

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

Политехнический институт
Кафедра Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____/ В.И. Темных
(подпись)
«__» _____ 2016 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА


Направление 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов
Профиль 22.03.01.07 Материаловедение и технологии материалов в
машиностроении

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА ВТ1-М1**

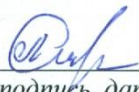
Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент


_____/ В.С. Казаков
(подпись, дата)

Выпускник


_____/ В.В. Шведов
(подпись, дата)

Нормоконтролер


_____/ Л.А. Свечникова
(подпись, дата)

Красноярск 2016

Реферат

Отчет 63 с., 31 рис., 12 табл., 32 источника.

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТИТАНОВО-МЕДНЫХ АНОДОВ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

Ключевые слова – Сварочное производство, анод, сборка, сварка, технология, титан, медь.

Объект исследования – образцы свидетели, технология и оборудование для сварки титана с медью.

Цель работы – провести исследования сварного соединения титана с медью, для дальнейшей оптимизации технологии сварки.

В процессе работы над проектом была оптимизирована сварка титана с медью без использования промежуточного материала, исключая глубокое взаимопроникновение металла. Исследованы сварные образцы из материала ВТ1–М1 с помощью металлографии. Проведены испытания на одноосное статическое растяжение сварного соединения ВТ1–М1, а также измерена его микротвердость, и измерено электрическое сопротивление.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Обзор литературы	5
1.1 Титан и его сплавы	5
1.2 Свариваемость титана	7
1.3 Сварка титановых сплавов.....	9
1.4 Медь и ее сплавы	14
1.5 Свариваемость меди	18
1.6 Сварка медных сплавов.....	20
1.7 Сварка титана с медью	26
1.8 Выбор способа сварки	33
2 Методики исследований и испытаний сварных соединений	34
2.1 Методы металлографического контроля.....	34
2.2 Методика измерения электрического сопротивления	37
2.3 Испытание на одноосное статическое растяжение	39
2.4 Измерение микротвердости	40
3 Исследовательская часть	42
3.1 Обзор конструкции.....	42
3.2 Выбор сварочных материалов	43
3.3 Выбор сварочного оборудования и режимов сварки	44
3.6 Сварка шины и патрубка.....	46
3.7 Сварка штанги и сегментов	48
3.8 Металлографические исследования	49
3.9 Механические испытания	57
3.10 Измерение электросопротивления	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	60

ВВЕДЕНИЕ

Сварка титана с медь имеет ряд технологических сложностей, вызванных различными теплофизическими характеристиками. Оптимизация технологии сварки и контроль качества сварных соединений является наиболее актуальными задачами в данной работе.

Данная работа посвящена разработке технологии и оборудования для изготовления анодов, выполненных из титана и меди, которые применяются для производства перхлората аммония. Назначением анода является подвод тока в электролит и его равномерное распределение по поверхности изделия.

Из-за своих особенностей при изготовлении изделия применялась аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом. Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом широко распространена по сравнению с другими способами сварки. Ее простота, маневренность, возможность наблюдения за дугой и ряд других преимуществ явились основанием для ее внедрения во всех отраслях промышленности.

1 Обзор литературы

1.1 Титан и его сплавы

Титан – металл серебристо-белого цвета. Титан очень распространен в природе. По содержанию в земной коре он уступает только трем конструкционным металлам: алюминию, магнию и железу. Содержание его в земной коре 0,6 %. Относится к легким металлам, его плотность $4,5 \text{ г/см}^3$, что почти в 2 раза меньше, чем у железа и сталей. При малой плотности титан обладает высокими механическими свойствами при нормальных и высоких температурах, и большой коррозионной стойкостью во многих средах. Титан в чистом виде пластичен и мягок как медь ($\sigma_b = 220 \text{ МПа}$, $\delta = 55 \%$, $\varphi = 80 \%$). Температура плавления $1800 \text{ }^\circ\text{C}$, кипения $3400 \text{ }^\circ\text{C}$. Титан, как и железо, является полиморфным металлом. Он имеет две полиморфные модификации: низкотемпературную $\alpha\text{-Ti}$ (до $882,5 \text{ }^\circ\text{C}$) с гексагональной плотноупакованной решеткой и высокотемпературную модификацию $\beta\text{-Ti}$ (выше $882,5 \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры плавления $1668 \text{ }^\circ\text{C}$) с кубической объемно-центрированной решеткой [1–5].

Марки технического титана классифицируют в зависимости от содержания примесей. В отечественной промышленности выпускают технически чистый титан двух марок (табл. 1.1) [5].

Таблица 1.1 – Химический состав технически чистого титана

Марка	C	Fe	Si	O	N	H	Другие элементы
BT1-00	0,05	0,20	0,08	0,10	0,04	0,008	0,10
BT1-0	0,07	0,30	0,10	0,20	0,04	0,010	0,30

Чистый титан имеет высокую химическую активность и низкую прочность, поэтому на практике наиболее часто применяют не чистый титан, а сплавы на его основе, обладающие высокими прочностными свойствами.

Механические свойства титана существенно зависят от содержания примесей в металле. Различают примеси внедрения – кислород, азот, углерод, водород и примеси замещения, к которым относятся железо и кремний. Примеси резко снижают пластичность, причем наиболее сильное отрицательное действие оказывают примеси внедрения, особенно газы [2, 5].

Кислород взаимодействует с титаном при температуре выше 600 °С с образованием TiO_2 . В процессе механической обработки, при недостаточной смазке, тонкая титановая стружка может загореться [6].

Азот, который находится в титане в виде нитридов и элементов внедрения, повышает твердость и снижает пластичность. Поверхностный слой титана насыщается повышенным количеством азота и кислорода, такой слой называют альфированным. Попадание частиц этого слоя в сварной шов приводит к хрупкости металла и образованию холодных трещин, в связи с чем перед сваркой его следует полностью удалять [7].

Повышенное содержание углерода в титане вызывает понижение пластичности. Так как, растворимость углерода в титане невелика и при температуре 900 °С составляет 0,28 %, а в α -титане растворимость углерода в 5 раз меньше. Из-за малой растворимости углерода содержание его в титане в количестве нескольких десятых процента приводит к выделению карбидов и заметному повышению прочности, и понижению пластичности [8].

Даже небольшое содержание водорода резко ухудшает свойства титана. Растворимость водорода в титане очень велика. Содержание водорода с увеличением температуры падает, водород находящийся в твердом пересыщенном растворе выделяется и образует отдельную фазу – гидриды титана (TiH_2), которая сильно охрупчивает титан и усиливает охрупчивающее действие кислорода и азота, и способствует образованию холодных трещин через длительное время после сварки (замедленное разрушение). Кроме того, водород способствует образованию пор [7].

Железо образует с α - и β -титаном твердые растворы замещения и стабилизирует β -фазу. Максимальная растворимость железа в α -титане составляет

менее 0,2 % и уменьшается с понижением температуры, так что при 500 °С она становится меньше 0,01 %. Железо значительно меньше влияет на механические свойства титана, чем примеси внедрения.

В системе Ti–Si образуется несколько силицидов, из которых самый близкий по составу к титану Ti_5Si_3 . На механические свойства титана кремний влияет примерно так же, как и железо. Кремний повышает сопротивление ползучести и увеличивает прочность при всех температурах. При малых концентрациях железо и кремний почти не влияют на пластичность титана.

В твердом состоянии и при умеренно высоких температурах (100 °С) благодаря прочной оксидной пленке титан коррозионно-устойчив в атмосферном воздухе, морской воде, во влажном хлоре, хлорной воде, горячих и холодных растворах хлоридов, азотной кислоте, в различных растворах и реагентах, применяемых в химической, нефтяной, бумажной промышленности, а также в гидрометаллургии [5, 9–11].

Технический титан хорошо обрабатывается давлением в горячем состоянии и удовлетворительно в холодном. Он легко прокатывается, куется, штампуется. Титан и его сплавы хорошо свариваются контактной и аргонодуговой сваркой, обеспечивая высокую прочность и пластичность сварного соединения. Недостатком титана является плохая обрабатываемость резанием из-за склонности к налипанию, также низкие жаростойкость и антифрикционные свойства [1, 5, 9].

1.2 Свариваемость титана

Важнейшим критерием выбора различных конструкционных сплавов титана является их свариваемость т. е. возможность получения сварного соединения, свойства которого не уступали бы свойствам основного металла. На свариваемость титана оказывает влияние высокая химическая активность металла в отношении газов, содержащихся в воздухе (кислорода, азота и водорода) и его повышенная склонность к росту зерна при температуре выше 800–850 °С.

При нагреве до температуры 350 °С и выше титан активно поглощает кислород, образуя различные окислы (альфированный слой) с высокими твердостью, прочностью и низкой пластичностью. Появление такого слоя может привести к тому, что на поверхности свариваемой детали появятся трещины. По мере окисления оксидная пленка меняет окраску от желто-золотистой до темно-фиолетовой, переходящей в белую. Эти цвета в околошовной зоне характеризуют качество защиты титана при сварке.

При температуре выше 500 °С титан активно взаимодействует с азотом с образованием нитридов, повышающих твердость и прочность металла, но снижающих его пластичность.

Водород образуется в результате разложения воды на водород и кислород под воздействием высокой температуры дуги. С титаном происходит очень вредное явление, его называют водородным охрупчиванием. Химическая природа этого процесса состоит в образовании в остывающем и холодном металле, содержащем растворенный водород, гидридов титана, повышающих хрупкость металла и вызывающих возникновение в нем трещин. На практике это приводит к тому, что спустя некоторое время после сварки (иногда довольно продолжительное) приваренная деталь, не имевшая, казалось бы, никаких дефектов, просто отваливается сама по себе или после легкого удара.

Рост зерна, имеющий место при высоких температурах 800–850 °С, также отрицательно сказывается на прочности титана. Ему способствует низкая теплопроводность титана, увеличивающая время пребывания шва и околошовного металла в зоне высоких температур. Чтобы снизить рост зерна, сварку необходимо выполнять при минимально возможной погонной энергии.

Титан имеет высокую температуру плавления (1668 °С), поэтому при сварке требуется мощный, концентрированный источник теплоты.

Основной проблемой сварки титановых сплавов является надежная защита металла, нагреваемого выше 300–400 °С, от водорода, кислорода и азота, содержащихся в воздухе [12, 13].

1.3 Сварка титановых сплавов

Для сварки титановых сплавов применяют следующие виды сварки: электронно-лучевая сварка, холодная сварка, прессованная сварка, плазменная сварка, дуговая сварка под флюсом, ручная аргоно-дуговая сварка плавящимся электродом, ручная аргоно-дуговая сварка неплавящимся электродом [14].

Электроннолучевая сварка титана обеспечивает наилучшие условия защиты металла от газов. Высокая концентрация тепловой энергии позволяет вести сварку на высоких скоростях при малой энергоёмкости процесса и получать сварные соединения титана с малой шириной шва и зоны термического влияния. Металл шва имеет мелкозернистую структуру. Необходимым условием Получения качественных сварных соединений является точная сборка под сварку. Режимы электронно-лучевой сварки титана зависят от типа используемой электронной пушки, технологической оснастки, толщины металла, конфигурации и размеров изделия.

Рекомендуемые режимы электронно-лучевой сварки стыковых соединений из сплавов ВТ20, ВТ22, ВТ23 толщиной 8–15 мм в нижнем положении на остающейся массивной технологической подкладке: $U = 30$ кВ; $I_{св} = 110–180$ мкА, $U_{св} = 25–35$ м/ч.

Основной дефект швов при ЭЛС титана и его сплавов – пористость. Поры имеют разные размеры и располагаются внутри металла шва или, чаще, вблизи зоны сплавления. Для предупреждения пор необходимо прежде всего обеспечить удаление с поверхности свариваемых кромок и присадочной проволоки (если она используется) адсорбированной влаги и жировой пленки, а также создать условия для максимальной дегазации сварочной ванны [15].

Холодная технология или холодная сварка подразумевает сваривание титана и его сплавов путем сдавливания. Данный метод отличается тем, что обработка производится под действием давления без внешнего нагрева. Сварка листов производится внахлест со специальными фиксирующими зажимами, кото-

рые позже снимаются, и листы соединяются. Метод позволяет получить надежное соединение без сложных технологий.

Прессовую сварку целесообразно осуществлять при нагреве до температуры 700–900 °С. Сварные соединения необходимо подвергать отжигу. В результате полной рекристаллизации через первоначальную границу раздела завершается прораствление общих зерен, исчезают дефекты в зоне контакта, повышается пластичность и улучшаются показатели ударной вязкости сварных соединений [15].

Плазменная сварка сравнению со сваркой неплавящимся электродом имеет следующие преимущества: при одинаковом сварочном токе скорость сварки выше в 2–3 раза, более глубокое проплавление и качественное формирование корня шва, малая чувствительность к изменению длины дуги, высокая стабильность дуги при малых токах. В качестве плазмообразующего газа используют аргон, защитного – гелий или смесь гелия с аргоном (50–75 % гелия). Плазменной сваркой можно сваривать металл толщиной до 15 мм без разделки кромок. Металл толщиной до 1,5 мм сваривают микроплазменной сваркой.

Для получения качественных швов при микроплазменной сварке к сборке предъявляются высокие требования. Оснастка должна обеспечивать плотный прижим свариваемых кромок как к подкладке, так и друг к другу. Сварка может выполняться как непрерывной, так и импульсной дугой. Сварка плазменной дугой характеризуется высокой температурой до 30000 °С и наличием плазмотрона – главной части технологии. В связи с высокими показателями плавления, по сравнению с аргонодуговой сваркой, сварка плазменной дугой обладает следующими достоинствами: высокая производительность, тепловое воздействие только на зону шва, небольшое количество защитного газа, стабильное горение малоамперной электродуги, низкое влияние длины электродуги на качество шва. Плазменная дуга возникает от плазмотрона.

Существует два типа плазмотрона: с дугой прямого и косвенного действия. Для первого плазмотрона характерно образование дуги между электродом из вольфрама, встроенным в газовую камеру и обрабатываемым титаном.

Для данного типа плазмотрона характерно совмещение струи с дугой, благодаря чему обеспечивается высокотемпературный режим и тепловая мощность. Данная технология довольно популярна. Создать электродугу между электродом и титаном непросто.

Поэтому при подведении к титану плазмотрона, в первую очередь, нужно создать дугу между электродом и соплом, так называемую, дежурную дугу. Затем соединяя дежурную дугу и факел титановой детали, автоматически образуется основная дуга между электродом и титаном. Для второго типа плазмотрона характерно создание электродуги между электродом и соплом.

В основном использование такого вида плазмотрона необходимо для нагрева, напыления и т. д.

Плазменная сварка с дугой применима для тонкого металла менее 1 мм, а также для сложных случаев, например, для сварки титана с легированной нержавеющейкой [15].

Перед сваркой флюс прокаливается при температуре 200–400 °С, чтобы содержание влаги в нем не превышало 0,05 % по массе. Сварка выполняется на стандартном оборудовании на постоянном токе обратной полярности. Получаемые сварные соединения не уступают по прочности и пластичности основному металлу и имеют более мелкозернистую структуру, чем при сварке в инертных газах. Данный способ экономически эффективен для металла толщиной более 6–8 мм [16].

Сварка плавящимся электродом (проволокой) выполняется при толщине титана и его сплавов свыше 3 мм в нижнем положении на постоянном токе обратной полярности на режимах, которые обеспечивают мелкокапельный перенос электродного металла. Режимы сварки плавящимся электродом указаны в таблице 1.2. Для уменьшения пористости и увеличения ширины сварного шва применяют смесь аргона с гелием (обычно 20 % аргона и 80 % гелия) или чистый гелий.

Таблица 1.2 – Режимы сварки титана и его сплавов плавящимся электродом (проволокой) в инертных газах

Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Толщина стыковых соединений, свариваемых без разделки кромок, мм	Скорость сварки, м/ч	Вылет электрода, мм	Расход газа, л/мин
в аргоне						
0,6–0,8	150–250	22–24	4–8	30–40	10–14	20–30
1,0–1,2	280–320	24–28	5–10	30–40	17–20	25–35
1,6–2,0	340–520	30–34	8–12	20–25	20–25	35–45
3,0	480–750	32–34	14–34	18–22	30–35	40–50
4,0	680–980	32–36	16–36	16–18	35–40	50–60
5,0	780–1200	34–38	16–36	14–16	40–45	50–60
в гелии						
0,6–0,8	150–250	28–32	4–6	30–40	10–14	30–40
1,0–1,2	280–320	32–36	4–8	30–40	17–20	35–45
1,6–2,0	340–520	38–40	5–10	20–25	20–25	70–90
3,0	480–750	42–48	10–28	18–22	30–35	80–100
4,0	680–980	46–50	12–32	16–18	40–50	100–120
5,0	780–1200	46–52	12–32	14–16	45–55	100–120

Для повышения производительности сварки титана и его сплавов плавящимся электродом в среде инертных газов используют предварительный подогрев проволоки проходящим током и импульсно-дуговую сварку (позволяю-

щую, например, в полуавтоматическом режиме при уменьшении погонной энергии сварки в 2–2,5 раза увеличить производительность в 2–3 раза), а также сварку в щелевую разделку (позволяющую сократить расход материалов) [16].

Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом признана более распространенным методом сварки по сравнению с другими способами. Это объясняется ее относительной простотой и большими возможностями. Чистота аргона при этом должна быть не менее 99,7 %.

Поверхности свариваемого и присадочного материала должны быть хорошо очищены от окислов и других загрязнений путем механической зачистки или травлением в течение 5 мин в растворе из соляной кислоты – 340 мл, азотной – 60 мл, фтористой кальция – 50 г, воды – 600 мл.

Используют присадочный металл, близкий по составу к основному металлу. Во многих случаях положительные результаты получаются при использовании проволоки ВТ1–00. Для удаления водорода проволоку обычно подвергают диффузионному (вакуумному) отжигу. Содержание водорода в такой проволоке не превышает 0,004–0,006 %. Сварку ведут без колебательных движений горелки, на короткой дуге углом вперед. Угол между электродом и присадочным материалом поддерживают в пределах 90 °, подачу присадочной проволоки осуществляют непрерывно. При обрыве дуги, а также после окончания сварки необходимо подавать аргон до тех пор, пока температура металла не станет ниже 400 °С [16, 17].

При аргонодуговой сварке титана толщиной свыше 4 мм обычно используется V–образная, X–образная или рюмкообразная разделка кромок. Для повышения производительности сварки вольфрамовым электродом применяются следующие способы: сварка с магнитным перемешиванием сварочной ванны, импульсно-дуговая сварка, сварка погруженной дугой, сварка по флюсу.

При сварке с магнитным перемешиванием металла сварочной ванны с помощью внешнего магнитного поля уменьшаются химическая неоднородность и пористость металла шва. При сварке в щелевую разделку (по узкому за-

зору) снижается расход дорогих и дефицитных материалов и увеличивается производительность.

С помощью импульсно-дуговой сварки (когда подача тока в зону дуги осуществляется кратковременными импульсами) можно в более широком диапазоне изменять размеры шва, уменьшать уровень остаточных напряжений, снижать деформации сварных конструкций, уменьшать зону термического влияния, а также уменьшать размеры кристаллитов и пористость в сварном шве.

Сварка погруженной дугой (когда конец электрода размещен ниже поверхности свариваемого металла) на больших токах позволяет сваривать за один проход без разделки кромок титан и его сплавы толщиной до 15 мм. При сварке сквозным проплавлением возможно сваривать за один проход титан и его сплавы толщиной 12 мм. При сварке по флюсу-пасте типа АН–ГА, наносимому тонким слоем на поверхность кромок свариваемых деталей, на меньших токах можно сваривать без разделки кромок металл толщиной до 12 мм. Данная технология позволяет увеличить глубину проплавления, снизить деформации сварных конструкций, изменить форму провара, уменьшить зону термического влияния, снизить вероятность образования пор и прожогов. Такими же преимуществами обладает и сварка порошковой проволокой с флюсом в качестве наполнителя [15].

1.4 Медь и ее сплавы

Медь – металл красновато-розового цвета, имеющий кристаллическую ГЦК решетку с периодом, $a = 0,3608$ нм, без полиморфных превращений. Медь мягкий металл (предел прочности 220 МПа, относительное удлинение 60 %) с температурой плавления 1083,4 °С, кипения 2360 °С и плотностью 8,92 г/см³. После обработки давлением за счет наклепа предел прочности меди возрастает до 400–450 МПа. Механические свойства меди хороши и сохраняются даже в условиях глубокого холода (-253 °С). Механические свойства ее

сильно изменяются и с повышением температуры. В интервале 250–550 °С существенно снижаются прочность и пластичность меди, в связи с чем при деформации ее могут появиться трещины [18, 19].

Медь обладает хорошей технологичностью. Она прокатывается в тонкие листы и ленту, из нее получают тонкую проволоку, медь легко полируется, хорошо паяется и сваривается.

Примеси кислорода, водорода, свинца и висмута ухудшают свариваемость меди. Применение специальных керамических флюсов улучшает качество сварного шва, приближая его физические и механические свойства к характеристикам основного металла. Медь характеризуется высокой теплопроводностью и электрической проводимостью, пластичностью и коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, пресной и морской воде, едких щелочах, органических кислотах и других агрессивных средах. Однако она взаимодействует с аммиаком, азотной, соляной, горячей концентрированной серной кислотами. Примеси влияют на все эти свойства.

По ГОСТ 859-78 в зависимости от содержания примесей различают следующие марки меди: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,97 % Cu), М1 (99,9 % Cu), М2 (99,7 % Cu), М3 (99,5 % Cu) (табл. 1.3) [18, 19].

Таблица 1.3 – Химический состав технически чистой меди марки М1, %

Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	O	Sb	Bi	Sn	Cu + ag min
0,005	0,002	0,004	0,002	0,005	0,004	0,05	0,002	0,001	0,002	99,9

Примеси оказывают существенное влияние на свойства меди:

Алюминий неограниченно растворим в расплавленной меди; в твёрдом состоянии растворимость его равна 9,8 %. Алюминий повышает коррозионную стойкость меди, уменьшает окисляемость и понижает электропроводность и теплопроводность меди.

Бериллий понижает электропроводность меди, повышает механические свойства и резко уменьшает окисляемость меди при повышенных температу-

рах. Висмут практически не растворим в меди. При повышенном содержании висмута медь делается хрупкой; на электропроводность меди висмут заметного влияния не оказывает.

Железо незначительно растворимо в меди в твёрдом состоянии. При температуре 1050 °С до 3,50 % железа входит в твёрдый раствор, а при 635 °С растворимость его падает до 0,15 %. Под влиянием железа повышаются механические свойства меди, резко снижаются её электропроводность, теплопроводность и коррозионная стойкость.

Кислород очень мало растворим в меди в твёрдом состоянии. Он является вредной примесью, так как при повышенном его содержании заметно понижаются механические, технологические и коррозионные свойства меди.

Водород оказывает значительное влияние на медь. Растворимость его в меди зависит от температуры: от 0,06 до 13,6 см³/100 г металла при температуре 500 и 1500 °С соответственно. Особенно разрушительное воздействие водород оказывает на медь, содержащую кислород. Такая медь после отжига в водородной или восстановительной атмосфере, содержащей водород, делается хрупкой и растрескивается, вследствие образования водяных паров реакции водорода с окисью меди. Образовавшиеся водяные пары не диффундируют и не диссоциируют и, имея высокое давление, разрушают медь.

Мышьяк растворим в меди в твёрдом состоянии до 7,5 %. Он значительно понижает электропроводность и теплопроводность, но значительно повышает жаростойкость меди.

Свинец практически не растворяется в меди в твёрдом состоянии. Заметного влияния на электропроводность и теплопроводность меди он не оказывает, но значительно улучшает её обрабатываемость резанием. Серебро не оказывает влияния на технические свойства меди, мало влияет на её электропроводность и теплопроводность.

Сурьма растворима в меди в твёрдом состоянии при температуре эвтектики 645 °С до 9,5 %. Растворимость её резко уменьшается при понижении

температуры. Сурьма значительно понижает электропроводность и теплопроводность меди.

Сера растворяется в расплавленной меди, а при затвердевании её растворимость снижается до нуля. Сера незначительно влияет на электропроводность и теплопроводность меди, заметно снижает пластичность. Под влиянием серы значительно улучшается обрабатываемость меди резанием.

Фосфор ограничено растворим в меди в твёрдом состоянии; предел насыщения твёрдого α -раствора при температуре 700 °С достигает 1,3 % фосфора, а при 200 °С он снижается до 0,4 %. Фосфор значительно понижает электропроводность и теплопроводность меди, но положительно влияет на механические свойства и свариваемость, повышает жидкотекучесть.

Теллур растворим в меди в твёрдом состоянии до 0,01 %. На электропроводность меди теллур значительного влияния не оказывает.

Селен мало растворим в меди в твёрдом состоянии – до 0,1 % и выделяется при затвердевании в виде соединения Se_2O . Незначительно влияет на теплопроводность и электропроводность меди, заметно снижает пластичность, а также улучшается обрабатываемость резанием [20].

Степень коррозии меди и ее сплавов в атмосфере, содержащей влагу и сернистый газ, зависит от концентрации газа, так как он является стимулятором, а влага – ускорителем коррозии. Коррозия медных сплавов начинается при содержании сернистого газа в атмосфере более 1 %. Диоксид меди, окисляясь до оксида $Cu(II)$ и адсорбируя влагу, образует серную кислоту, непосредственно воздействующую на медный сплав. Воздух вызывает равномерную коррозию меди около 1,3 мкм в год. С повышением содержания сернистого газа в воздухе коррозия возрастает. Латуни, бронзы, медно-никелевые сплавы (типа нейзильбера МНЦ15 – 20), широко применяемые для изготовления ювелирных и художественных изделий, обладают достаточно хорошими коррозионными свойствами. Необходимо учитывать, что многие медные сплавы более стойки к коррозии, чем сама медь. Это объясняется наличием в сплаве либо коррозионно-стойких металлов (никель и олово), либо таких металлов, как алюминий и

бериллий, присутствие которых способствует формированию защитных оксидных пленок на поверхности изделий, изготовленных из этих сплавов [20].

1.5 Свариваемость меди

Инертная при обычных температурах медь при нагреве реагирует с кислородом, серой, фосфором и галогенами. С водородом она образует неустойчивый гидрид CuH , с углеродом образует ацетиленистую медь Cu_2C_2 (взрывчатую); с азотом медь не реагирует, что позволяет азот использовать как защитный газ для сварки чистой меди. Образование химических соединений переменной валентности и растворимость этих соединений в жидкой меди приводит к довольно сложным диаграммам плавкости и к изменению химического сродства в зависимости от фазового состояния. Медь в условиях сварки может окисляться за счет газовой атмосферы или за счет обменных реакций с компонентами флюсов или электродных покрытий. Сродство меди к кислороду возрастает при растворении закиси меди в жидкой меди, особенно сильно при малых концентрациях Cu_2O , и резко снижается до нормального при распаде жидкого раствора в процессе образования эвтектики $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$. Cu_2O как отдельная фаза легко восстанавливается до меди. Газы, образующиеся в результате реакций, не растворяются в твердой меди и нарушают металлическую связь между зернами, приводя к образованию трещин – "водородная болезнь" меди.

Твердые растворы меди с кислородом имеют исчезающие малые концентрации при низких температурах. Поэтому медь в процессе сварки необходимо тщательно раскислять или вести сварку в среде инертных защитных газов или в вакууме.

Остаточные концентрации раскислителей влияют на свойства металла шва (электропроводность, теплопроводность, коррозионную стойкость), и поэтому при сварке изделий из чистой меди задача раскисления металла шва решается с трудом.

К сварным соединениям из чистой меди почти всегда предъявляют высокие требования по сохранению в металле сварных швов всего комплекса физических свойств: электропроводности, теплопроводности, плотности и коррозионной стойкости, так как эти изделия работают в тяжелых условиях эксплуатации. Поэтому в процессе сварки медь не должна загрязняться какими-либо примесями, влияющими на эти свойства.

Особенно высокие требования предъявляются к сварке вакуум-плотных швов в изделиях электронной техники, в энергетических установках, в узлах аппаратуры, работающей с внутренним охлаждением. Механические свойства сварных соединений определяются общими свойствами меди. Сварка чистой меди существенно отличается от сварки сталей.

Большая теплопроводность и температуропроводность создают высокие градиенты температуры и скорости охлаждения, а также малое время пребывания сварочной ванны в жидком состоянии. Это обуславливает необходимость применения повышенной погонной энергии при сварке меди по сравнению со сталями или применения предварительного подогрева изделия, но последнее является нежелательным осложнением технологии сварки.

Значительный коэффициент линейного расширения и его зависимость от температуры вызывают необходимость сварки при жестком закреплении изделия или по прихваткам. При большой толщине металла следует регулировать ширину зазора при сварке. Малое время существования сварочной ванны в жидком состоянии ограничивает возможности ее металлургической обработки. В частности, при раскислении меди требуются более активные раскислители, чем при сварке сталей, для снижения концентрации кислорода до допустимых пределов.

Высокие градиенты температуры способствуют развитию термической диффузии водорода в зоне термического влияния, что приводит к обогащению водородом металла вблизи зоны сплавления и увеличивает вероятность возникновения дефектов (пор, трещин). Высокая чувствительность меди к водороду должна учитываться при разработке технологии сварки.

Выбор технологического процесса сварки изделия в первую очередь определяется его назначением, сложностью (наличие коротких или криволинейных швов в различных пространственных положениях, труднодоступных мест), а также числом изготавливаемых изделий (серия) и требованиями, предъявляемыми к их качеству [6, 16].

1.6 Сварка медных сплавов

Для сварки медных сплавов применяются следующие виды сварки: газовая сварка, сварка угольным электродом, ручная дуговая сварка покрытыми электродами, дуговая сварка под флюсом, электрошлаковая сварка, дуговая сварка в защитных газах [15, 16]. Кроме соединений бора, флюсы могут содержать фосфаты, такие как в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Составы флюсов для сварки меди и ее сплавов, %

Компоненты	Флюсы					
	1	2	3	4	5	6
Борная кислота H_2BO_3	100	—	50	25	35	—
Бура безводная $Na_2B_2O_7$	—	100	50	75	50	56
Бифосфат натрия Na_2NPO_4	—	—	—	—	15	—
Поташ безводный K_2CO_3	—	—	—	—	—	22
Хлористый натрия $NaCl$	—	—	—	—	—	12

Сварочные флюсы для меди содержат соединения бора (борная кислота, борный ангидрид, бура), которые растворяют закись меди, образуя легкоплавкую эвтектику, и выводят ее в шлак Газовая сварка меди. Для меди используют ацетилено-кислородную сварку, обеспечивающую наибольшую температуру ядра пламени. Газовая горелка является тепловым источником малой сосредото-

точности, поэтому поддержание нормальных размеров сварочной ванны затрудняется. Для изделия толщиной более 10 мм рекомендуется применять две горелки, из которых одна осуществляет подогрев, а вторая служит для сварки. При двусторонней сварке двумя горелками необходимость подогрева отпадает. Для сварки меди и бронз используют нормальное пламя.

Раскисление металла сварочной ванны, несмотря на защиту от окружающей среды продуктами сгорания, производится извлечением закиси меди флюсами или введением раскислителей через присадочную проволоку.

Флюсы наносят на зачищенные и обезжиренные свариваемые кромки по 10–12 мм на сторону. Дополнительно их можно вносить с помощью присадочного металла на который наносят покрытие из компонентов флюса и жидкого стекла с добавками древесного угля (10–20 %) [20].

Сварку меди и ее сплавов осуществляют дугой, горящей между изделием и угольным электродом, или независимой дугой, горящей между двумя угольными электродами.

Раскислители при сварке меди вводят в электродную проволоку и в электродное покрытие. Составы металлических стержней и покрытий приведены в таблицах 1.5, 1.6. Химические составы медных сплавов используют для изготовления проволок, которые применяются в электродных стержнях.

Таблица 1.5 – Химический состав медных сплавов, %

Марка проволоки	Cu	Sn	Si	Mn	P	Zn	Примеси, не более
M1	99,9	–	–	–	–	–	0,10
БрКМц3-1	Остальное	–	2,75	1,0	–	–	0,10
БрОФ4-0,25	–	3,5	–	–	0,3	–	1,50
Л90	88–91	–	–	–	–	Остальное	0,2

Дуговой разряд является источником энергии при сварке. Все технологические приемы, составы флюсов, присадочного металла остаются такими же,

как и при газовой сварке. Используя проволоку БрКМцЗ–1, можно вести сварку меди на воздухе. Полученные соединения удовлетворяют требования к механическим свойствам, но электро- и теплофизические свойства будут резко снижены. Сварку меди и ее сплавов угольным электродом применяют редко, так как это малопроизводительный процесс.

Ручная электродуговая сварка электродами с покрытием позволяет получить удовлетворительные механические свойства сварных соединений, но состав металла шва будет существенно отличаться от состава основного металла из-за легирования раскислителями при сварке.

Таблица 1.6 – Состав электродных покрытий (сухая шихта), %

Покрытие ЗТ	Покрытие К–100
Марганцевая руда...17,0 Плавиновый шпат...32,0 Графит серебристый...16,0 Ферросилиций...32,0	Полевой шпат...12,5 Плавиновый шпат...15,0 Ферромарганец 47,5 Кремнистая медь...20,0

Сухую шихту замешивают на жидком стекле (класс А), которое составляет 20–25 % массы шихты. Технология соответствует технологии изготовления электродов основного типа. Тепло– и электропроводность сварных соединений значительно ниже, чем у чистой меди, особенно при сварке электродами из сплавов меди. При сварке покрытыми электродами наблюдается сильное разбрызгивание. Металл шва часто содержит поры. При сварке меди и ее сплавов толщиной более 4–5 мм рекомендуется, подогрев до 300–500 °С [20].

Дуговая сварка под флюсом. Дуговую сварку меди и ее сплавов под флюсом можно осуществлять под слоем плавящегося угольным или графитовым электродом, неплавящимся электродом и плавящимся электродом под слоем керамического флюса.

Режимы сварки меди указаны в таблице 1.7. При сварке под флюсом угольным (графитизированным) электродом, электрод затачивают в виде плоской лопатки.

Сборку под сварку производят с закладкой встык присадочного металла (латуни, томпака) для раскисления металла шва.

Таблица 1.7 – Режимы сварки меди под флюсом угольным электродом (напряжение 19–20 В; ток 100 А)

Толщина свариваемого металла, мм	Размеры присадочного металла, мм		Время подогрева, с	Скорость сварки, м/ч
	Ширина	Толщина		
5	12		3–5	20
10	14		10–15	6–8

Засыпают прокаленный флюс ОСЦ–45. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности; подогрев тока создается в результате замыкания электрода на изделие. Режимы сварки приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Режимы сварки меди под флюсом (проволока М1; скорость сварки 21 м/ч)

Толщина металла, мм	Диаметр проволоки, мм	Напряжение, В	Ток, А
1–2	1–2	26–27	160–180
5–6	2–3	28–30	400–500

Сварка под плавными флюсами плавящимся электродом является высокопроизводительным способом. Состав металла шва при сварке меди изменяется незначительно, и металл сохраняет свои физические свойства. Лучшие результаты получаются при сварке под флюсом АН–М1, имеющим состав: 55 % фтористого магния, 40 % фтористого натрия, 5 % фтористого бария. В качестве электродного металла используют проволоки из меди М1 или МО. Для повышения механических свойств сварного соединения применяют и легированные проволоки из медных сплавов БрКМцЗ–1; БрАЖМцЮ–3–1, но в этом случае снижаются тепло- и электропроводность металла шва. Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности; При сварке меди толщиной более 15 мм рекомендуется разделка под углом 90 ° с притуплением или сварка расщепленным электродом. Сварку осуществляют на графитовой подкладке или на флю-

совой подушке. Подготовка кромок и электродной проволоки должна быть тщательной – зачистка до металлического блеска и обезжиривание. Флюс должен быть прокален при 300–400 °С. Сварку ведут при жестком закреплении или по прихваткам.

Для сварки латуни марок Л63 и Л062–1 применяют медную проволоку с использованием плавного флюса МАТИ–5 или АНФ–5. Этот способ сварки допускает получение сварных соединений из меди со сталью. При сварке в этом случае электрод смещают на медь и подбирают такой режим, чтобы жидкая медь контактировала со сталью минимальное время во избежание хрупких прослоек (диффузия меди между зернами стали). Керамический флюс К–13 МВТУ применяют при сварке меди, меди со сталями и наплавке меди на сталь. В состав флюса входят компоненты, %: глинозем 20; плавиковый шпат 20; кварцевый песок 8–10; магнезит 15; мел 15; бура безводная 15–19; порошок алюминия 3–5. Шихту замешивают на жидком стекле, гранулируют и после сушки прокаливают в течение 1–2 ч при 450 °С. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности при жестком закреплении на подкладке из охлаждаемой меди (толщиной до 2,5 мм) или на графите (толщиной 5–6 мм).

Применение керамического флюса, кроме хорошего раскисления металла шва, позволяет легировать металл шва нужными компонентами (хромом, никелем и др.) через флюс. Электропроводность и теплопроводность металла шва получается на уровне электропроводности и теплопроводности основного металла. Механические свойства сварного соединения также приближаются к свойствам основного металла. Для сварки меди можно применять также флюс ЖМ–1, хорошо стабилизирующий дуговой разряд и позволяющий вести сварку на переменном токе. Состав флюса ЖМ–1, %: мрамор 28; полевой шпат 57,6; плавиковый шпат 8, древесный уголь 2,2; борный шлак 3,5; алюминий 0,7. Электрошлаковая сварка меди и ее сплавов. Сварку меди большой толщины (30–55 мм) можно осуществлять электрошлаковым процессом с пластинчатым электродом. Температура плавления флюсов должна быть ниже температуры плавления меди [20].

Дуговая сварка в защитных газах. Автоматическую, полуавтоматическую и ручную сварку меди в среде защитных газов можно производить плавящимся и неплавящимся (вольфрамовым) электродом. Наиболее часто для чистой меди применяют сварку вольфрамовым электродом (для толщин до 10 мм) с подачей присадочной проволоки, реже – сварку плавящимся электродом. Применяют защитные газы: аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-73, гелий особой чистоты по МРТУ 6-02-274-66, азот особой чистоты по МРТУ 6-02-375-66. Наиболее целесообразно применять азот высокой чистоты, в котором эффективный и термический КПД дугового разряда выше, чем для аргона и гелия. При сварке в азоте глубина проплавления получается выше, чем при сварке в аргоне и гелии, но устойчивость дугового разряда в азоте ниже, чем в аргоне и гелии. Эти результаты объясняются наличием мощных плазменных потоков в дуге, горячей в азоте, и более высоким запасом энтальпии азотной плазмы (диссоциация 1М2). Однако при сварке в труднодоступных местах или при сварке меди малой толщины, меньше 1 мм, предпочтение следует отдать аргону, как защитному газу, в котором наблюдается наибольшая устойчивость дугового разряда. Несмотря на высокую чистоту защитных газов, медь при сварке подвергается окислению, и может возникать пористость, что определяет необходимость применения легированных присадочных и электродных проволок.

Сварку меди неплавящимся вольфрамовым электродом осуществляют на постоянном токе прямой полярности; используют электрод из лантанированного вольфрама, который обладает удовлетворительной устойчивостью в защитных газах, в том числе, и в азоте особой чистоты. При сварке электрод располагают строго в плоскости стыка, наклон электрода 60–80 ° «углом назад». При сварке меди толщиной более 4–5 мм рекомендуется, подогрев до 300–400 °С.

Присадочные проволоки из чистой меди М1 и М0 при сварке обеспечивают получение металла шва, по составу и физическим свойствам близкого к основному металлу, однако механические свойства сварного соединения понижены, а пористость уменьшает плотность металла шва. При введении в состав присадочных проволок раскислителей и легирующих компонентов механиче-

ские свойства сварного соединения возрастают, но, как правило, снижаются тепло- и электропроводность металла шва, что недопустимо при сварке ответственных изделий из чистой меди. В таких случаях рекомендуются присадочные проволоки, легированные сильными раскислителями (в микроколичествах), которые после сварки не остаются в составе твердых растворов, а переходят в свои соединения (высокодисперсные, шлаковые включения), и поэтому не влияют на физические свойства металлов. Аргонодуговая и азотио-дуговая сварки будут различаться по составу присадочных проволок, так как в азоте возможно образование нитридов некоторыми легирующими компонентами.

Электродную проволоку и кромки основного металла зачищают до блеска и обезжиривают. Медь толщиной до 5–6 мм можно сваривать без разделки кромок. Для сварки вакуумно-плотных швов выполняют разделку «вакуумный замок» с обязательной проваркой корневого шва. Сварку осуществляют на подкладках из прокаленного графита или медных пластин, охлаждаемых водой. Чрезмерное охлаждение медной подкладки и появление точки росы может вызвать пористость в нижней части шва. Медь толщиной более 5 мм сваривают на флюсовой подушке. Швы большой протяженности сваривают по прихваткам, проставленным с шагом 300–400 мм.

Дуговую сварку латуней и других сплавов меди, содержащих цинк, рекомендуется вести с низкоопущенным соплом. Расход защитного газа зависит от его плотности и теплофизических свойств (л/мин): аргона 8–10, гелия 10–12, азота [20].

1.7 Сварка титана с медью

Титан и медь обладают разными физическими свойствами, резко отличаются типами кристаллических решеток и размерами атомных радиусов.

Малая взаимная растворимость, образование хрупких интерметаллидных соединений (Ti_2Cu , $TiCu$, Ti_2Cu_3 , $TiCu_2$, $TiCu_3$) и легкоплавкой эвтектики затрудняют сварку меди с титаном. Взаимная растворимость указана в таблице

1.9. Соединение $TiCu_2$ при температуре меньше $850\text{ }^{\circ}C$ распадается на две фазы: Ti , Cu , $TiCu_4$.

Характерная особенность взаимодействия титана с медью при высоких температурах – очень быстрый эвтектоидный распад.

Таблица 1.9 – Взаимная растворимость меди и титана, %

$T_{св},\text{ }^{\circ}C$	Медь в α -титане	Титан в меди
300	–	0,2
500	0,5	0,5
600	0,6	1,6
700	–	2,0
798	1,6	–
800	–	3,9
850	–	5,2
870	–	6,5

Поэтому растворы одного элемента в другом не удастся зафиксировать в сплавах ни при каких скоростях охлаждения. Характеристики и свойства интерметаллидных соединений представлены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Интерметаллидные соединения в системе титан-медь

Соединение	Атомная доля меди, %	Температурная область существования $^{\circ}C$, не более	Микротвердость, МПа
Ti_2Cu	30...33	1015	4420
$TiCu$	48...52	984	5530
Ti_2Cu_4	57	918	5000
Ti_2Cu_3	60	865	5970
$TiCu_2$	–	878...850	2530
$TiCu_4$	78...80	870	5040

Кроме того, наличие в системе легкоплавкой эвтектики, имеющей открытый максимум плавления, способствует образованию жидкой прослойки по линии контакта двух металлов уже при температуре 860 °С. Поэтому основная задача при сварке титана с медью состоит в том, чтобы избежать появления интерметаллидов. Для этого необходимо: либо устранить перемешивание металлов при сварке плавлением, либо вести процесс в твердом состоянии при температурах, ограничивающих диффузию одного металла в другой. В условиях сварки плавлением, когда материал обеих заготовок находится в жидком состоянии, в металле шва при кристаллизации будут неизбежно появляться интерметаллиды и легкоплавкие эвтектики. Последнее обстоятельство сопряжено с опасностью возникновения трещин. Рассматриваемые материалы сильно отличаются по температурам плавления и другим теплофизическим характеристикам. В связи с указанными металлургическими и физическими особенностями для этой пары материалов наиболее перспективна сварка давлением. Применение методов сварки в жидкой фазе возможно при условии плавления только медной заготовки (режим сварко-пайки) с ограничением продолжительности контакта расплава с твердым металлом или с использованием промежуточных вставок, играющих роль барьера [21].

Сварка плавлением ведется с расплавлением лишь меди. Использование жестких режимов способствует сокращению времени контакта расплава с твердым титаном [22].

Электронно-лучевая сварка на жестких режимах дает соединения с удовлетворительными механическими свойствами только на тонких листовых заготовках. При аргонодуговой сварке предварительное напыление плазменным методом медного покрытия толщиной 0,15...0,25 мм на титановую кромку, смещение электрода от оси стыка в сторону меди на 2,5...4,5 мм и разделка титановой заготовки под углом 45 °С несколько улучшают условия формирования шва, но не предотвращают полностью появления интерметаллидов. При последующем нагреве такого соединения до 400...500 °С резко снижаются прочность и пластичность.

Предложен способ сварки меди с титановыми (β -сплавами, обладающими объемноцентрированной кристаллической решеткой и более высокой растворимостью меди. К числу (β -стабилизирующих элементов, которые не образуют с медью интерметаллидных фаз, относятся молибден, ниобий, ванадий, тантал).

Опробованы β -сплавы двойных систем: титан – молибден, титан – ниобий, титан – тантал и сплав ВТ15 толщиной 1,5...2 мм. Выполняли АДС неплавящимся электродом. Дугу смещали от оси шва на медную кромку. Наиболее высоких механических свойств сварных соединений достигали в тех случаях, когда обеспечивалось минимальное расплавление титана. Более прочные соединения получены при сварке сплавов Ti – 30 % Nb и ВТ15 с бронзой БрХ0,8 ($\sigma_B = 286$ МПа; $\alpha = 162$ °С) [21].

Подтверждена возможность получения хорошо сформированных швов при сварке титановых сплавов ВТ15 и Ti – 3 %, Al – 37 %, Nb с медью М1 толщиной 2; 3 и 5 мм, обладающих удовлетворительными механическими свойствами. Для защиты от теплового воздействия сварочной дуги и предотвращения контакта с жидкой медью на титановую кромку методом плазменной металлизации наносили медное покрытие толщиной 0,15...0,25 мм. При сварке пластин толщиной 3 и 5 мм на титановой кромке выполняли одностороннюю разделку под углом 45 °.

Радикальным решением при сварке плавлением является применение вставок из ниобия или тантала.

В настоящее время разработано несколько способов сварки плавлением титана с медью, предусматривающих применение промежуточных металлов - вставок из тантала или ниобия и ванадия, а также сплавов титана со стабильной тройной структурой.

При электронно-лучевой сварке получают соединения с высокой пластичностью (угол загиба 180 °). При АДС этот показатель составляет 160 °. Ударная вязкость на уровне 800 кДж/мм. Разрушение при испытании сварных соединений происходит по границе с медным сплавом.

Применяя промежуточное кольцо из ниобия, АДС соединяли обечайки из титана и хромистой бронзы. Прочность таких соединений ограничивается прочностью медного сплава и составляет 325 МПа. Отмечается, что при использовании ниобия в качестве промежуточного металла при сварке титана с медными сплавами необходима тщательная защита зоны сварки от взаимодействия с газами. Сварные соединения ниобия с медным сплавом характеризуются высокой химической неоднородностью металла шва.

Одним из перспективных методов соединения титана с медью является использование переходных биметаллических элементов, полученных совместной прокаткой или сваркой взрывом. Способ сварки с применением промежуточного тугоплавкого металла имеет существенные недостатки: вставки усложняют конструкцию соединения, затрудняют процесс сборки и сварки и значительно удорожают изделия. Кроме того, следует учитывать коррозионную стойкость соединений из разнородных металлов, если сварная конструкция предназначена для работы в агрессивных средах.

Для получения высококачественного соединения разнородных металлов, склонных к образованию интерметаллидных фаз, необходимо: создать условия для физического контакта по всей площади соединяемых поверхностей в начальный период сварки, когда диффузионные процессы не успели развиваться; замедлить взаимную диффузию металлов, ограничив максимальную температуру нагрева заготовок, и, тем самым, исключить появление интерметаллидов в зоне контакта; активизировать соединяемые поверхности в основном за счет пластической деформации металлов. Изменяя в широких пределах параметры режима диффузионной сварки и обеспечивая оптимальные условия формирования соединения, можно получить хорошее непосредственное соединение не только титана с медью, но и других металлов, обладающих ограниченной взаимной растворимостью и резко отличающихся своими физико-химическими свойствами [21].

Диффузионная сварка без применения барьерных слоев возможна в узком диапазоне соединения с низкой прочностью.

Более высокие и стабильные прочностные показатели при соединении титана с медью достигаются при использовании барьерных слоев, препятствующих взаимодействию соединяемых металлов.

Для получения равнопрочного соединения используют прослойки из ванадия, молибдена, ниобия.

Оптимальный режим диффузионной сварки меди М06 с титаном ВТ1 без применения промежуточной прослойки: $T_{св} = 973 \text{ К}$, $P = 6 \text{ МПа}$, $t = 20 \text{ мин}$. Прочность полученного соединения ниже прочности исходных материалов. Для получения равнопрочного соединения целесообразно использовать прослойку ванадия. Температура сварки в этом случае 993 К .

Диффузионную сварку титановых сплавов ОТ4 и ВТ14 с медью М1 и бронзой БрХ0,8 проводят с применением прослоек из молибдена или ниобия толщиной $0,1 \dots 0,2 \text{ мм}$.

Прослойку напыляют на титан, и образец перед сваркой отжигают в вакууме при 1673 К в течение 3 ч. Более высокие прочностные показатели связаны с тем, что молибден и ниобий образуют с титаном твердые растворы, а в контакте их с медью не возникает хрупких фаз. Ниобий с медью образует ограниченные растворы. В молибдене при 1223 К растворяется $2,2 \%$ Cu .

Наименьшая прочность наблюдается при непосредственном соединении титана с медью. В числителе приведены режимы сварки и значения прочности соединений, полученных при использовании индукционного, а в знаменателе - печного нагрева.

Высокие прочностные показатели при ограниченной макропластической деформации меди достигаются при $T_{св} = 1223 \text{ К}$, $P = 15 \text{ МПа}$, $t = 20 \text{ мин}$.

Непосредственное соединение титана с медью осуществлено холодной сваркой сдвигом. Сущность этого способа заключается в том, что на свариваемых поверхностях предусматриваются выступы и соответствующие им впадины, а при соприкосновении свариваемые поверхности деталей должны находиться под углом к направлению сжимающего усилия. Таким способом были сварены пластины титана с медью размером $65 \times 100 \text{ мм}$ и цилиндрические де-

тали диаметром 16 мм. Установлено, что оптимальная величина угла заточки выступов и впадин 7° . Прочность соединений получается почти в 2 раза больше, если выступы расположить на более мягком металле и вдавливать их во впадины на твердом. Необходимость применения в конструкции медных деталей, плакированных титаном, способствовала разработке технологии получения титаномедных полос и листов методом совместной прокатки. Такие медные листы, плакированные титаном, используются для изготовления токопроводов, работающих в агрессивных средах, а также для производства теплонапряженных частей химических аппаратов. При изготовлении биметалла титан – медь совместной прокаткой рекомендуется применение ниобиевых прокладок толщиной 0,1 ...1,5 мм. Отмечается необходимость тщательной защиты соединяемых поверхностей от окисления при нагреве и прокате, для чего процесс должен осуществляться в вакууме или герметизированной оболочке. Прочное сцепление листов происходит при относительной деформации 20...75 %. В случае непосредственной прокатки титана с медью рентгеноструктурным анализом в приграничной зоне обнаружены интерметаллиды типа $TiCu_3$, $TiCu$, Ti_3Cu .

Для получения соединений α -сплавов титана с медью М1 стабильного качества целесообразна сварка взрывом с применением промежуточного слоя - ниобия. Толщина ниобиевой прослойки изменялась в пределах 0,3... 1 мм в зависимости от толщины свариваемых титановых (5...15 мм) и медных (3...8 мм) листов. Предел прочности соединения в состоянии после сварки составлял 271...301 МПа, а после высокотемпературного нагрева (до 850...900 °С с выдержкой в течение 1 ч) – 204 МПа. При этом появления охрупчивающих прослоек не наблюдалось. Сваркой взрывом получены высококачественные непосредственные соединения β -сплава Ti – 3 %, Al – 37 %, Nb с медью М1, работоспособные при нормальной температуре [21].

1.8 Выбор способа сварки

Для сваривания титана и его сплавов могут применяться различные способы сварки. В основном все способы предполагают защиту зоны сварки от воздуха. Специальные виды сварки (электронно-лучевая сварка, диффузионная сварка, сварка взрывом и др.), применяемые в промышленности для соединения титановых сплавов в нашем случае из-за конструктивных особенностей изделия и технологических возможностей предприятия ООО «Красноярские машиностроительные компоненты» неприменимы. Поэтому наиболее подходящим видом сварки анодов была признана ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. Дуговая сварка в среде инертных газов является самой широко применяемой. Это объясняется ее относительной простотой и большими возможностями. Также к достоинствам относят: возможность выполнять сварку в различных пространственных положениях; возможность визуального наблюдения за сварочной ванной; надежную защиту сварочной ванны; обеспечение высоких механических свойств металлу сварного соединения и хороший внешний вид шва.

2 Методики исследований и испытаний сварных соединений

2.1 Методы металлографического контроля

Абразивная подготовка шлифов заключается в срезании неровностей поверхности абразивными частицами. Обработку производят в несколько стадий, постепенно уменьшая крупность этих частиц. При подготовке шлифа абразивным методом шлифовать следует как минимум на 4 шлифовальных бумагах, начиная с более крупной и заканчивая мелкой, а также при переходе на новую шлифовальную бумагу, смывать остатки абразива спиртом и поворачивать образец на 90 °. Заканчивается абразивная подготовка шлифа обычно полировкой с помощью водной суспензии окислов металлов [23].

Травление титана и меди.

Наиболее универсальными для выявления микроструктуры титана и меди являются реактивы, в состав которых входит плавиковая кислота. Одним из рекомендуемых является реактив следующего состава:

- HCl – 16,6 %;
- HNO₃ – 16,6 %;
- HF – 16,6 %;
- H₂O – 50 %;

Изучение структуры и свойств методами оптической и электронной микроскопии.

Задачей металлографических исследований является установление взаимосвязи между качественными и количественными характеристиками структуры, с одной стороны, и механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами материалов с другой. Исследования микроструктуры проводили путем визуального наблюдения и фотографирования микроструктуры непрозрачных объектов в отраженном свете на металлографическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m и при увеличениях от 50 до 1000 крат. Фотосъемку проводили при помощи специального устройства цифровой визуализации изображений AxioCam MRc5. На рисунке 2.1 представлен люминесцентный инвер-

тированный микроскоп проводящего света Carl Zeiss Axio Observer Z1m. Он служит для исследования в проводящем и отраженном свете. Позволяет проводить исследования методами светового поля, фазового контраста, дифференциального контраста (DIC), контраста VAREL, контраста PlasDic в проходящем свете и флуоресценции [24].

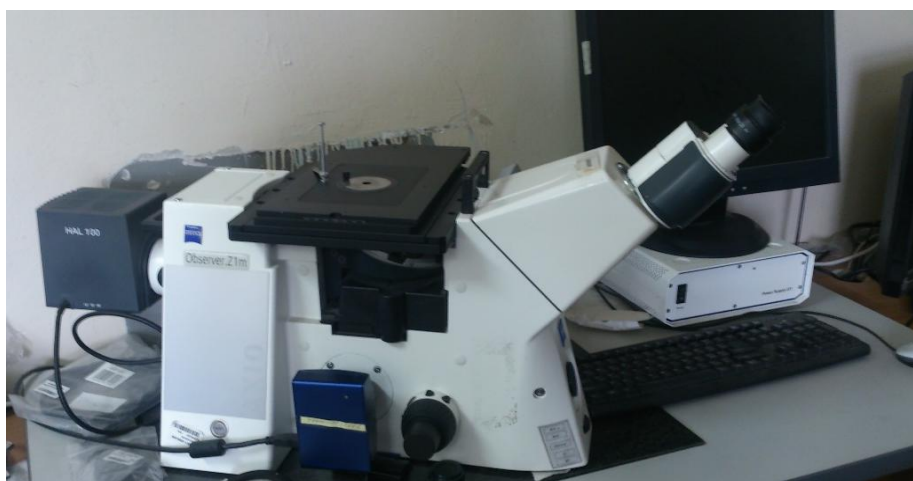


Рисунок 2.1 – Люминесцентный инвертированный микроскоп проводящего света Carl Zeiss Axio Observer Z1m

Общий вид, устройство, принцип работы РЭМ НИТАСНІ ТМ1000. РЭМ НИТАСНІ ТМ1000 изображен на рисунке 2.2, предназначен для исследования изломов и микроструктуры материалов различного назначения. Режим низкого вакуума позволяет исследовать не только проводящие образцы, полупроводники, но и диэлектрики [25].

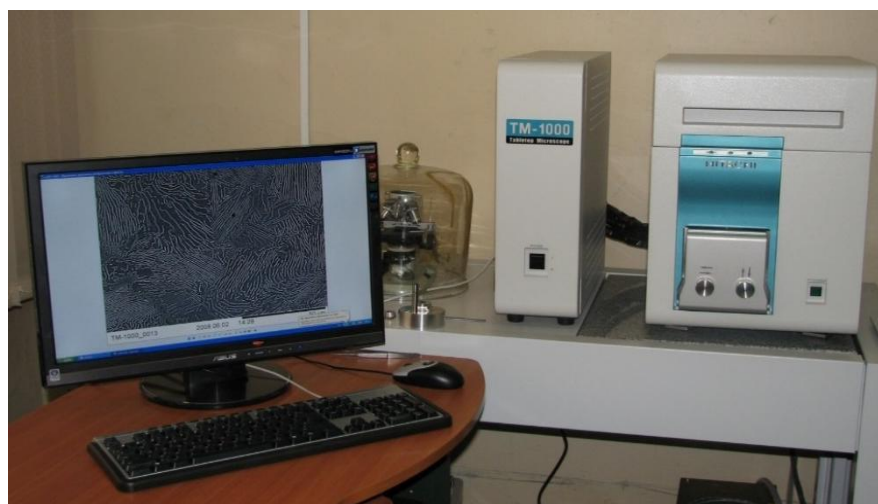


Рисунок 2.2 – Общий вид РЭМ НИТАСНІ ТМ1000

НІТАСНІ ТМ 1000 состоит из 3-х блоков – собственно микроскопа с вакуумной системой, состоящей из насоса с диафрагмой, обеспечивающего низкий вакуум, и турбомолекулярного насоса – для получения высокого вакуума, блока питания, и управляющего компьютера. Высоковакуумный турбомолекулярный насос поддерживает высокий вакуум 10^{-5} Па в верхней части колонны микроскопа – пушке, в которой расположен вольфрамовый катод.

Технические характеристики: увеличение $\times 20$ –10000, разрешение – 30 нм, глубина резкости 0,5 мм, ускоряющее напряжение – 15 кВ. Камера объектов позволяет размещать образцы довольно больших размеров: диаметром до 70 и высотой до 20 мм. В этом РЭМ нет регулировки ускоряющего, перемещения образца по высоте, наклона и вращения. Образец перемещается только по осям x , y .

Формирование изображения происходит следующим образом. На пушку подается ускоряющее напряжение, под действием которого катод начинает эмитировать электроны. Управление микроскопом, получение изображения, визуализация производятся персональным компьютером со специальным программным обеспечением рисунок 2.3.

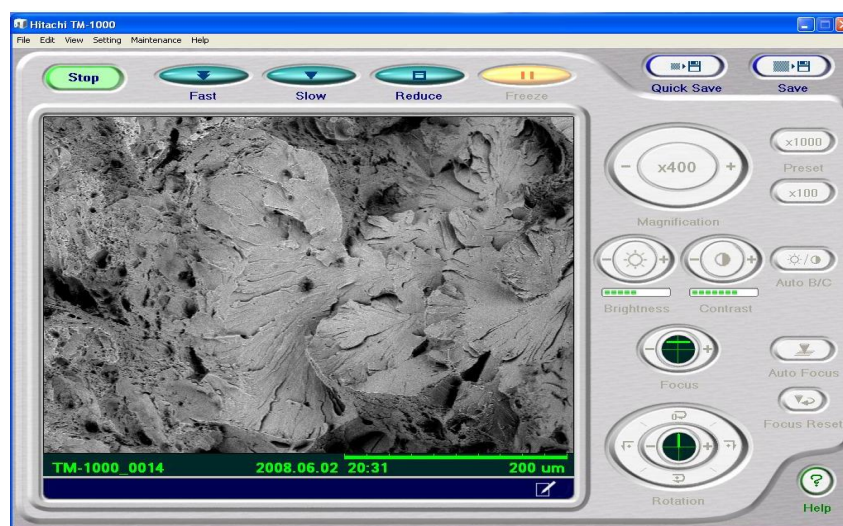


Рисунок 2.3 – Окно управляющей программы

Электронный пучок, формируемый электромагнитными линзами в тонкий зонд, взаимодействует с поверхностью образца. Вторичные и отраженные

электроны фиксируются твердотельным детектором, на экране монитора за счет фазового и топографического контраста формируется изображение. Изображение сохраняется в файл с расширением *.bmp*, *.jpg*, *.gif*.

2.2 Методика измерения электрического сопротивления

Для измерения электросопротивления применяли микроомметр Ф4104–М1 – прибор с высокой степенью точности рисунок 2.4.

Принцип действия микроомметра основан на измерении величины падения напряжения на измеряемом сопротивлении при прохождении через него тока заданной величины. Для измерения производится настройка прибора: установка 0, калибровка и предел измерения: 10^{-2} мОм. Далее узлы устанавливаются на исследуемые детали, так чтобы они располагались максимально близко друг к другу и параллельны оси измерения, так чтобы через все четыре контакта можно было провести прямую линию. После измерения результаты сравнили с результатами, полученными на образцах основного металла.

Принцип действия микроомметра Ф4104–М1 основан на измерении величины падения напряжения на измеряемом сопротивлении при прохождении через него оперативного тока заданной величины. При измерении на диапазонах 0–100 мкОм, 0–1 мОм, 0–10 мОм, 0–100 мОм, 0–1 Ом, 0–10 Ом в качестве оперативного тока используется стабилизированный по амплитуде одиночный импульс, на остальных диапазонах стабилизированный постоянный ток. Микроомметр Ф4104–М1 состоит из блока питания, стабилизатора тока, измерительного усилителя с фильтром и генератора синхронизирующих импульсов. При питании прибора от сети входное напряжение понижается до 12–16 В и выпрямляется. Преобразователь напряжения выполнен на транзисторах по схеме с самовозбуждением и стабилизацией выходного напряжения. К выходным клеммам подключается измеряемое сопротивление.



Рисунок 2.4 – Микроомметр Ф4104–М1

Падение напряжения с измеряемого сопротивления поступает на вход измерительного усилителя, выполненного на операционных усилителях. Ток, протекающий через измеряемое сопротивление постоянный, поэтому падение напряжения на измеряемом сопротивлении прямо пропорционально величине измеряемого сопротивления. Для запоминания амплитуды одиночного импульса, когда в качестве оперативного тока используется одиночный импульс, служит запоминающая емкость, которая коммутируется электронным ключом.

Калибровка измерительного усилителя микроомметра Ф4104–М1 осуществляется при помощи переменного резистора КЛБ, при этом на измерительный усилитель поступает сигнал с образцовых резисторов. Технические характеристики микроомметра Ф4104–М1:

Пределы допускаемых значений основной погрешности от конечного значения диапазона измерений:

- 4 % на диапазоне 1–100 мкОм;
- 2,5 % на диапазоне 0–1 мОм, 0–10 мОм, 0–100 мОм, 0–1 Ом;
- 1,5 % на остальных диапазонах;

Диапазон измерений микроомметра Ф4104 – от 0–100 мкОм до 0–10МОм (12 диапазонов).

Класс точности 1,5; 2,5 и 4 (в зависимости от диапазона измерения).

2.3 Испытание на одноосное статическое растяжение

Испытания на растяжение – один из самых распространенных видов механических испытаний. Тщательно подготовленный образец помещают в захваты мощной машины, которая прикладывает к нему растягивающие усилия. На рисунке 2.5) представлен испытательный комплекс LFM 20.



Рисунок 2.5 – Испытательный комплекс LFM 20

При испытании определяют прочность наиболее слабого участка стыкового или нахлесточного соединения или прочность металла шва в стыковом соединении. Чертеж образца представлен на рисунке 2.6

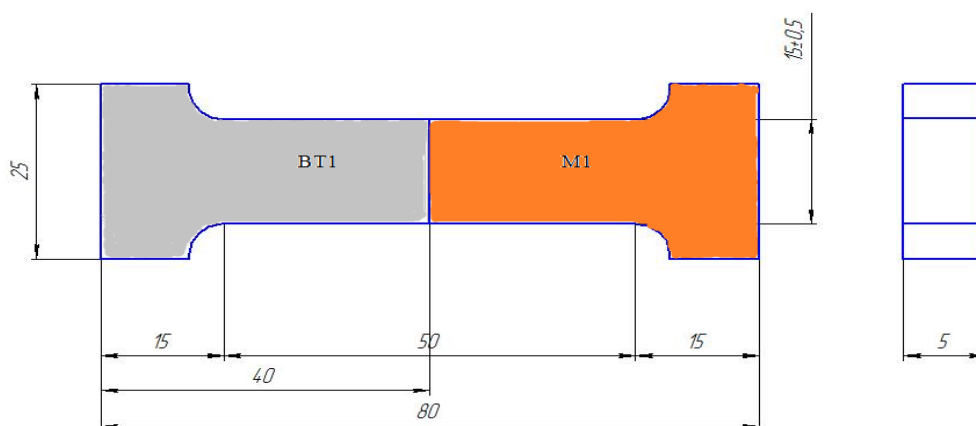


Рисунок 2.6 – Образец для испытания на статическое растяжение

Испытание на статическое одноосное растяжение проводится в соответствии с ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств» [25].

2.4 Измерение микротвердости

Испытание на микротвердость применяется при определении твердости таких объектов, которые не могут быть испытаны обычно применяемыми методами (по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу), а именно мелких деталей приборов, тонких полуфабрикатов (лент, фольги, проволоки), тонких слоев, получающихся в результате химико-термической обработки (азотирования, цианирования и др.) и гальванических покрытий, поверхностных слоев металла, изменивших свои свойства в результате снятия стружки, давления, трения.

Микротвердость определяют вдавливанием алмазной пирамиды. Для испытания на микротвердость применяют прибор ПМТ–3 рисунок 2.7.



Рисунок 2.7 – Микротвердомер ПМТ–3

Для изучения свойств и превращений в сплавах необходимо не только знать «усредненную» твердость, представляющую твердость в результате сум-

марного влияния присутствующих в сплаве фаз и структурных составляющих, но и определять твердость отдельных фаз и структур сплава.

Измерение микротвердости проводится согласно ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» [27, 28].

3 Исследовательская часть

3.1 Обзор конструкции

Анод используется для получения перхлората аммония электролитическим методом. Эскиз анода изображен на рисунке 3.1. Фотография анода представлена на рисунке 3.2

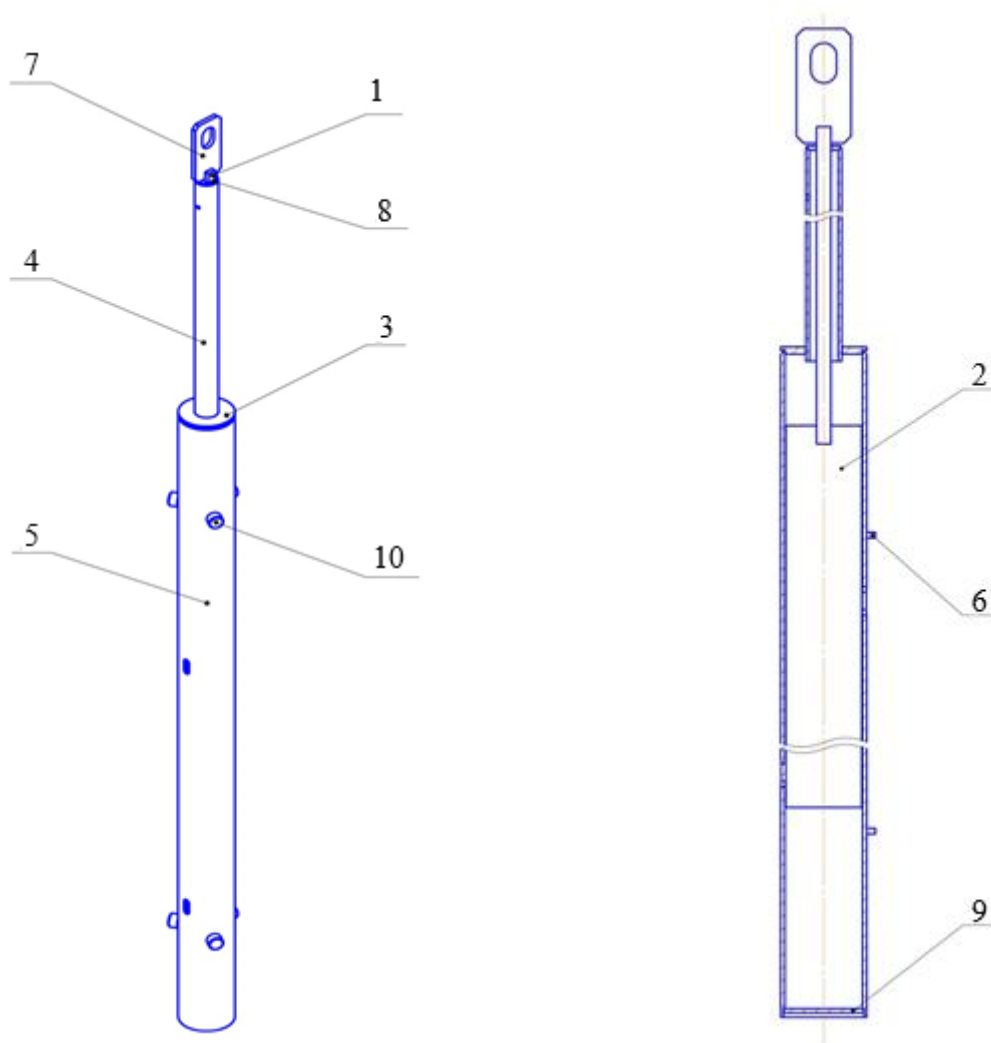


Рисунок 3.1 – Эскиз анода :1 – штанга; 2 – шина; 3 – крышка; 4 – патрубок; 5 – патрубок;
6 – штифт; 7 – ушко; 8 – сегмент; 9 – заглушка; 10 – фиксатор.



Рисунок 3.2 – Внешний вид анода

3.2 Выбор сварочных материалов

Для сварки швов очистного анода выбираем сварочную проволоку ВТ1-00 ОСТ 1 90015-71 диаметром 3 мм. Химический состав проволоки представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1- Химический состав сварочной проволоки ВТ1-00

Марка титана	Fe	C	Si	N	Ti	O	H	Примеси
ВТ1-00	До 0,12	До 0,05	До 0,08	До 0,04	99,5– 99,99	До 0,1	До 0,008	Прочих 0,1

При использовании этой проволоки нет необходимости в применении специализированного оборудования [29].

Так же для аргонодуговой сварки выбираем торированные вольфрамовые электроды для сварки на постоянном токе 4 ВЛ ТУ 38-19-27-88. Соответствует стандарту ISO 6848-2004 [30].

Это наиболее распространенные электроды, поскольку они первые показали существенные преимущества композиционных электродов над чисто вольфрамовыми при сварке на постоянном токе.

Для защиты сварочной ванны от кислорода воздуха применяем аргон первого сорта по ГОСТ 10157-79 [31].

3.3 Выбор сварочного оборудования и режимов сварки

Для выполнения сварочных работ выбираем сварочный аппарат TIG 250P AC/AD (R62) рисунок 3.3 Сварочный инвертор Сварог TIG 250P AC/DC (R62) – инверторный сварочный аппарат профессионального уровня для аргонодуговой сварки (TIG DC), (TIG AC), (TIG AC/DC PULSE) и ручной дуговой сварки покрытым электродом (MMA), оборудованный цифровым индикатором параметров сварки и большим набором ручных регулировок. Возможность использования аппарата для двух видов работ весьма расширяет область применения аппарата. Наличие высокочастотного поджига дуги на TIG сварке позволяет аккуратно и профессионально сваривать как титан и нержавеющей сталь, так и алюминиевые сплавы, а функция импульсной сварки позволяет сваривать тонкие материалы. Наличие расширенных возможностей по регулировке сварочного цикла обеспечивает высокое качество соединений и возможность работы с материалами с особыми свойствами. Аппарат построен на базе MOSFET транзисторов нового поколения по современной инверторной схеме. Данная технология позволяет получать максимальную мощность и длительное включение аппарата при его минимальных размерах и массе [32].



Рисунок 3.3 – TIG 250pAC/DC

Аппарат имеет дополнительные функции, такие как горячий старт, регулируемый спад тока, 2Т и 4Т режим, дистанционное управление и другие, позволяющие более комфортно, качественно и безопасно работать на нем.

Выбор режимов аргонно-дуговой сварки

При сварке меди в различных газовых средах необходимо поддерживать разные по длине дуги. Для аргона и гелия длина дуги должна быть как можно меньше (около 3 мм).

Экспериментальным путем установлены следующие режимы сварки:

Для соединений титан-медь сила сварочного тока $I_{св} = 80–100$ А, напряжение на дуге $U_{д} = 12–16$ В, расход аргона 10–14 л/мин.

Техника сварки титана с медью

Перед процессом сварки необходимо продуть шланги аргоном в течение 10 с. Затем устанавливаем время предварительной подачи газа перед сваркой (5 с.) и величину сварочного тока.

Ручную аргонодуговую сварку выполняем справа налево. Следует обратить внимание на положения вольфрамового электрода (горелки) и присадочного материала: при сварке с присадочным материалом угол наклона присадочного прутка к поверхности свариваемого металла должен быть в пределах 15–20 °, а вольфрамового электрода – 70–80 °, при этом угол между вольфрамовым

электродом и прутком присадочного материала составляет 90° . Присадочный пруток в процессе сварки перемещается впереди горелки, поперечные движения прутком и электродом в целях предотвращения окисления металла шва не допускаются. Подачу присадочного прутка необходимо выполнять так, чтобы металл равными порциями поступал в сварочную ванну.

Вольфрамовый электрод следует подводить как можно ближе к зоне плавки. Чем меньше длина дуги, тем глубже происходит плавление металла и тоньше сварной шов.

При сварке без использования камеры для сварки в контролируемой атмосфере неплавящийся электрод и присадочный материал не должны выходить за границы защиты. Это достигается путем использования специальных насадок на сварочную горелку. В случае если рабочие материалы выйдут из-под действия газа, произойдет насыщение шва атмосферным азотом и кислородом, что приведет к дефектам сварного соединения.

Окончание сварки и заварку кратера осуществляем плавным уменьшением величины тока сварочной цепи. Прекращение сварки увеличением длины дуги до обрыва не предотвращает образование кратера, а отвод горелки от кратера ухудшает газовую защиту, увеличивает окисленность металла кратера и в конечном итоге приводит к возникновению дефектов сварного соединения. Для предотвращения окисления и защиты расплавленного металла в кратере после обрыва дуги подачу газа выключаем через 10–15 с.

3.6 Сварка шины и патрубка

1 Установили штангу с шиной в патрубке так, чтобы 4 отв. на нем совпали с ребром шины, а торец штанги вышел из малого патрубка не менее, чем на 13 мм. Эскиз шины и патрубка представлен на рисунке 3.4.

2 Заклеили скотчем отверстие для проверки герметичности анода на малом патрубке и технологические пазы на большом патрубке.

3 Установили заглушки по торцам патрубков.

4 Подали аргон внутрь изделия.

5 Освободили один из технологических пазов. В этом положении приварили шину к патрубку через технологический паз. Наличие меди на поверхности шва не допускается.

Материалы: присадочная проволока ВТ1–00 диаметром 3 мм ГОСТ 27265-87, скотч. Приспособление: Заглушка.

6 Повторили операцию 5 для всех технологических пазов

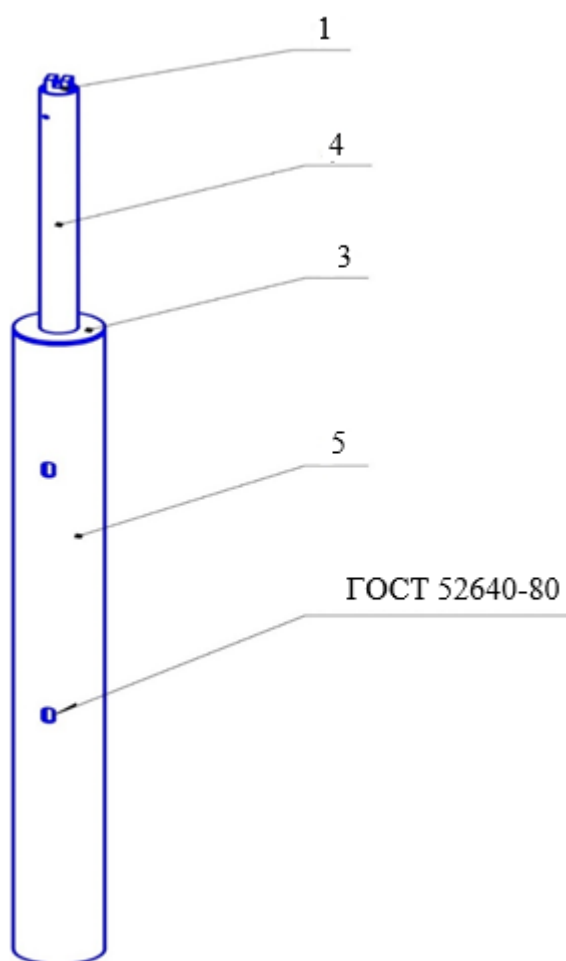


Рисунок 3.4 – Сборка и сварка шины позиция. 2 и патрубка позиция. 5

При соединении патрубка и шины сварка осуществлялась в два этапа. На первом этапе производили наплавку титанового слоя на видимый участок ши-

ны до уровня поверхности патрубка. На втором этапе производили сварку шины с патрубком, соединение образуется между кромкой наплавленного на шину слоя титана и кромкой, образованной отверстием в патрубке. В результате такой техники выполнения сварного соединения патрубков в месте наложения сварного шва имеет ровную поверхность без выемок и выступов.

3.7 Сварка штанги и сегментов

1 Установили сегменты на малый патрубок. Эскиз штанги и сегментов рисунок 3.5.

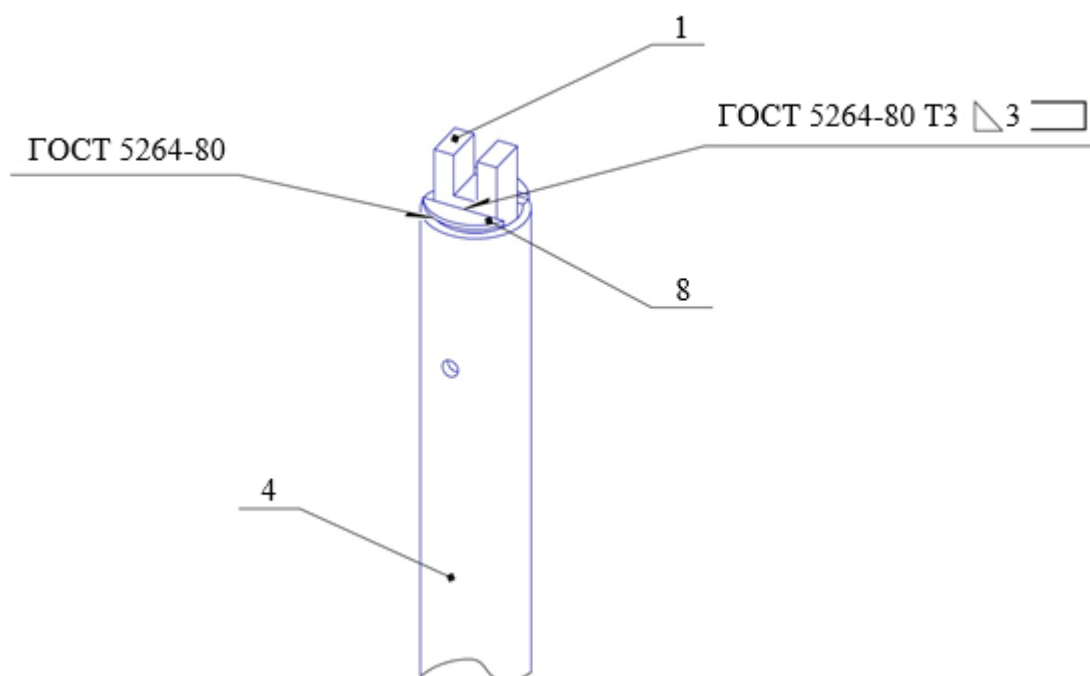


Рисунок 3.5 – Сборка и сварка штанги позиция. 1 и сегментов позиция. 8

- 2 Заклеили скотчем отверстие для проверки герметичности анода на малом патрубке.
- 3 Установили заглушку на торце патрубка.
- 4 Подали аргон внутрь изделия.

5 Приварили свободный торец штанги к сегментам и сегменты к малому патрубку, создав сплошную площадку без отверстий и трещин.

Материалы: присадочная проволока ВТ1–00 ГОСТ 27265-87 диаметром 3 мм, скотч. Приспособление: Заглушка.

3.8 Металлографические исследования

Микроструктуру исследовали на люминесцентном инвертированный микроскопе проводящего света Axio Observer Z1m и получили структуры меди и титана в различных увеличениях.

На рисунке 3.6 представлен снимок микроструктуры сварного соединения ВТ–М1 выполненный двухсторонним сварным швом присадочный материал ВТ1. В левой части рисунка наблюдаем характерную структуру титанового сплава ВТ1. Сварной шов имеет выраженное игольчатое строение характерное для литой структуры сварного шва ВТ1. На границе сварной шов и медь М1 наблюдается переходной слой, имеющий четкую границу и отличающийся цветом, предположительно образованный в результате взаимного растворения меди и титана. За ним наблюдаем характерную структуру меди.

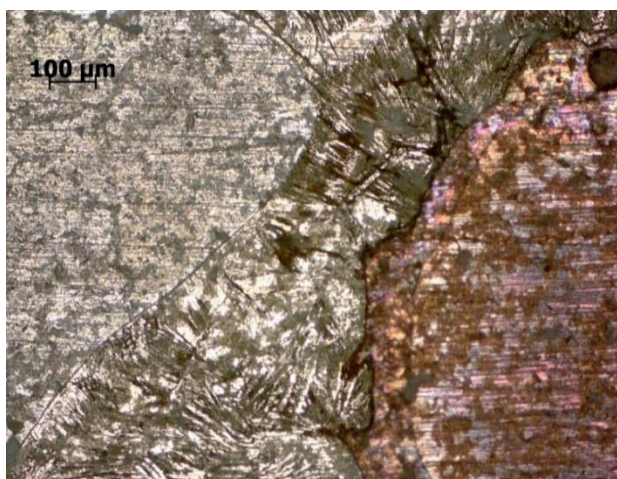


Рисунок 3.6 – Сварное соединение титан-медь, $\times 150$

Микроструктура сварного шва и титана изображена на рисунке 3.7. На этой структуре мы видим то, что ближе к титану шов имеет мелко игольчатое строение из-за быстрой кристаллизации, где он кристаллизовался медленно наблюдается крупно игольчатое строение.

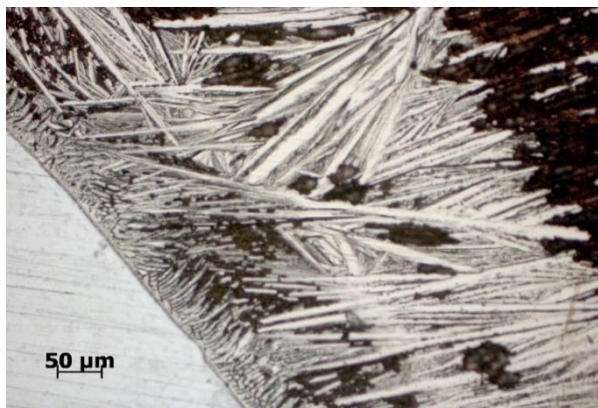


Рисунок 3.7 – Структура титан–сварной шов, × 100

Микроструктура сварного шва и меди представлена на рисунке 3.8. На структуре видно, как сварной шов насытился компонентами титана и меди, участок, который близок к медному сплаву приобрёл строение близкое строению титана, шов имеет игольчатую структуру.

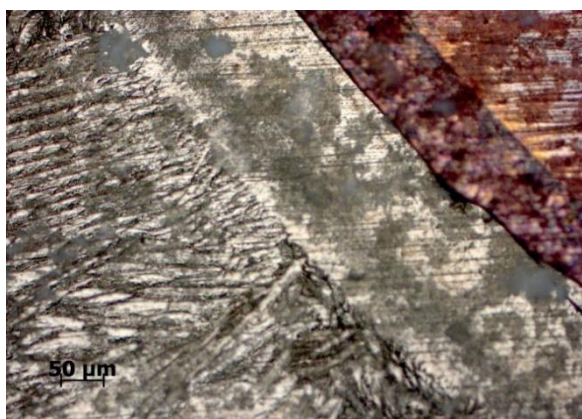


Рисунок 3.8 – Структура сварной шов– медь, × 300

Микроструктура сварного соединения меди с титаном рисунке 3.9. При таком увеличении мы не наблюдаем дефектов в сварном соединении титана с медью.

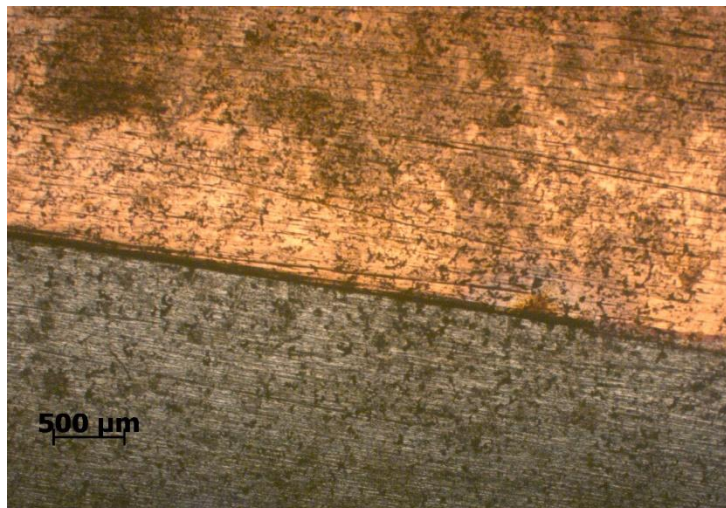


Рисунок 3.9 – Сварное соединение медь–титан, $\times 40$

На рисунке 3.10 представлена микроструктура титана и меди. При большом увеличении в структуре титана и меди мы наблюдаем дефекты в виде пор.

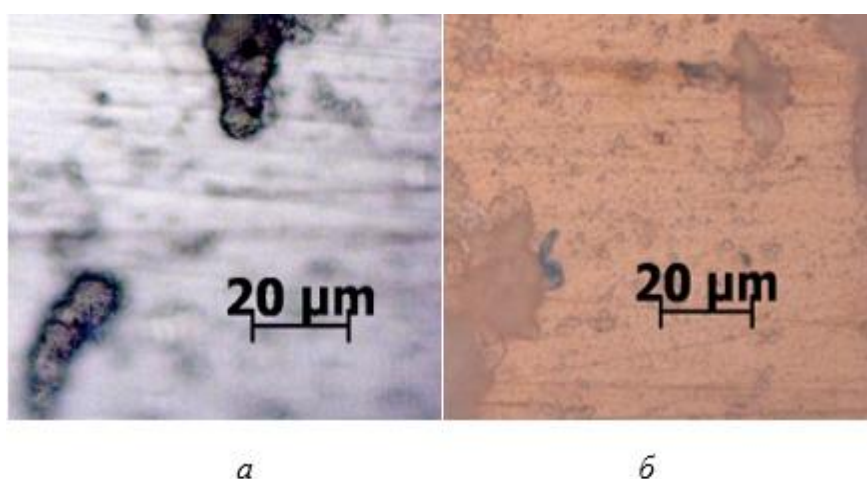


Рисунок 3.10 – Микроструктуры металлов: *a* – титан; *б* – медь, $\times 750$

Микроструктура сварного шва и меди изображена на рисунке 3.11. Структура медного шва имеет волокнистое строение, продольные волокна темного цвета.

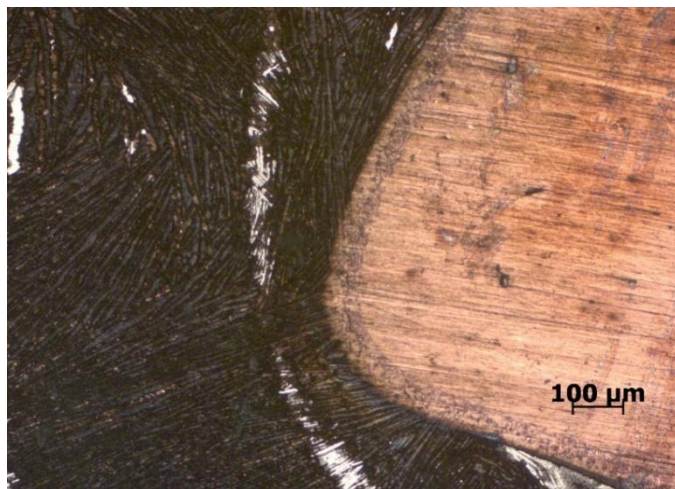


Рисунок 3.11 – Структура сварной шов–медь, × 150

Микроструктура титана и сварного шва показана на рисунке 3.12. Отчетливо видна структура титана по мере удаления от титана сварной шов имеет игольчатое строение мартенситного типа.

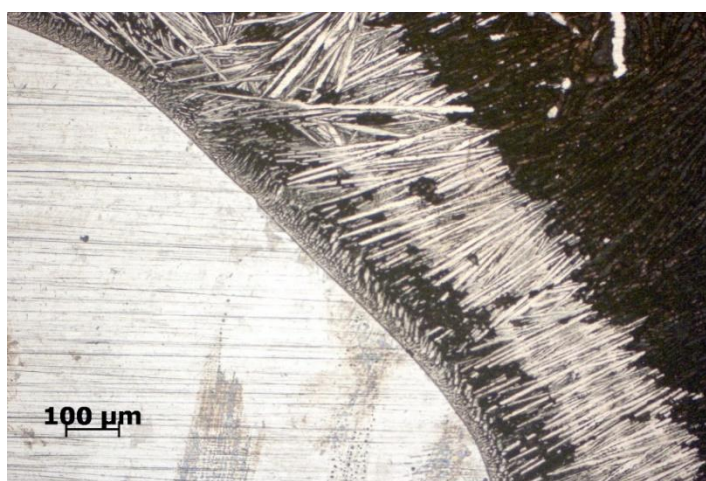


Рисунок 3.12 – Структура титан–сварной шов, × 150

На рисунке 3.13 представлен участок сварного соединения ВТ1 (левая верхняя часть снимка), М1 нижняя часть снимка сварной шов (верхняя правая часть снимка) по границе раздела основной металл сварной шов наблюдается тонкая зона мелких равноосных кристаллов (характерно для границ ВТ1 сварной шов и М1 сварной шов. Сварной шов примыкающий к М1 имеет ярко-выраженную характерную структуру, состоящую из длинных, вытянутых в направлении теплоотвода кристаллов материала сварного шва ВТ1. В центральной части сварного шва наблюдаются хрупкие равноосные кристаллы материалы сварного шва.

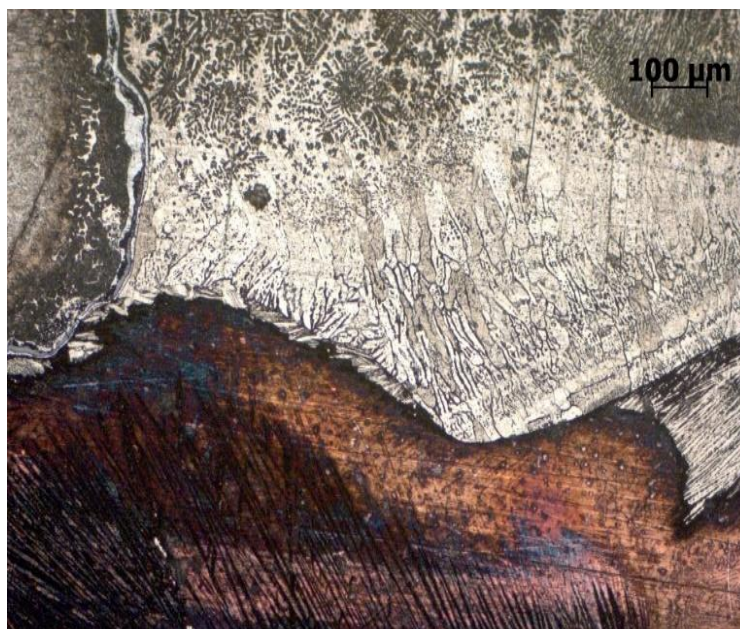


Рисунок 3.13 – Сварное соединение ВТ1 – М1, $\times 150$

На рисунке 3.14 представлен участок сварного соединения ВТ1 (правая верхняя часть снимка) по границе раздела основной металл сварной шов наблюдается тонкая зона мелких равноосных кристаллов, характерно для границ ВТ1 сварной шов. В центральной части сварного шва наблюдаются хрупкие равноосные кристаллы материалы сварного шва.

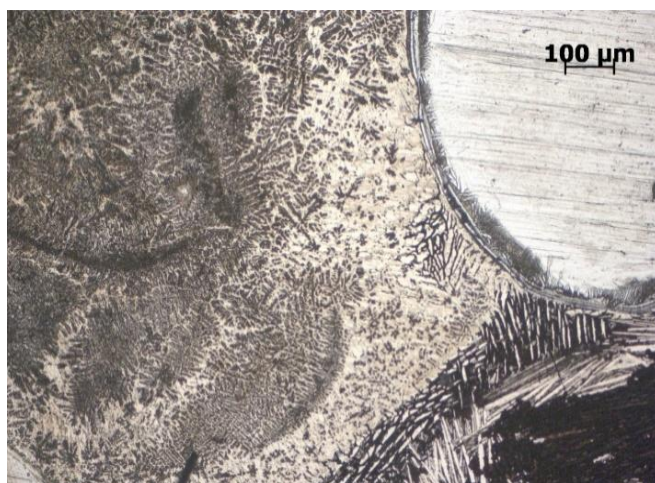


Рисунок 3.14 – Участок сварного соединения ВТ1, $\times 150$

На рисунке 3.15 представлен участок сварного соединения ВТ1–М1 в нижней части снимка. Наблюдается четкая граница раздела, травлением выявлены границы зерен сварного шва с характерным игольчатым строением.



Рисунок 3.15 – Сварное соединение ВТ1– М1, $\times 150$

На рисунке 3.16 представлен участок сварного соединения ВТ1–М1 в центральной части снимка. Наблюдается четкая граница раздела, травлением выявлены границы зерен сварного шва с характерным игольчатым строением.

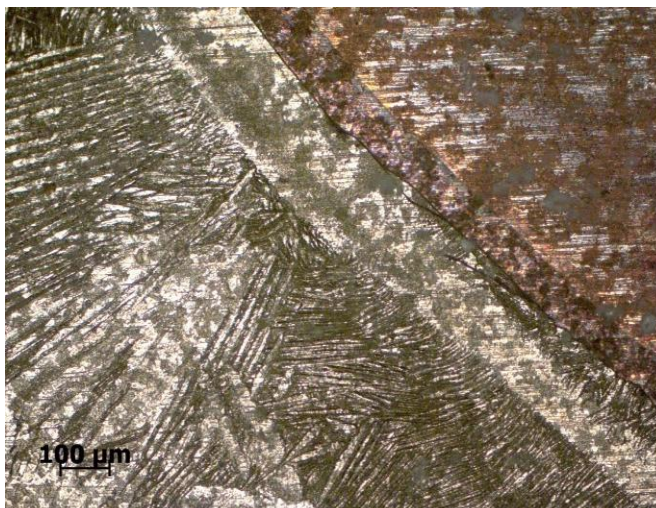


Рисунок 3.16 – Сварное соединение VT1–M1, × 150

Микроструктура титана и сварного шва рисунок 3.17.

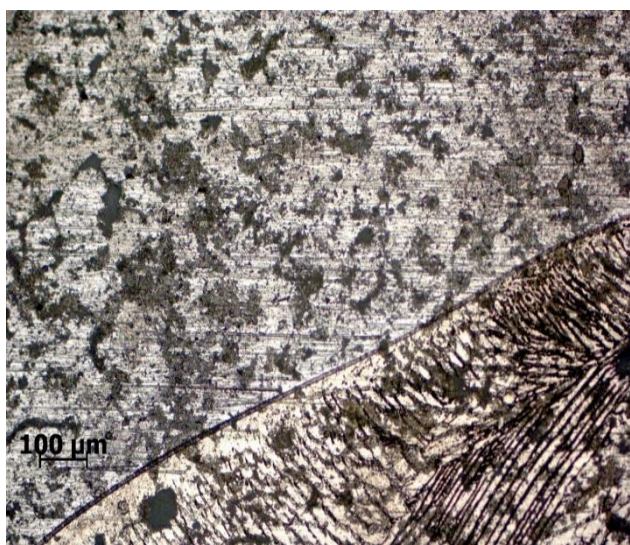


Рисунок 3.17 – Структура титан–сварной шов, × 150

С помощью РЭМ мы получили следующие микроструктуры: на рисунке 3.18 и рисунке 3.19 изображён титан и сварной шов. Эти структуры имеют большое разрешение.

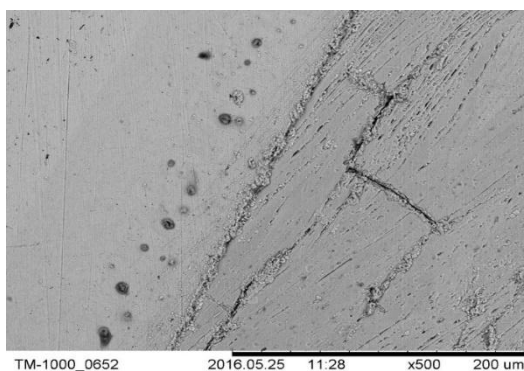


Рисунок 3.18 – Структура титана–сварной шов

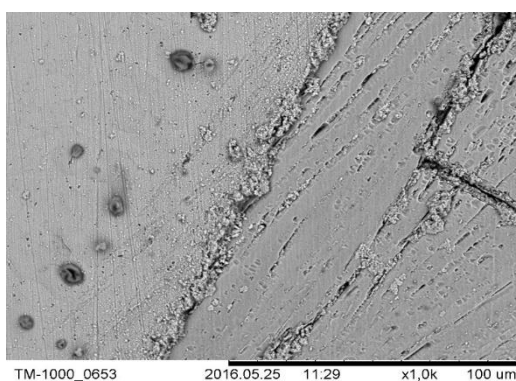


Рисунок 3.19 – Структура титана–сварной шов

На рисунке 3.20, 3.21 участок на границе сварной шов М1 видна граница переходной зоны и игольчатое строение сварного шва

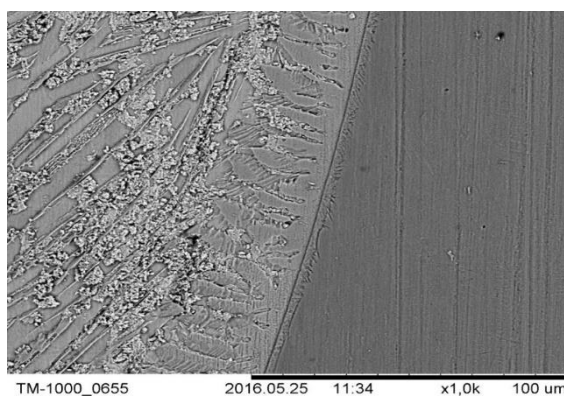


Рисунок 3.20 – Структура сварной шов–медь

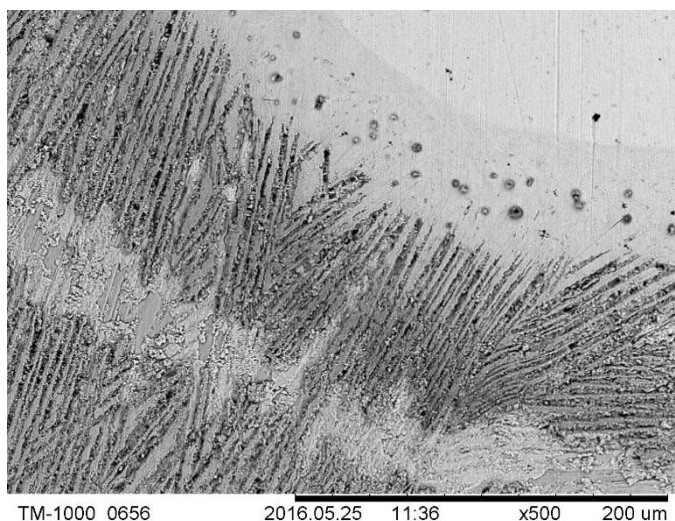


Рисунок 3.21 – Структура сварной шов–титан

Отчетливо видна структура титана по мере удаления от титана сварной шов имеет игольчатое строение мартенситного типа.

3.9 Механические испытания

Испытание на статическое одноосное растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств». На испытательном комплексе LFM 20.

Три образца сварного соединения меди с титаном были испытаны на одноосное растяжение. Получили среднее значение предела прочности сварного соединения ВТ1–М1 = 220–230 МПа. Образцы ВТ1–М1 были разорваны в месте сварного соединения.

Измерение микротвердости проводили согласно ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» на приборе ПМТ–3. График микротвёрдости сварного соединения ВТ1–М1 изображен на рисунке 3.22. Средние значения $Cu = 90$ МПа, ВТ1–М1 = 335 Мпа, $Ti = 180$ МПа.

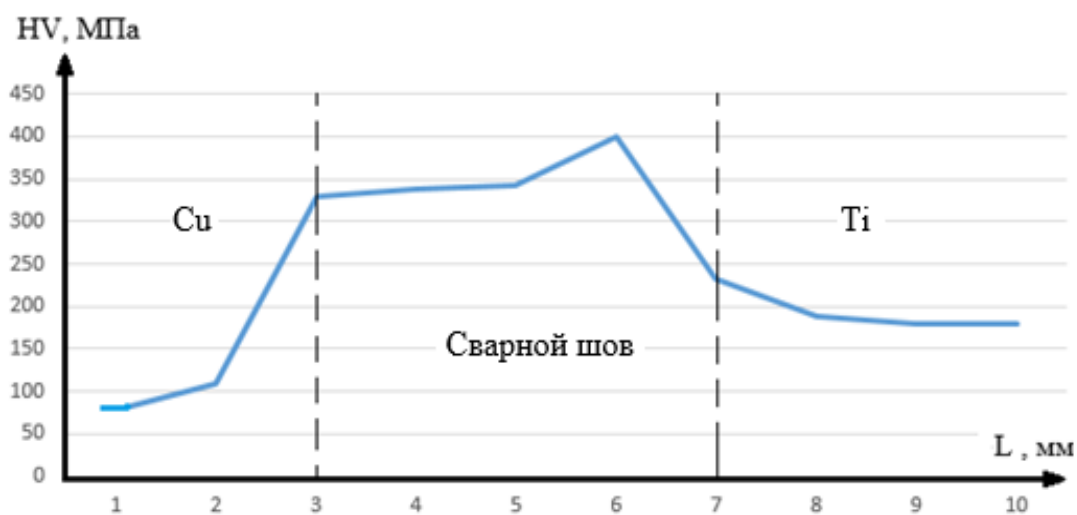


Рисунок 3.22 – Микротвердость сварного соединения меди с титаном

3.10 Измерение электросопротивления

Электросопротивление образцов измеряли с помощью микроомметра марки Ф415 рисунок 3.23



Рисунок 3.23 – Микроомметр Ф415

На рисунке 3.24 изображен процесс измерения сопротивления сварного соединения меди с титаном.

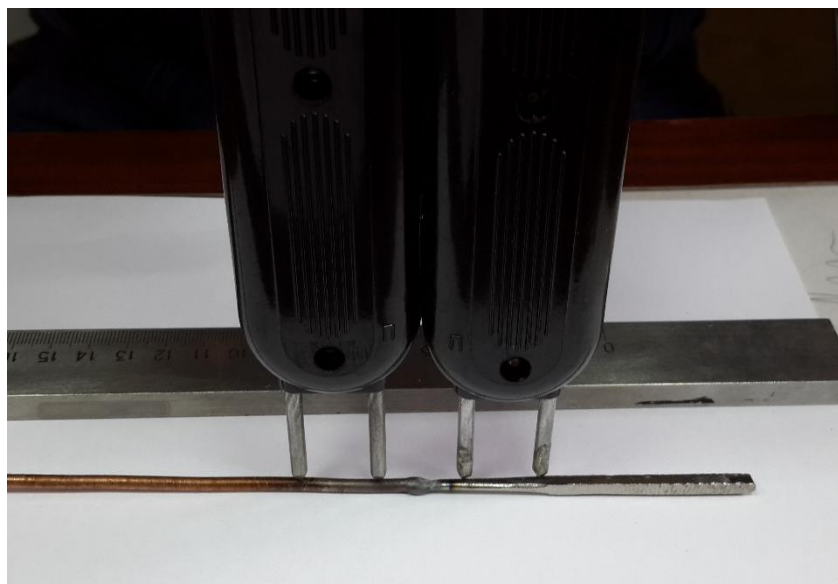


Рисунок 3.24 – Измерение электрического сопротивления

Были проведены измерения электрического сопротивления материалов таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерений электрического сопротивления материалов

Название материала	Cu	Ti	BT1-M1
Электрическое сопротивление , мОм	0,08	5-6	7,4-7,8

Электрическое сопротивление сварного соединения не значительно выше, чем сопротивление титана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Исследованы основные материалы, применяемые при сварке анода.

2 Рассмотрены основные виды сварки, применяемые для меди и титана, особенности и технологические приемы получения сварных соединений.

3 Исследована микроструктура титана и меди, а также сварного соединения ВТ1–М1 с помощью люминесцентного инвертированного микроскопа проводящего света Carl Zeiss Axio Observer Z1m и РЭМ HITACHI TM1000.

4 Приведена методика измерения электрического сопротивления. Получены результаты измерения электрического сопротивления меди, титана, сварного соединения меди с титаном: $Cu = 0,08$ мОм, $Ti = 5-6$ мОм, ВТ1–М1 = 7,4–7,8 мОм. Электрическое сопротивление сварного соединения не значительно выше, чем сопротивление титана.

5 Проведены испытания на статическое одноосное растяжение в соответствии с ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств». В результате среднее значение предела прочности сварного соединения составило 220–230 МПа.

6 Рассмотрена методика измерения микротвердости и проведены измерения микротвердости согласно ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Сварной шов имеет более высокие значения микротвердости по сравнению с основными материалами.

7 Результаты исследований будут использованы для оптимизации технологии аргонно-дуговой сварки очистных анодов на предприятии ООО «Красноярские машиностроительные компоненты».

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Горыгин, И. В. Титан в машиностроении: науч. изд. / И.В. Горынин, Б. Б. Чечулин. – Москва: Машиностроение, 1990. – 400 с.
- 2 Биронт, В. С. Материаловедение. Конструкционные материалы: учебное пособие / В. С. Биронт. – Красноярск: ГАЦМиЗ, 2003. – 156 с.
- 3 Титан: науч. изд. / В. А. Гармата [и др.]. – Москва: Металлургия, 1983. – 559 с.
- 4 Петрунько, Л. Н. Титан в новой технике: науч. изд. / Л. Н. Петрунько, Ю.Г. Олесов, В.А. Дрозденко. – Москва: Металлургия, 1970. – 160 с.
- 5 Парфенов, О. Г. Проблемы современной металлургии титана: науч. изд. / О. Г. Парфенов, Г. Л. Пашков; отв. ред. А. Д. Михнёв; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т химии и химической технологии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 279 с.
- 6 Урвачев, В. П. Сварщику цветных металлов: справочное пособие/ Урвачев, В. П – Донецк: машиностроение, 1985. – 174с.
- 7 Акулов, А.И. Технология и оборудования сварки плавлением: Учебник для студентов вузов / А. И. Акулов, Г.А Бельчук, В. П. Демянцевич. – Москва: Машиностроение, 1977. – 432 с.
- 8 Думов, С.И. Технология электрической сварки плавлением: науч. изд. / С.И. Думов – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 461 с.
- 9 Титановые сплавы в машиностроении: учеб. пособие / Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 248 с
- 10 Фокин М. Н. Титан и его сплавы в химической промышленности: справочное пособие / М. Н. Фокин, Ю. С. Рускол, А. В. Мосолов. – Ленинград: Химия, 1978. – 200 с.

- 11 Цвиккер У. Титан и его сплавы: науч. изд. / У. Цвиккер; Пер. с немецкого; под ред. докт. тех. наук. О. П. Юлютина, С. Г. Глазунова. – Москва: Металлургия, 1979. – 512 с.
- 12 Оботуров, В. И. Дуговая сварка в защитных газах: науч. изд. / В. И. Оботуров. – Москва: Металлургия, 1989 – 232 с.
- 13 Юхин Н. А. Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в защитных газах (TIG/WIG): науч. изд. / Н. А. Юхин; под общ. ред. докт. техн. наук О.И. Стеклова. – Москва: СОУЭЛО, 2007. – 50 с.
- 14 Квагинидзе, В. С Технология металлов и сварка: учебное пособие / В. С Квагинидзе. – Москва: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 566 с.
- 15 Сварка в машиностроении: справочник в 4-х т. / Г. А. Николаев [и др.]; под ред. А. И. Акулова. – Москва: Машиностроение, 1978. – 462 с.
- 16 Гуревич, С. М. Справочник по сварке цветных металлов: науч. изд. / С. М. Гуревич; отв. ред. В. Н. Замков. – 2 изд. перераб. и доп. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 512 с Сварка, резка, пайка металлов. Кортес А.Р. ООО «Арфа СВ». 1999. 192 с.
- 17 Материаловедение: учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – 7-е изд., стереотип. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 648 с.
- 18 Осинцев, О. Е, Медь и медные сплавы: Справочник / О. Е Осинцев, В. Н Федоров. – Москва: Машиностроение, 2004. – 336с.
- 19 Все для надежной сварки [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://svarkainfo.ru/rus/lib/tech/teh1/>
- 20 Алешина, Н. П. Сварка. Резка. Контроль: Справочник в 2-х томах / Н. П Алешина, Г. Г. Чернышова, А. И. Акулов. – Москва: Машиностроение 2004. – 480 с.
- 21 Полухина П. И, Технология металлов и сварка: Учебник для вузов / П.И. Полухина. – Москва : Высш. школа, 1977. – 464 с.

22 Лаборатория металлографии: учеб. пособие для студентов металлургических вузов и факультетов / Е. В. Панченко [и др.] ; под ред. докт. тех. наук. проф., Б.Г. Лившица. – Москва: Металлургия, 1965. – 439 с.

23 Axio Observer для материаловедения [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.optecgroup.com/equipment/inverted_micro/axio-observer-mat/.

24 РЭМ НИТАСНІ ТМ–1000 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://ccu.kirensky.ru/info/31/>.

25 ГОСТ 6996-66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – Взамен ГОСТ 6996-54; введ. 01.01.1967. – Москва: Стандартиформ, 1967. – 45 с.

26 Быконя, Л. А. Испытание на микротвердость: метод. указания / Л.А. Быконя. – Красноярск: КГТУ, 1998. – 15с.

27 ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – Взамен ГОСТ 9450-60; введ. 01.01.1977. Москва: Стандартиформ, 1977. – 35 с.

28 ГОСТ 27265-87 Проволока сварочная из титановых сплавов. Технические условия. – Введ. 01.01.1989. Москва: Стандартиформ, 1989. – 16 с.

29 ISO 6848-2004 Дуговая сварка и резка. Электроды нерасходуемые воль-фрамовые. Классификация. – Введ 31.05.2007. Москва: Стандартиформ, 2007. – 14 с.

30 ГОСТ 10157-79 Аргон газообразный и жидкий. – Взамен ГОСТ 10157-73; введ. 30.06.1980. Москва: Стандартиформ, 1980. – 19 с.

31 СВАРОГ TIG 250P AC/DC (R62) [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.welding-russia.ru/catalog.html?itemid=1037>.