которых появляются различные дефекты и определить закономерность их появления.

### **2.3 Методика исследования механических и эксплуатационных свойств наплавленных покрытий**

Твердость наплавленных образцов измеряется по методу Роквелла с применением шкалы HRC. Метод Роквелла заключается во внедрении в поверхность образца алмазного конусного наконечника под действием прилагаемого усилия и в определении глубины внедрения наконечника после снятия основного усилия. Исследования проводились на универсальном твердомере HBRV-187.5 (рисунок 20)» [16].



Рисунок 20 -стационарный универсальный твердомер HBRV-187.5

«Износостойкость наплавленного покрытия определялась способностью его поверхностных слоев противостоять внедрению абразивных частиц при абразивном изнашивании о шкурку и оценивалась относительной износостойкостью, установка для определения износостойкости (рисунок 21)» [16].

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_s}{\Delta l_m}, \quad (1)$$

где  $\Delta l_s$  — линейный износ эталона (ВТ1-0);

$\Delta l_m$  — линейный износ испытуемого материала.

Для сравнения испытания также проводили для образца из титана ВТ1-0.



Рисунок 21 – Установка для испытания на износостойкость  
наплавленных образцов на износостойкость УХ-11

Установка содержит станину, на которой закреплена шлифовальная машина. К станине прикреплен шток, с возможностью вертикального движения. К штоку присоединены тиски, с помощью которых зажимаются образцы во время испытания и ручка для подъема и опускания тисков.

Для проведения испытаний на жаростойкость использовалась муфельная печь СНОЛ 30/1300 (рисунок 22). Образцы вырезались из наплавленных валиков с одинаковой площадью поверхности. После подготовки к испытанию образцы помещались в печь и выдерживались при температуре °С. Жаростойкость оценивалась по относительному изменению массы образцов» [16]. Испытания проводились в течение 100 часов.



Рисунок 22 – Муфельная печь СНОЛ 30/1300 [4]

#### Выводы по разделу

1 Подобрана методика исследований по результатам, которой будет произведен анализ эксплуатационных характеристик, а так же определён химический и фазовый состав наплавленных валиков.

2 Проанализированы участки наплавленного валика наиболее подходящие для проведения исследований.

3. Определены геометрические размеры образцов для проведения испытания на износостойкость.

4 Определён режим для исследования жаростойкости.

5 Определен метод, по которому будет проводиться исследование твердости наплавленных образцов.

### **3 Исследование процессов формирования и свойств наплавленных сплавов системы**

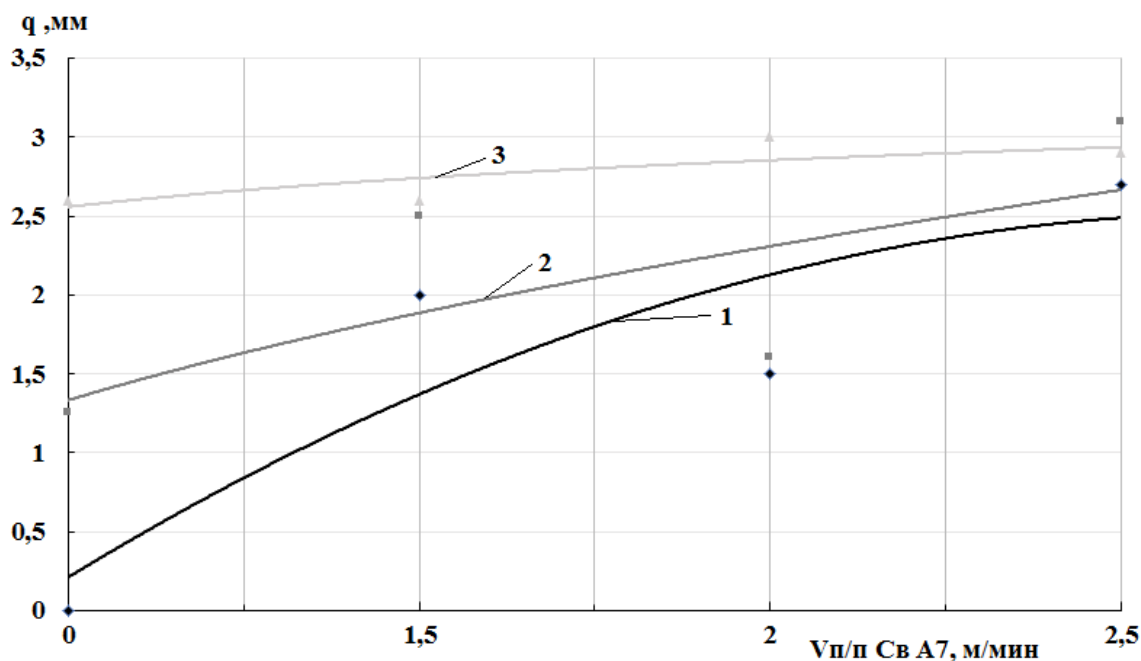
#### **3.1 Исследование процессов наплавки сплавов Ti-Cu-Al и геометрических параметров наплавленных валиков**

«Проведенные исследования процессов наплавки сплавов системы медь-титан, легированных алюминием показали, что при выбранных режимах наплавленные валики имели удовлетворительное качество со стабильными геометрическими параметрами (рисунок 23)» [16].



Рисунок 23 – Образцы наплавленных валиков

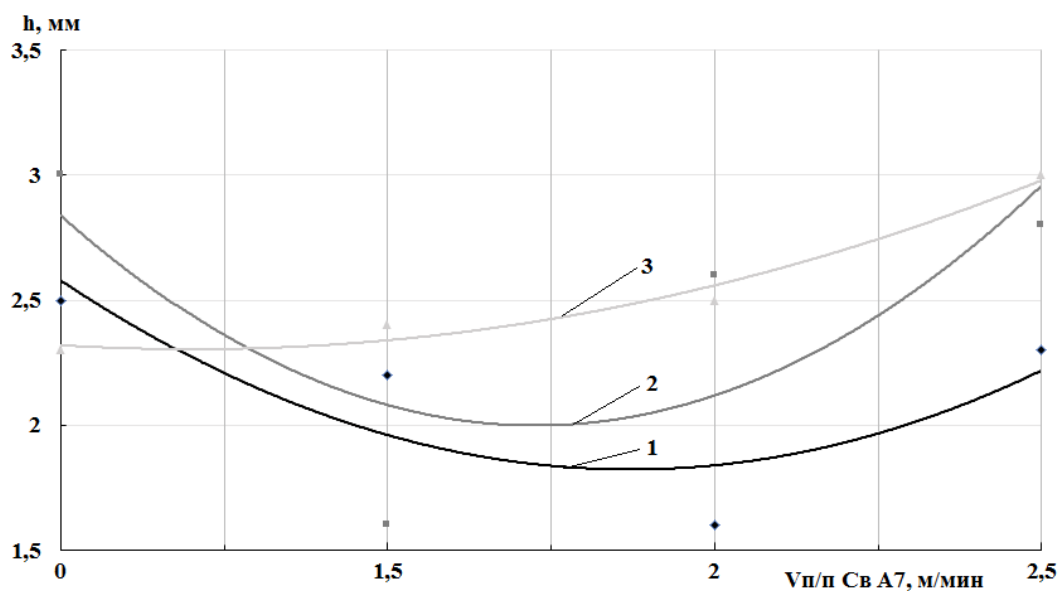
«Проведенные исследования показали, что при увеличении скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки высота наплавленного валика увеличивается (рисунок 24), что связано с увеличением весового расхода присадочного материала» [9]. Особенно заметно повышение при скоростях подачи медной проволоки 1 и 3 м/мин. При скорости подачи медной проволоки 5 м/мин интенсивность увеличения высоты валика снижается. Увеличение скорости подачи медной проволоки от 1 до 5 м/мин так же приводит к увеличению высоты наплавленного валика в 1,2 -2 раза.



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 высоты наплавленного валика от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

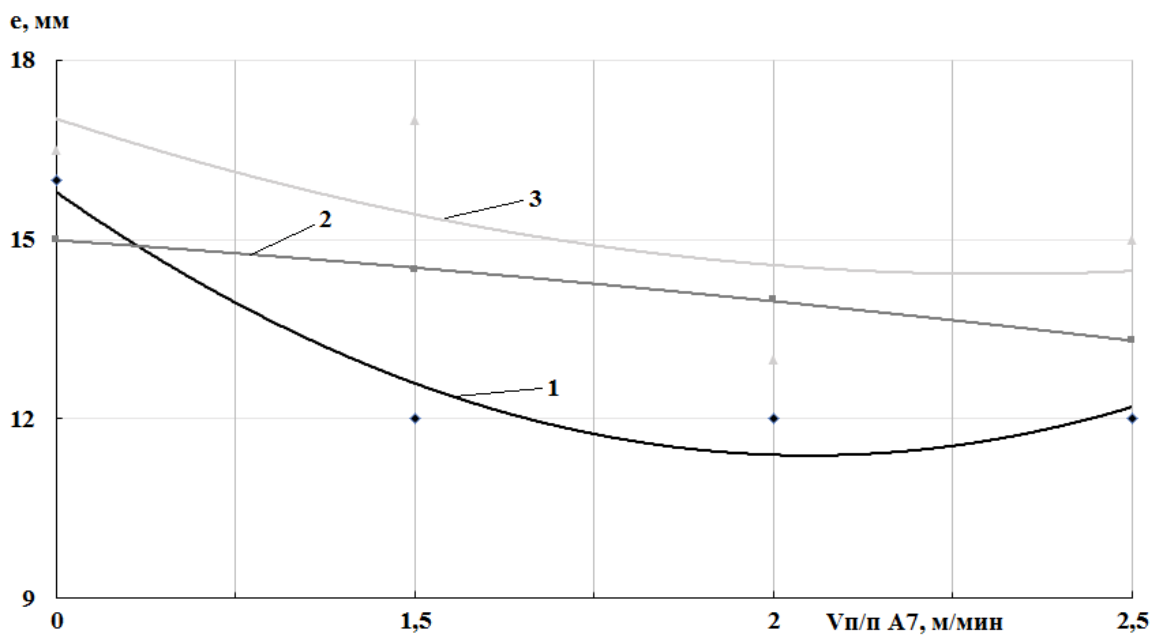
Измерение глубины проплавления при различных скоростях подачи проволоки  $V_{п/п}$  Св А7 показали, что на графиках 2 и 3 в диапазоне подачи алюминиевой присадочной проволоки до 2 м/мин прослеживается заметное снижение глубины проплавления, а затем в диапазоне от 2 м/мин до 2,5 м/мин прослеживается повышение (рисунок 25). Это может быть связано со снижением температуры плавления наплавленного металла. На 3 графике прослеживается плавное повышение глубины проплавления.



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 25 - Зависимость глубины проплавления от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

Измерение ширины валика при различных скоростях подачи проволоки  $V_{п/п} \text{ Св А7}$  показали что, с увеличением подачи алюминиевой присадочной проволоки ширина валика уменьшается (рисунок 26), что связано с увеличением доли тепла источника нагрева расходуемого на плавление присадочной проволоки.

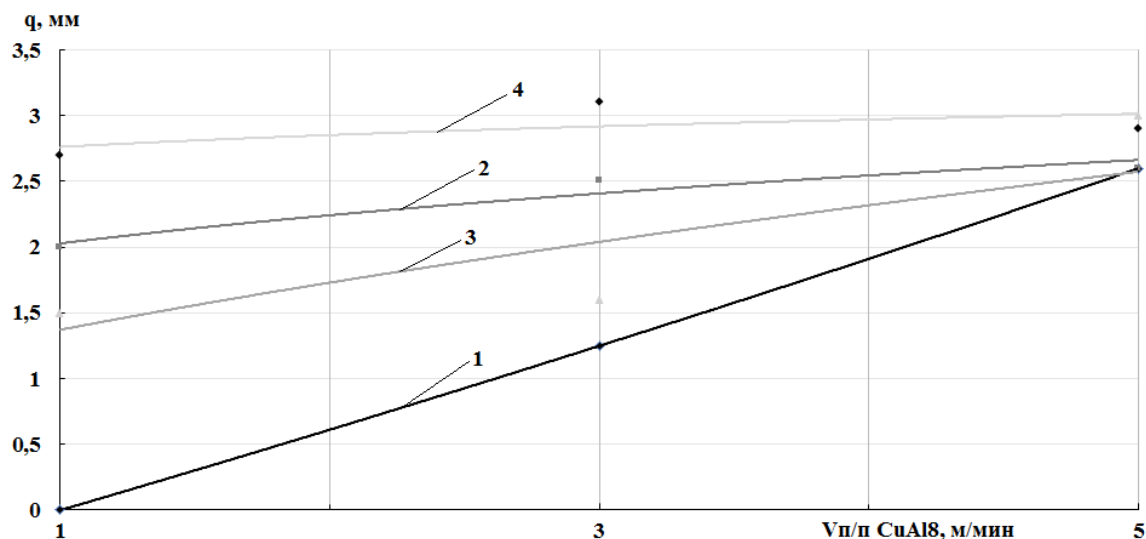


1-  $V_{п/п CuAl8} = 1$  м/мин, 2 -  $V_{п/п CuAl8} = 3$  м/мин, 3 -  $V_{п/п CuAl8} = 5$  м/мин

Рисунок 26 - Зависимость ширины валика от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

Измерение высоты валика при различных скоростях подачи проволоки показали линейную зависимость, которая говорит о том что, при увеличении подачи проволоки прослеживается стабильное увеличение высоты валиков (рисунок 27), что связано с увеличением весового расхода присадочной медной проволоки.

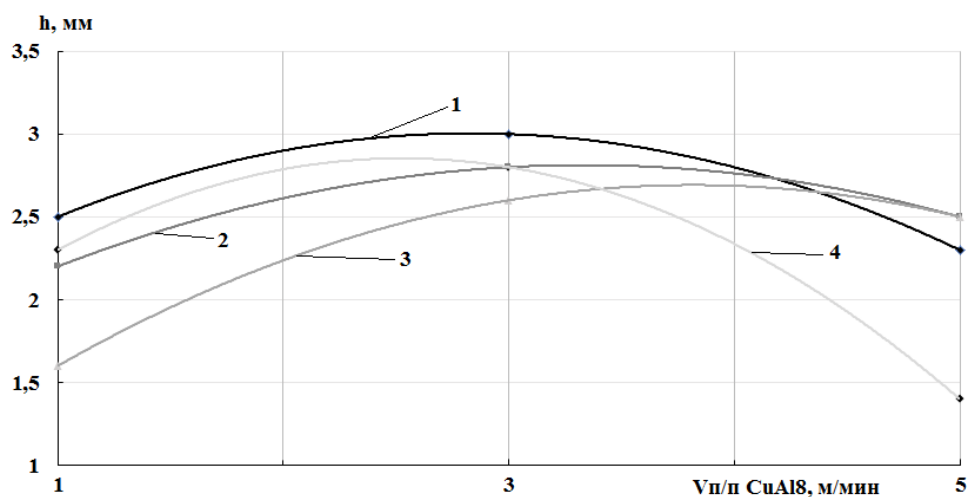




1 -  $V_{п/п} Св А7 = 0$  м/мин, 2 -  $V_{п/п} Св А7 = 1,5$  м/мин,  
 3 -  $V_{п/п} Св А7 = 2$  м/мин, 4 -  $V_{п/п} Св А7 = 2,5$  м/мин

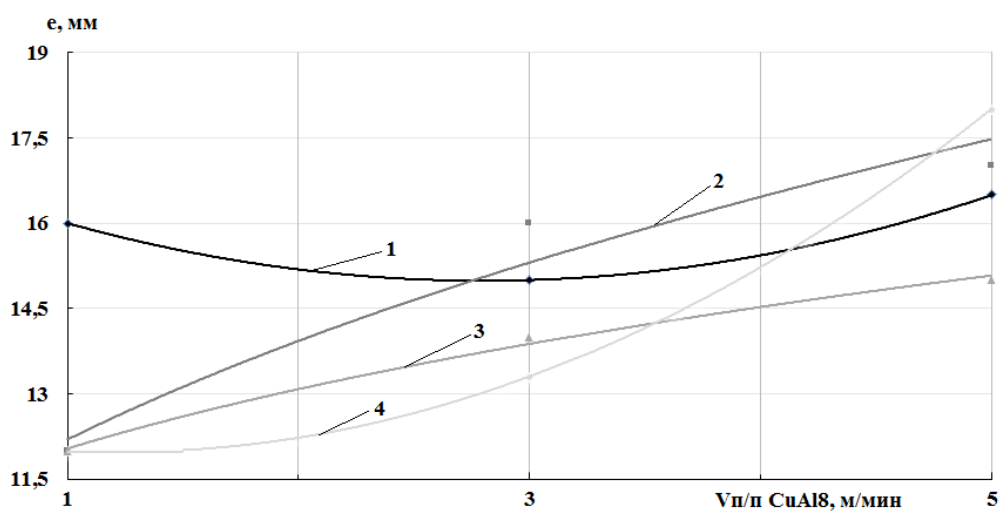
Рисунок 27 - Зависимость высоты валика от скорости подачи проволоки CuAl8

Измерение глубины проплавления при различных скоростях подачи проволоки CuAl8 показали, что с увеличением подачи присадочных пвоволок прослеживается вначале повышение глубины проплавления до скорости подачи CuAl8 = 3 м/мин, а затем плавное понижение. На 4 графике при скорости подачи медной присадочной 5 м/мин проволоки виден наименьший показатель глубины проплавления (рисунок 28).



1 -  $V_{п/п} Св А7 = 0$  м/мин, 2 -  $V_{п/п} Св А7 = 1,5$  м/мин,  
 3 -  $V_{п/п} Св А7 = 2$  м/мин, 4 -  $V_{п/п} Св А7 = 2,5$  м/мин

Рисунок 28 - Зависимость глубины проплавления от скорости подачи проволоки CuAl8, где скорость подачи

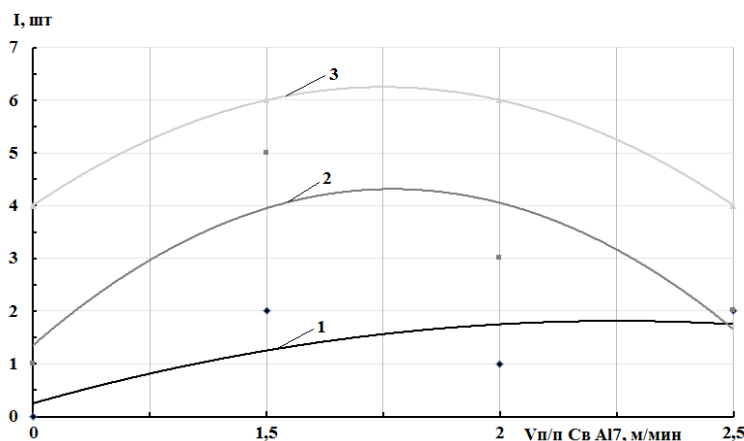


1 -  $V_{п/п} Св А7 = 0$  м/мин, 2 =  $V_{п/п} Св А7 = 1,5$  м/мин,  
 3 -  $V_{п/п} Св А7 = 2$  м/мин, 4 =  $V_{п/п} Св А7 = 2,5$  м/мин

Рисунок 29 - Зависимость ширины валика от скорости подачи присадочной проволоки CuAl8, где скорость подачи

Измерение ширины валика при различных скоростях подачи проволоки показали что, с увеличением подачи присадочной проволоки CuAl8 ширина валика увеличивается (рисунок 29), что связано с резким снижением температуры ликвидус и солидус титанового сплавов при легировании.

Проведенные исследования показали, что при увеличении скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки в диапазоне до 1,5 м/мин количество трещин возрастает, затем в диапазоне от 1,5 м/мин до 2,5 м/мин прослеживается снижение количество трещин (рисунок 30),



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

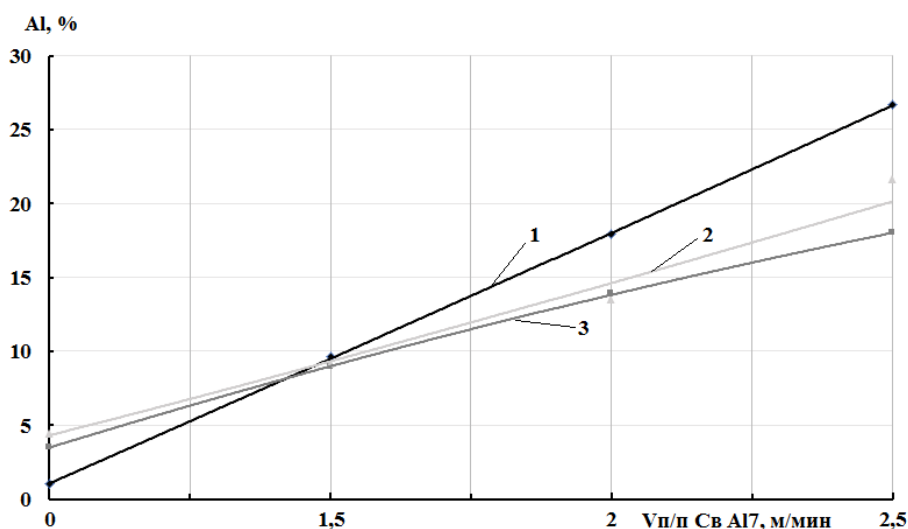
Рисунок 30- Зависимость количества трещин от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

Повышение количества трещин в диапазоне до 1,5 м/мин обуславливается образованием хрупких интерметаллидных фаз.

### 3.2 Структура, химический и фазовый состав наплавленного металла

«Проведенные исследования показали, что изменяя режимы наплавки можно управлять химическим составом наплавленного слоя за счет изменения доли основного и наплавленного металла в объеме металла наплавленного валика» [22].

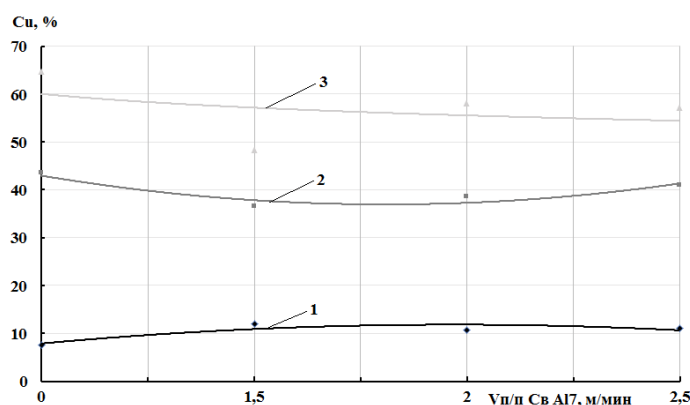
В ходе исследований было установлено, что при увеличении подачи алюминиевой проволоки резко увеличивается содержание алюминия (рисунок 31), что связано с увеличением весового расхода присадочного материала. Наибольшее содержание алюминия в наплавленном валике прослеживается в 1 графике  $V_{п/п} CuAl8 = 1$ .



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

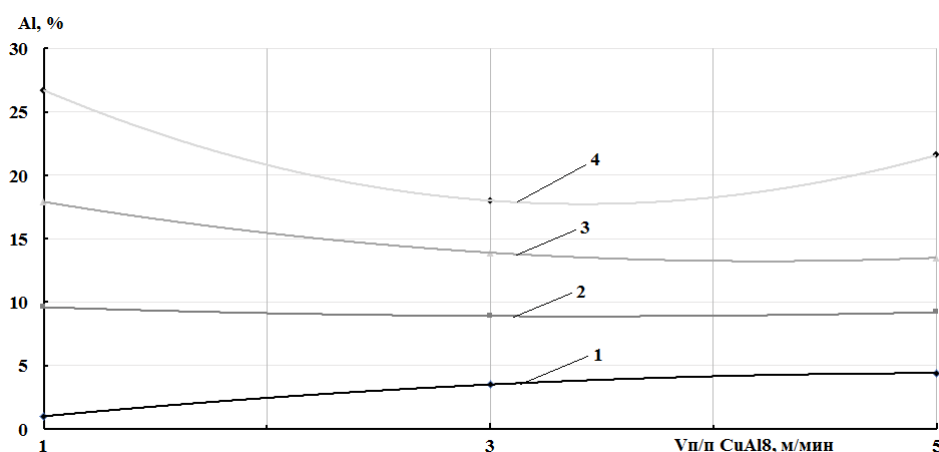
«Исследование процентного содержания меди в наплавленных валиках показало, что с увеличением подачи алюминиевой присадочной проволоки содержание меди изменяются не значительно (рисунок 32)» [16].



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

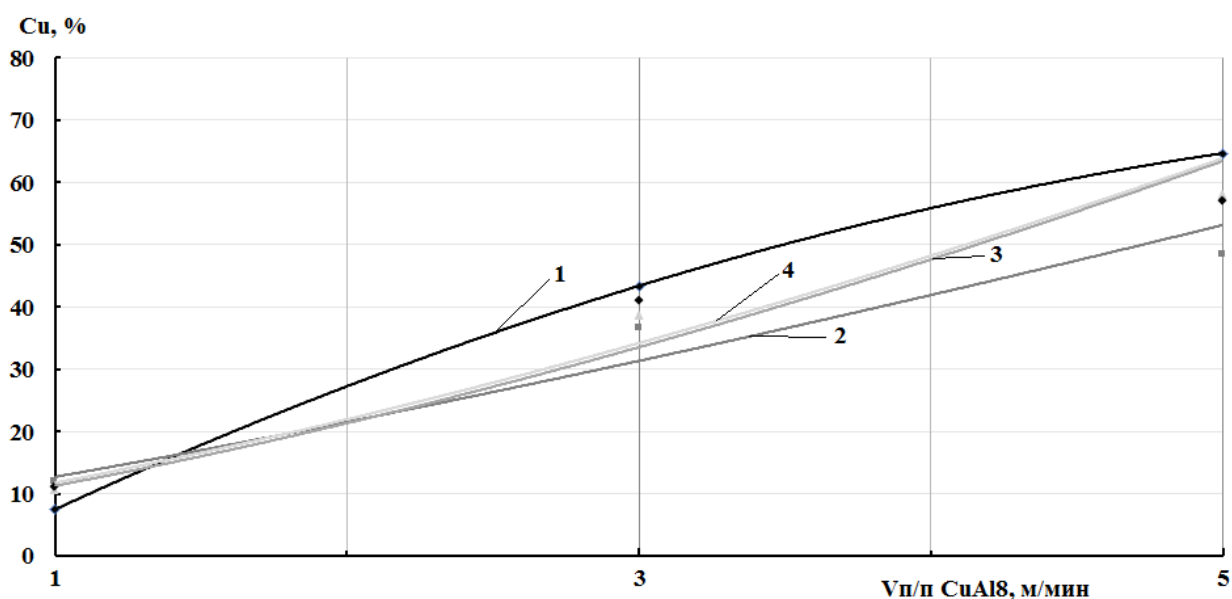
Исследование процентного содержания алюминия в наплавленных валиках показало, что с увеличением подачи медной присадочной проволоки показатели содержания меди изменяются не значительно (рисунок 33).



1 -  $V_{п/п} Св А7 = 0$  м/мин, 2 -  $V_{п/п} Св А7 = 1,5$  м/мин,  
3 -  $V_{п/п} Св А7 = 2$  м/мин, 4 -  $V_{п/п} Св А7 = 2,5$  м/мин

Рисунок 33 - Зависимость процентного содержания меди в наплавленном валике от скорости подачи присадочной проволоки CuAl8

В ходе исследований было установлено, что при увеличении подачи алюминиевой проволоки резко увеличивается процентное содержание алюминия, что связано с увеличением весового расхода присадочного материала. Наибольшее содержание алюминия в наплавленном валике прослеживается в 1 графике  $V_{п/п} \text{ CuAl8} = 1$  (рисунок 34).



1 -  $V_{п/п} \text{ Св A7} = 0$  м/мин, 2 -  $V_{п/п} \text{ Св A7} = 1,5$  м/мин,  
3 -  $V_{п/п} \text{ Св A7} = 2$  м/мин, 4 -  $V_{п/п} \text{ Св A7} = 2,5$  м/мин

Рисунок 34 - Зависимость процентного содержания меди от скорости подачи присадочной проволоки CuAl8

Анализ макроструктуры образца №1 показал равновесную структуру наплавленного валика (рисунок 35). Зерна имели слегка вытянутую структуру в направлении теплоотвода. При скоростях подачи медной 1 м/мин без применения алюминиевой присадочной проволоки по диаграмме состояния титан-медь (рисунок 1) определили что, структура наплавленного металла представлена двумя фазами:  $\alpha\text{Ti}$  и  $\text{Ti}_2\text{Cu}$ .



Рисунок 35 – Макроструктура наплавки образца № 1

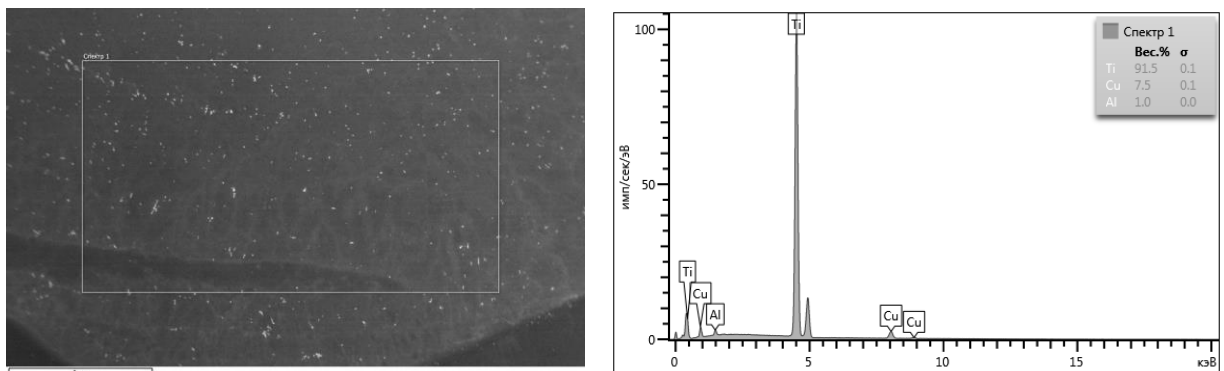


Рисунок 36 - Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником (Спектр 1).

Образец № 1

Однако исследование микроструктуры образца № 1 показали, что в твердом наплавленном металле наблюдается однофазная структура с содержанием меди от 3 до 7,5% (рисунок 36). «Наличие однофазной структуры в двухфазной области согласно диаграмме связано с высокими скоростями охлаждения наплавленного металла и его неравновесным состоянием. Поэтому структура наплавленного металла представлена пересыщенным  $\alpha$  - твердым раствором меди в титане» [16]. Размер зерна при изучении микроструктуры на первом образце равен 70-80 микронам.

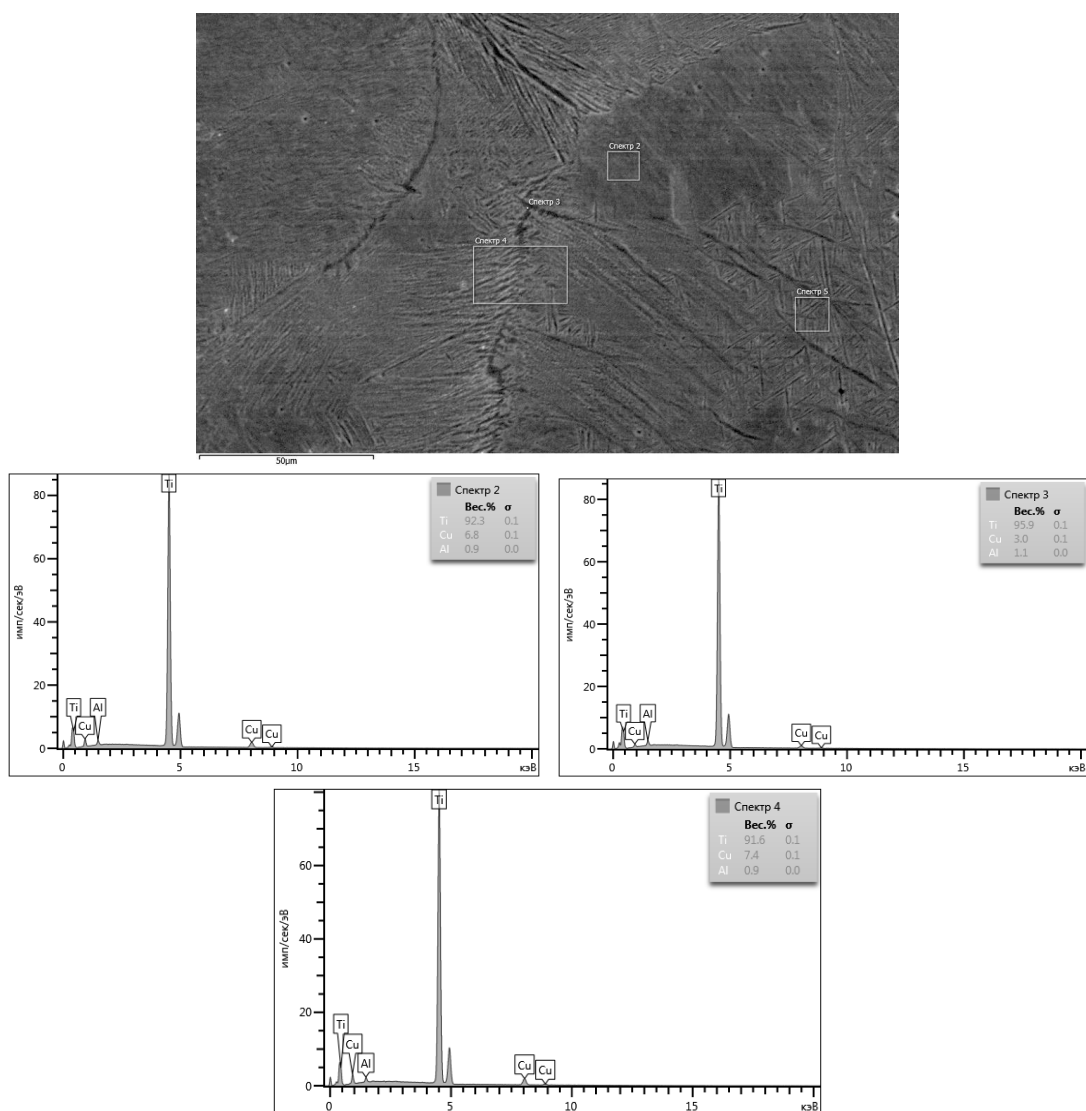


Рисунок 37 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 2», «Спектр 3»).

### Образец № 1

Анализ макроструктуры образца № 2 показал наличие игольчатых включений в матрице наплавленного валика (рисунок 38). Зерна по границе сплавления имели более равноосную структуру. При скоростях подачи медной 3 м/мин без применения алюминиевой присадочной проволоки по диаграмме состояния титан-медь (рисунок 1) определили что, структура наплавленного металла, должна быть представлена двумя фазами:  $TiCu$  и  $Ti_2Cu$  (рисунок 38).





Рисунок 38 – Макроструктура наплавки образца № 2

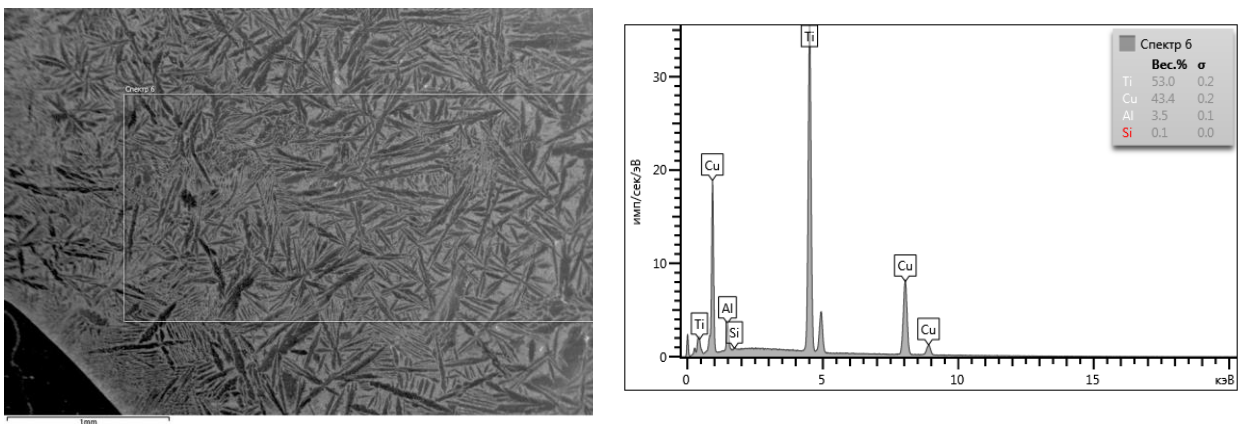


Рисунок 39 – Микроструктура и Результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 6»). Образец № 2

Исследование микроструктуры показали, что матрица наплавленного валика представлена эвтектикой  $TiCu + Ti_2Cu$  легированной алюминием с содержанием меди в области 40-43% (рисунок 40). Игольчатые включения являются первичной фазой  $Ti_2Cu$ , легированной до 3% алюминием. Размер игольчатый включений при изучении микроструктуры на первом образце 240x42 микрона.

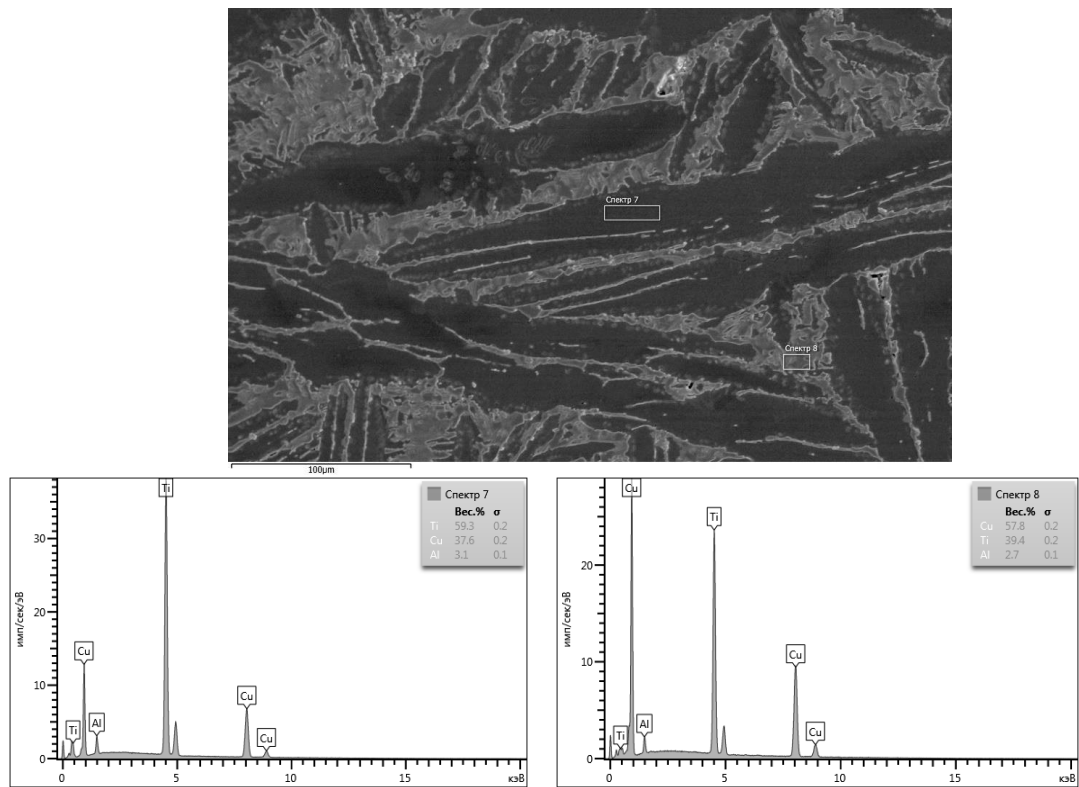


Рисунок 40 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками наплавки («Спектр 7», «Спектр 8»). Образец № 2

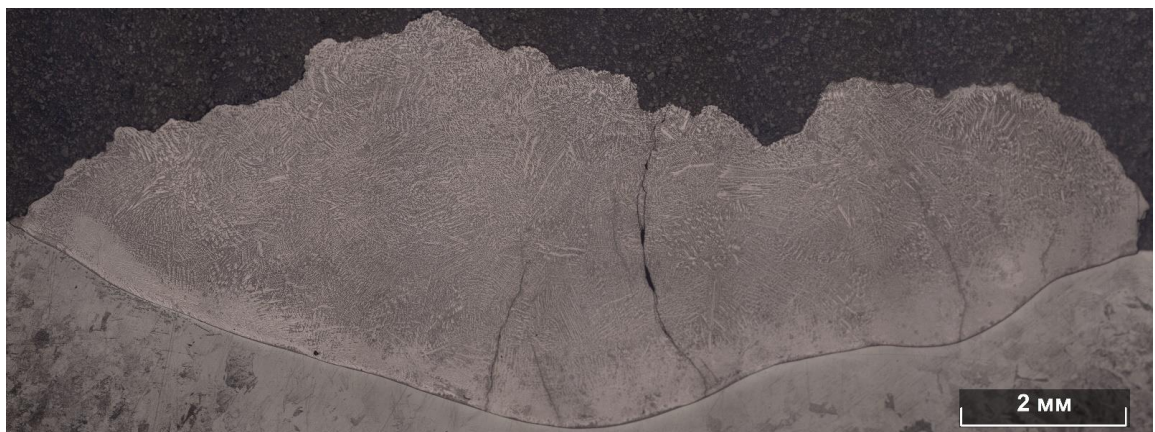


Рисунок 41 – Макроструктура наплавки образца № 3 [15]

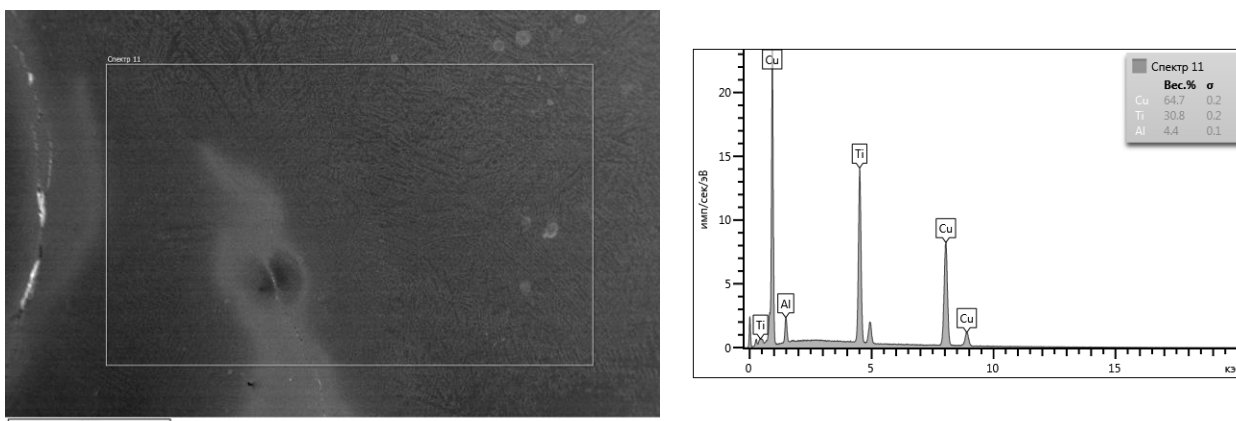


Рисунок 42 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 8»).

### Образец № 3

Анализ макроструктуры образца №3 показал, смешанную структуру по внешней границе преобладает игольчатая структура, а внутри более равноосная структура наплавленного валика (рисунок 41). Зерна по границе сплавления имели более равноосную структуру. При скоростях подачи медной 5 м/мин без применения алюминиевой присадочной проволоки по диаграмме состояния титан-медь (рисунок 1) определили что, матрица наплавленного валика должна быть представлена двумя фазами:  $TiCu$  и  $Ti_3Cu_4$  легированной алюминием до 4.4% с содержанием меди в области 64% (рисунок 42). Исследование химического состава отдельных фаз (рисунок 43) показывает, что «темная» фаза содержит около 70% меди и 7% алюминия, что исходя из тройной диаграммы состояния, соответствует области существования тройной фазы  $\tau_1-TiCu_2Al$ . Вторая фаза «светлая» содержит меди около 58%, а алюминия всего 0,9%, что отвечает области существования двойной фазы  $TiCu$ , легированной алюминием. Размер зерна этой фазы при изучении микроструктуры равен от 6 до 63 микрон.

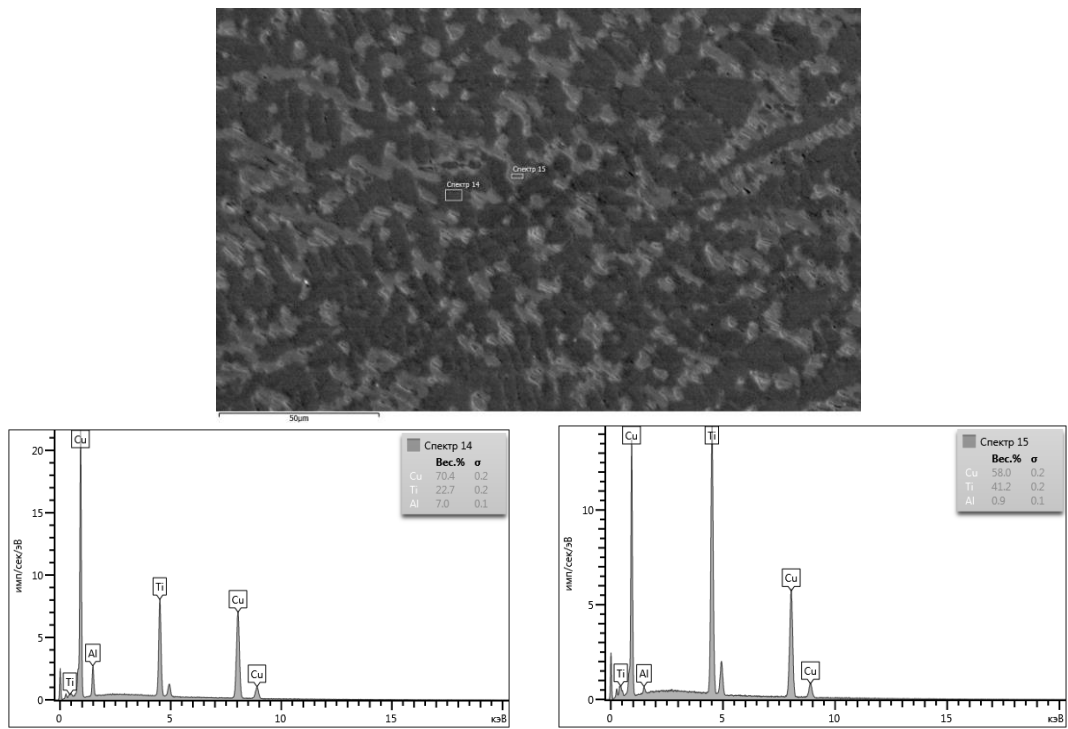


Рисунок 43 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 14», «Спектр 15»). Образец № 3



Рисунок 44 – Макроструктура наплавки образца № 4

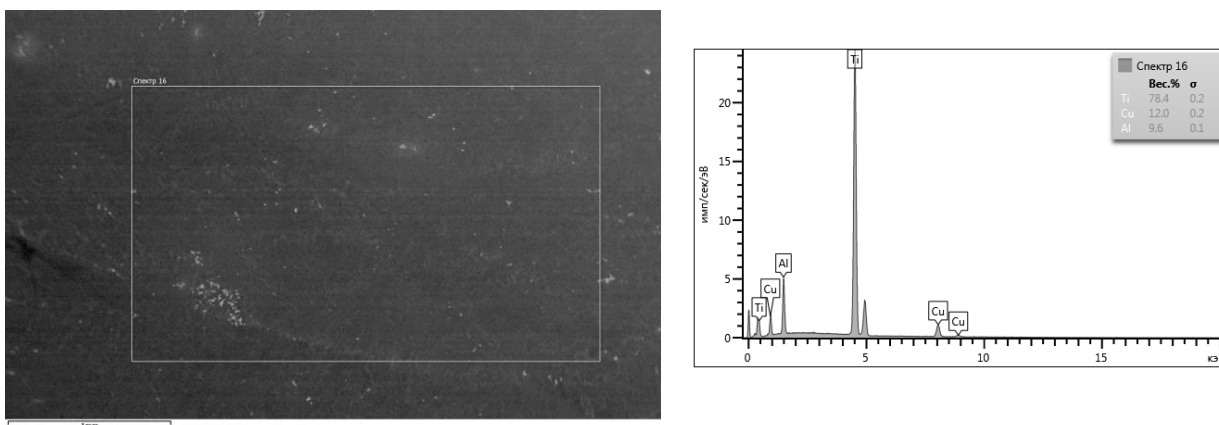


Рисунок 45 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 16»).

#### Образец № 4

Анализ макроструктуры образца №4 показал равноосную структуру (рисунок 44). При скоростях подачи медной 1 м/мин с применением алюминиевой присадочной проволоки 1,5 м/мин среднее содержание меди около 12%, а алюминия до 9,6% (рисунок 45). Исходя из тройной диаграммы состояния (рисунок 2) эта область твердого раствора меди и алюминия в  $\alpha\text{Ti}$ , что так же было подтверждено исследованием химического состава отдельных фаз (рисунок 46). Следует отметить, что в пределах зерна  $\alpha\text{Ti}$  содержание меди изменяется от 8,4 % в центре до 12,1% на границе зерна. Содержание алюминия по сечению зерна изменяется незначительно: от 10,4% на границе зерна до 10,8% в центре. Размер зерна при изучении микроструктуры на первом образце равен от 50 до 100 микрон.

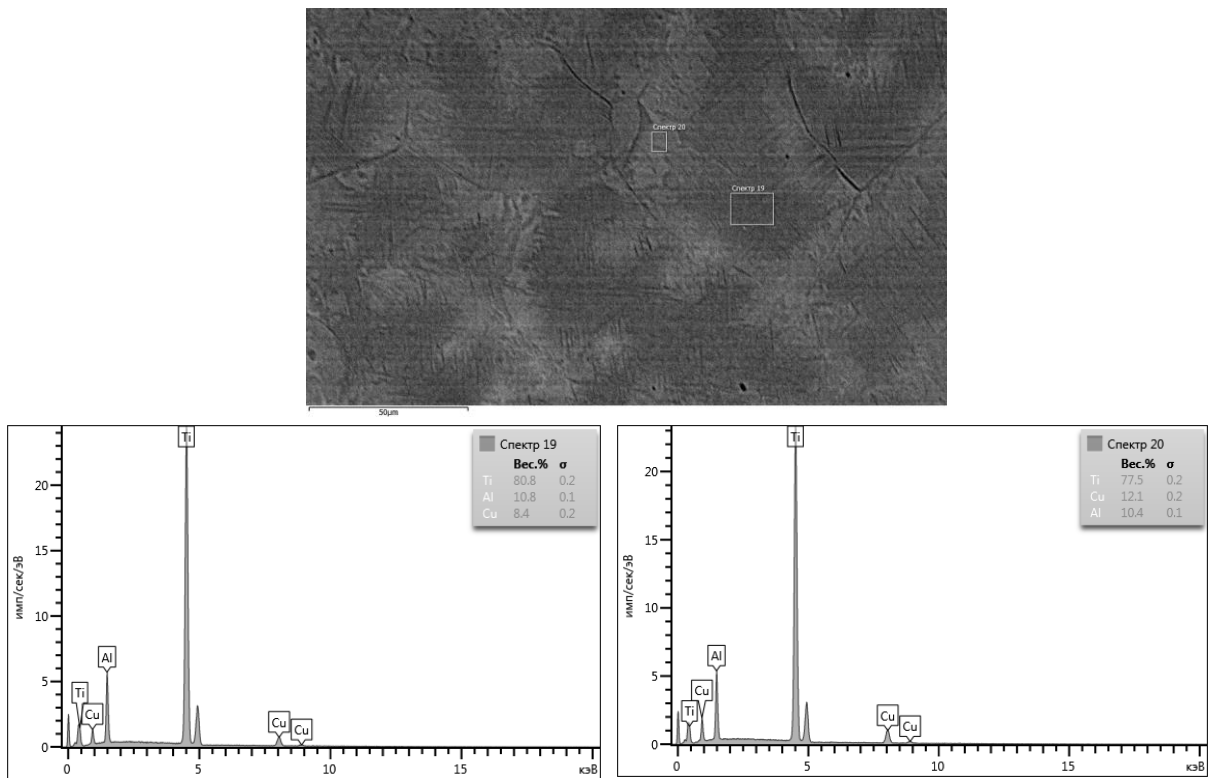


Рисунок 46 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 19», «Спектр 20»). Образец № 4



Рисунок 47 – Макроструктура наплавки образца № 5

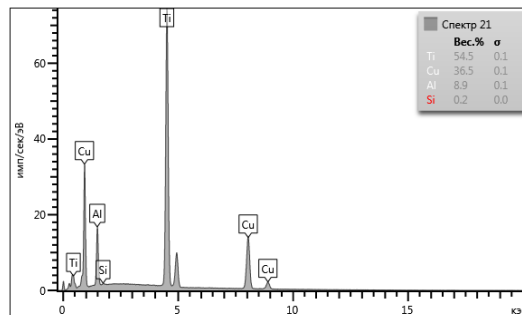
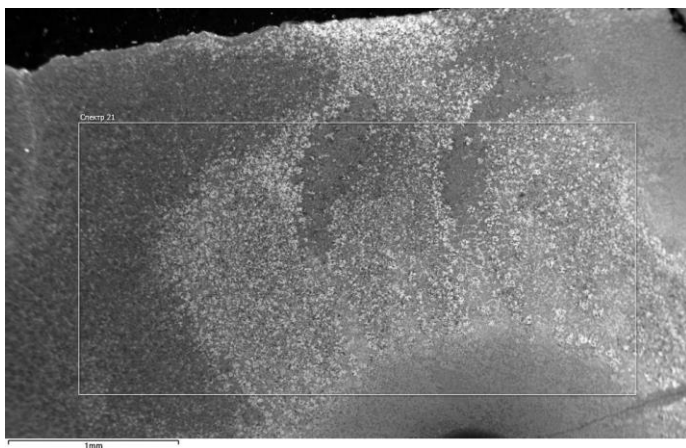


Рисунок 48 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником, («Спектр21»).

#### Образец № 5

Анализ макроструктуры образца № 5 показал равноосную структуру (рисунок 47). Среднее содержание алюминия около 8,9%, а меди 36,5% (рисунок 48). При скоростях подачи медной 3 м/мин с применением алюминиевой присадочной проволоки 1,5 м/мин по диаграмме состояния титан-медь (рисунок 1) определили что, структура наплавленного металла, представлена двумя фазами:  $\alpha\text{Ti}$  и  $\text{Ti}_2\text{Cu}$  (рисунок 49). Исследование микроструктуры показали, что в твердом наплавленном металле наблюдается структура, состоящая как минимум из трех различных структурных составляющих: фаз  $\text{Ti}_3\text{Al}$ , легированной медью до 4,5% - черные включения; фаз  $\text{Ti}_2\text{Cu}$ , легированной алюминием в количестве 5,5% - темные зерна; фаза  $\text{TiCu}$  – 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.

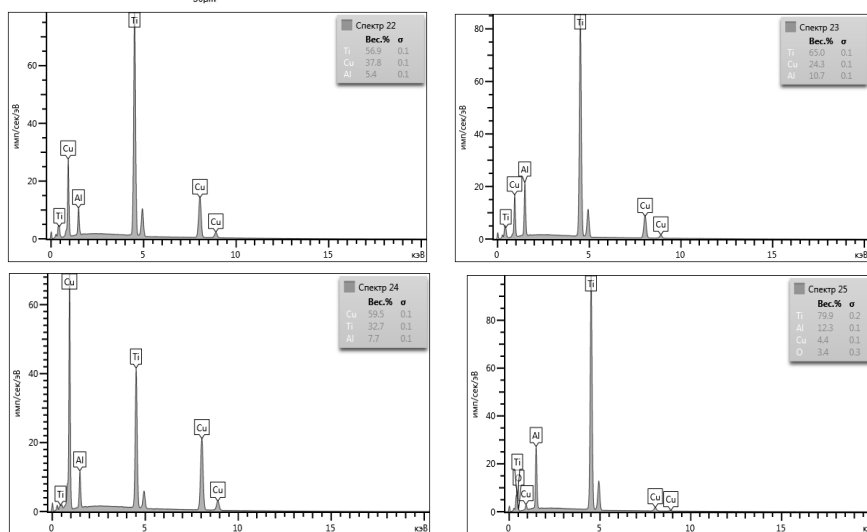
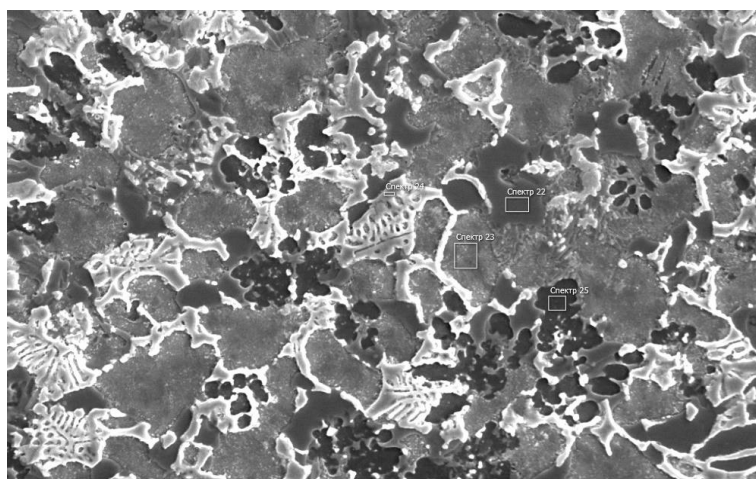


Рисунок 49 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками наплавки.

Образец № 5



Рисунок 50 – Макроструктура наплавки образца № 6



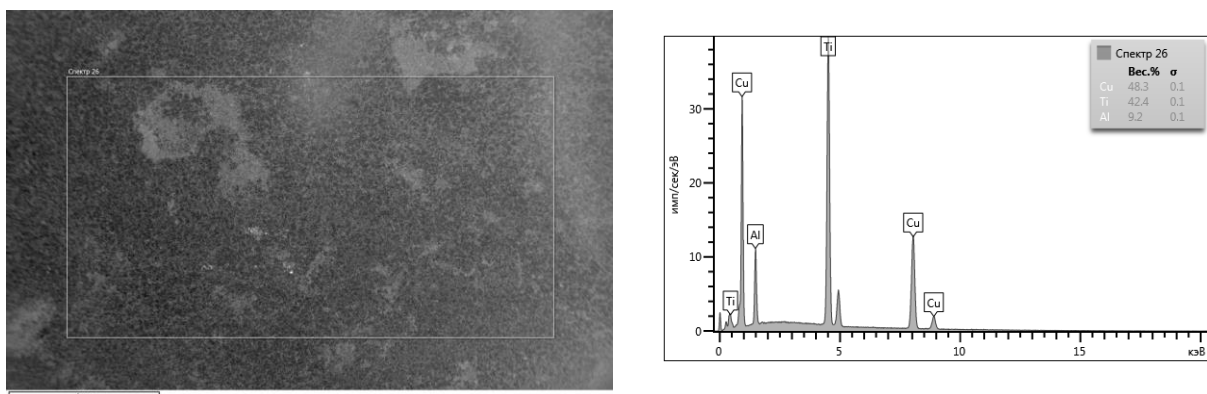


Рисунок 51 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 26»).

### Образец № 6

Анализ макроструктуры № 6 показал равноосную структуру (рисунок 50). Среднее содержание меди в наплавленном металле составляло 48,3%, а алюминия 9,2% (рисунок 51). При скоростях подачи медной 5 м/мин с применением алюминиевой присадочной проволоки 1,5 м/мин по диаграмме состояния титан-медь (рисунок 1) определили что, структура наплавленного металла, представлена двумя фазами:  $Ti_2Cu$  и  $TiCu$ . Исследование микроструктуры показали, что в структуре наплавленного металла наблюдаются три фазы (рисунок 52). Исходя из тройной диаграммы состояния Ti-Cu-Al (рисунок 2) структура представлена фазами:  $\tau_1$ - $TiCu_2Al$  – серые зерна;  $TiCu$  - темные зерна и фаза  $Ti_3Al$  - черные включения. Размер зерна при изучении микроструктуры черных включений равен от 3 до 10 микрон, размер темных зерен равен от 4 до 20 микрон.

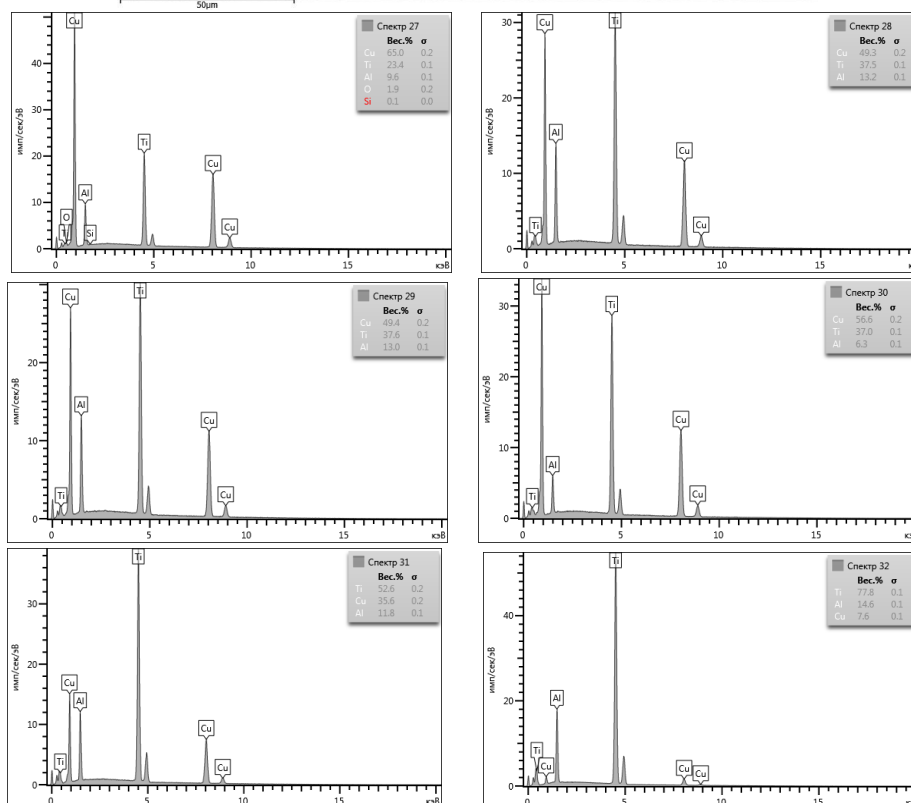
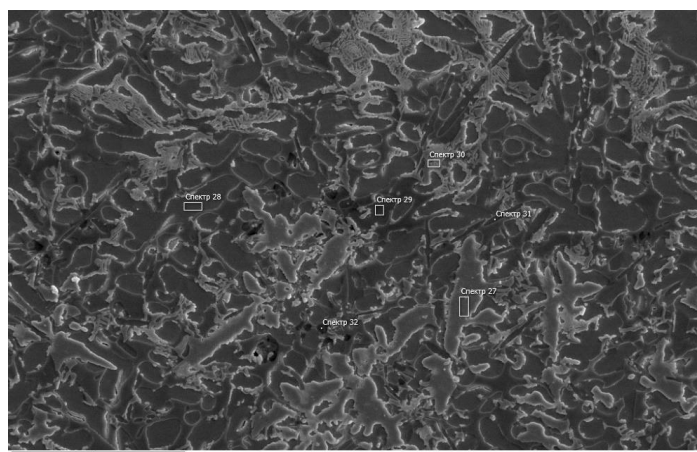


Рисунок 52 –Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 27», «Спектр 28», «Спектр 29», «Спектр 30», «Спектр 31», «Спектр 32»).

### Образец № 6

Анализ макроструктуры образца 2-1. показал равновесную структуру (рисунок 53). Среднее содержание меди в наплавленном металле составляло 10,7%, а алюминия 17,9% (рисунок 53).



Рисунок 53 – Макроструктура наплавки образца № 2-1

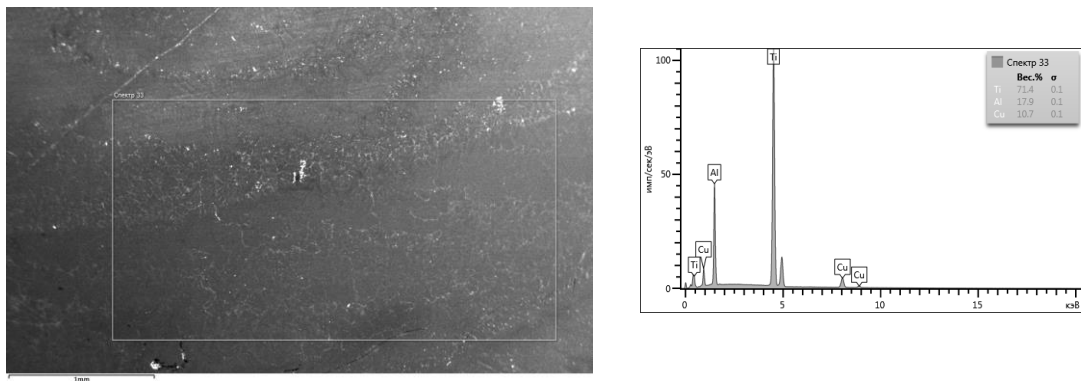


Рисунок 54 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 33»).

Образец № 2-1

При скоростях подачи медной 1 м/мин с применением алюминиевой присадочной проволоки 2 м/мин исходя из тройной диаграммы состояния Ti-Cu-Al (рисунок 2) определили что, структура наплавленного металла, представлена фазами:  $Ti_3Al$  и эвтектикой  $TiCu + Ti_3Al + \tau_1-TiCu_2Al$  (рисунок 55). Размер зерна при изучении микроструктуры равен более 85 микрон.

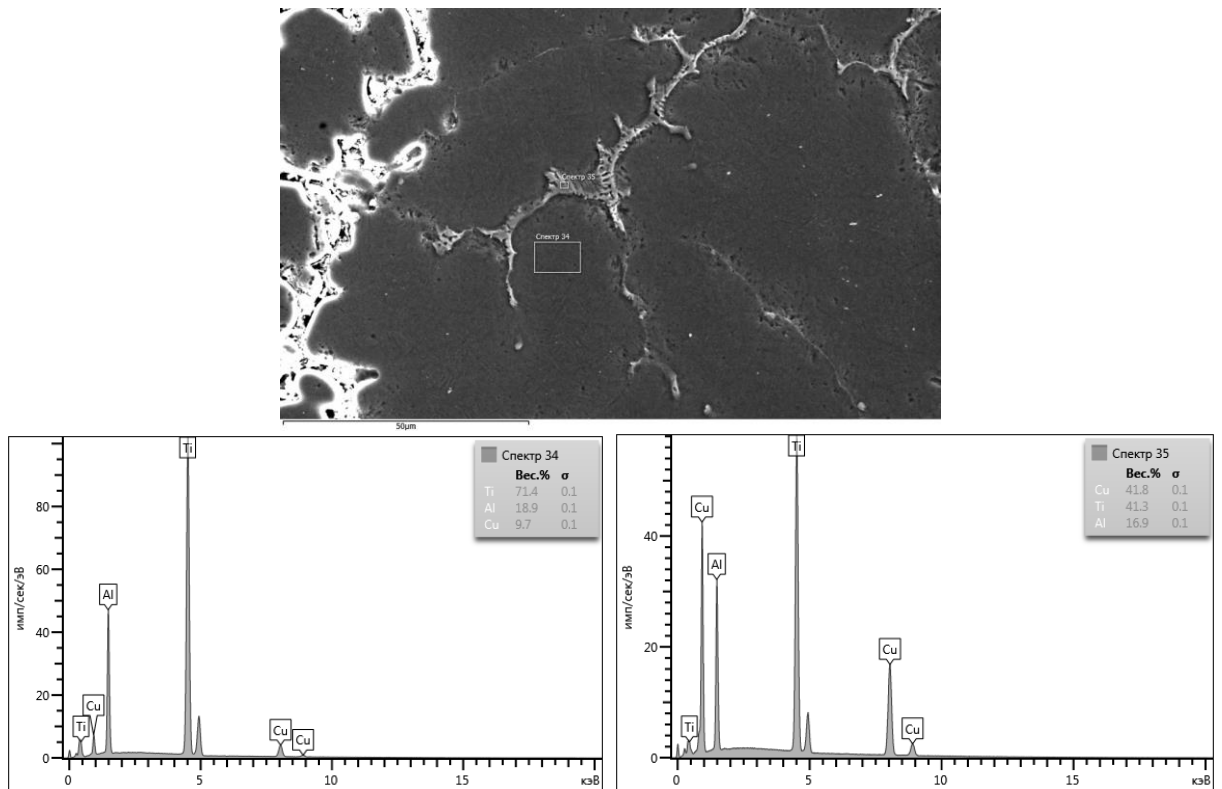


Рисунок 55 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 34», «Спектр 35»). Образец № 2-1

Макроструктура образца № 2-2 имеет равноосный характер, но на макрошлифе явно выделяются продольные трещины и заметно отслоение от основного металла (рисунок 56).

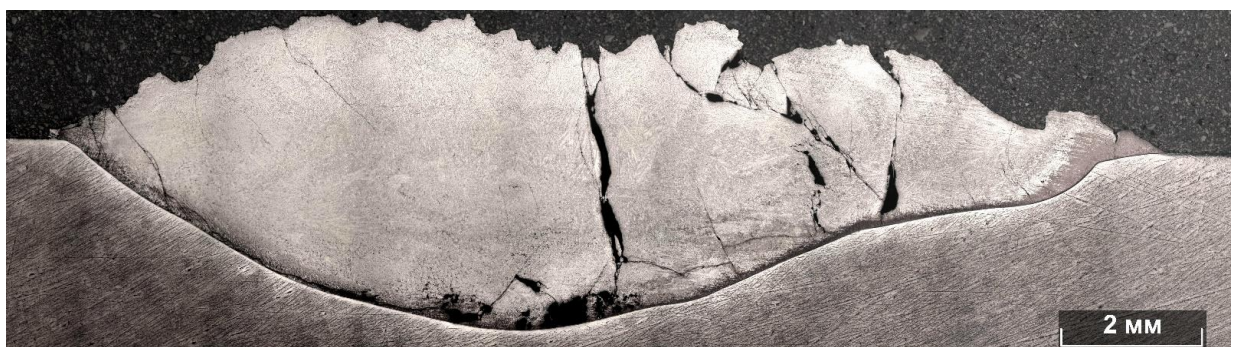


Рисунок 56 – Макроструктура наплавки образец 2-2

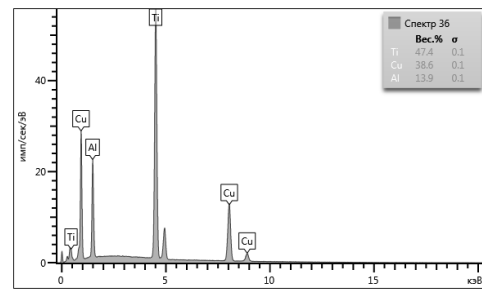
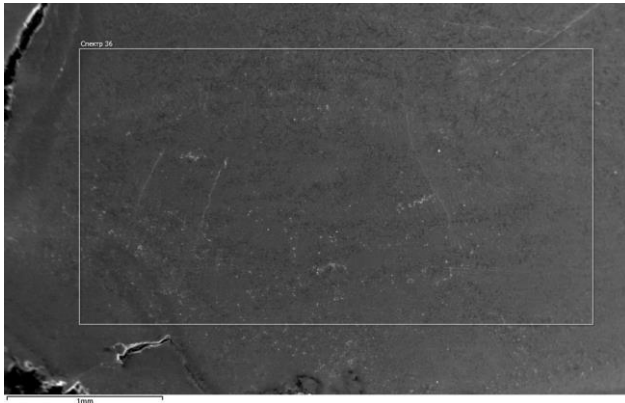


Рисунок 57 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 36»).

### Образец № 2-2

При скоростях подачи медной 3 м/мин с применением алюминиевой присадочной проволоки 2 м/мин среднее содержание титана 47,4%, меди 38,6% и алюминия 13,9%. Исследование микроструктуры и проведенный микроанализ показывают наличие в структуре трех явно выделенных фаз. Незначительное количество включений 10-20% занимает фаза  $Ti_3Al$  (черные включения на микрошлифе) (рисунок 58). Остальная область занята эвтектикой состоящей из фаз:  $Ti_2Cu + TiCuAl$ . Размер черных включений при изучении микроструктуры равен от 2 до 27 микрон.

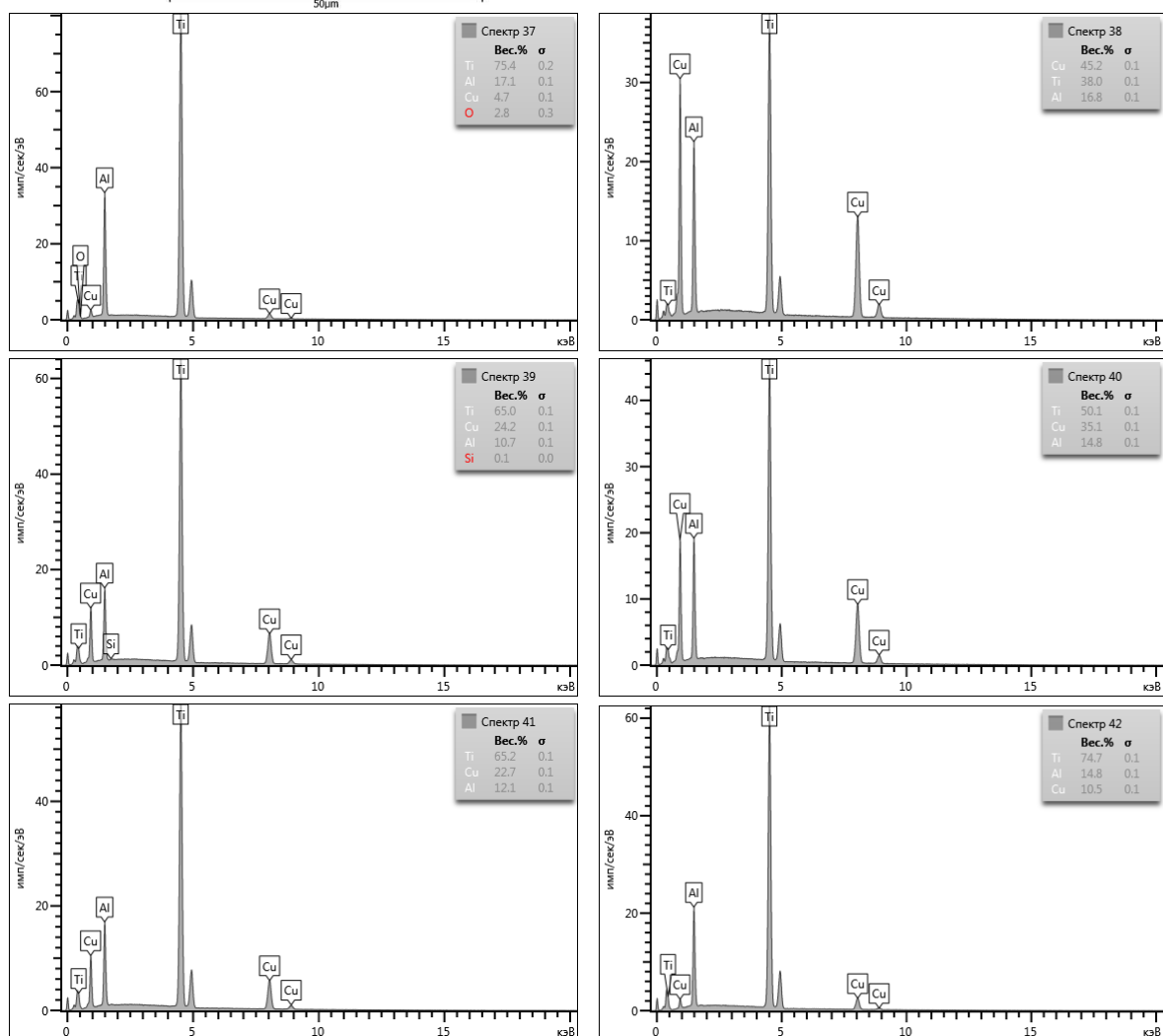
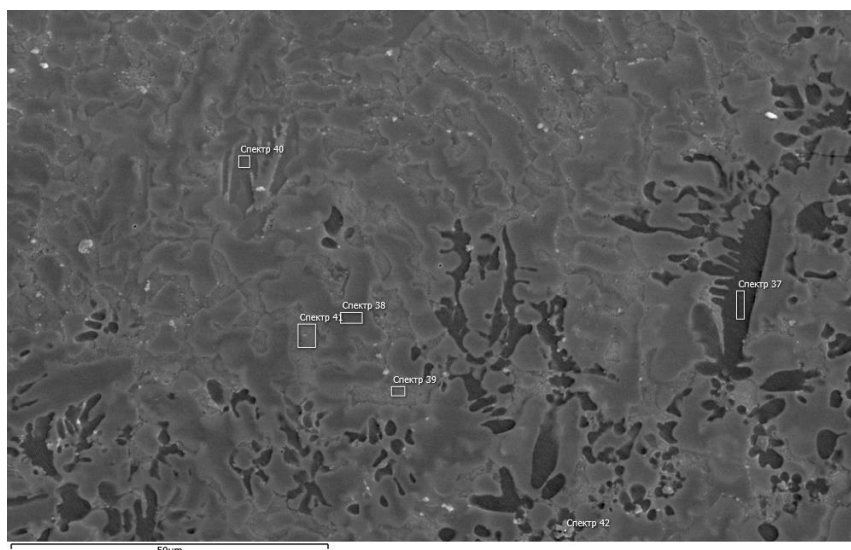


Рисунок 58 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 37», «Спектр 38», «Спектр 39», «Спектр 40», «Спектр 41», «Спектр 22»). Образец № 2-2

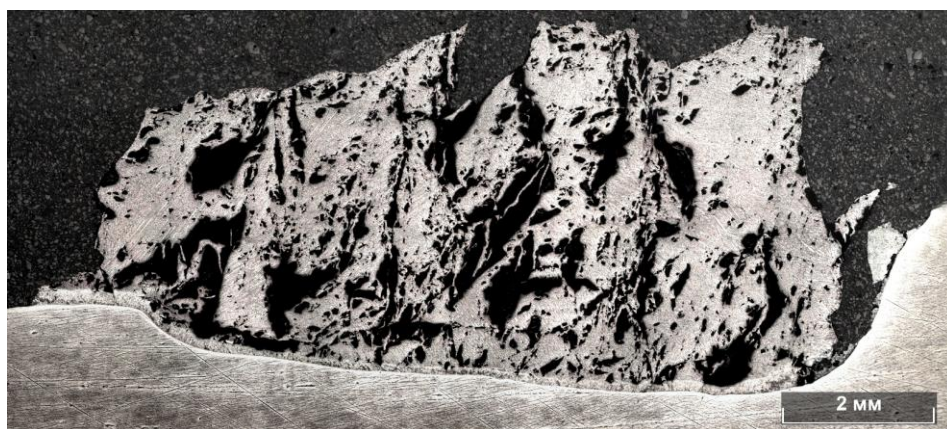


Рисунок 59 – Макроструктура наплавки образца № 2-3

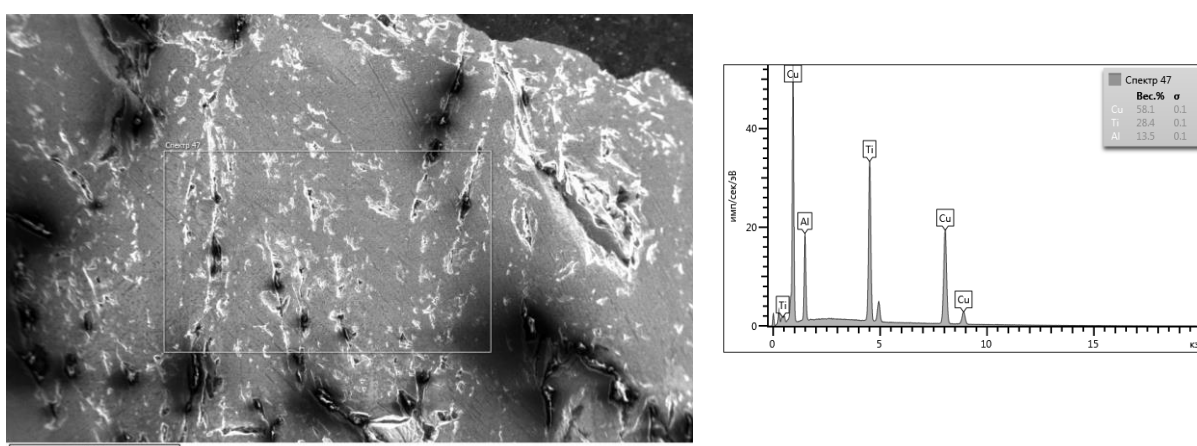


Рисунок 60 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 47»).

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 59). Содержание меди составляет в среднем 58,1%, а алюминия до 13,5% (рисунок 60). Исследование микроструктуры и проведенный микро-рентгеноспектральный анализ показывают наличие в структуре двух явно выделенных тройных фаз  $\tau_1$ -TiCu<sub>2</sub>Al – черные зерна и  $\tau_2$ -TiCuAl - серые зерна. Размер черных зерен равен от 5 до 63 микрон (рисунок 61).

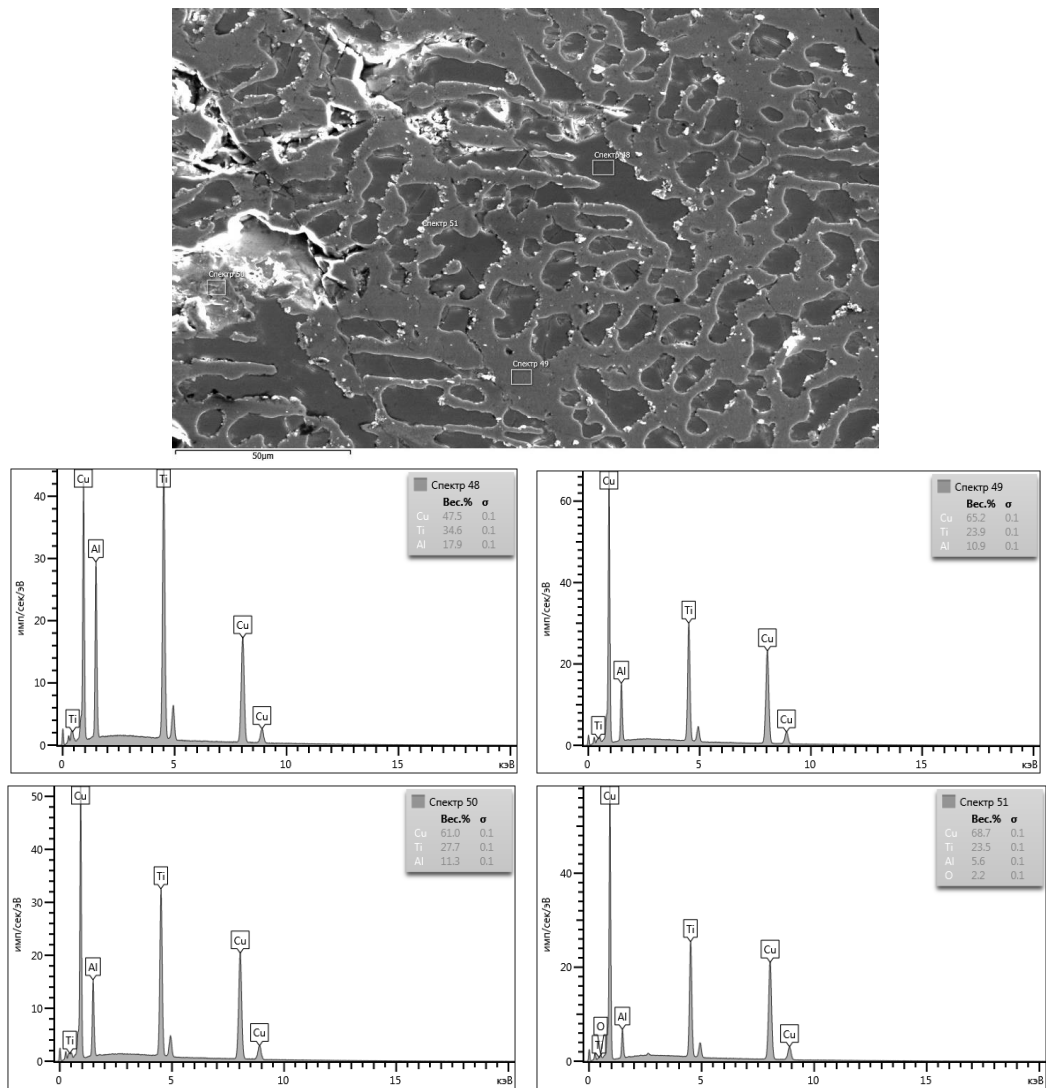


Рисунок 61 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 48», «Спектр 49», «Спектр 50», «Спектр 51»). Образец № 2-3



Рисунок 62 – Макроструктура наплавки образца № 2-4



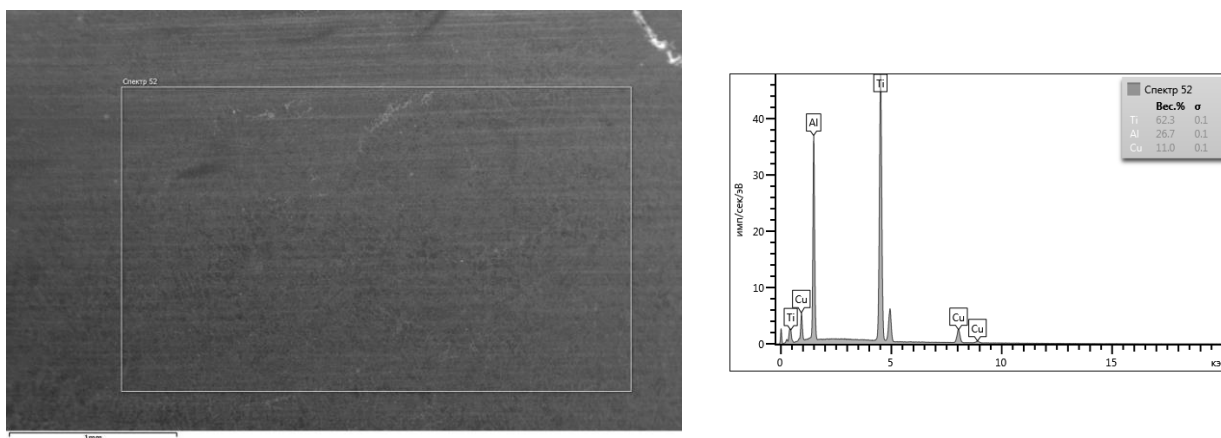


Рисунок 63 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 52»).

#### Образец № 2-4

Анализ макроструктуры образца № 2-4 показал, что склонность к образованию трещин этого сплава ниже (рисунок 62), чем у предыдущего образца 2.3 (рисунок 63). 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 зернами. Размер зерен первичной фазы равен от 2,5 и более 50 микрон (рисунок 64).



Рисунок 64 – Микроструктура наплавки образца 2-4

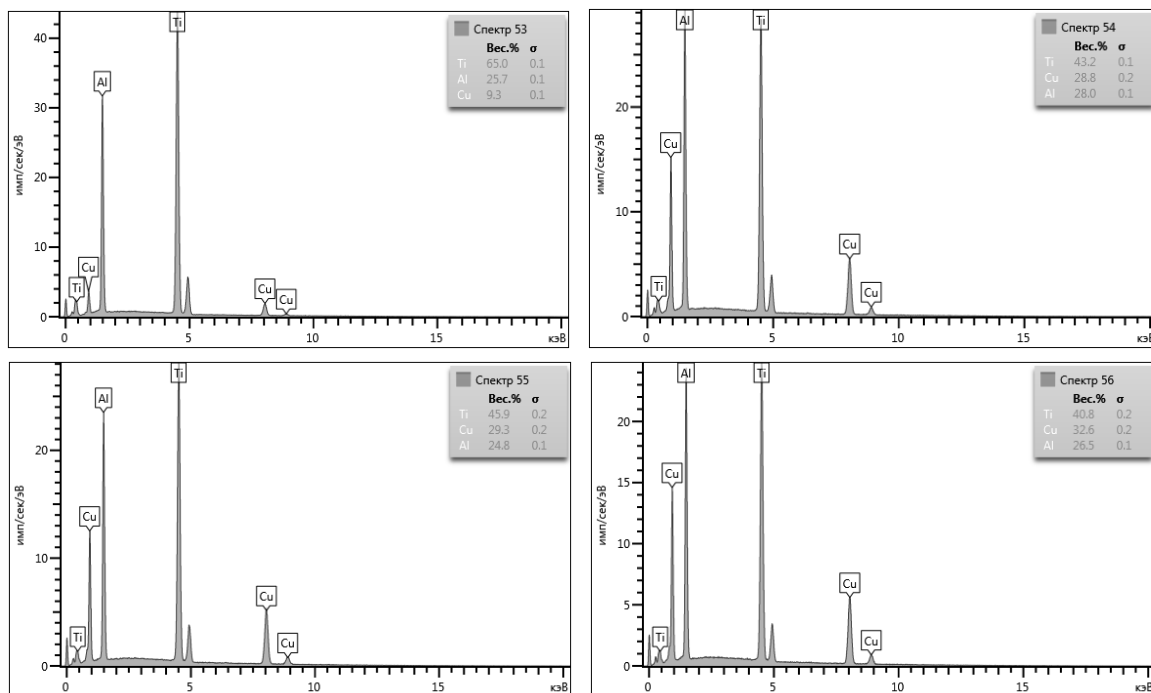


Рисунок 65 – Результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 53», «Спектр 54», «Спектр 55», «Спектр 56»). Образец № 2-4

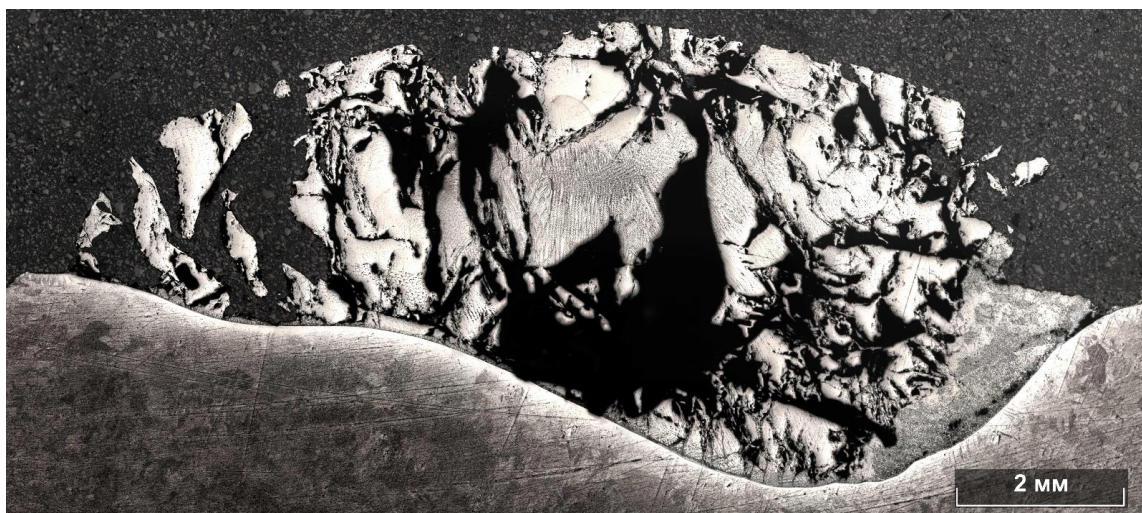


Рисунок 66 – Макроструктура наплавки образца 2-5

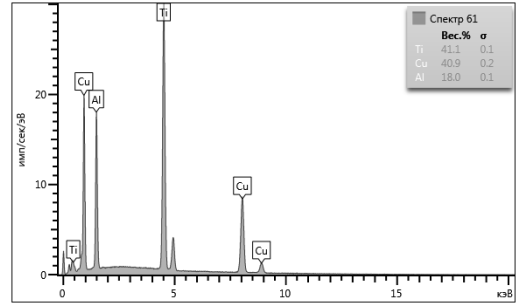
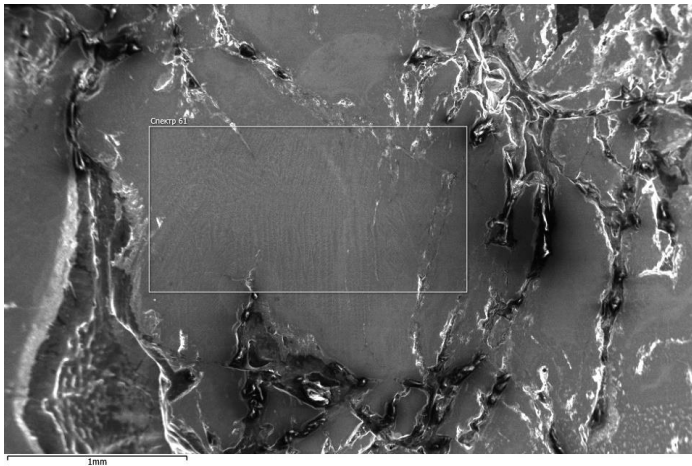


Рисунок 67 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 61»).

Образец № 2-5

Структура образца № 2-5 аналогична структуре образцов №2-3. Наплавленные валики содержат большое количество трещин (рисунок 66). Среднее содержание меди до 41%, а алюминия 18% (рисунок 67). Основная фаза этого сплава  $\tau_2$  - TiCuAl. По границам фазы  $\tau_2$  - TiCuAl расположена фаза  $\tau_1$ -TiCu<sub>2</sub>Al (рисунок 68).

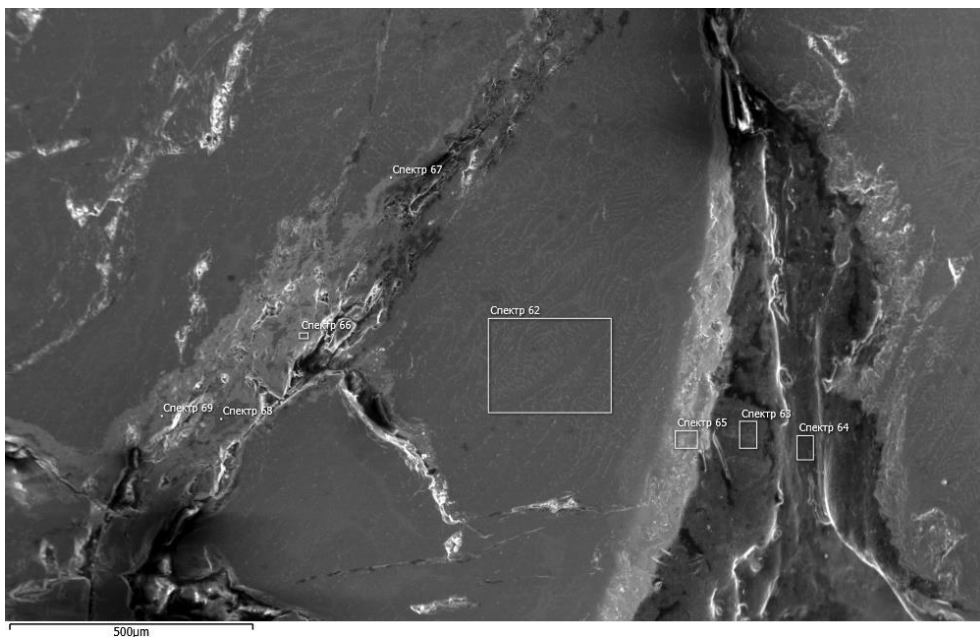


Рисунок 68 – Микроструктура наплавки образца № 2-5

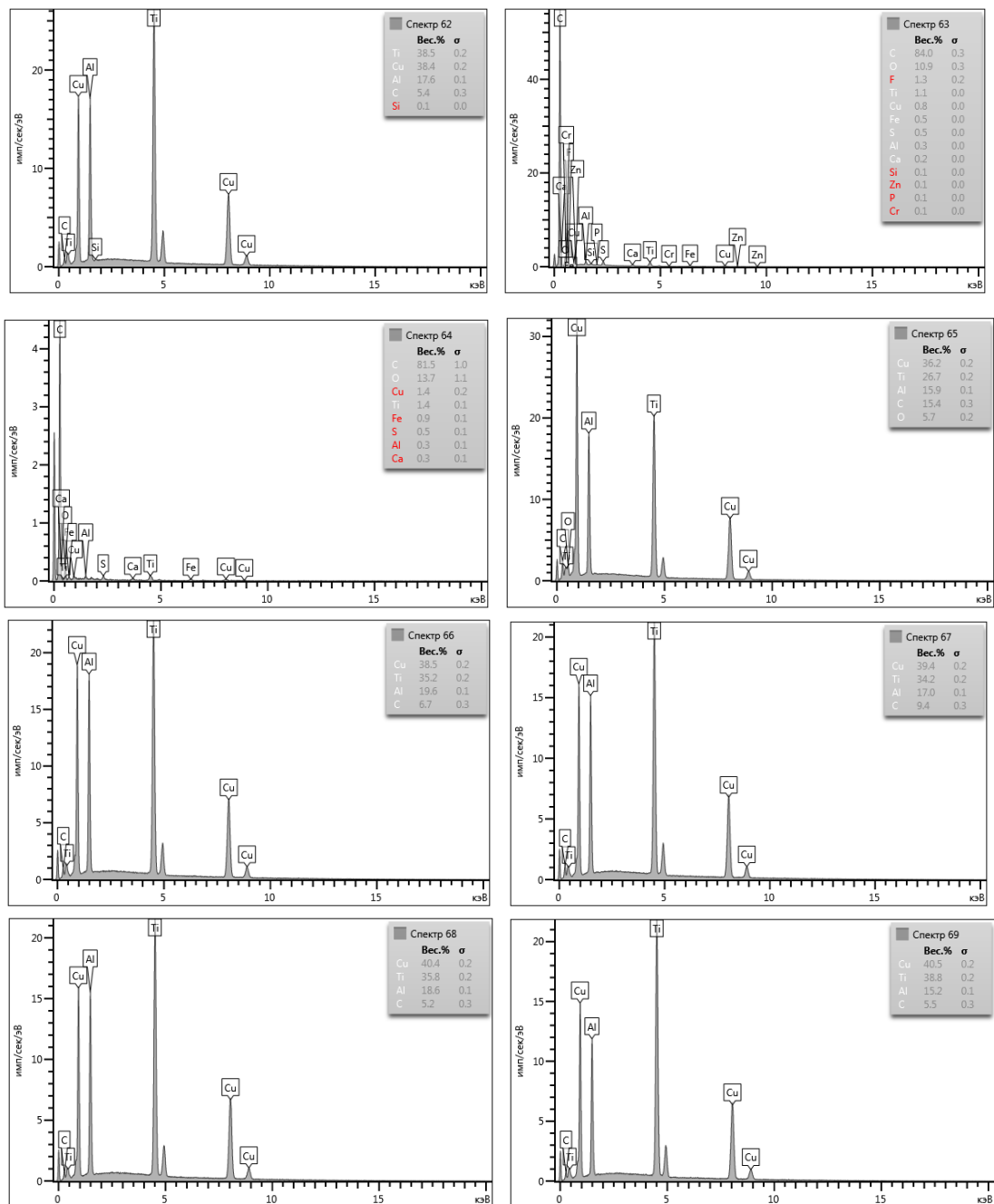


Рисунок 69 – Результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных («Спектр 66», «Спектр 67», «Спектр 68», «Спектр 69»).



Рисунок 70 – Макроструктура наплавки образца 2-6

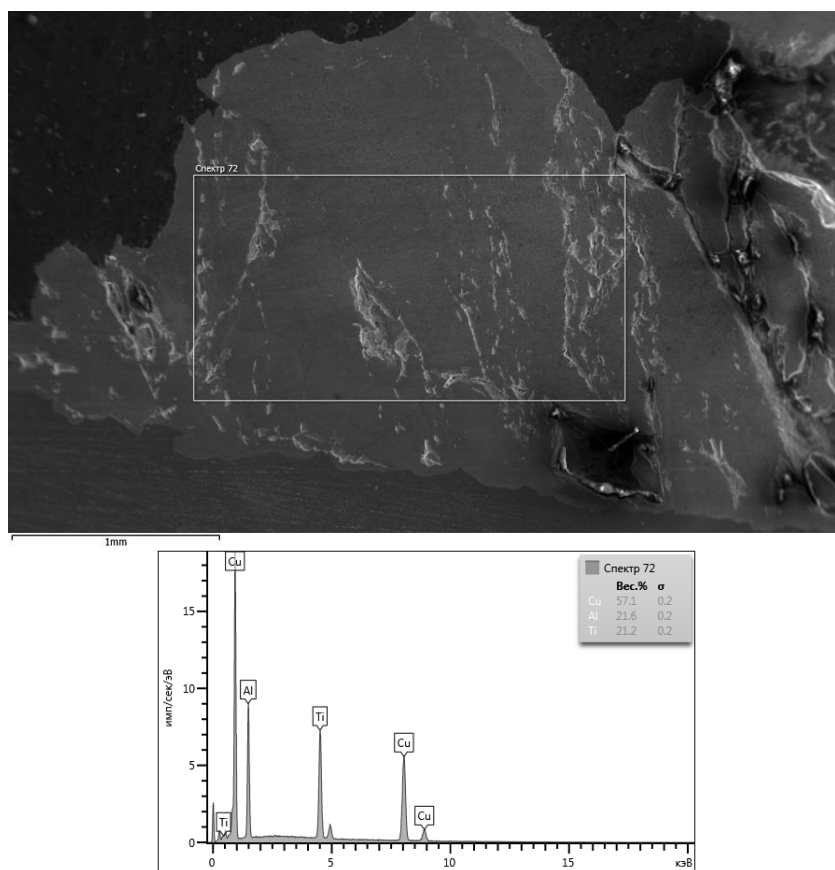


Рисунок 71 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зоне, обозначенной прямоугольником («Спектр 72»). Образец № 2-6

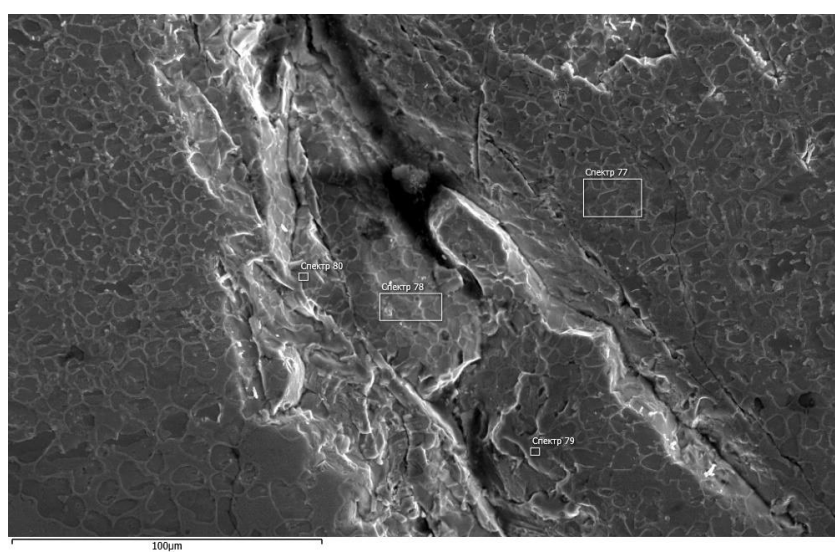


Рисунок 72 – Микроструктура наплавки образец 2-6

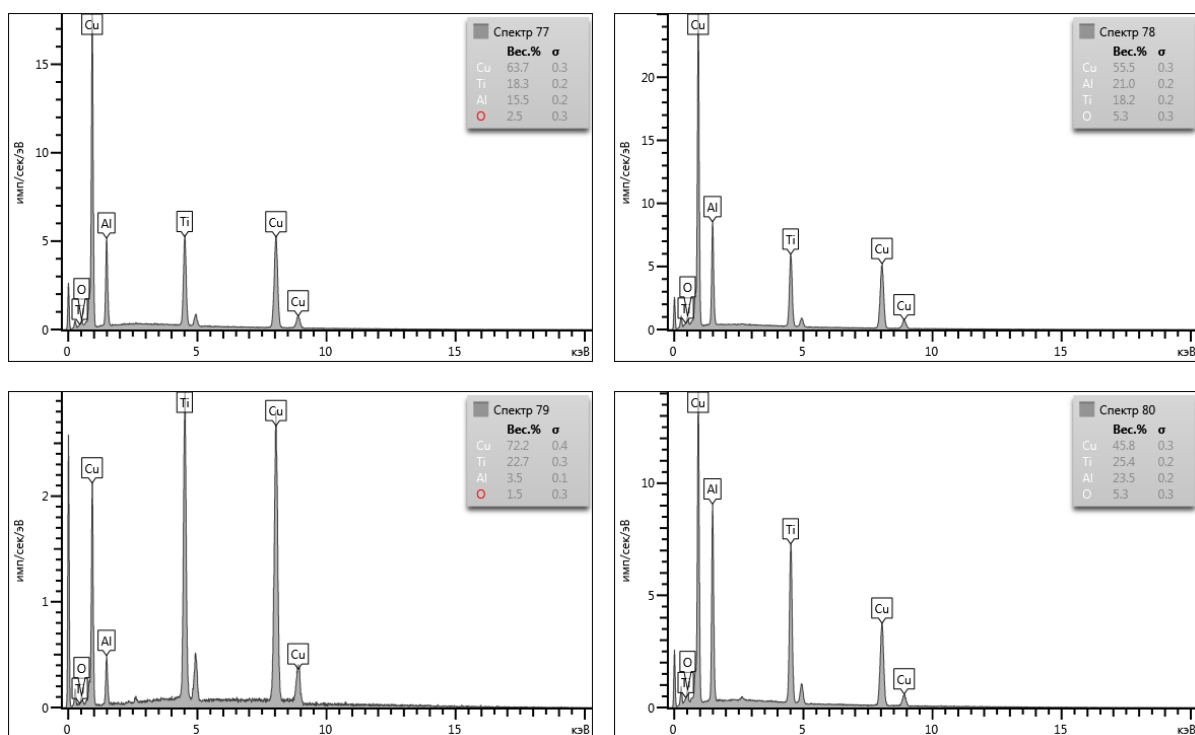


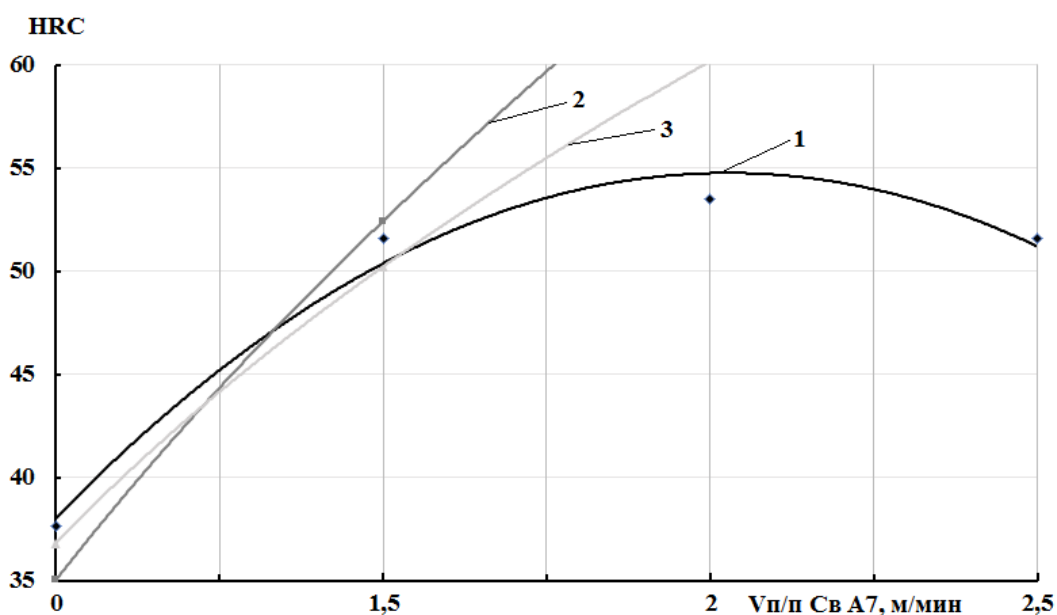
Рисунок 73 – Микроструктура и результаты рентгеноспектрального микроанализа в зонах, обозначенных прямоугольниками («Спектр 77», «Спектр 78», «Спектр 79», «Спектр 80»).

#### Образец 2-6

Образец 2-6. так же разрушился при подготовке шлифа (рисунок 69). Химический состав отличается большим содержанием меди до 57,1 % и содержанием алюминия до 21,25% (рисунок 71). Структура практически однофазная с небольшим размером зерна. Фазовый состав представлен фазой  $\tau_1$ -TiCu<sub>2</sub>Al (рисунок 72,73).

### 3.3. Исследование механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла

Исследование твердости наплавленных валиков показало, что с увеличением подачи алюминиевой проволоки проволоки диапазоне до 1,5 м/мин твердость наплавленных валиков резко возрастает. На 1 графике при увеличении при увеличении скорости подачи алюминиевой проволоки прослеживается снижение твердости в диапазоне от 2 м/мин до 2,5 м/мин. На 2 и 3 графиках отсутствуют значения твердости в диапазоне скорости подачи алюминиевой проволоки от 2 м/мин до 2,5 м/мин в связи с разрушением образцов. Разрушение образцов обуславливается макроструктурой наплавленных валиков (рисунок 74).



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 74 - Зависимость твердости наплавленных образцов от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

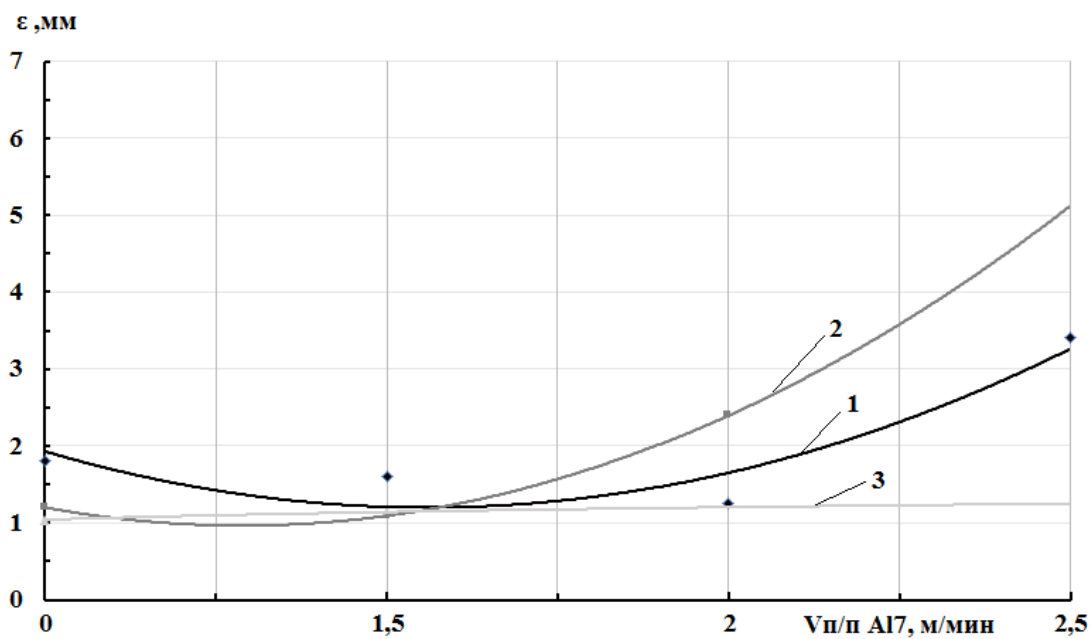
Исследование жаростойкости при 100 часах выдержки в печи показало, что увеличение массы наплавленных образцов варьировалась в пределах от 0,5 до 7 %. Увечение массы эталона составляло 14 %, это говорит о том что, увеличение массы наплавленных образцов от 2 до 28 раз меньше по сравнению с эталоном (таблица 3).

Таблица 3 – Исследование жаростойкости

№ образца	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

Проведенные исследования показали, что увеличении скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки в диапазоне до 1,5 м/мин износостойкость наплавленных образцов снижается. При дальнейшем увеличении подачи алюминиевой присадочной проволоки в диапазонах от 2 м/мин до 2,5 м/мин прослеживается резкое увеличение износостойкости 1 и 2 графика, на 3 графике видна линейная зависимость, так как диапазонах от 2 м/мин до 2,5 м/мин образцы разрушались при испытаниях (рисунок 75).





1- Vп/п CuAl8= 1 м/мин, 2- Vп/п CuAl8= 3 м/мин, 3- Vп/п CuAl8 = 5 м/мин

Рисунок 75 - Зависимость износостойкости от скорости подачи алюминиевой присадочной проволоки

При увеличении скорости подачи медной проволоки с 1 до 2 м/мин наблюдается увеличение износостойкости, что связано с появлением в структуре включений твердой интерметаллидной фазы  $Ti_2Cu$ . Дальнейшее увеличение скорости подачи медной проволоки приводит к формированию сплавов на основе хрупкой фазы  $Ti_2CuAl$  (рисунок 75).

## Выводы по разделу

1 Предложена технология аргонодуговой наплавки с применением двух присадочных проволок из меди и алюминия, которая позволяет получить наплавленные валики удовлетворительного качества со стабильными геометрическими параметрами.

2 Установлено что при скорости подачи увеличении присадочной проволоки из алюминиевой бронзы в диапазоне от 1 до 5 м/мин формируются наплавленные валики с содержанием меди от 7,5 % до 64,7 %, алюминия от 1% до 4,4 %.

3 Применение второй присадочной проволоки позволяет повысить содержание алюминия от 9,6 % до 21 %.

4 Проведенный микроструктурный анализ позволил определить фазовый состав наплавленного металла в зависимости от режимов наплавки представлен фазами:  $\alpha\text{Ti}$ ,  $\text{TiCu}$ ,  $\text{Ti}_2\text{Cu}$ ,  $\text{TiCu}_2\text{Al}$ ,  $\text{TiCuAl}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$ .

5 Установлено, что наличие тройных фаз  $\tau_1\text{-TiCu}_2\text{Al}$  и  $\tau_2\text{-TiCuAl}$  приводит к охрупчиванию структуры наплавленного металла.

6 В результате проведения исследований значение твердости изменялось в диапазоне от 35 до 54 HRC в зависимости от режимов наплавки.

7 Максимальное значение износостойкости наблюдается при режиме скорости наплавки медной проволоки  $\text{CuAl8} = 2$  м/мин, алюминиевой проволоки  $\text{Св А7} = 2,5$  м/мин.

9 Жаростойкость повышается от 1,5 до 28 раз по сравнению с эталоном.

## **4 Безопасность и экологичность**

### **4.1 Технологическая характеристика объекта**

В данной научно-исследовательской дипломной работе рассматривается аргодуговая наплавка купридов титана, которая подразумевает слесарные и наплавочные работы, а так же работы по исследованию образцов. Данные виды работ не отличаются от общеизвестных рисков возгорания и поражающих факторов для человека.

Участок, на котором выполняют слесарные и наплавочные работы представлен следующим оборудованием: сварочным инвертором, который используется как источник питания для аргодуговой наплавки, механизмами подачи присадочных проволок, болгаркой с зачистными и отрезными кругами, дополнительным оборудованием для разметки.

«Технологии, в которых основной операцией является наплавка, представляют собой источник опасных и вредных факторов. Этот факт приводит к дополнительному усложнению и повышению стоимости оборудования для наплавка. В результате этого одной из неотложных задач является проведение исследований по изучению взаимосвязи энергетических параметров процесса сварки (ток и напряжения на дуге), особенностей протекания процесса сварки и внешних условий, при котором он протекает, объемов выделений сварочного аэрозоля и других вредных веществ» [1].

«Механизированная дуговая наплавка в защитных газах обладает высокой производительностью, она очень востребована в промышленности. Тем не менее, продолжаются поиски путей улучшения её санитарно-гигиенических характеристик» [1]. В экологическом разделе данной выпускной квалификационной будут определены факторы, влияющие на здоровья человека и окружающей среды, а так же предложены меры защиты персонала от возникающих опасных и вредных факторов, сопровождающих проектную технологию.

## 4.2 Персональные риски, возникающие при реализации технологического процесса

Таблица 4 - Профессиональные риски, возникающие при реализации технологического процесса

Перечень операций	Опасные и вредные факторы	Источник возникновения опасных факторов
1	2	3
1. Входной контроль и разметка поверхности заготовленной пластины	- наличие острых кромок по краям заготовленной пластины	1) Заготовленная пластина 2) Маркер 3) Линейка
2. Заготовительная операция	- наличие острых кромок по краям заготовленной пластины; - возможность нанесения механические повреждения при выполнении работ с болгаркой, как шлифовальным диском, так и искрами	1) Болгарка 2) Тиски
3. Аргонодуговая наплавка	- опасность замыкания на тело рабочего высокого напряжения, питающего производственное оборудование; - повышенная запылённость и загазованность воздуха рабочей зоны; - резкое увеличение температуры изготавливаемых изделий и сварочной горелки; - ультрафиолетовое излучение в рабочей зоне сверх безопасных значений;	1) Сварочный инвертор Сварог 315P AC/DC 2) Сварочная горелка AUT-TIG 400W

Продолжение таблицы 4

1	2	3
4 Вырезание образцов	<ul style="list-style-type: none"> <li>- возможность нанесения механические повреждения при выполнении работ с болгаркой, как отрезным диском, так и искрами;</li> <li>- нагрев отрезаемых образцов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Болгарка</li> <li>2) Тиски</li> </ul>
5 Исследования жаростойкости	<ul style="list-style-type: none"> <li>- наличие теплового излучения от печи во время загрузки вы выгрузки образцов;</li> <li>- нагрев выгружаемых образцов;</li> <li>- возможность нанесения механические повреждения при выполнении работ по зачистке образцов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Муфельная печь СНОЛ 30/1300</li> <li>2) Металлическая щетка</li> </ul>
6 Исследования износостойкости	<ul style="list-style-type: none"> <li>- возможность нанесения механические повреждения при выполнении работ на установке для испытания износостойкости наплавленных образцов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Установка для испытания износостойкости наплавленных образцов</li> </ul>

В ходе анализа операций проводимых при выполнении выпускной квалификационной работы были выявлены опасные и вредные факторы (таблица 4).

### 4.3 Технические и организационные предложения по уменьшению выявленных при анализе проектной технологии профессиональных рисков

Таблица 5 – Предложения по защите персонала от вредных факторов [2]

Перечень выявленных опасных и вредных факторов	Предложения по снижению опасных и вредных факторов	Предлагаемые защитные средства
1	2	3
1 Наличие острых кромок по краям заготовленной пластины;	Инструктаж персонала	Защитные перчатки, специализированная одежда.
2 Возможность нанесения механические повреждений при выполнении работ с болгаркой, как шлифовальным диском, так и искрами;	Инструктаж персонала	Защитные перчатки, защитные очки, специализированная одежда.
3 Возможность короткого замыкания и поражения человека, как электрическим током, так и искровыми разрядами;	Подключение заземляющих кабелей и контроль над качеством соединения	-
4 Повышенная запылённость и загазованность воздуха рабочей зоны;	Инструктаж персонала	Местная и общая вытяжная вентиляция
5 Резкое увеличение температуры изготавливаемых изделий и сварочной горелки;	Инструктаж персонала	Защитные перчатки, специализированная одежда.

Продолжение таблицы 5

1	2	3
6 Высокое ультрафиолетовое излучение в рабочей области сотрудника;	Осуществление экранирования зоны сварки с использованием щитов. Обеспечение безопасного расстояния.	Защитные перчатки специализированная одежда, защитная маска.
7 Возможность нанесения механические повреждений при выполнении работ с болгаркой, как отрезным диском, так и искрами;	Инструктаж персонала	Защитные перчатки, защитные очки, респиратор для защиты дыхательных путей, специализированная одежда.
8 Нагрев отрезаемых образцов:	Инструктаж персонала	Защитные перчатки, специализированная одежда.
9 Наличие теплового излучения от печи во время загрузки выгрузки образцов;	Инструктаж персонала	Защитные перчатки, специализированная одежда.
10 Нагрев выгружаемых образцов;	Инструктаж персонала	Защитные перчатки, специализированная одежда.
11 Возможность нанесения механические повреждений при выполнении работ на установке для испытания износостойкости наплавленных образцов	Инструктаж персонала	Защитные перчатки, защитные очки, специализированная одежда.

При анализе выявленных опасных и вредных факторов было установлено, что все факторы известные и по ним предложены методы по их воздействия на человека или исключения из технического процесса (таблица 5).

#### 4.4 Технические и организационные предложения по обеспечению пожарной безопасности

Таблица 6 – Анализ опасных факторов возможного пожара при слесарных работах и наплавке

Место проведения исследований	Оборудование, которое использовалось при исследовании	Возможный класс пожара	Поражающие факторы при пожаре
Лаборатория для проведения слесарных, наплавочных и исследовательских работ	Болгарка, сварочный инвертор, муфельная печь, установка для испытания износостойкости наплавленных образцов	Пожары, которые возникают при замыкании электрических устройств (Е)	Резкое увеличение температуры, выделение токсичных веществ при горении, возможные разрушения частей конструкции здания

Таблица 7 – Организационные мероприятия для исключения возгораний [11]

Наименование мероприятий	Наименование противопожарного оборудования, которым должна быть укомплектована лаборатория
Обучение персонала правилам пожарной безопасности, размещение в лаборатории плакатов предупреждающих о возможности возгорания.	Огнетушитель ОП-5, ящик с песком, кошма, багор, тревожная кнопка.

Возникновение пожара один из самых распространенных опасных факторов на производстве или в лабораториях, поэтому необходимо уделить особое внимание к обучению персонала технике безопасности и правилам поведения при пожаре.

#### Выводы по разделу

«В процессе выполнения раздела по безопасности и экологического удалось установить, что возникающие в процессе реализации технологии наплавки и исследовании образцов, опасные и вредные факторы устраняются или снижаются до приемлемого уровня путём применения стандартных средств по обеспечению безопасности и санитарии производства» [1].



## **5 Оценка экономической эффективности**

### **5.1 Состав затрат на проведение ВКР**

«Затраты на проведение исследовательских и опытных работ являются предпроизводственными и складываются из следующих составляющих:

- затраты на постановку задачи исследования (литературный обзор, изучение патентов и т. п.);
- затраты на лабораторные исследования;
- затраты на опытное производство (проектирование и сооружение опытной установки), получение и испытание опытной партии продукта, изучение отходов производства и технико-экономическая оценка процесса;
- затраты на промышленное проектирование» [20].

### **5.2 Материальные затраты**

«Стоимость израсходованных в процессе исследования основных и вспомогательных материалов, а также расходы на исследование химического состава и рентгенофазового анализа рассчитывается, исходя из их фактического расхода и цен. Расчет цен представлен в таблице 10» [20].

Таблица 10 – Стоимость материалов

Наименование материала/работ	Единица измерения	Цена руб./ед.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Титановый лист марки ВТ1-0	кг.	1600	10	16000
Проволока марки Св. А7	кг.	700	5	3500
Проволока марки Св. CuAl8	кг.	1500	5	7500
Аргон	л.	60	40	2400
Круг отрезной	шт.	30	100	3000
Исследование химического состава	шт.	3000	12	36000
Шлифовальный круг	шт.	80	6	480
Всего:				68880

Таблица 11 – Стоимость электроэнергии

Наименование оборудования	Мощность, кВт	Время, ч	Электроэнергия, кВт/ч	Сумма, руб.
Сварочный инвертор Сварог 315р AC/DC	12,7	1	3,96	50,3
УШМ	1	2	2	9
Муфельная печь SNOL 30/1100	3,4	800	2720	12240
Всего:				12299,3

«Стоимость электроэнергии, израсходованной в процессе исследования, рассчитывается аналогично затратам на материалы. Затраты на электроэнергию определяются исходя из мощности оборудования, времени его работы и цены 1 кВт·ч. Расчет затраченной электроэнергии представлен в таблице 26» [20].

#### Вывод по разделу

В результате сложения затрат на материалы и затрат на электроэнергию мы получили общую стоимость проведения исследования для данной выпускной квалификационной работы, которая составила 81179 рублей.

## Заключение

Предложена технология аргонодуговой наплавки с применением двух присадочных проволок из меди и алюминия, которая позволяет получить наплавленные валики удовлетворительного качества со стабильными геометрическими параметрами.

Была подобрана методика исследований по результатам, которой будет произведен анализ эксплуатационных характеристик, а так же определён химический и фазовый состав наплавленных валиков.

Установлено что при увеличении присадочной проволоки из алюминиевой бронзы в диапазоне от 1 до 5 м/мин формируются наплавленные валики с содержанием меди от 7,5 % до 64,7 %, алюминия от 1% до 4,4 %.

Применение второй присадочной проволоки позволяет повысить содержание алюминия от 9,6 % до 21 %.

Проведенный микроструктурный анализ позволил определить фазовый состав наплавленного металла в зависимости от режимов наплавки представлен фазами:  $\alpha\text{Ti}$ ,  $\text{TiCu}$ ,  $\text{Ti}_2\text{Cu}$ ,  $\text{TiCu}_2\text{Al}$ ,  $\text{TiCuAl}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$ .

Установлено, что наличие тройных фаз  $\tau_1\text{-TiCu}_2\text{Al}$  и  $\tau_2\text{-TiCuAl}$  приводит к охрупчиванию структуры наплавленного металла.

В результате проведения исследований значение твердости изменялось в диапазоне от 35 до 54 HRC в зависимости от режимов наплавки.

Максимальное значение износостойкости наблюдается при режиме скорости наплавки медной проволоки  $\text{CuAl8} = 2$  м/мин, алюминиевой проволоки  $\text{Св А7} = 2,5$  м/мин.

Жаростойкость повышается от 1,5 до 28 раз по сравнению с эталоном.

В результате сложения затрат на материалы и затрат на электроэнергию мы получили общую стоимость проведения исследования для данной выпускной квалификационной работы, которая составила 81179 рублей.

## Список используемых источников

- 1 Бочаров И. В. Технология ремонтной сварки рамы траншеекопателя [Текст]: Выпускная квалификационная работа: защищена 2019: утв. 2019 г.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 Егоров А.С. Методические указания по оформлению выпускных квалификационных работ по программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры [Текст]: // Метод. указ. ТГУ.-2020.
- 5 Захаров А.М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем.[Текст] / А.М. Захаров. –М.:Металлургия.-1990.
- 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. Влияние кремния на процессы формирования и свойства наплавленных сплавов системы Fe-Al/ [Текст] Бочкарев А. Г. Плахотный А. Г. // Символ науки/ - 2016 г./ - №11/ - С. 3

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

11 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.

12. 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

13. 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.

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

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

16 Острянка 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/ Острянка Алексей Михайлович

17 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.

18 Середа, Б.П. Диффузионное титанирование как метод повышения износостойкости латуни и бронзы в агрессивных средах/ Б.П. Середа, И.В. Кругляк, В.П. Падалкаидр. // [Электронный ресурс]:[http://www.zgia.zp.ua/gazeta/METALURG\\_26\\_14.pdf](http://www.zgia.zp.ua/gazeta/METALURG_26_14.pdf)

19 Середа Б.П. Исследование физико-механических свойств многокомпонентных защитных покрытий на медных сплавах/ Б.П. Середа, И.В. Кругляк, Д.О. Кругляк, Ю.В.Бондаренко // [Электронный ресурс]:  
[http://www.zgia.zp.ua/gazeta/METALURG\\_24\\_17.pdf](http://www.zgia.zp.ua/gazeta/METALURG_24_17.pdf)

20 Хмелевская Г. Г Раздел бакалаврской работы «Расчет затрат на дипломную научно-исследовательскую работу». Учебное электронное текстовое издание пособие. - Екатеринбург: изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 3

21 Шморгун В.Г. Диффузионные процессы на межслойной границе сваренного взрывом трёхслойного композита системы Cu-Ti [Текст] / В.Г. Шморгун, 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. – P. 26.

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

25 Landolt-Bornstein Ternary alloy system (Phase diagram, crystallographic and thermodynamic data) [Текст] // Materials Science and International Team, MSIT –P.156-173.

26 Marek M.I., 1987, Metals Handbook, 9th Edition, ASM International, Materials Park, OH, U.S.A, Vol.13, pp. 20-21.

27 M.R. Akbarpour Characterization and hardness of TiCu–Ti<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub> 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.