

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 кафедры)

22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

(код и наименование направления подготовки)

«Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических  
материалов»

(наименование (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Исследование процессов сварки и наплавки меди и ее сплавов»

Студент	<u>Д.П. Медведев</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Научный руководитель	<u>О.В. Шашкин</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Консультанты	_____ (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)

Руководитель магистерской  
программы д.т.н., профессор, А.И. Ковтунов \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

**Допустить к защите**  
Заведующий кафедрой д.т.н., доцент, В.В. Ельцов \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2019

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. Сварка плавлением меди и ее особенности.....	5
1.1 Развитие сварки плавлением тяжелых цветных металлов и сплавов .....	5
1.2 Металлургические особенности сварки плавлением меди и низколегированных сплавов на ее основе .....	10
1.3 Свариваемость меди и некоторых ее сплавов .....	13
1.4 Влияние примесей и ряда легирующих элементов на образование трещин при сварке меди .....	16
2. Сварка под флюсом меди и ее сплавов металлическим электродом.....	22
3. Автоматическая сварка толстолистовой меди под флюсом .....	45
3.1 Технология автоматической сварки меди под флюсом плавящимся электродом .....	45
3.2 Оптимизация параметров дополнительной газовой защиты при сварке и наплавке меди и ее сплавов под флюсом.....	55
3.3 Особенности технологии сварки под флюсом замкнутых швов на крупногабаритных изделиях из меди больших толщин .....	64
4. Флюсы применяемые при сварке меди и сплавов на ее основе .....	71
4.1 Влияние степени окисленности флюса на пористость швов при сварке меди.....	71
4.2 Повышение стойкости швов против пористости швов при сварке меди под флюсом.....	75
4.3 Отделимость шлаковой корки при сварке меди под силикатными флюсами .....	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	91
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	93

## ВВЕДЕНИЕ

В различных областях современной техники наряду с легкими, химически-активными и тугоплавкими металлами широкое применение находят тяжелые цветные металлы и сплавы на их основе, обладающие рядом особых физико-химических свойств.

Сочетание высокой электро- и теплопроводности с достаточно хорошей коррозионной стойкостью способствует широкому использованию меди как конструкционного металла в электротехнической и металлургической промышленности, в химическом аппаратостроении, судостроении и других отраслях.

Несмотря на дефицитность, незаменимым конструкционным материалом в ряде случаев при изготовлении специальной химической аппаратуры, работающей в особо агрессивных средах и сложных условиях, является никель.

Из года в год возрастает применение в промышленности сплавов на основе меди и никеля — разных типов бронз, латуней, медноникелевых и никель-хромовых сплавов. Использование последних особенно эффективно в новых отраслях техники — атомной, реактивной и др.

Свинец и цинк в качестве самостоятельных конструкционных материалов применяются сравнительно в небольшом объеме (изготовление некоторых резервуаров, химической аппаратуры, свинцовых трубопроводов и др.). Эти тяжелые цветные металлы, а также олово являются в основном составной частью сплавов на основе меди.

Развитие современной техники предъявляет к сварным конструкциям, изготовляемым из тяжелых цветных металлов, новые требования, главным из которых является необходимость дальнейшего повышения качества и надежности сварных соединений. Это в свою очередь требует постоянного совершенствования технологических процессов сварки тяжелых цветных

металлов, разработки новых высокопроизводительных, высокоэффективных способов их соединения.

Особенно эффективно развивается ведущий технологический процесс, дуговая сварка. Дальнейшее развитие получили механизированные и ручные процессы сварки в среде защитных газов, под флюсом, покрытыми электродами и др. Этому способствовало комплексное исследование важнейших вопросов металлургии и технологии сварки этих металлов, направленное прежде всего на изыскание эффективных мер предупреждения образования пор и трещин в сварных швах, создание новых сварочных материалов и совершенствование техники сварки.

Анализ показывает, что для большинства тяжелых металлов и сплавов, как и для других цветных металлов, наиболее прогрессивными являются процессы сварки в среде защитных газов, отличающиеся большой универсальностью и простотой решения задачи защиты металла сварочной ванны от воздействия окружающей атмосферы. Широкое применение, особенно для металла малых толщин (до 10 мм), находит сварка неплавящимся электродом. В значительно меньшем объеме, в основном из-за отсутствия специальных присадочных проволок, используется сварка плавящимся электродом.

Цель – повышение качества соединений при сварке и наплавке меди и ее сплавов за счет обобщения и формулирования общих требований к особенностям технологий сварки и наплавки.

# 1. Сварка плавлением меди и ее особенности

## 1.1 Развитие сварки плавлением тяжелых цветных металлов и сплавов

Учитывая особые теплофизические свойства меди и некоторых ее сплавов, в качестве защитной среды предпочтительно применение гелия и азота, а также смесей на их основе, обеспечивающих более высокий эффективный КПД процесса. Однако необходимо все же учитывать отрицательное влияние азота на пористость швов при сварке меди и ее сплавов. Существовавшее ранее мнение об инертности азота по отношению к меди ошибочно. Последними работами установлено, что в условиях сварочного процесса возможна абсорбция азота расплавленным металлом, а выделение его при кристаллизации сварочной ванны обуславливает образование газовой пористости. Получение плотных швов при азотно-дуговой сварке возможно лишь при использовании присадочных материалов, легирующих металл нитридообразующими элементами.

Таким образом, требуемое качество швов при сварке в среде защитных газов достигается прежде всего правильным выбором присадочного материала. Многочисленными исследованиями установлено, что применительно к техническим маркам меди и никеля, а также большинству сплавов на их основе в качестве присадочных материалов необходимо использовать проволоки из низколегированных (для меди и никеля) или комплекснолегированных (для бронз и др.) сплавов, содержащих активные раскислители и нитридообразующие элементы: титан, алюминий, кремний, марганец (как для меди, так и для никеля и их сплавов), а также бор, фосфор и некоторые другие элементы (для медных сплавов). Однако эти рекомендации не нашли должного использования в промышленности, так как выпуск предложенных новых проволок осуществляется лишь в экспериментальном порядке и объемы производства их недостаточны. Для

сварки меди и некоторых ее сплавов в основном же применяются проволоки из легированных сплавов типа МНЖКТ, БрКМц и другие, которые позволяют получать швы удовлетворительного качества, однако теплофизические свойства металла зачастую не удовлетворяют условиям эксплуатации. Особенно большая потребность ощущается в электродных проволоках малого диаметра для сварки легированных сплавов, главным образом бронз. Вследствие низкой деформационной способности этих сплавов изготовление из них сварочных проволок представляет определенную трудность. Применяемые в ряде случаев для сварки этих сплавов порошковые и композитные проволоки позволяют сравнительно несложно получать металл любого требуемого состава и удовлетворительного качества.

Новым перспективным направлением в области сварки цветных металлов является применение флюсов-паст при сварке неплавящимся электродом. Как показали исследования, при сварке тяжелых цветных металлов флюсы-пасты не только повышают проплавленную способность дуги, но и позволяют существенным образом улучшить качество сварных швов без применения присадочных проволок. За счет активного металлургического воздействия на сварочную ванну они предупреждают образование пор в швах. Новая технология аргонодуговой сварки с применением флюсов-паст уже освоена рядом заводов по обработке цветных металлов при укрупнении сваркой рулонов из меди и ее сплавов с целью их последующей прокатки и весьма перспективна для других отраслей промышленности.

Однако сварка в среде защитных газов тяжелых цветных металлов, особенно меди, связана с необходимостью применения предварительного подогрева, а при больших толщинах и сопутствующего, что существенно усложняет процесс. Поэтому особого внимания заслуживают новые высокоэффективные способы и приемы сварки в среде защитных газов: многодуговая сварка неплавящимся электродом: сварка меди плавящимся

электродом в среде азота погруженной дугой; гелиево-дуговая сварка на форсированных режимах и др. Эти новые процессы позволяют существенно расширить диапазон толщин металла, сварка которых возможна без подогрева, а также снизить температуру предварительного и сопутствующего подогрева, повысить производительность сварочных работ. Большие резервы увеличения производительности имеет многодуговая сварка неплавящимся электродом, которая особенно перспективна для изготовления сварных труб и других непрерывных процессов производства полуфабрикатов из цветных металлов.

В связи с необходимостью изготовления сварных конструкций из металла больших толщин и сечений в последние годы интенсивно совершенствовались такие прогрессивные технологические процессы, как электродуговая сварка меди под флюсом, а также созданы новые высокоэффективные способы сварки меди плавлением — плазменнодуговой и электрошлаковой. Основным достоинством этих процессов является возможность получения высококачественных сварных соединений из меди без предварительного и сопутствующего подогревов (подогрева в общепринятом представлении этого процесса), что особенно важно при сварке металла больших толщин и изготовлении крупногабаритных изделий. Начальные тепловые условия стабильного процесса при этом достигаются путем совмещения ряда этапов технологического процесса или приемов техники сварки. Так, при плазменно-дуговой сварке в начале процесса совмещены этапы наведения сварочной ванны с необходимым нагревом изделия неподвижной плазменной дугой. При электрошлаковом процессе требуемый нагрев свариваемых кромок достигается за счет последовательного применения неплавящегося и плавящегося электродов. Сварку этими процессами обычно выполняют за один проход или с двух сторон с полным проваром свариваемых кромок.

Создание специальных сварочных материалов: плавленого флюса

марки АН-М13 и проволоки БрХТ 0,6-0,5 — для сварки меди под флюсом, порошковой проволоки ПП-БрХТ 12-2 — для плазменно-дуговой сварки меди и хромовой бронзы, легкоплавкого флюса на фторидной основе марки АН-М10 и других позволило успешно решить задачу получения высококачественных сварных соединений при автоматических процессах сварки.

Сварка под флюсом успешно применяется при серийном и массовом производстве сварных конструкций ответственного назначения из меди и ее сплавов в металлургической промышленности, химическом аппаратостроении, судостроении и других отраслях.

Основными преимуществами плазменно-дуговой сварки являются возможность осуществления значительного тепловложения в свариваемые кромки без расплавления присадочного материала, возможность сварки различных типов соединений меди больших толщин без разделки кромок, минимальный объем механической обработки до сварки и после нее. Создание и промышленное освоение этой технологии позволило успешно и в довольно короткие сроки решить проблему изготовления в стране уникальных сварных кристаллизаторов печей спецэлектрометаллургии.

Новая технология электрошлаковой сварки нашла применение для изготовления сварных заготовок медных бандажей-кристаллизаторов установок непрерывного литья и прокатки катанки из цветных металлов.

Из других механизированных процессов можно отметить способ сварки меди незащищенной дугой с применением специальной комплексно легированной проволоки сплошного сечения. Данный процесс рекомендован для сварки металла толщиной до 10 мм, причем при толщине свыше 6 мм необходим предварительный подогрев. Способ сварки незащищенной дугой находит ограниченное применение (в химическом аппаратостроении).

Наряду с механизированными способами сварки тяжелых цветных металлов и сплавов в промышленности применяется и ручная сварка

покрытыми электродами. Этот процесс также постоянно совершенствуется с целью повышения качества сварных соединений и обеспечения возросших эксплуатационных требований. Для ручной дуговой сварки меди разработаны специальные высокопроизводительные электроды марки

АНЦ-1. Особенностью новых электродов является то, что они позволяют сваривать металл толщиной до 15-20 мм без применения предварительного подогрева, для металла больших толщин достаточен невысокий (до 250-400 °С) подогрев. Электроды обладают удовлетворительными сварочно-технологическими свойствами и обеспечивают минимальное легирование швов. Коэффициент наплавки электродов составляет 20-24 г/Ач. Необходимым условием получения качественных швов при использовании новых электродов является соблюдение рекомендаций по режимам и технике сварки.

В то же время для тяжелых цветных металлов еще недостаточно используются такие современные методы сварки плавлением, как электронно-лучевая, импульсно-дуговая и некоторые другие. Далеко не исчерпаны возможности автоматической сварки под флюсом и, как уже отмечалось, многодуговых процессов. Характерно, что эти процессы объединяет еще одно весьма ценное преимущество — хорошие санитарно-гигиенические условия труда. В связи с повышенной вредностью работ при сварке тяжелых цветных металлов и сплавов развитие перспективных направлений должно вестись с учетом требования обеспечения нормальных условий труда сварщиков.

Целесообразно усилить также исследования в области металлургии сварки тяжелых цветных металлов и сплавов и, особенно по изучению свариваемости технических марок меди и никеля, новых марок сплавов, что даст возможность регламентировать содержание примесей в них, правильно произвести выбор конструкционного материала этой группы цветных металлов. Недостаточно интенсивно ведутся исследования по сварке

разнородных материалов. Для сварных конструкций, применяемых в новых отраслях современной техники, необходимо всестороннее определение служебных характеристик металла швов и сварных соединений и комплексная оценка работоспособности и надежности этих изделий.

В связи с расширением объемов выпуска сварных конструкций из тяжелых цветных металлов и сплавов необходима организация серийного производства новых высокоэффективных сварочных материалов — проволок, электродов, флюсов, паст и т.д.

Рассматривая перспективы развития сварки тяжелых цветных металлов и сплавов, следует отметить, что широкое применение этих металлов при серийном и массовом производстве сварных конструкций, специализация производства ставят актуальными также задачи дальнейшей автоматизации сварочных процессов, повышения эффективности сварочных работ.

## **1.2 Металлургические особенности сварки плавлением меди и низколегированных сплавов на ее основе**

Актуальная задача повышения качества и надежности сварных конструкций из меди и сплавов на ее основе обуславливает необходимость дальнейшего изучения вопросов металлургии сварки меди плавлением и, прежде всего, исследования причин образования пор и трещин и изыскания эффективных мер их предупреждения.

На основании анализа литературных и экспериментальных данных, а также произведенных термодинамических расчетов показано, что наиболее вероятной причиной пористости при сварке меди является образование и выделение из металла сварочной ванны паров воды в результате взаимодействия водорода с кислородом. Выделение паров воды определяет начальную стадию процесса образования пор — появление газовых

зародышей. Размеры пор и степень пористости швов зависят от концентрации водорода в сварочной ванне.

Исследованиями, установлено также отрицательное влияние азота на пористость швов при сварке меди. В условиях сварочного процесса возможна абсорбция азота расплавленным металлом, а выделение его при кристаллизации сварочной ванны обуславливает образование газовых зародышей.

Основными металлургическими мерами борьбы с пористостью при сварке меди, учитывая указанные причины ее возникновения, является активное раскисление металла сварочной ванны, связывание водорода в дуге в нерастворимые в жидком металле соединения, а также разбавление газовой фазы с целью снижения парциального давления водорода и легирование металла нитридообразующими элементами для связывания азота. В качестве примера показано, что при сварке меди под флюсом существенное влияние на плотность швов оказывает состав флюса и способ его грануляция. Наилучшая стойкость металла швов против пористости обеспечивается при использовании окисленного флюса сухой грануляции марки АН-М13.

С целью получения стабильного качества швов при сварке меди и хромовой бронзы больших толщин в качестве присадочных материалов рекомендуется применять проволоки, содержащие активные раскислители. Например, для сварки под флюсом разработана специальная электродная проволока марки Бр.ХТ0,6-0,5, для плазменно-дуговой сварки — порошковая проволока марка ПП-Бр.ХТ12-2, для сварки в среде защитных газов используются проволоки марок МНЖКТ5-1-0,2-0,2 и Бр,КМц3-1, а также предложены специальные проволоки с комплексным микролегированием такими элементами, как РЗМ, Zr, В, Ti.

Для повышения качества швов при сварке неплавящимся электродом могут быть рекомендованы активирующие флюсы-пасты, также содержащие в своем составе раскислители (например, флюс марки АН-М15А).

При создании покрытий электродов для ручной сварки меди с целью предупреждения пористости швов практически используют весь комплекс металлургических мер.

Технологические рекомендации по предупреждению пористости в сварных швах на меди те же, что и для других металлов. Это, прежде всего, ограничение доступа водорода и влаги в зону дуги, выбор рода и полярности тока, оптимальных режимов сварки и др.

Вопросы исследования склонности меди и ее сплавов к образованию трещин при сварке также изучены недостаточно. Трещины при сварке меди являются кристаллизационными, о чем свидетельствует межкристаллитный характер разрушения и окисленная поверхность изломов швов с трещинами.

Общеизвестно отрицательное влияние на свариваемость меди и ее сплавов легкоплавких примесей (висмута, свинца, селена, телура и др.). Однако до настоящего времени нет единого мнения о механизме влияния этих примесей на образование кристаллизационных трещин. Возможно, вредное влияние легкоплавких примесей может быть связано с проявлением эффекта адсорбционного понижения пластичности и прочности. Действительно, кристаллизационные трещины образуются в процессе деформации металла, находящегося в твердо-жидком состоянии, поэтому различная адсорбционная активность жидкой фазы должна оказывать определенное влияние на деформационную способность кристаллизующегося металла. Подтверждением этому являются результаты опытов по изучению пластичности меди и некоторых ее сплавов при высокотемпературных испытаниях на растяжение в контакте с поверхностно-активными элементами.

Для предупреждения образования кристаллизационных трещин при сварке меди и ее сплавов рекомендуется:

а) ограничивать содержание вредных примесей в основном металле и сварочной проволоке;

б) обеспечивать, по возможности, двухфазную структуру металла швов, снижающую отрицательное влияние легкоплавких примесей на образование трещин;

в) использовать сварочные материалы, легированные добавками, нейтрализующими вредное влияние примесей.

Учитывая отрицательное влияние кислорода на свариваемость меди, и особенно на прочностные свойства сварных соединений, в качестве конструкционного материала для изготовления сварных конструкций ответственного назначения необходимо применять медь, содержащую не более 0,01 % кислорода.

### **1.3 Свариваемость меди и некоторых ее сплавов**

Одним из часто встречающихся дефектов сварных швов на меди и ее сплавах являются кристаллизационные трещины. Поэтому исследование склонности меди и ее сплавов к образованию трещин при сварке представляет большой научный и практический интерес.

Для оценки свариваемости медных сплавов используются стыковые пробы с жестким закреплением и тавровые пробы, которые обладают сравнительно низкой чувствительностью и являются очень металлоемкими. Опробование для меди и ряда ее сплавов методики с использованием технологической пробы типа ЛТП, применяемой для оценки склонности к образованию трещин при сварке сталей, не дало положительных результатов вследствие повышенной склонности меди и ее сплавов к образованию кристаллизационных трещин.

Проба «рыбий скелет», применяемая для оценки свариваемости алюминиевых сплавов, определяет прежде всего склонность материала к распространению трещин.

Выполнен комплекс исследований по разработке специальной методики оценки свариваемости меди и ее сплавов. Сущность ее заключается в следующем. Образцы размером 60x25x3 мм проплавляются с полным проваром на разных погонных энергиях, но при определенном значении силы тока, и по критической скорости сварки, при которой появляются в швах трещины, оценивают склонность металла к образованию кристаллизационных трещин. Чем больше эта скорость, тем выше стойкость металла против образования трещин. Одновременно определяется показатель  $K_{тр}$ , представляющий собой отношение длины трещины к длине шва, выраженное в процентах, по которому оценивается и склонность металла к распространению трещин.

Преимуществом разработанной методики оценки свариваемости меди и ее сплавов является высокая чувствительность и не металлоемкость применяемых образцов.

По разработанной методике было изучено влияние вредных примесей и легирующих элементов на свариваемость меди и хромовой бронзы.

Проведенные исследования показали, что наибольшее влияние на склонность меди к образованию трещин оказывает висмут и, в меньшей степени, свинец. Установлено также отрицательное влияние фосфора на свариваемость меди.

Литературные данные по влиянию кислорода на образование трещин в швах при сварке меди противоречивы.

Опытным путем установлено, что с увеличением содержания кислорода в меди склонность ее к образованию и распространению кристаллизационных трещин в швах сначала резко возрастает, а затем снижается, и при содержании кислорода  $>0,06-0,08$  % трещины в швах практически отсутствовали. Положительное влияние кислорода можно объяснить тем, что кислород связывает вредные примеси в окислы и снижает их поверхностную активность и тем самым нейтрализует их вредное

влияние. При практическом использования этого явления необходимо, однако, учитывать отрицательное влияние кислорода на механические свойства сварных соединений.

Было изучено также влияние хрома на свариваемость меди. Показано, что с увеличением содержания хрома в меди в исследованных пределах (0,3-1,3 %) стойкость швов против образования и распространения трещин возрастает. Это, по-видимому, связано с увеличением эвтектической составляющей на последних этапах кристаллизации и с уменьшением относительной концентрации вредных примесей по границам кристаллитов. Оптимальное содержание хрома в швах должно быть в пределах 0,6-1,0 %.

Сравнительная оценка свариваемости различных марок хромовой бронзы показала (таблица 1), что хромовая бронза марка Бр.Х08 обладает наибольшей сопротивляемостью возникновению и распространению трещин.

Таблица 1 – Критическая скорость сварки

Марка сплава	Химический состав, %				Сумма примесей (по ТУ)	Критическая скорость сварки, м/ч
	Си	Сг	Ni	Ti		
Бр.Х08	Осн.	0,66	-		0,2	32
Бр.Х	То же	0,50	-	-	0,5	8
Сплав № 1	То же	0,40	0,7	0,02	0,2	17
<b>Примечание:</b> Сварка выполнялась на режиме: $I_{д}=300$ А, $U_{д}=13$ В						

Полученные результаты подтверждаются многолетним практическим опытом применения хромовой бронзы Бр.Х08 в качестве конструкционного материала при изготовлении сварных изделий ответственного назначения.

#### 1.4 Влияние примесей и ряда легирующих элементов на образование трещин при сварке меди

В связи с недостаточной изученностью вопросов свариваемости меди актуальным является исследование влияния примесей и легирующих добавок на склонность к образованию кристаллизационных трещин при сварке. Как показывает анализ литературных данных, свариваемость меди и ее сплавов оценивалась с использованием малочувствительных и металлоемких технологических проб: тавровой или наплавки на пластину. В результате этих исследований установленные критические концентрации примесей являются завышенными.

Оценка ряда существующих технологических проб показывает, что наиболее чувствительной является проба типа ЛТП. Методика оценки свариваемости с помощью этой пробы основана на изменении деформации формоизменения (внешней деформации) для различной жесткости (ширины) образцов. Критерием стойкости швов против образования трещин служит ширина образца — чем меньше ширина образца, при которой отсутствуют трещины в шве, тем выше стойкость против образования трещин. Эта методика опробована при оценке свариваемости ряда марок технической меди. Одновременно с фиксацией наличия трещин определялся также показатель  $K_{тр}$ :

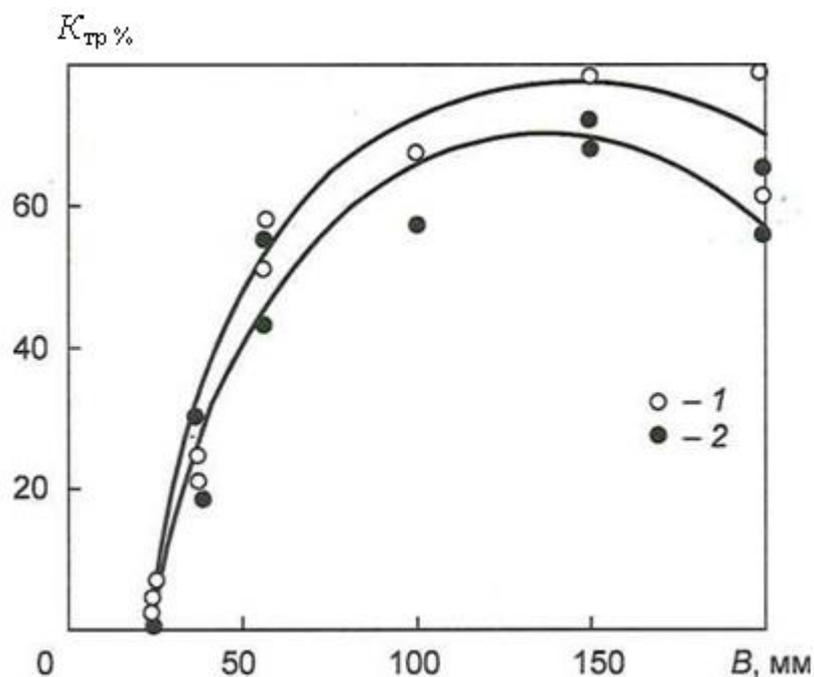
$$K_{тр} = I_{тр} / I_{шва} \times 100\%$$

где  $I_{тр}$  — длина трещины;  $I_{шва}$  — длина шва.

В сварочной и металлургической литературе величины  $K_{тр}$  и  $I_{тр}$  используют в качестве критерия склонности сплава к образованию трещин. На наш взгляд, более правильным считать, что величины  $K_{тр}$  и  $I_{тр}$  определяют склонность сплава к распространению трещин.

Как видно из приведенных на рисунке 1 результатов испытаний, склонность к образованию и распространению трещин с увеличением

ширины образцов увеличивается. Трещины появились во всем исследуемом диапазоне режимов сварки при ширине образцов более 25 мм, поэтому использовать эту методику для оценки свариваемости меди нецелесообразно.



1 -  $V_{св} = 6$  м/ч; 2 -  $V_{св} = 4$  м/ч

Рисунок 1 - Влияние ширины образца на стойкость швов против трещинообразования (медь марки М1 р,  $I_{св} = 200$  А)

В то же время, как показали опыты, при ширине образца, равной 25 мм, с уменьшением скорости сварки до определенной величины трещины в шве не образуются.

Таким образом, сваривая образцы постоянной ширины малых размеров (рисунок 2) на одинаковом токе и напряжении, но при различных скоростях сварки, обеспечивающих полное проплавление образца, можно оценивать склонность металла к образованию трещин по критической (минимальной) скорости сварки, выше которой в шве появляются трещины. Чем больше эта скорость, тем выше стойкость металла против образования

трещин. Определяя одновременно показатель  $K_{тр}$  можно оценивать и склонность металла к распространению трещин.

Преимуществом разработанной методики оценки меди и ее сплавов к образованию и распространению трещин в швах является высокая чувствительность и неметаллоемкость выбранной технологической пробы.

Для проведения исследований по оценке влияния вредных примесей и легирующих элементов (добавок) в вакуумной индукционной печи были выплавлены слитки опытных плавок с различным содержанием исследуемых элементов.

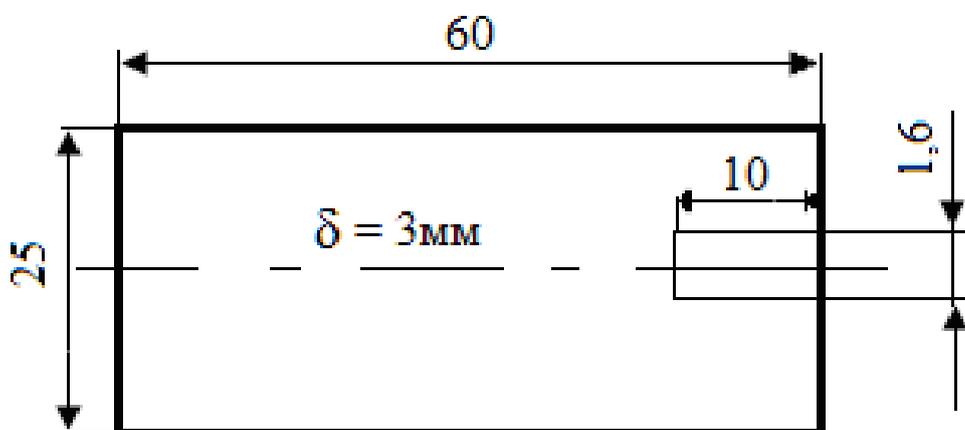


Рисунок 2 - Схема образца типа ЛТП для оценки свариваемости меди

В качестве исходного материала использовалась катодная медь марки М00. Выплавленные слитки прокатывались на полосы толщиной 3 мм, из которых вырезались образцы типа ЛТПМ. Было изучено влияние на свариваемость меди примесей, обычно содержащихся в ее промышленных марках и регламентированных ГОСТ 859-78, и дополнительно Se и Te, которые встречаются в полуфабрикатах, выпускаемых некоторыми медеплавильными заводами. Концентрации исследуемых примесей составляли (вес. %): Sb, As, S, P — от 0,005 до 0,05; [O] — от 0,005 до 0,1; Bi, Pb, Te — от 0,001 до 0,01; Se — от 0,0005 до 0,005. Учитывая высокую склонность меди к образованию трещин в широком диапазоне скоростей

сварки, оценку свариваемости производили по показателю  $K_{тр}$  при определенной величине  $v_{CB}$ .

Проведенные исследования показали, что по характеру влияния на образование трещин примеси могут быть разделены на три группы (рисунок 3).

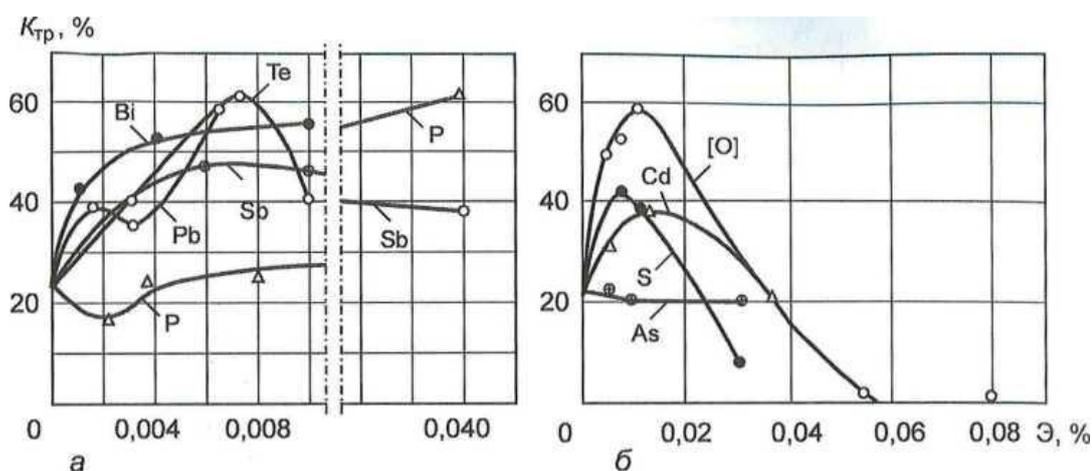


Рисунок 3 - Влияние примесей на свариваемость меди

1. Примеси, повышающие склонность к образованию и распространению трещин при сварке, — Bi, Te, Se, P, Pb, Sb. Указанные примеси, кроме фосфора, оказывают вредное влияние на свариваемость меди при их концентрациях в тысячных и даже десятитысячных долях процента. Существенное влияние фосфора проявляется при его содержании в меди более 0,01 %.

2. Примеси, оказывающие в зависимости от концентрации переменное влияние на образование и распространение трещин: при малых концентрациях (~ до 0,01%) они увеличивают склонность к образованию и распространению трещин, а при больших — уменьшают. Такими примесями являются [O], S, Cd.

Примеси, практически не влияющие на образование трещин (в исследуемых концентрациях), — As.

Наибольшее влияние из первой группы оказывают висмут и теллур. Свинец начинает существенно влиять только при больших скоростях сварки ( $\geq 14$  м/ч), а при введении его в медь, раскисленную фосфором, он даже уменьшает склонность к образованию и распространению трещин.

Наиболее типичные представители второй группы — кислород и сера, оказывающие сильное как отрицательное, так и положительное влияние. Практическое использование положительного эффекта невозможно, так как, во-первых, кислород при содержании его в меди более 0,01 % снижает механические свойства сварного соединения, во-вторых, кислород и сера увеличивают пористость сварных швов.

Вредное действие этих примесей обусловлено их общими физико-механическими свойствами: ограниченной растворимостью в меди, образованием легкоплавких эвтектик, поверхностной активностью по отношению к меди. Поэтому механизм влияния вредных примесей на склонность к образованию трещин, на наш взгляд, связан с проявлением эффекта адсорбционного понижения пластичности и прочности.

Анализ результатов проведенных исследований и химического состава различных марок меди, выпускаемых отечественной промышленностью, показывает, что причиной образования трещин при сварке меди марки МОб может быть наличие в металле примесей — Bi, Pb, S; для меди марки М1 — Bi, Pb, S [O]; для меди марки М1р — Bi, Pb, S, P; для остальных марок — любая из исследованных примесей. Наиболее приемлемым конструкционным материалом для сварных изделий является медь марки М1 с содержанием кислорода  $< 0,01$  %. Кроме примесей было исследовано влияние на сопротивляемость меди образованию кристаллизационных трещин легирующих добавок (при содержании их в основном до 0,6 %). По характеру влияния на образование трещин их можно разделить на следующие группы:

1) элементы, уменьшающие склонность швов против образования и распространения трещин — Cr, Nb, Y, в меньшей степени — Ti, Mn, V, Si;

2) элементы, практически не влияющие на образование, но уменьшающие склонность к распространению трещин, — Fe, Ni, Co, Al, Zn;

3) элементы, оказывающие переменное влияние на образование трещин в зависимости от концентрации и скорости сварки, — B, Zr, Mg.

Такое действие легирующих добавок, связано с влиянием их на характер кристаллизации и различной раскисляющей способностью по отношению к меди.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке специальных марок хорошо свариваемой меди, а также при создании новых сварочных материалов — присадочных проволок, покрытых электродами

## **2. Сварка под флюсом меди и ее сплавов металлическим электродом**

Медь и сплавы на медной основе широко применяются в промышленности для изготовления различного оборудования и аппаратуры, к которым предъявляется требование высокой коррозионной стойкости. Кроме того, медь широко используется в электропромышленности. Для изготовления конструкций из меди применяются различные способы сварки.

Способ сварки меди медным электродом под слоем порошкообразных веществ, защищающих дугу и место сварки от воздуха. В настоящее время сварка меди и ее сплавов производится преимущественно ацетиленокислородным пламенем. В значительно меньшем объеме применяются другие способы сварки: электродуговая в среде инертного газа; электродуговая угольным электродом; автоматическая угольным электродом под флюсом; электродуговая металлическим электродом и пайка [2-7].

Медь принадлежит к трудносвариваемым металлам ввиду следующих причин:

а) теплопроводность ее более чем в 6 раз превышает теплопроводность железа, а коэффициент теплового расширения на 30—40 % выше соответствующего коэффициента для стали; эти свойства обуславливают значительные напряжения и деформации в процессе сварки меди и склонность сварных швов к образованию горячих трещин.

б) медь в жидком состоянии активно соединяется с кислородом, резко снижаются ее пластические свойства;

в) воздействие водорода на кислородсодержащую медь обуславливает «водородную болезнь» и служит причиной появления дефектов[4-6].

Вследствие высокой теплопроводности меди для ее сварки наиболее целесообразно применять концентрированные источники тепла большой мощности. Этому условию в наибольшей степени удовлетворяет сварка под флюсом металлическим электродом. Флюс к тому же хорошо защищает

кромки изделия и металл сварочной ванны от окисления воздухом.

При автоматической сварке меди под флюсом угольным электродом могут применяться флюсы предназначенные для сварки стали [6]. С целью выбора флюса наиболее пригодного для сварки меди металлическим электродом, были испробованы флюсы, используемые при сварке стали. Испытывались флюсы марок АН -348, АН -348-А и ОСЦ -45 (высококремнистые марганцевые), АН-5 (высококремнистый безмарганцевый). АН -10 и АН-51 (низкокремнистые марганцевые) и АН-20 (низкокремнистый безмарганцевый). Таким образом. Были проверены почти все типы флюсов, применяемые для электродуговой сварки стали. Химический состав их приводим в таблице 2.

Испытание заключалось в сварке швов на меди медной электродной проволокой . В качестве основного металла применялась листовая медь марки МЗ, толщиной 5 и 10 мм, содержащая 99,84 % Cu и 0.01-0,02 % P. Употреблялась электродная проволока марки М1. Сварка проводилась на постоянном токе обратной полярности. Фиксировались: устойчивость процесса сварки характер формирования швов, наличие в них дефектов, структура металла шва и характер отделимости шлака.

Устойчивость процесса при сварке под исследованными флюсами была вполне удовлетворительной.

Формирование швов зависит от стабилизирующих свойств, флюса. С ухудшением этих свойств, швы становятся уже и выше. Вообще при сварке меди под флюсом металлическим электродом (при равных условиях) швы образуются более высокие и узкие, чем при сварке стали. Это, по-видимому, связано с большей теплопроводностью меди и более высоким коэффициентом плавления электродной проволоки.

Коэффициент плавления проволоки зависит от состава флюс. Так при сварке под флюсом АН-5, обладающим хорошими стабилизирующими свойствами, коэффициент плавления медной электродной проволоки

равнялся 20,3 г/Ач. При сварке в тех же условиях под флюсом АН-348-А с удовлетворительными стабилизирующими свойствами коэффициент плавления электродной проволоки составлял 22,5 г/Ач.

Таблица 2-Химический состав флюсов

Марка флюса	Химический состав, %								
	SiO	MnO	MgO	CaO	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O
АН-348	42,3	35,0	0,5	10,3	0,9	3,2	-	6,8	1,0
АН-348-А	43,5	37,9	4,9	4,8	1,5	3,0	-	4,4	-
ОСЦ-45	43,5	40,8	-	4,7	1,1	3,4	-	6,5	-
АН-5	47,0	-	-	31,6	0,6	2,7	-	5,0	-
АН-10	21,0	29,9	-	6,9	0,7	17,6	-	20,0	-
АН-51	33,4	6,0	15,0	13,2	1,0	22,6	1,5	7,1	-



Рисунок 4 - Вид шва на меди, выполненного под флюсом медной электродной проволокой

Поверхность швов, сваренных под исследованными флюсами, имела крупные чешуйки. На рисунке 4 показана поверхность шва, выполненного на меди под флюсом АН-348-А. Наличие чешуек на поверхности медных швов показывает, что эти флюсы не мешали свободному отложению металла

сварочной ванны в шов. Вместе с тем температура плавления меди на 450° ниже температуры плавления стали и несколько ниже условной температуры плавления флюсов исследованных марок. Под условной температурой плавления флюсов подразумевается температура, при которой крупинки флюса начинают растекаться. Вязкость флюса при условной температуре его плавления близка к 40 пуазам. Ниже подана условная температура плавления ряда флюсов, определенная с помощью микропечи конструкции Института черной металлургии (таблица 3).

Таблица 3 – Условная температура плавления флюса

<b>Марка флюса</b>	<b>Условная температура плавления флюса, °С</b>
АН-348	1120
АН-348-А	1180-1190
ОСЦ-45	1200
АН-5	1240
АН-10	1150
АН-51	1250
АН-10	1050

Таким образом, сварка меди возможна под флюсами, условная температура плавления которых на 100-150° выше температуры плавления самой меди. При сварке стали шлак не дает возможности нормально формироваться шву даже в том случае, когда условная температура плавления равна температуре плавления стали [8] Эта разница, по-видимому, объясняется тем, что при сварке меди металл сварочной ванны вследствие интенсивного теплоотвода в массу изделия затвердевает прежде, чем шлак

успеет приобрести достаточно большую вязкость.

Пористость швов — в условиях, благоприятствующих образованию пор, — зависит от состава флюса. Наибольшая пористость наблюдалась, при сварке под флюсом АН-5. Меньше пор было при сварке под флюсами АН-20 АН-51 и АН-10 и совсем мало — при флюсах АН-348, АН-348-А и ОСЦ-45. Поры редко выходят наружу и обычно выявляются лишь при рентгенографировании. Расположение пор и их характер в швах сваренных на меди, отличаются от таковых для швов на стали. Поры в швах на меди, выполненных под флюсом медной электродной проволокой, разбросаны по всему сечению шва.

Отделимость шпака от шва при сварке под большинством исследованных флюсов была вполне удовлетворительной. Исключения составляет флюс АН-51, где шлак прочно удерживался на поверхности шва.

При сварке под исследованными флюсами металл шва, как правило, имел крупностолбчатую структуру. Состав флюса не оказывал заметного влияния на характер кристаллизации металла шва.

Таким образом, для сварки меди медным электродом пригодны флюсы всех типов, применяемых в настоящее время для сварки стали.

Предупреждение пористости сварных швов. Пористость сварных швов на меди, так же, как и на стали, может вызываться выделением газов из металла сварочной ванны в процессе ее кристаллизации. Из обычных газов в жидкой меди растворимы водород и кислород. Азот в меди нерастворим, поэтому он используется в качестве защитного газа при азотодуговой сварке [3]. Ввиду наличия химического сродства кислорода к меди и к ряду компонентов медных сплавов (алюминию, кремнию и др.), кислород растворяется в жидкой меди и ее сплавах с образованием окислов. При затвердевании металла эти окислы выделяются в виде твердых включений. Поэтому при затвердевании меди газообразный кислород не образуется [10. 11],

Растворимость водорода в меди резко падает при ее затвердевании. Разница растворимости водорода в жидкой и твердой меди большая, чем в железе. Таким образом, выделение при кристаллизации растворенного в жидкой меди водорода может явиться причиной пористости шва.

Для кислородсодержащей меди причиной пористости может быть также выделение паров воды.

Растворимость водорода в жидкой меди зависит от содержания в ней примесей других элементов. Так, алюминий уменьшает растворимость водорода [12], поэтому добавка к меди алюминия должна уменьшать пористость швов. Н. А. Ольшанский [6] указывает, что пористость швов на меди уменьшается при введении в сварочную ванну Zn.

В опытах по устранению пористости шва при сварке меди под флюсом мы вводили в сварочную ванну алюминий, марганец, кремний и цинк с присадочным материалом, укладываемым в канавки простроганные на пластине листовой меди толщиной 10 мм. Цинк в сварочную ванну вводился с латунной жостью марки Л-62, алюминий в виде алюминиевой проволоки диаметром 2,0 и 2,8 мм марганец и кремний в виде порошков. Сварка проводилась медной электродной проволокой диаметром 2 мм под флюсами АН-348-А и АН-20, на постоянном токе обратной полярности. Режим сварки был таков: ток – 350 - 400 А, напряжение дуги – 25 - 35 В, скорость сварки – 17 м/ч. При этих условиях на медную пластину направлялся валик шириною 10 – 14 мм с высотой усиления до 5 мм и глубиной провара 3 – 5 мм. Для выявления дефектов полученные наплавки подвергались наружному осмотру и рентгеновскому просвечиванию.



Рисунок 5- Вид шва на меди, выполненного под флюсом медной электродной проволокой

В результате опытов установлено следующее:

а) алюминий, кремний и цинк уменьшают пористость сварных швов; при введении в сварочную ванну алюминия остается лишь небольшое количество пор у поверхности шва, а при введении достаточно большого количества цинка (до 5 % от веса металла швов) пористость последних вовсе устраняется;

б) марганец увеличивает пористость швов.

На рисунке 5 показана рентгенограмма шва на меди, выполненного под флюсом с введением марганца. Видно большое количество пор расположенных вдоль оси столбчатых кристаллов.

Уменьшение пористости швов на меди при введении в сварочную ванну цинка Н А Ольшанский [6] объясняет раскисляющим действием цинка на жидкую медь. Это объяснение кажется несостоятельным. Чтобы судить о силе раскисляющего действия цинка, сравним его с раскисляющим действием других элементов. Данные о теплоте образования различных окислов [13] таковы:

Таблица 4– Теплота образования

<b>Окислы</b>	<b>Теплота образования, ккал/моль</b>
CuO	37.5
Cu <sub>2</sub> O	40.6
FeO	64.6
ZnO	83.4
MnO	93.1
SiO <sub>2</sub>	206.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	402.9

Как следует из этих данных, ввиду малого сродства меди к кислороду, алюминий, кремний, марганец, цинк и даже железо являются по отношению к меди раскислителями. Вместе с тем введение в сварочную ванну марганца, хотя он и обладает более значительным сродством к кислороду, чем цинк, не только не устраняет, но даже несколько увеличивает пористость швов на меди. Поэтому уменьшение пористости швов при введении в медную сварочную ванну цинка не может быть объяснено его раскисляющим действием. Более правильно, связывать указанное влияние цинка с уменьшением содержания водорода в металле ванны. Это уменьшение может быть вызвано как удалением водорода вместе с парами цинка, так и уменьшением его растворимости в жидкой меди.

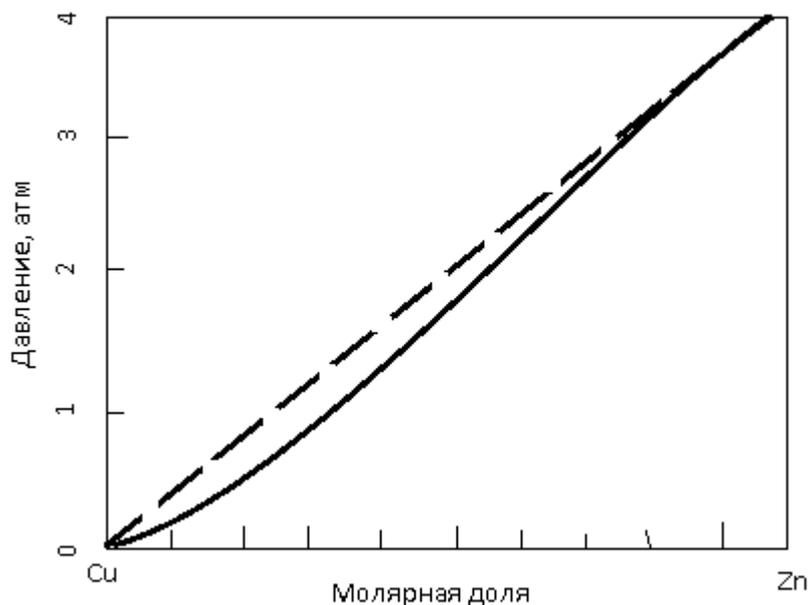


Рисунок 6 – Давление паров цинка над жидким сплавом медь – цинк при 1065 °C

О влиянии добавки цинка на растворимость водорода в жидкой меди мы данных не имеем; что же касается испарения, то известно, что цинк интенсивно испаряется из жидкой латуни. Температура кипения жидкого цинка равна 907 °C. Давление паров цинка над жидким медно-цинковым расплавом показано на рисунке 6 [14]. Из рисунка видно, что давление это пропорционально молярной доле цинка в расплаве. При содержании цинка в медно-цинковом расплаве 40 % давление паров его над расплавом при 1065 °C равно 1 ат. В результате испарения цинка из металла сварочной ванны создается газовая защита металла от водорода, и тот же испаряющийся цинк увлекает с собой водород, растворенный в сварочной ванне.

Испаряющийся в процессе сварки цинк может попадать в окружающую атмосферу и окисляться до ZnO. Окись цинка вредна для здоровья. Согласно ГОСТ 1324-47 максимально допустимая концентрация окиси цинка в воздухе рабочего помещения – 0,005 мг/л. Поэтому сварка латуни открытой дугой не допустима. При сварке под флюсом дым окиси цинка оседает на зернах флюса и обычно не попадает в атмосферу. Это является

существенным преимуществом сварки под флюсом, позволяющим использовать цинк в качестве добавки для уменьшения пористости. Цинк в сварочную ванну может попадать с основным металлом (при сварке латуни), с присадкой или электродной проволокой. В качестве последней применяли латунную проволоку марки ЛС-59-1 и медную оцинкованную. Сварка латунной проволокой шла бурно - из-под слоя флюса выбивалась струя газов; по их белому цвету можно было заключить о высоком содержании в них окислов цинка. При сварке латунной проволокой не удалось получить нормально сформированных швов. Плохое формирование швов, обуславливалось бурным испарением цинка из расплавляющейся проволоки и металла сварочной ванны. Улучшение формирования в таком случае может быть достигнуто путем уменьшения содержания цинка в проволоке, например, применением томпаковой или полутомпаковой проволоки, содержащей 10 - 20 % цинка.

Для введения цинка в сварочную ванну можно применять медную оцинкованную проволоку. При этом количество вводимого в зону сварки цинка может регулироваться за счет толщины оцинковки. В опытах применялась оцинкованная медная проволока диаметром 2 мм с толщиной поверхностного слоя цинка от 0,02 до 0,1 мм . Сварка проводилась на постоянном токе обратной полярности под флюсам АН-348-А. Было установлено, что в результате применения медной оцинкованной проволоки устраняются поры и улучшается формирование шва при условии, если слой цинка составляет не меньше 15 % общего сечения проволоки. Недостатком такой проволоки является малая прочность толстого слоя цинка на ее поверхности и необходимость в дополнительной операции — оцинковке.

Пористость швов на меди, как уже указывалось выше, в некоторой степени зависит от состава флюса. Наименьшая пористость наблюдалась при сварке под флюсами АН-348, АН-348-А и ОСЦ-45, как это бывает и при сварке стали. Отсюда можно заключить, что при сварке меди под флюсом

металлическим электродом в атмосфере дуги имеют место реакции связывания водорода фтором в соединении, не растворимые в жидкой меди. Меры, повышающие содержание  $\text{SiF}_4$  в атмосфере дуги, должны поэтому уменьшать пористость швов на меди. Одной из таких мер является повышение содержания кремния в электродной проволоке. Для этой цели мы воспользовались проволокой марки КМц-3-1, содержащей около 3% кремния и около 1 % марганца, остальное – медь. Применялась проволока диаметром 2 мм. Сварка проводилась под флюсом АН-348-А на постоянном токе обратной полярности. Режим сварки и основной металл применялись те же, что и в предыдущих опытах. При этом были получены плотные, хорошо сформированные наплавки. Металл шва, сваренного проволокой марки КМц-3-1 на меди, содержал 0,94% Si, 1,33% Mn и 0,02% P, остальное – медь.

Применение проволоки марки КМц – 3-1 заметно усилило выделение фтористого кремния в процессе сварки по сравнению со сваркой медной проволокой в тех же условиях. Это было связано с взаимодействием кремния содержащегося в проволоке с соединениями фтора, испаряющимися в процессе сварки из флюса. Устранение пористости в наплавке, в некоторой степени было связано с действием кремния, уменьшающего растворимость водорода в жидкой меди. Но полезный эффект применения проволоки КМц-3-1 этим полностью объяснить нельзя, так как повышение содержания кремния в металле наплавки до 2-2,5 % путем введения присадки кремния не устраняло пористости, доведение же содержания кремния в металле шва до 0,94 % за счет применения проволоки марки КМц-3-1 устраняло ее полностью. При этом следует еще учитывать наличие в металле шва 1,33 % марганца, повышающего пористость швов на меди.

В описанных выше опытах по выбору состава флюса производились наплавки на медные пластины медной электродной проволокой. Все полученные наплавки имели поры, преимущественно располагавшиеся в начале шва, где происходил наиболее интенсивный теплоотвод в массу

изделия. Следует подчеркнуть, что опытные сварки производились под высушенным флюсом, при чистых поверхностях основного металла и электродной проволоки, на умеренном режиме сварки. При этих условиях швы на стали пор не имели. Более значительная пористость швов на меди, по-видимому, обуславливается следующими обстоятельствами: а) большей скоростью остывания металла сварочной ванны, в следствии высокой теплопроводности меди; б) большой разницей растворимости водорода в жидкой и твердой меди; в) отсутствием при сварке меди медной электродной проволокой кипение сварочной ванны способствующей удалению водорода из жидкого металла.

Одним из возможных путей устранения пористости сварных швов является создание условий, облегчающих выделение газа из металла сварочной ванны и затрудняющих зарождение пор в кристаллизующемся металле шва. Облегчение выделение газов из металла сварочной ванны может быть достигнуто за счет предварительного подогрева свариваемых изделий. Предварительный подогрев медных изделий приводит к уменьшению пористости сварных швов. Уменьшение скорости сварки так же благоприятно сказывалось на уменьшении пористости. Однако указанные два пути устранения пористости нежелательны, так как применение предварительного подогрева лишает сварку под флюсом одного из основных его преимуществ по сравнению с ацетиленокислородной сваркой, а уменьшение скорости сварки снижает производительность и увеличивает опасность образования горячих трещин.



Рисунок 7- Характер кристаллизации металла шва на меди, затрудняющий образование пор.

Надежное устранение пористости швов на меди при сварке под флюсом может быть достигнуто за счет сквозного проплавления свариваемого металла. При этом зарождение пор в кристаллизующемся металле затрудняется, так как металл шва кристаллизуется с двух сторон, как это видно на рисунке 7.

В заключение можно указать, что для большинства возможных случаев надежное устранение пористости сварных швов на меди, выполненных под флюсом металлическим электродом, может быть достигнуто за счет сварки швов со сквозным проваром. В тех же случаях, когда этот путь невозможен, следует в ванну вводить цинк с основным металлом, с электродной проволокой или с присадкой.

Предупреждение образования трещин. Основной причиной образования горячих трещин в швах на меди, по-видимому, является наличие жидких прослоек между кристаллитами в момент возникновения растягивающих напряжений. На рисунке 8 показан макрошлиф стыкового шва на меди с горячей трещиной, проходящей по стыку кристаллитов.

Наличие жидких прослоек между растущими кристаллитами зависит от содержания в металле примесей других элементов и от характера образуемых этими примесями соединений. Опасной в отношении образования горячих трещин является примесь кислорода. Окись меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  дает эвтектику с медью, отвечающую содержанию 3,4%  $\text{Cu}_2\text{O}$  или 0,38% кислорода.



Рисунок 8- Макрошлиф стыкового шва с горячей трещиной

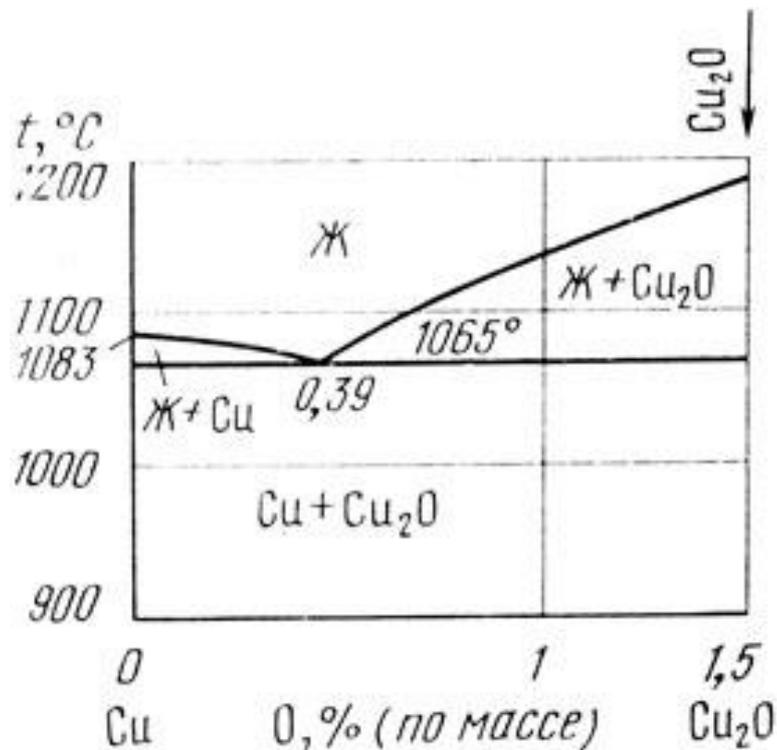


Рисунок 9- Диаграмма состояния системы медь-кислород.

На рисунке 9 показан левый угол диаграммы состояния системы медь - кислород. Температура плавления эвтектики этих элементов равна 1065°. Эвтектика (Cu+Cu<sub>2</sub>O) затвердевает позже основного металла, залегает по границам зерен и имеет меньшую прочность, чем медь.

Значительную опасность образования горячих трещин в швах на меди

вызывает кремний, как это можно видеть из левого угла диаграммы состояния системы медь-кремний (рисунок 10). При небольших содержаниях кремния в медно-кремнистом сплаве последний является однофазным, однако расстояние между линиями ликвидуса и солидуса здесь велико, а потому велика и ликвация в процессе кристаллизации сплава. На рисунке 11 изображена диаграмма состояния системы медь-цинк. Как следует из диаграммы, ввиду близости линий ликвидуса и солидуса при кристаллизации такого сплава ликвация не велика. Поэтому невелика и опасность образования горячих трещин вследствие ликвации цинка.

В опытах по сварке листовой меди было установлено, что склонность к образованию горячих трещин в металле шва возрастает с увеличением мощности дуги и с уменьшением скорости сверки. По-видимому, это связано с длительностью существования жидких межкристаллитных прослоек в процессе сварки. С увеличением времени их существования возрастает возможность возникновения горячих трещин. Таким образом, регулируя условия теплоотвода при сварке или изменяя режим сварки мы можем избежать образования в швах горячих трещин .

При сварке меди под флюсом возможно образование трещин на границе между основным металлом и швом. На рисунке 12 показан макрошлиф наплавки, выполненной под флюсом на меди медной электродной проволокой; видна трещина, проходящая по границе между наплавкой и основным металлом.

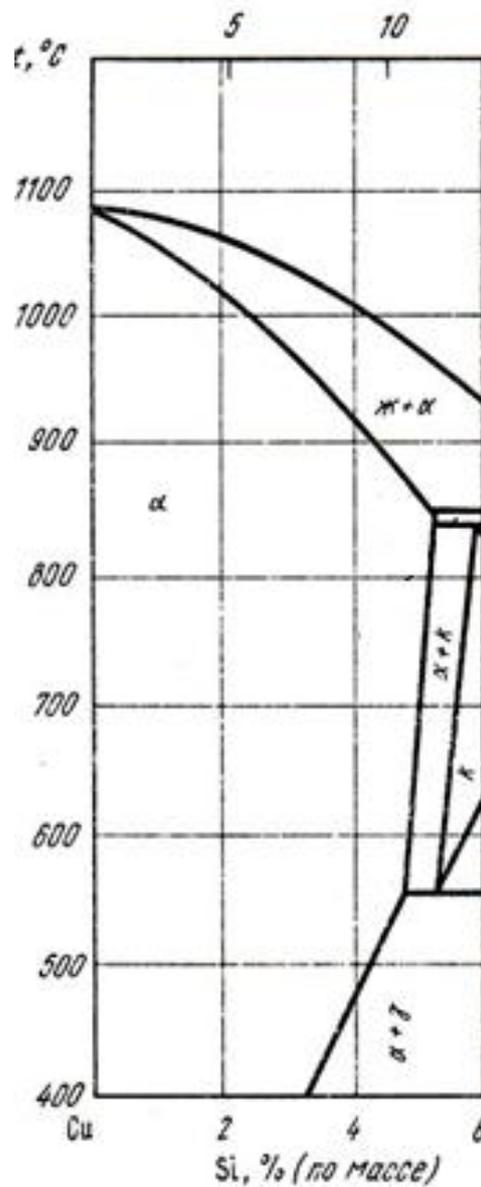


Рисунок 10- Диаграмма состояния системы медь-кремний

Склонность к образованию трещин на указанной границе возрастает при повышении в основном металле содержания кислорода. Такие трещины имели место при наплавке на медь, содержащую 0,082 и 0,039 % кислорода. При содержании кислорода в основном металле 0,009 и 0,0014 % трещин на границе с наплавкой не наблюдалось. Поэтому при сварке под флюсом следует в качестве основного металла применять хорошо раскисленную медь.

Сварка под флюсом изделий из меди и ее сплавов металлическим

электродом должна производиться на постоянном токе. Попытки применения переменного сварочного тока от источников с напряжением холостого хода 65 и 75 В дали отрицательные результаты вследствие неустойчивости процесса сварки. При выборе полярности сварочного тока мы стремились обеспечить выделение максимального количества тепла на изделии.

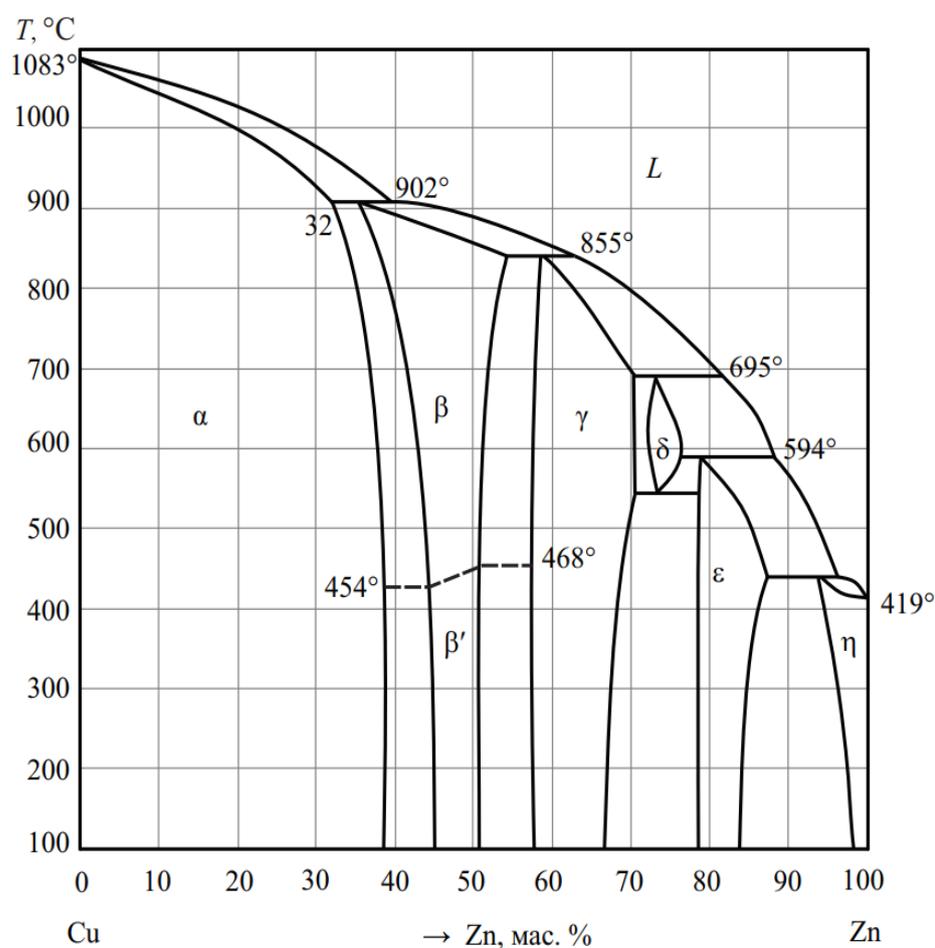


Рисунок 11- Диаграмма состояния системы медь-цинк.

В таблице 5 помещены данные о влиянии полярности на величину тока при сварке меди под флюсом. Сварка производилась шланговым полуавтоматом ПШ-5 медной электродной проволокой диаметром 2 мм под флюсом АН-348-А. Величина тока изменялась путем изменения скорости подачи электродной проволоки.

Как следует из таблицы 5, при равной скорости плавления элек-

тродной проволоки, т. е. при одинаковом количестве выделяющейся на ней тепловой энергии, величина тока при сварке на обратной полярности больше, чем при сварке на прямой, как это бывает и при сварке стали. Принимая равным количество энергии, выделяющейся в столбе дуги, приходим к выводу, что при сварке на обратной полярности на изделии выделяется больше тепла, чем при сварке на прямой.

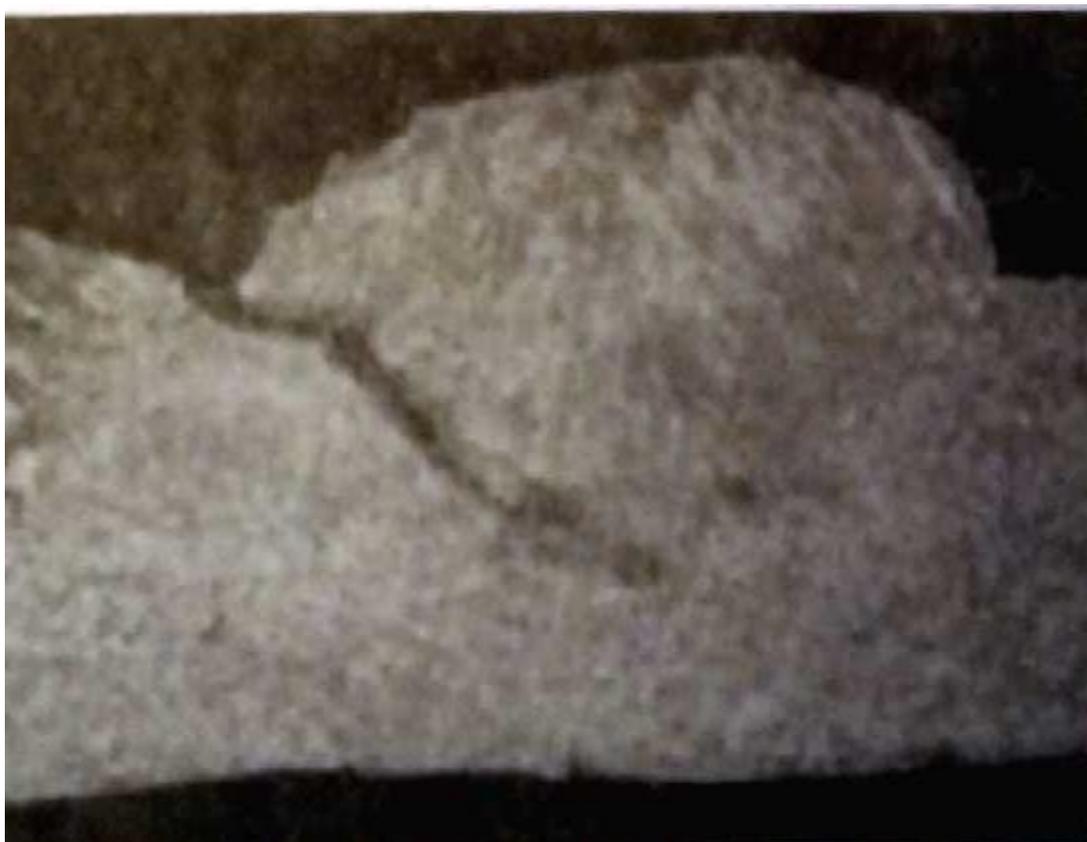


Рисунок 12. Макрошлиф наплавки на медь с трещиной, проходящей по границе между основным и наплавленным металлом.

Таблица 5 – Влияние полярности на величину тока при сварке меди под флюсом.

Скорость подачи проволоки, м/ч	Величина сварочного тока, А	
	прямая полярность	обратна полярность
126	150-180	150-200

Скорость подачи проволоки, м/ч	Величина сварочного тока, А	
	прямая полярность	обратна полярность
166	200-220	240-260
191	230-250	280-300
250	290-310	360-380
285	320-340	390-410
378	420-470	500-520

Учитывая большую теплопроводность меди, сварку ее под флюсом металлическим электродом следует вести на постоянном токе обратной полярности.

Возбуждение дуги при сварке медной электродной проволокой несколько затруднено в сравнении со сваркой стальной проволокой вследствие высокой теплопроводности меди. Поэтому для сварки медой электродной проволокой рекомендуется применять автоматы и полуавтоматы, реверсирующие подачу проволоки при коротком замыкании. В случае применения аппаратуры с постоянной скоростью подачи электродной проволоки, для надежного возбуждения дуги рекомендуется под конец проволоки подкладывать латунную стружку.

Для хорошего качества швов на меди необходимо, чтобы величина тепловой мощности дуги была вполне достаточной. Влияние тепловой мощности дуги на форму валика, наплавленного под флюсом, показано на рисунке 13. Показан поперечный макрошлиф четырех валиков, наплавленных под флюсом АН-348-А на медную пластину толщиной 10 мм. Наплавка производилась с одинаковой скоростью при одном и том же напряжении дуги. Повышением величины тока повышалась погонная энергия, затраченная на выполнение наплавки. Валик 1 наплавлен с затратой погонной энергии в 2160 ккал/м, валик 2 — 2580 ккал/м, валик 3 — 3350 ккал/м и 4 — 3500 ккал/м . С повышением затраты погонной энергии

формирование наплавки улучшается.



Рисунок 13 - Макрошлиф наплавки на медь, выполненных под флюсом.

Таблица 6 – Рекомендуемые режимы сварки стыковых швов листовой меди.

Толщина листов, мм	Диаметр проволоки, мм	Режим сварки		
		ток, А	напряжение дуги, В	скорость сварки, м/ч
2	1,4	140-160	32-35	25
3	2,0	190-210	32-35	20
4	2,0	250-280	30-35	25
5	2,0	300-340	30-35	25
6	2,0	330-350	30-35	25

Сваркой металлическим электродом под флюсом могут выполняться различные типы швов: стыковые, нахлесточные, угловые.

Сварку стыковых соединений рекомендуется производить за один проход со сквозным проваром. Для предупреждения протекания металла следует применять флюсовые подушки, графитовые или медные подкладки. Как правило, сварка производится без предварительного подогрева. Медные листы толщиной до 5-6 мм можно сваривать без подготовки кромок. При более толстых листах требуется V-образная подготовка кромок. Сварку

тонкого металла необходимо выполнять тонкой электродной проволокой. Рекомендуемые режимы сварки стыковых соединений медных листов без разделки кромок помещены в таблице 6. При этом должны применяться медная электродная проволока и флюс АН-348-А или ОСц-45.

Стыковые соединения медных листов большей толщины могут выполняться при автоматической сварке проволокой диаметром 4-6 мм или же при тонкой электродной проволоке шланговым полуавтоматом с поперечными колебаниями держателя. При этом требуется разделка кромок листов под углом около  $60^\circ$  без притупления. Так, например, листы меди толщиной 10 мм сваривались под флюсом АН-348-А проволокой диаметром 2 мм за один проход. Швы выполнялись шланговым полуавтоматом с поперечными колебаниями держателя полуавтомата. Режим сварки был следующий: ток около 300 А, напряжение дуги 30-35 В, скорость сварки около 10 м/ч.

Стыковые соединения толстых медных листов могут выполняться в вертикальном положении с принудительным формированием. На рисунке 14 показан макрошлиф стыкового соединения медных листов толщиной 14 мм, выполненного под флюсом методом принудительного формирования.

Нахлесточные соединения медных листов следует выполнять глубоким или сквозным проплавлением нижнего листа. На рисунке 15 показан макрошлиф нахлесточного соединения медных листов толщиной 5 мм, выполненного под флюсом без предварительного подогрева. Для предупреждения прожогов применяются флюсовые подушки или подкладки из графита или меди.



Рисунок 14. Макрошлиф стыкового соединения медных листов, выполненного под флюсом с принудительным формированием.



Рисунок 15. Макрошлиф нахлесточного соединения листов толщиной 5 мм, выполненного под флюсом.

Таблица 7 – Рекомендуемые режимы сварки нахлесточных соединений медных листов.

Толщина листов, мм	Диаметр проволоки, мм	Режим сварки		
		ток, А	напряжение дуги, В	скорость сварки, м/ч
3,0	2,0	220-240	30-35	25
4,5	2,0	300-340	30-35	25

Электрод при сварке следует направлять наклонно в угол между свариваемыми листами. В таблице 7 приведены рекомендуемые режимы сварки нахлесточных соединений медных листов медной электродной проволокой под флюсом АН-348-А.

### **3. Автоматическая сварка толстолистовой меди под флюсом**

#### **3.1 Технология автоматической сварки меди под флюсом плавящимся электродом**

Технология автоматической сварки меди под флюсом плавящимся электродом нашла практическое применение при изготовлении сварных конструкций из металла толщиной до 10-12 мм. По данным медь толщиной 20 мм нельзя сваривать под флюсом за один проход, так как в металле шва образуются трещины. Сварные соединения из толстолистовой меди могут быть выполнены под флюсом только многопроходной сваркой, причем следует тщательно подбирать режим сварки и соблюдать определенный порядок наложения швов во избежание шлаковых включений. Кроме того, в этом случае необходима очистка поверхности отдельных слоев от остатков шлаковой корки. Для швов, выполненных многопроходной сваркой под флюсом, характерна некоторая пористость и сравнительно низкая пластичность металла шва.

Одним из основных недостатков при сварке меди являются горячие трещины в металле шва. Стойкость металла шва против образования горячих трещин при автоматической сварке меди под флюсом зависит, в первую очередь, от содержания вредных примесей — висмута, свинца и кислорода. Из элементов, повышающих стойкость металла шва против образования трещин, рекомендуется применять хром, так как он незначительно снижает электро- и теплопроводность сварных соединений из меди.

Производственный опыт автоматической сварки меди под флюсом показал, что соединения без трещин и других дефектов получаются в случае применения в качестве основного и электродного металлов бескислородной меди марок МА, МБ (ЦМТУ 3302-53, 3303-53, 3304- 53) или МЗС (ТУ Ленинградского СНХ 25052-59). Можно также использовать хромистую или

техническую медь марок М0, М1, М2 и М3 (ГОСТ 859-41), если содержание кислорода в ней не превышает 0,01 %. Замечено, что склонность металла шва к образованию горячих трещин, независимо от содержания вредных примесей, существенно повышается с увеличением толщины свариваемого металла.

Целью настоящей работы являлось изыскание надежной производственной технологии автоматической сварки меди толщиной 28 мм под флюсом. В качестве основного металла и электроды проволоки применялась медь с содержанием 0,5 % Сг и М3 с 0,0С:- 0,01 % О<sub>2</sub> при одновременном содержании <0,002 % В<sub>і</sub> и <0,01 % F: Все опыты проводились на стандартном сварочном оборудовании. Исследования на металле толщиной 18-28 мм подтвердили, что при автоматической однопроходной сварке меди под флюсом стойкость металла шва против образования трещин, независимо с толщины свариваемого металла, зависит также от коэффициента формы шва. Стойкость против образования горячих трещин достаточная, когда коэффициент формы шва (отношение ширины шва к толщине свариваемого металла) больше 1,8+2,0 при неизменном химическом составе основного и электродного металлов. Разумеется, что коэффициент формы шва является внешней характеристикой факторов, влияющих на стойкость шва против образования трещин. Ширина шва для каждой определенной толщины металла зависит от технологии сварки. Из многолетнего опыта сварки сталей под флюсом известно, что для увеличения ширины шва используется: предварительный подогрев деталей, снижение скорости сварки, повышение напряжения дуги, увеличение диаметра электродной проволоки и др.

Предварительный подогрев, кроме усложнения технологического процесса изготовления сварных конструкций, вызывает окисление кромок свариваемых листов, причем полное удаление окислов перед сваркой

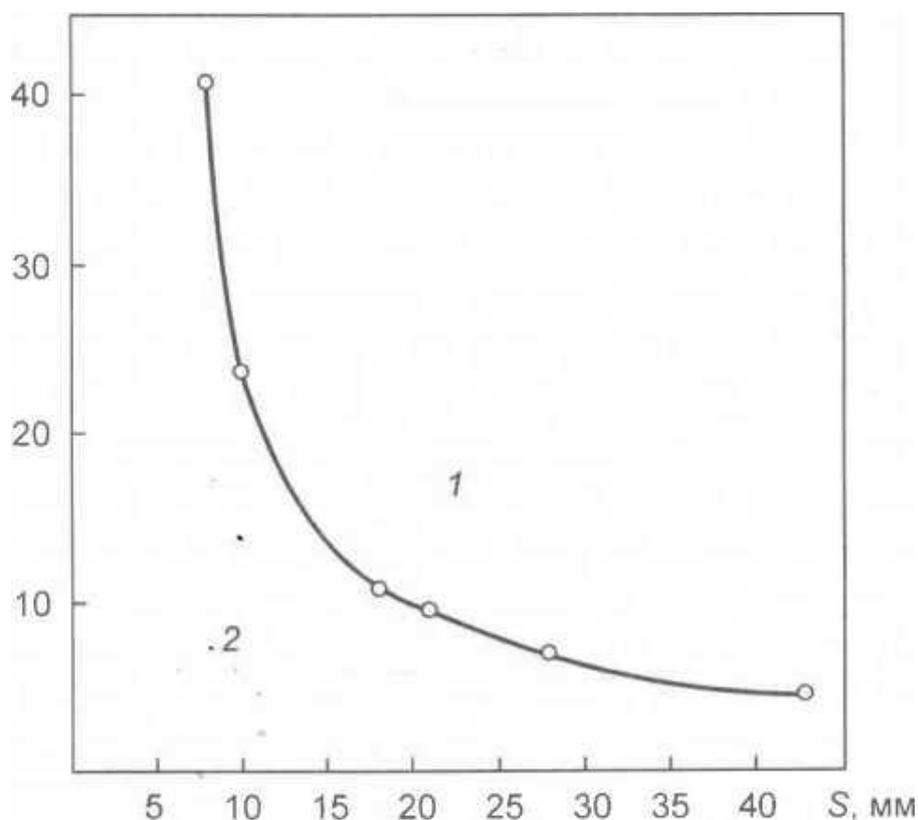
зачастую невозможно. По этой причине металл шва обогащается кислородом, что, в свою очередь, приводит к образованию трещин.

Опыты показали, что путем снижения скорости сварки можно увеличить ширину шва. Однако при чрезмерно низких скоростях ширина шва неравномерная. Механические свойства металла швов, сваренных на различных скоростях, изучались на стандартных образцах (диаметр 6 мм, ГОСТ 6996-54), вырезанных вдоль шва. Основным металлом служила медь марки МЗ толщиной 8 мм, электродным - проволока той же марки диаметром 4 мм, флюс АН-26. Образцы сваривались за один проход на флюсовой подушке того же состава всех случаях  $U = 37-38$  В,  $I_{св} = 450-600$  А,  $V_{св} = 16-40.5$  м/ч. Прочность металла шва остается постоянной в широком диапазоне изменений погонной энергии, в то время как высокая пластичность наблюдается только в случае малой погонной энергии, которая соответствует сварке на больших скоростях.

Для каждой толщины металла существует определенная максимальная возможная скорость сварки, при которой пластические свойства металла шва наивысшие и в то же время отсутствуют шлаковые включения (рисунок 16). При более высоких скоростях сварки на границе сплавления шов — основной металл обнаруживаются шлаковые включения (чем больше скорость сварки, тем крупнее включения). Характер расположения шлаковых включений при сварке меди под флюсом показан на рисунке 17. Подобные шлаковые включения, в отличие от так называемых несплавлений по краям шва обычно не выходят на поверхность.

На рисунке (рисунок 6) приведена зависимость ширины стыковых швов на меди толщиной 10 мм от напряжения дуги и диаметра электродной проволоки. Швы выполнены за один проход под флюсом АН-26 без разделки кромок листов. Во всех случаях  $I_{св} = 680-720$  А,  $V_{св} = 23$  м/ч. Из графика видно, что для каждого диаметра электродной проволоки существует

определенное напряжение, которому соответствует максимальная ширина шва. Дальнейшее повышение напряжения приводит к сужению шва, что, по-видимому, связано с уменьшением эффективного КПД дуги из-за шунтирования значительной доли тока расплавленным флюсом, количество которого пропорционально напряжению.



1 - есть шлаковые включения; 2 - нет шлаковых включений

Рисунок 16 - Зависимость максимально возможных скоростей сварки от толщины металла при автоматической однопроходной сварке меди под флюсом АН-26

Большой объем расплавленного флюса при автоматической сварке меди на высоких напряжениях способствует уменьшению тока, а следовательно, и количества теплоты, которая затрачивается на плавление основного металла. Так как прочие параметры режима выбраны таким образом, чтобы

обеспечить полный провар стыковых соединений, меньший ввод теплоты в свариваемые листы при очень высоких напряжениях приводит к уменьшению ширины шва. Возможно, что рост напряжения сопровождается некоторым сжатием дуги окружающим ее значительным объемом расплавленного шлака.

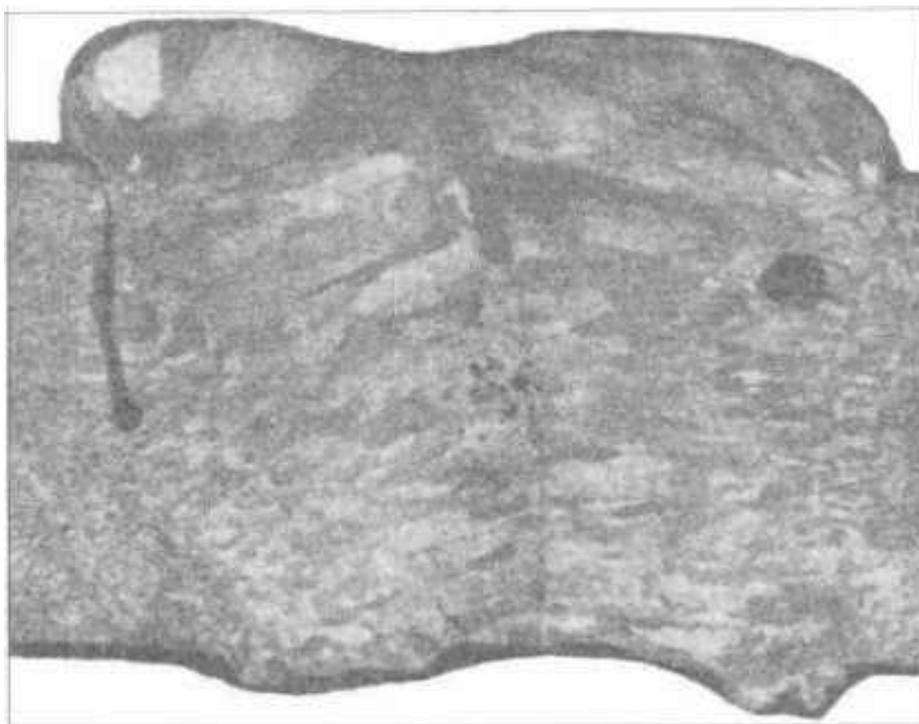
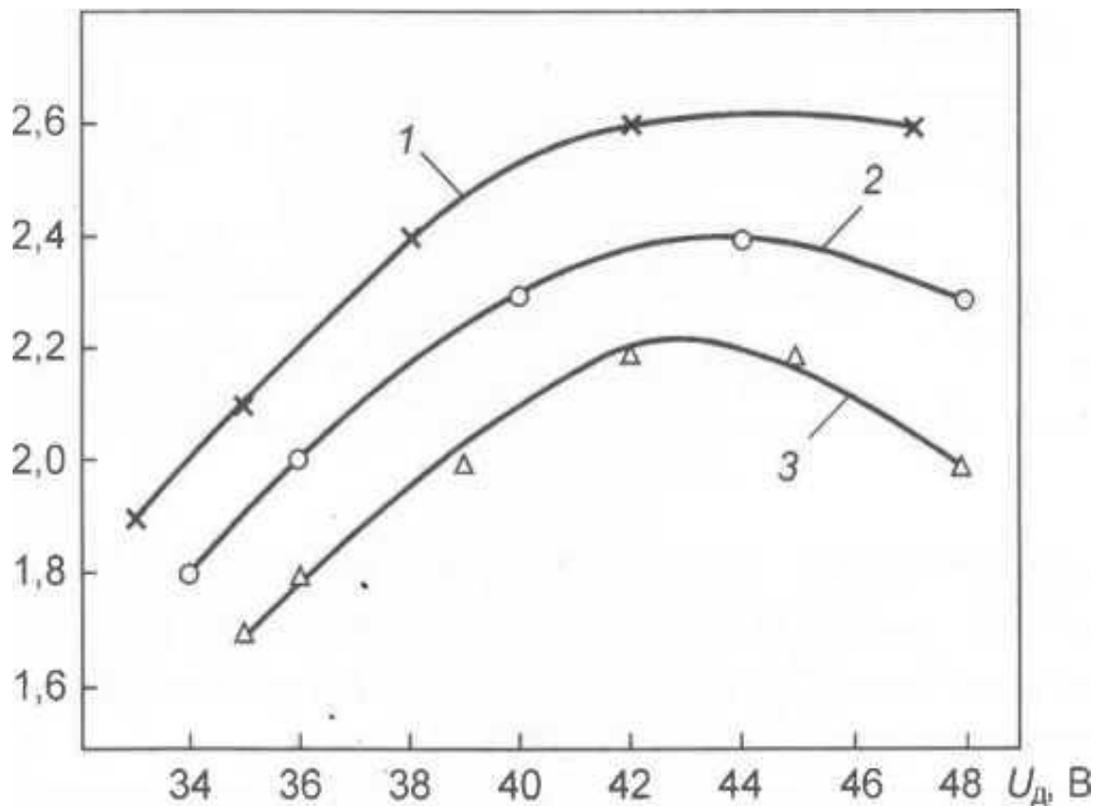


Рисунок 17 - Шлаковые включения в металле шва при автоматической сварке меди толщиной 28 мм под флюсом АН-26;  $V_{CB} = 13,5$  м/ч



1 -  $d_3 = 5$  мм; 2 -  $d_3 = 4$  мм; 3 -  $d_3 = 3$  мм

Рисунок 18 - Зависимость ширины шва от напряжения дуги и диаметра электродной проволоки при автоматической сварке меди толщиной 10 мм под флюсом АН-26

Это явление способствует некоторому уменьшению ширины шва. Из рисунка (рисунок 18) видно, что при прочих равных условиях с увеличением диаметра электродной проволоки ширина шва возрастает.

Лабораторные исследования и производственный опыт свидетельствуют о том, что медь толщиной до 12 мм можно сваривать под флюсом за один проход без разделки кромок электродной проволокой диаметром 5 мм. Для обеспечения хорошего формирования и достаточной ширины шва на более толстом металле при однопроходной сварке под флюсом проволоками указанных диаметров необходима V-образная разделка

кромки под углом  $90^\circ$ . Притупление выбирается в зависимости от толщины свариваемых листов и диаметра электродной проволоки.

На рисунке 19 показан макрошлиф сварного шва на меди толщиной 18 мм, выполненного под флюсом АН-26 на режиме:  $I_{св} = 980-1020$  А,  $U_R = 42-46$  В,  $V_{св} = 10,75$  м/ч, кромки разделялись под общим углом  $90^\circ$ , притупление 10 мм.



Рисунок 19- Макрошлиф сварного шва на меди толщиной 18 мм

Таблица 8 – Ориентировочные режимы автоматической сварки

Толщина металла, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Расстояние между электродами, мм	U, В	I <sub>св</sub> , А	V <sub>св</sub> , м/ч
18	4	18	42-46	1000-1050	10,75
21	4-5	18	44-48	1200-1250	9,25
28	5	24	46-50	1600-1650	6,75

Отклонение оси электрода от оси разделки кромок, несоблюдение точности геометрических размеров их разделки, а также неточность сборки приводит к несплавлениям, шлаковым включениям и другим дефектам.

Из производственного опыта автоматической сварки алюминия известно, что от ряда недостатков одноэлектродной сварки можно избавиться путем применения расщепленного электрода. В случае сварки расщепленным электродом диаметр электродной проволоки как бы искусственно увеличивается, в результате чего образуются достаточно широкие швы на толстом листовом металле. Стыковые соединения из меди толщиной 28 мм можно выполнять расщепленным электродом за один проход. В этом случае отпадает необходимость разделки кромок, что облегчает подготовку изделия к сварке. Хорошее формирование металла шва на меди толщиной 14-28 мм и достаточная стойкость против образования трещин достигается в результате правильного выбора расстояния между осями электродов и соответствующего диаметра электродной проволоки. Для указанных толщин можно использовать электродную проволоку диаметром 3-5 мм с расстоянием между электродами 12-24 мм.

Ориентировочные режимы автоматической сварки толстолистовой меди без скоса кромок расщепленным электродом под флюсом АН-26 приведены в таблице 8. Если применяется электродная проволока меньшего диаметра, расстояние между осями электродов должно быть увеличено.

Медь толщиной 14-28 мм в лабораторных и производственных условиях сваривалась универсальным автоматом АБС, в механизме перемещения которого двухзаходная червячная передача была заменена однозаходной. Это позволило получить минимальную скорость сварки 6,75 м/ч. Для обеспечения требуемого расстояния между электродами вместо обычных мундштуков был использован мундштук А-694 (рисунок 20), сконструированный инж. В.А. Смолярко. Производственные испытания

показали, что А-694 надежен в эксплуатации и пригоден для автоматической сварки толстолистовой меди под флюсом.

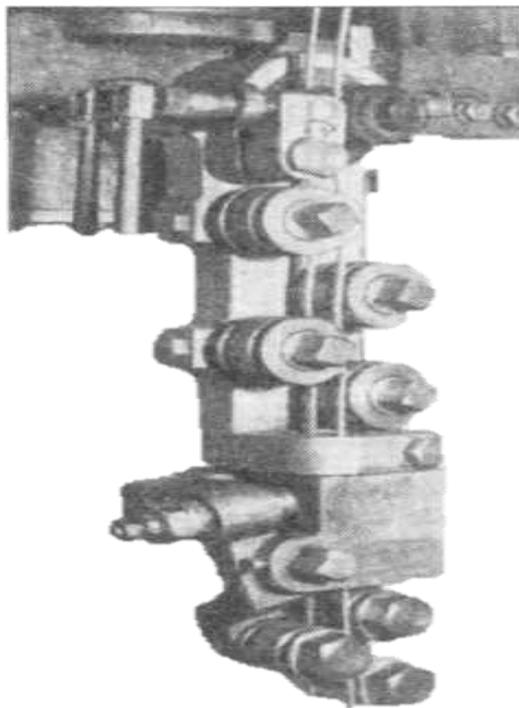


Рисунок 20 - Мундштук А-694 для автоматической сварки толстолистовой меди расщепленным электродом

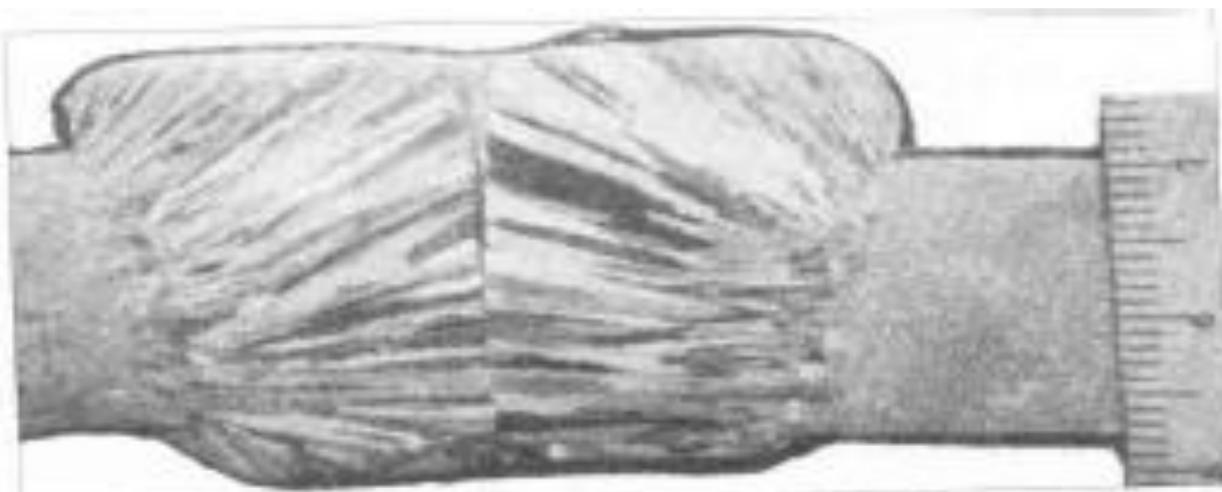
Макрошлиф металла сварного шва на меди толщиной 18 мм, выполненного расщепленным электродом, показан на рисунке 21. Металл шва плотный, без шлаковых включений, пор, трещин и других дефектов. Механические свойства металла шва, выполненного на меди марки МЗ толщиной 28 мм электродной проволокой той же марки под флюсом АН-26 и на меди толщиной 8-12 мм, одинаковы и составляют в среднем  $\delta_t = 6,4 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\delta_b = 16,9 \text{ кг/мм}$

$\delta = 46,4 \%$ ,  $\Psi = 57,9 \%$ .

Таблица 9 – Механические свойства шва и сварного соединения

	Металл	Механические свойства				
		$\delta_T$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	$\alpha_z$ , град
		14,7	20,7	33,8	77,7	-
Сварка под флюсом АН-26	Сварного соединения	-	21,2	-	-	180
		13,4	22,0	36,5	68,2	-
	Сварного соединения	-	21,8	-	-	180

*Примечания.* 1. В металле шва содержится 0,45 % Сг. 2. В числителе указаны наименьшие и наибольшие значения, в знаменателе — средние из четырех-пяти измерений.



$$\delta_T=6,4 \text{ кг/мм}^2, \delta_B=16,9 \text{ кг/мм}^2, \delta=46,4 \%, \Psi=57,9 \%$$

Рисунок 21 - Макрошлиф сварного шва на меди толщиной 181мм выполненного расщепленным электродом под флюсом АН-2 в среднем

В таблице 9 приведены механические свойства шва и сварного соединения, полученных при однопроводной автоматической сварке меди толщиной 18 мм под флюсом АН-26. Образцы вырезались из стыковых

соединений, выполненных обычным методом и расщепленным электродом при примерно одинаковых значениях погонной энергии. Из таблицы следует, что при автоматической сварке меди под флюсом как одним так и другим методом механические свойства металла шва и сварного соединения одинаковы.

### **3.2 Оптимизация параметров дополнительной газовой защиты при сварке и наплавке меди и ее сплавов под флюсом**

Автоматическая сварка и наплавка под флюсом меди и ее сплавов является одним из перспективных способов изготовления как элементов металлургического оборудования, так и получения биметаллических изделий медь-бронза, сталь-бронза.

В настоящее время для сварки и наплавки меди и медных сплавов применяют плавные флюсы АН-60, АН-20П, АН-26П, АН-348-А, ОСЦ-45 и др., разработанные для сварки сталей. Однако даже при соблюдении всех технологических рекомендаций (прокалка флюсов, механическая очистка, обезжиривание проволоки и основного металла) они не всегда обеспечивают требуемую плотность металла. Известно, что эффективной мерой предупреждения пористости является снижение парциального давления водорода в атмосфере дуги. Это может быть достигнуто за счет как связывания его в соединения, так и добавления в атмосферу дуги других газов [5].

В настоящей работе дополнительно оценивали влияние дополнительной газовой защиты на газонасыщенность металла на стадии капли и ванны, качество сварных швов меди, меди со сталью и наплавки медных сплавов на сталь и медь.

Для выбора оптимальной схемы подачи газа в зону дуги были опробованы два способа — через медное сопло и через расположенную горизонтально медную трубку. В качестве дополнительной защиты использовали азот (расход 300—700 л/ч), который подавали в непрерывном режиме. При подаче защитного газа первым способом изменяли диаметр сопла (от 10 до 20 мм) и расстояние от его торца до основного металла (от 10 до 30 мм), при втором способе — диаметр трубки (от 3 до 10 мм), угол наклона (от 0 до 30°) к горизонту, расстояние от выходного отверстия до электрода (от 10 до 30 мм), до основного металла (от 5 до 15 мм). Наружные поры определяли визуально. Наличие и характер расположения внутренних дефектов изучали на макро- и микрошлифах. Склонность наплавленного металла к пористости оценивали по количеству плотных валиков.

Как показали проведенные эксперименты, при подаче защитного газа через сопло положительный эффект достигался только тогда, когда нижний край сопла находился в расплавленном шлаке и создавались благоприятные условия для попадания защитного газа в зону дуги. Однако это приводит к шунтированию сварочного тока, нарушению стабильности процесса и ухудшению формирования валика.

При подаче защитного газа через газопроводную медную трубку наилучшие результаты получены тогда, когда она располагалась перед дугой или сбоку под углом не более 5—10° к горизонту, причем ее конец находился в расплавленном шлаке. Оптимальный диаметр трубки составлял 4—6 мм. При выборе наиболее эффективной защитной среды опробовали азот, аргон и углекислый газ.

С целью изучения механизма влияния дополнительной газовой защиты на пористость определяли газонасыщенность металла на стадиях капли и ванны. Для этого определяли содержание водорода в каплях электродного металла, остающихся на концах электрода после прекращения

сварки, и в «карандашных пробах», которые отбирали путем слива металла ванны через отверстие в образце. Жидкий металл попадал в разборной медный кристаллизатор диаметром внутреннего отверстия 10 мм. Фиксация растворенных в жидком металле газов происходит в результате высокой скорости кристаллизации проб.

Образцы, изготовленные из «карандашных проб», и капли электродного металла анализировали на приборе RH-2 фирмы «1.ECO» с целью определения в них содержания остаточного водорода. Наплавку проводили проволокой марки БрАМц9-2 под флюсом АН-26П на пластины из бронзы марки БрАМц9-2 толщиной 10 мм. При сварке меди толщиной 10 мм использовали проволоку марки БрХ07 и флюс АН-348А, меди со сталью толщиной 10 мм — проволоку марки МНЖКТ5-1 -0,2-0,2 и флюс АН-60. Расход аргона, азота и углекислого газа составлял 500 л/ч. Газ подавали в непрерывном режиме через медную трубку диаметром 5 мм, установленную перед дугой под углом  $10^\circ$  к горизонту. Расстояние от выходного отверстия до электрода составляло 12 мм, а до поверхности образцов — 7 мм.

Установлено, что применение дополнительной газовой защиты позволяет уменьшить насыщение жидкого металла водородом на стадии капли и ванны (рисунок 22), что обуславливает снижение пористости швов и наплавов.

В швах и наплавках, выполненных с дополнительной газовой защитой, пористость отсутствовала во всех случаях. Без применения дополнительной газовой защиты при сварке меди и меди со сталью в швах наблюдали отдельные поры, а при наплавке бронзы — значительную пористость.

Таким образом видно, что содержание водорода в жидкой ванне значительно ниже, чем в каплях электродного металла, что, по-видимому, обусловлено частичной дегазацией ванны.

Для изучения влияния дополнительной газовой защиты на пористость наплавленного металла применили методику многослойной наплавки, когда в каждом следующем валике склонность наплавленного металла к пористости увеличивается. Наплавки проводили проволокой марки Бр.АМц9-2 под флюсом АН-26П на медные и стальные образцы толщиной 15 мм. Медную трубку диаметром 5 мм устанавливали на расстоянии 10 мм от электрода перед дугой. Угол наклона к горизонту составлял  $5^\circ$ , а расстояние от выходного отверстия до поверхности образцов — 5 мм. В качестве дополнительной защиты использовали аргон, азот и углекислый газ, которые подавали в непрерывном режиме, изменяя расход от 100 до 900 л/ч. Данные о влиянии дополнительной газовой защиты на пористость наплавленного металла (рисунок 23).

Как показали проведенные эксперименты, с увеличением расхода газа стойкость наплавленного металла против образования пор возрастала. Однако при расходе более 800 л/ч наблюдаются разрывы шлакового пузыря, что приводит к нарушению стабильности процесса горения дуги, повышенному разбрызгиванию металла и ухудшению формирования валиков. При расходах менее 200 л/ч не обеспечивается равномерная подача газа из-за залипания трубки шлаком.

Наилучшая плотность наплавленного металла достигается при использовании в качестве дополнительной защиты углекислого газа, который не только разбавляет атмосферу дуги, но и, имея окислительную способность, дополнительно связывает водород.

Большую эффективность азота в качестве защитного газа по сравнению с аргоном, по-видимому, с одной стороны, можно объяснить содержанием в техническом азоте примесей кислорода (от 0,5 до 5 %), который связывает водород, а с другой, — лучшими условиями дегазации сварочной ванны. При этом возможно выделение пузырьков азота, которые

могут служить зародышами пор и приводить к пористости при более низких содержаниях водорода в жидком металле.

С целью уменьшения расхода защитного газа проводили сравнительные опыты по подаче защитного газа в импульсном и непрерывном режимах. В опытах изменяли угол наклона газопровода от 0 до 15°, расстояние от выходного отверстия газопровода до основного металла от 3 до 9 мм, частоту импульсов от 0 до 1,5 Гц, расход защитного газа от 250 до 800 л/ч.

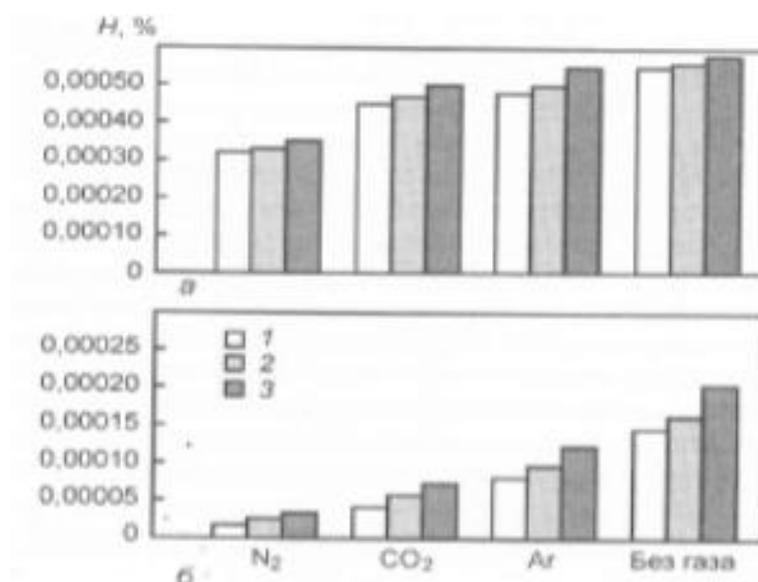


Рисунок 22 – Влияние защитного газа на содержание водорода в каплях электродного металла (а) и металла сварочной ванны (б): 1 - проволока марки БрАМц9-2; 2 – БрХ07; 3 – МНЖКТ5-1-0,2-0,2

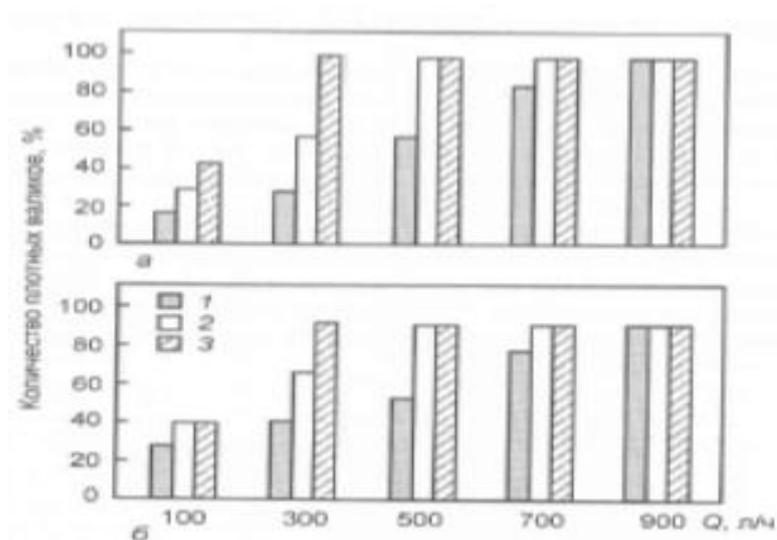


Рисунок 23 – Влияние состава газов и их расхода на стойкость против пористости при наплавке бронзы БрАМц9-2 под флюсом АН 26П на медь (а) и сталь (б): 1 - Ar; 2 – N<sub>2</sub>; 3 – CO<sub>2</sub>

Опробование способа подачи защитного газа через медную трубку в импульсном режиме показало, что при определенных параметрах импульсной подачи можно достичь значительного уменьшения расхода защитных газов, улучшения стабильности процессов сварки и наплавки при гарантированном отсутствии пор в швах и наплавленном металле.

На основании проведенных экспериментов разработан способ подачи защитного газа в зону дуги в импульсном режиме, схематически изображенный на рисунке 24. На границе плавления флюса 1 размещают газопровод 2, выполненный в виде трубки. Газ в зону сварки можно подавать как в постоянном, так и в импульсном режиме через устройство 3.

Выходной диаметр газопровода выбирают в пределах одного диаметра электрода и размещают на расстоянии 5-7 мм от поверхности свариваемой детали, а газопровод устанавливают под углом 5-10° к

горизонтальной плоскости. Продолжительность импульса подачи газа устанавливают в размере 40-60 % длительности выбранного периода подачи газа.

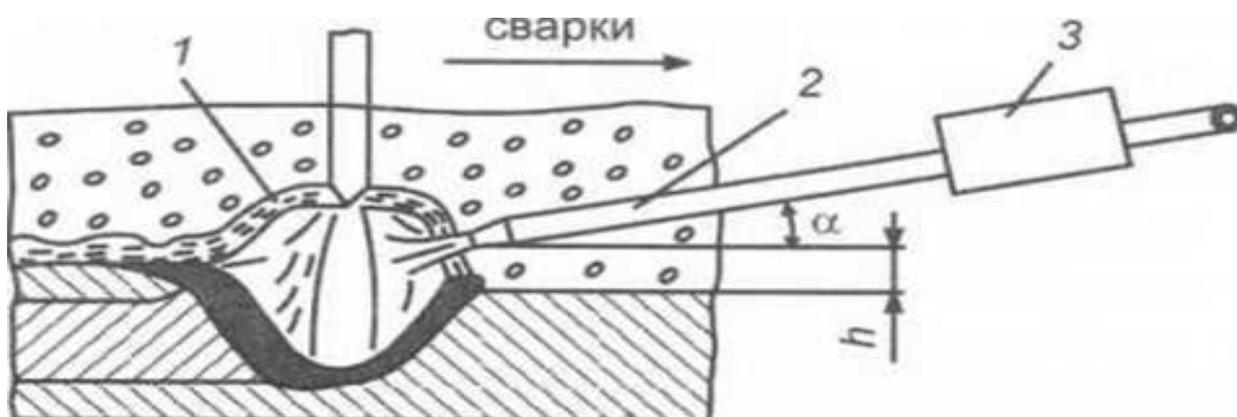


Рисунок 24 - Схема способа подачи защитного газа

Увеличение или уменьшение угла наклона газопровода к горизонтальной плоскости приводит к ухудшению формирования шва, разбрызгиванию металла при сварке и наплавке, образованию наплыва, нарушению стабильности процесса сварки и наплавки, а также появлению пористости в швах и наплавленном металле. При установке расстояния от выходного отверстия газопровода до поверхности свариваемой детали менее 5 мм возможны случаи зацепления его за поверхность металла, а при увеличении этого расстояния более 7 мм струя защитного газа может распространяться во флюсе над расплавленной пленкой шлака. При этом парциальное давление водорода не снижается, что приводит к появлению пористости в наплавленном металле. Частоту пульсации газа устанавливают в пределах 0,75-1,25 Гц. Уменьшение частоты импульсов приводит к появлению пористости в наплавленном металле, а увеличение частоты — практически к непрерывной подаче газа и увеличению его расхода.

Уменьшение или увеличение соотношения длительности импульса к длительности всего периода пульсации от 40-60 % приводит к пористости в наплавляемом металле шва. Экспериментальные данные обобщены в таблице, в которой приведены результаты наплавки бронзовой проволокой БрАМц 9-2 диаметром 4 мм на образцы из меди марки М1 под флюсом АН-26П при различных расходах защитного газа аргона.

Таблица 10 – Влияние параметров подачи защитного газа и технологических факторов на качество швов

Частота импульсов $f$ , Гц	Угол наклона газопровода $\alpha$ , град	Высота газопровода над основным металлом, мм	Расход защитного газа $Q$ , л/ч	Качество		Наличие пор
				стабильности процесса	формирования валика	
0,50	5	5	250	Уд.	Уд.	Поры
0,75	7	5	250	Хор.	Хор.	Пор нет
1,00	5	6	250	Отл.	Отл.	»
1.25	5	7	250	»	Хор.	»
1,50	5	5	250	»	»	Отдельные поры
1,00	0	5	250	Уд.	Неуд.	Пор нет
1,00	10	5	250	Хор.	Хор.	»
1,00	15	5	250	Уд.	Уд.	Отдельные поры
1,00	7	3	250	Неуд.	Неуд.	Поры
1,00	7	9	250	Хор.	Уд.	»
	5	5	250	Отл.	Отл.	»
	5	5	300	»	»	»
	5	5	400	»	»	»
	5	5	500	»	»	»
-	5	5	600	»	»	Отдельн

Частота импульсов $f$ , Гц	Угол наклона газопровода $\alpha$ , град	Высота газопровода над основным металлом, мм	Расход защитного газа $Q$ , л/ч	Качество		Наличие пор
				стабильности процесса	формирования валика	
						ые поры
	5	5	700	»	»	»
-	5	5	800	»	»	Пор нет

При пульсирующей подаче защитного газа достигается периодический разрыв пленки плавленного флюса и газ, беспрепятственно проходя в зону дуги, снижает в ней парциальное давление водорода, оказывая динамическое воздействие на расплавленный металл и облегчая тем самым выход растворенного в нем водорода. Как видно из таблицы 10, соблюдение указанных выше оптимальных параметров импульсной подачи газа через медную трубку позволяет получать стабильный процесс наплавки, плотные валики с хорошим формированием при более низких расходах защитного газа по сравнению с его подачей в постоянном режиме. Широкое опробование данного способа при сварке меди и меди со сталью, многослойной наплавке на медь и сталь бронз типа БрАМц9-2, БрКМц-3-1 под флюсами марок АН-26П, АН-20П, АН-60, АН-348-А, ОСЦ-45 показало, что применение комбинированной защиты во всех случаях обеспечивает получение плотных швов и наплавленного металла.

### **3.3 Особенности технологии сварки под флюсом замкнутых швов на крупногабаритных изделиях из меди больших толщин**

При изготовлении таких крупногабаритных изделий, как медные изложницы кристаллизаторов печей вакуумно-дугового и электрошлакового переплавов, хорошо зарекомендовал себя метод сварки под флюсом. В данной работе рассмотрены некоторые особенности выполнения указанным методом кольцевых швов при сварке длинномерных изложниц и швов при приварке к изложницам фланцев.

Изложницы круглого сечения диаметром более 450 мм и длиной до 2500 мм изготавливают из листового металла вальцовкой с последующим наложением продольного шва, а изложницы большей длины сваривают из двух таких трубных заготовок кольцевым швом.

Сборка под сварку и сварка кольцевого шва выполняются на специализированной установке, состоящей из роликового стенда Т-ЗОМ с уменьшенной скоростью вращения приводных роликов и головки АБС с поворотной колонной ПК-2.

Затруднения, имеющие место при сварке меди больших толщин, обуславливают применение специальных технологических приемов выполнения кольцевого шва. Как и при сварке продольных швов, на кромках выполняется разделка круглого сечения с радиусом и притуплением, равными половине толщины металла. Однако в месте начала сварки, когда температурное поле еще не установилось, возможны дефекты в виде несплавлений и зашлаковок. Для уменьшения объема перевариваемого металла в месте начала сварки разделку углубляют по хорде до притупления, равного одной четверти толщины кромки.

Обратное формирование швов обеспечивается с помощью флюсовой подушки специальной конструкции (рис. 1). Засыпка флюса в устройство производится через заранее выполненное в стыке отверстие, которое затем заваривают прихваткой. Уплотнение флюса и поджатие его к свариваемым кромкам осуществляется пневматически.

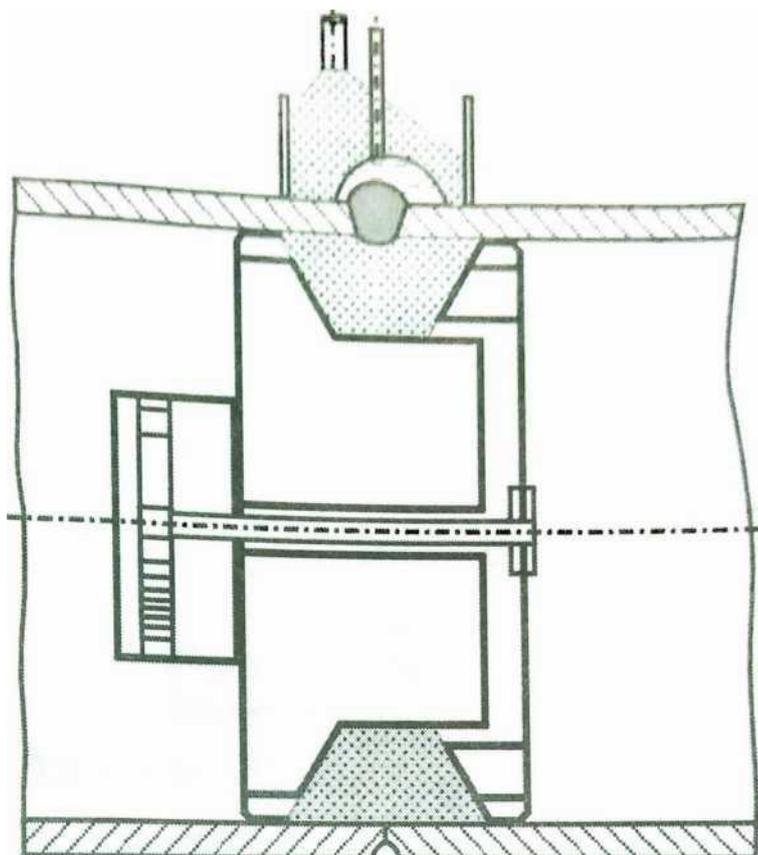


Рисунок 25 - Схема сварки кольцевого шва

Сборка кольцевого стыка под сварку производится на прихватках, проставляемых по периметру через 200-250 мм. Сварка выполняется со смещением электрода от зенита навстречу направлению вращения на величину, обуславливаемую, главным образом, высокой жидкотекучестью расплавленного металла и большими объемами сварочной ванны. Оптимальным является положение середины металлической ванны в зените.

При сварке, например, металла толщиной 40мм смещение составляет 25-30 мм. Для удержания флюса в зоне сварки применяется скользящее приспособление коробчатого типа.

При выполнении кольцевого шва расплавленный шлак стекает, увлекая за собой жидкий металл, что приводит к ухудшению защиты металла сварочной ванны и формирования шва.

Указанный недостаток был устранен тем, что помимо подсыпки флюса во флюсоудерживающее приспособление его подавали также из бункера головки АБС по шлангу так, чтобы флюс поступал в зону сварки сбоку электрода (рисунок 25). Столб флюса, оказывая боковое давление, смещает верхний слой расплавленного шлака на противоположную заготовку, по которой он и стекает, При этом на кристаллизующемся шве образуется шлаковая корка толщиной 3-5 мм, надежно защищающая его и предохраняющая металл сварочной ванны от протекания. При использовании такой дополнительной боковой подачи флюса в зону сварки усиление шва формируется несколько смещенным, однако это не ухудшает качества сварного соединения.

Приварка фланцев к изложницам круглого сечения не вызывает затруднений. Процесс ведется при вращении обечайки в вертикальном положении. Установка для приварки фланцев обычно комплектуется из головки АБС, поворотной колонны ПК-2 и сварочного манипулятора УСМ-5000.

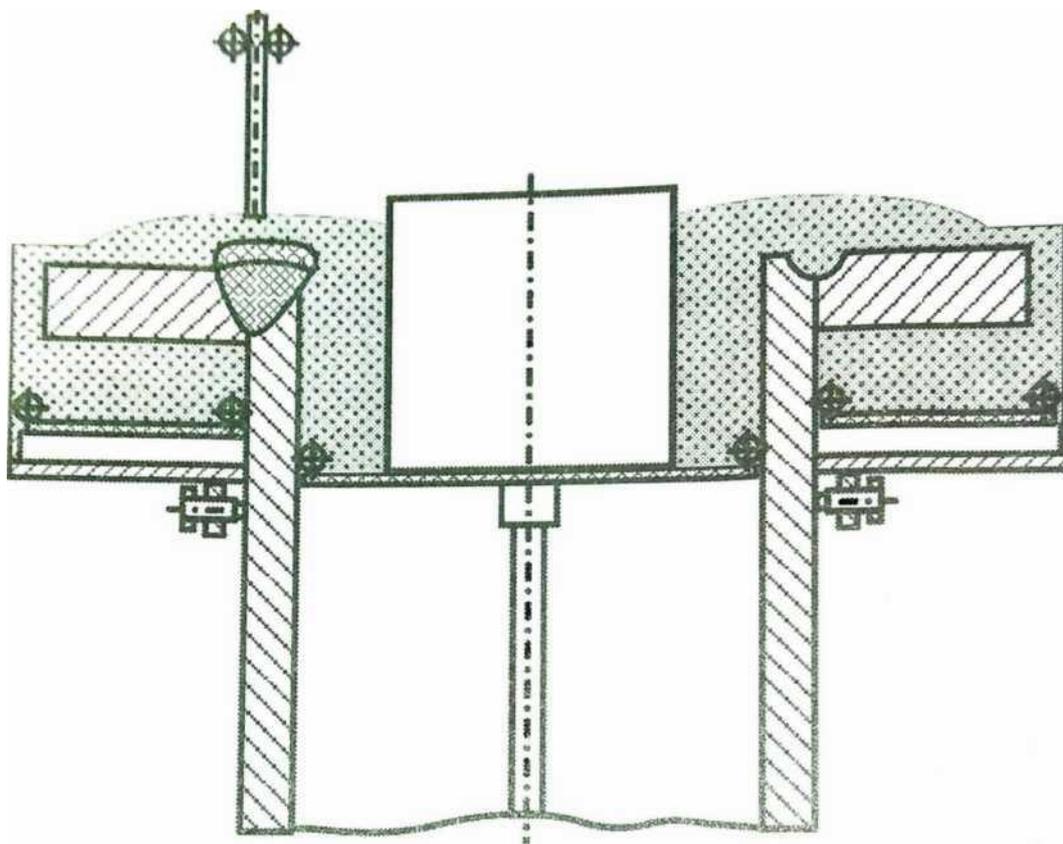


Рисунок 26 - Схема приварки фланца к обечайке изложницы

В зависимости от толщины металла, габаритов свариваемых элементов, а также от требуемой глубины проплавления, применяют U или V-образную разделку кромок. При сравнительно небольших толщинах стенки обечайки возможно только выполнение скоса кромки на фланце. Схема приварки фланца к обечайке показана на (рисунок 26).

Для предотвращения протекания металла сварочной ванны применяются простые флюсоудерживающие приспособления. Особенностью формирования шва является то, что торец обечайки, как правило, расплавляется полностью. При недостаточном количестве флюса во внутреннем приспособлении возможны протекания жидкого металла внутрь обечайки и размывы стенки. Надежное удержание металла сварочной ванны обеспечивается, когда высота слоя флюса составляет 150-200 мм до зоны

сварки. Приварка фланцев к крупно-габаритным изложницам прямоугольного сечения вызывает значительные затруднения. Способы ручной и полуавтоматической сварки в среде защитных газов, используемые для этой цели, очень трудоемки из-за необходимости применения предварительного и сопутствующего подогревов до 400-700 °С. Поэтому автоматизация процесса приварки фланцев к изложницам квадратного сечения с использованием способа сварки под флюсом явилась актуальной задачей.

Специализированная установка для осуществления процесса приварки фланцев монтируется из стандартного сварочного оборудования. Сущность автоматизации указанного процесса заключается в стабилизации скорости сварки во всех точках свариваемого контура при непрерывном его вращении (процесс осуществляется при перпендикулярном расположении электрода к плоскости контура и обеспечении слежения по кромкам с помощью копирного устройства).

При постоянной скорости вращения контура установленная в точке А (рисунок 27, а) скорость сварки  $V_y = 2\pi R_{\min}n$  будет изменяться следующим образом:

$$V_{св} = \frac{V_y}{\cos^2 \alpha} \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол поворота контура при отсчете от  $R_{\min}$  изменяющийся в пределах  $0 \leq \alpha \leq \beta/2$ , где  $\beta$  — центральный угол многоугольника.

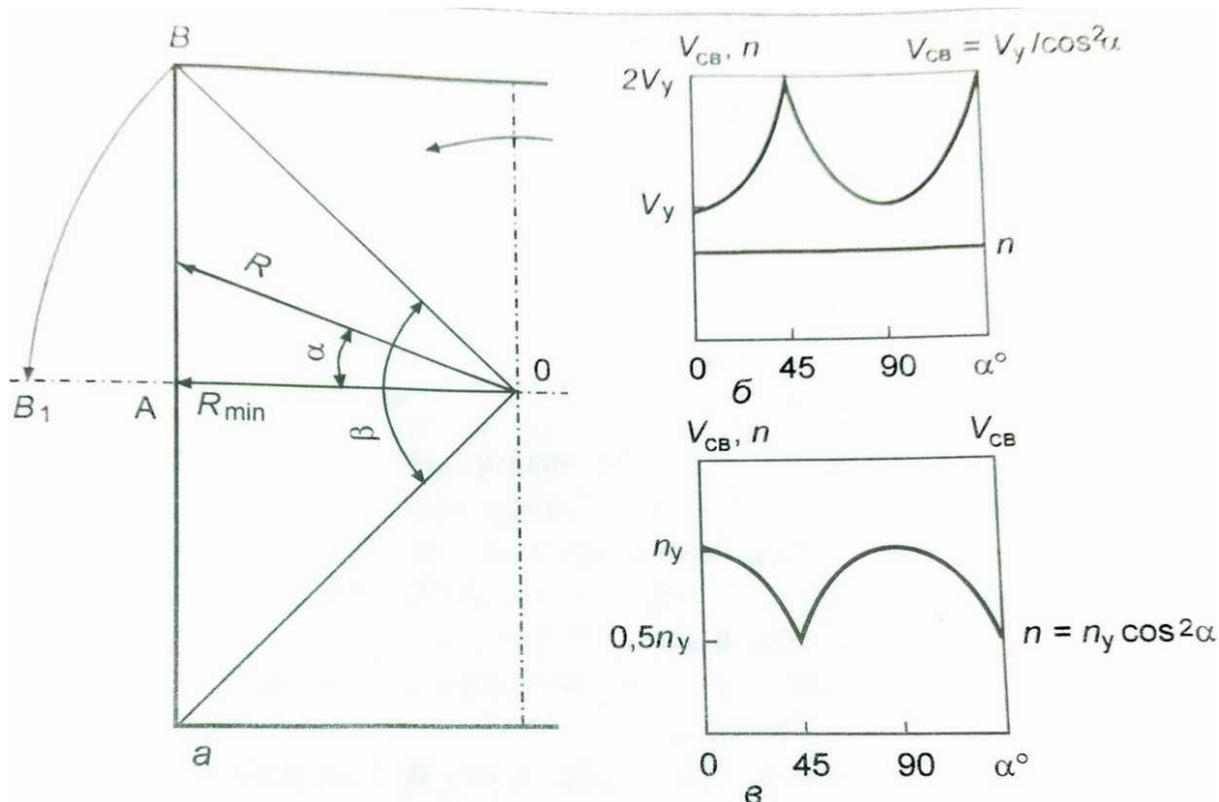


Рисунок 27 - Схемы к анализу зависимости скорости сварки на квадратном контуре от скорости его вращения

Для наглядности на (рисунок 27, б) показана кривая изменения скорости сварки, свидетельствующая о периодическом ее возрастании в два раза при встрече точки  $B$  контура и электрода в точке  $B'$  (рисунок 27, а)

Стабилизация скорости сварки достигается изменением установленной скорости вращения  $n_y$  по зависимости, обратной (1), (рисунок 27, в):

$$n = n_y \cos^2 \alpha. \quad (2)$$

Изменение скорости вращения по зависимости (2) осуществляется автоматически с помощью функционального потенциометра, включенного во входную цепь исполнительного механизма вращателя и кинематически связанного со сварочным автоматом.

Модернизированная установка для этих целей смонтирована на базе сварочного автомата ТС-17М, поворотной колонны ПК-2 и сварочного манипулятора УСМ-5000.

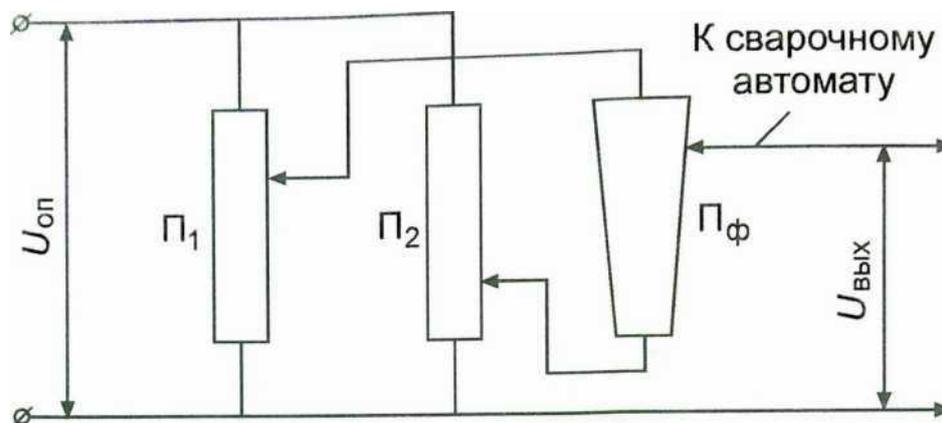


Рисунок 28 - Схема управления скоростью вращения сварочного манипулятора

Схема управления скоростью вращения манипулятора усовершенствована (рисунок 28): параллельное включение между собой потенциометров  $P_1$  и  $P_2$  дает возможность расширения диапазонов и независимого регулирования верхнего и нижнего пределов изменения скорости вращения. Кинематическая связь функционального потенциометра  $P_\phi$  со сварочным автоматом выполнена по рычажной системе. Это позволяет путем изменения соотношения плеч рычагов производить приварку фланцев к изложницам с различными по размерам сечениями.

Разработанная технология приварки под флюсом фланцев к изложницам квадратного сечения обеспечивает высокое качество сварных соединений. При этом могут значительно улучшиться условия труда и производительность, по сравнению с применяющимся полуавтоматическим способом сварки в среде защитных газов.

## 4. Флюсы применяемые при сварке меди и сплавов на ее основе

### 4.1 Влияние степени окисленности флюса на пористость швов при сварке меди

Применяемые при сварке меди больших толщин (более 20 мм) стандартные плавные флюсы АН-348-А, АН-26С, АН-60, ОСЦ-45 даже при тщательном соблюдении всех технологических рекомендаций (сушка флюса, зачистка свариваемых кромок, соответствующая подготовка электродной проволоки и др.) не обеспечивают требуемого для получения плотных швов состава атмосферы дуги. Для снижения вероятности образования пор в металле шва необходимо уменьшить содержание водорода в атмосфере дуги, Это может быть достигнуто путем повышения степени окисления флюса [1] и уменьшения содержания в нем влаги.

Окислению подвергали серийные плавные флюсы — пемзовидный АН-60, содержащий 37-40 % закиси марганца, и стекловидные АН-348-А и АН-26С с большим и малым содержанием этого окисла соответственно. Флюсы прокаливали на воздухе в течение 1 ч при температурах 600, 700, 800 и 900 °С. Содержание высших окислов марганца (в пересчете на  $Mn_2O_3$ ) определяли с помощью химического анализа по методике, разработанной Институтом коллоидной химии и химии воды АН УССР совместно с ИЭС им. Е.О. Патона.

Как видно (рисунок 29) с повышением температуры прокалки степень окисленности флюса АН-60 существенно возрастает. Наличие максимума на кривой обусловлено, по-видимому, тем, что  $Mn_2O_3$  устойчива только до 950 °С [2], и выше 700-750 °С реакция окисления  $MnO$  начинает смещаться влево.

Влияние степени окисленности флюса на пористость швов оценивали путем наплавки на пластины из хромовой бронзы проволокой БрХ0,7 диаметром 3 мм с введением в зону дуги «возбудителя» пор (соединения, содержащего кристаллизационную воду). Хромовая бронза по своим свойствам очень близка к меди, а отсутствие в ней закиси меди исключает образование реакционных пор при сварке. Это дает возможность осуществлять визуальный контроль, так как швы на хромовой бронзе склонны к образованию выходящих на поверхность трубчатых пор. Дозированные количества Р «возбудителя» пор равномерно распределялись на 100 мм длины в простроганных на пластинах канавках. Критерием оценки качества флюса служило максимальное количество «возбудителя», не вызывающее поры.

Как показали опыты, стойкость швов против пористости возрастает с повышением степени окисленности флюса. При этом наибольшая стойкость соответствует максимуму на кривой изменения окисленности (рисунок 29, 30).

Прокалка стекловидных флюсов АН-348-А и АН-26С не приводит к заметному повышению степени их окисленности и, следовательно, к уменьшению пористости металла шва.

Металлографические исследования сварных швов (рисунок 31), выполненных на литой меди, также подтвердили их более высокую стойкость против пористости при использовании окисленного прокалкой флюса АН-60 по сравнению с просушенным по обычной технологии.

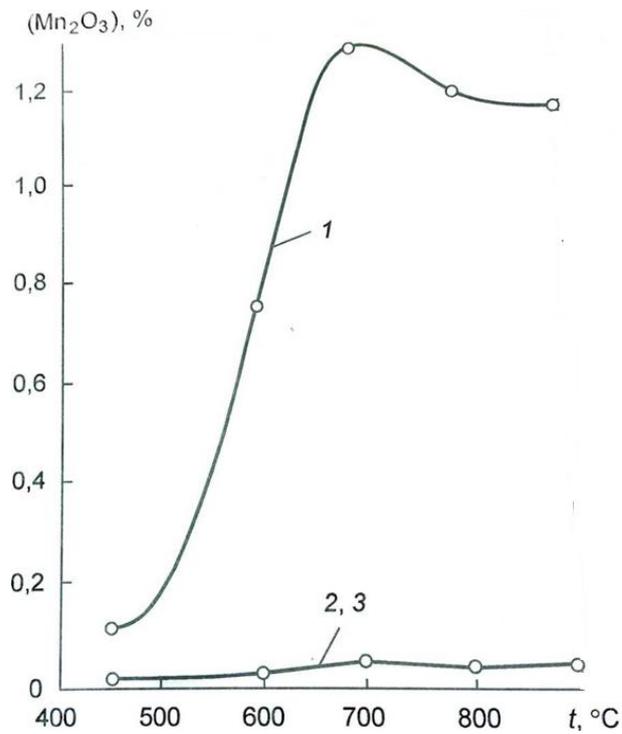


Рисунок 29 - Степень окисленности флюсов в зависимости от температуры прокаливания: 1 — АН-60; 2 — АН-26С; 3 — АН-348-А

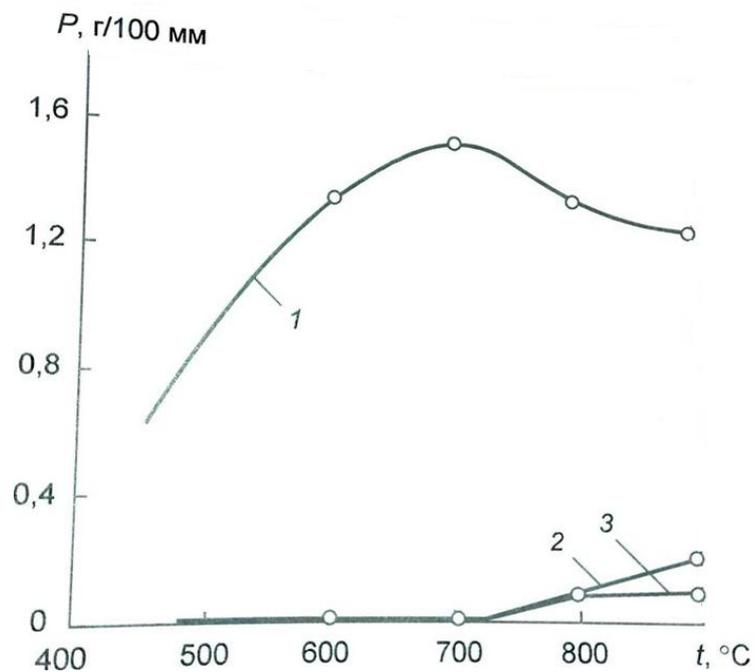
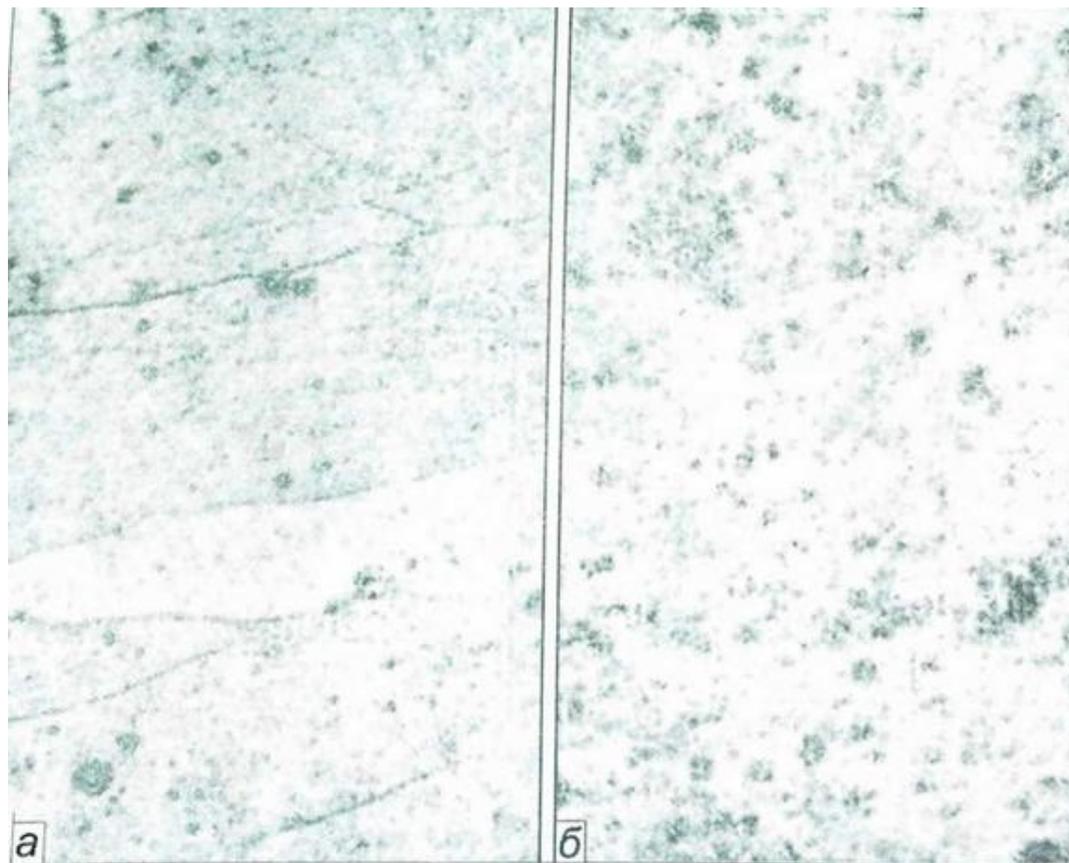


Рисунок 30 - Стойкость швов против пористости в зависимости от температуры прокаливания флюса (обозначения см. рисунок 29)

Таким образом, диапазон температур 700-750 °C является оптимальным для максимального окисления флюса АН-60. Кроме того, при

повышенных температурах достигается более полное удаление влаги из флюса, что также способствует предупреждению пористости швов при сварке меди.

Опытами установлено, что содержание в плавленном флюсе  $Mn_2O_3$  в количестве около 1 % обеспечивается при введении марганцевой руды в конце плавки.



а— прокаленном при 720 °С; б— просушенном при 350-450 °С

Рисунок 31 - Микропористость металла шва, выполненного на литой меди под флюсом АН-60 (x100, уменьш. 3/4)

Снизить содержание влаги во флюсе можно применением способа сухой грануляции. С учетом этого был разработан флюс АН-М13 для сварки меди и хромовой бронзы [3].

Флюс АН-М13 и прокаленный при 700-750 °С флюс АН-60 позволяют устранить пористость сварных соединений из меди и хромовой бронзы как средних, так и больших толщин при изготовлении изложниц кристаллизаторов для печей ЭШП и ВДП и фурм для доменных печей.

#### **4.2 Повышение стойкости швов против пористости швов при сварке меди под флюсом**

Проведен термодинамический анализ процессов снижения парциального давления водорода в атмосфере дуги при сварке меди под флюсом. Показано что с повышением степени окисленности флюса стойкость швов против пористости повышается. Исследовано влияние марганцевой руды, кремнефтористого натрия и мрамора и на их основе разработаны керамические добавки к серийным плавленным флюсам, позволяющие повысить стойкость швов против пористости при сварке меди.

Значительная доля сварочных работ при изготовлении изделий из меди выполняется с использованием высокопроизводительного способа сварки под флюсом. Однако применяемые на практике флюсы не всегда обеспечивают надежное качество швов. Наиболее часто встречающимся дефектом является их пористость, особенно при сварке металла больших толщин. Для сварки меди обычно используют серийные плавленные флюсы, разработанные для сварки сталей: АН-348-А, АН-26С, АН-60, ОСЦ-45 и др. Известно, что основной причиной пористости швов на меди является водород. Низкую их стойкость против пористости можно, повидимому, объяснить тем, что при этом уровень парциального давления водорода в атмосфере дуги для меди остается выше критического. Поэтому представлялось целесообразным изыскание дополнительных металлургических мер его снижения. Выполненные В.В Подгаецким [3, 4] и

И.И. Фруминим [5] термодинамические расчеты позволяют выделить следующие основные реакции связывания водорода в атмосфере дуги



Появление в последнее время уточненных и расширенных данных по термодинамическим свойствам веществ позволило более полно проанализировать реакции путем расчета и одновременной оценки изменения энергий Гиббса и констант равновесия.

Расчеты выполнялись по уравнениям :

$$\Delta_r G^0(T) = \Delta_r H^0(O) - \Delta_r \Phi^0(T)T, \quad (4)$$

$$RT \ln K^0(T) = -\Delta_r G^0(T), \quad (5)$$

где  $\Delta_r G^0$ ,  $\Delta_r H^0$ ,  $\Delta_r \Phi^0$  - стандартное изменение энергии Гиббса, энтальпии и приведенной энергии Гиббса системы соответственно;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $T$  - абсолютная температура;  $\ln K^0$  - натуральный логарифм константы равновесия реакции.

Результаты расчетов представлены (рисунок 32) и в таблице 11. Сравнение констант равновесия и изменения энергий Гиббса показывает, что до 3000 К решающее значение в связывании водорода может иметь реакция (2). Реакция (3) получает существенно меньшее развитие, а вероятность протекания реакции (1) практически ничтожно мала. По-видимому, в температурном интервале существования меди в жидком состоянии снижение парциального давления водорода за счет диоксида углерода происходит преимущественно путем разбавления атмосферы дуги.

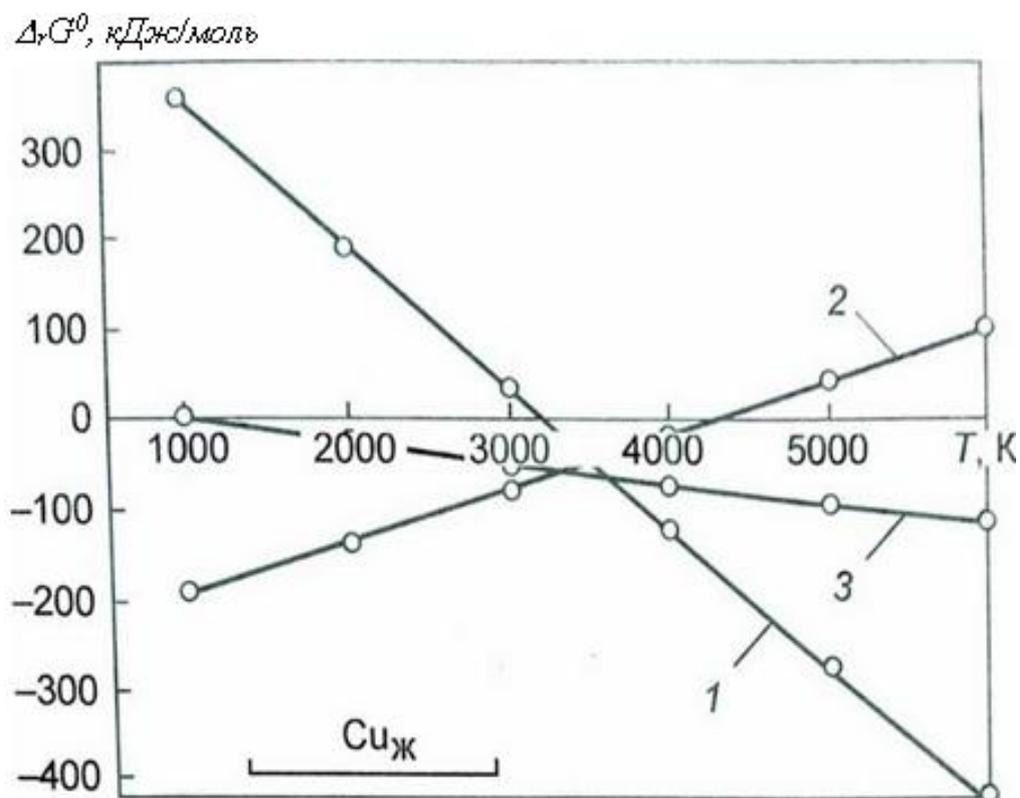


Рисунок 32 - Зависимости изменения энергий Гиббса реакций (1)-(3) от температуры

Основываясь на полученных результатах термодинамического анализа, решено было исследовать влияние активного кислорода высших оксидов элементов переменной валентности и диоксида углерода мрамора в составе флюса на стойкость швов на меди против пористости.

Таблица 11 – Константы равновесия реакций (1) – (3)

Реакция	$K^0$ при $T, K$		
	1000	2000	3000
(1)	$2,18 \cdot 10^{-19}$	$8,96 \cdot 10^{-6}$	0,247
(2)	$1,56 \cdot 10^{10}$	$3,52 \cdot 10^3$	22,657
(3)	0,697	4,606	7,440
Реакция	$K^0$ при $T, K$		

Реакция	$K^0$ при $T, K$		
	1000	2000	3000
	4000	5000	6000
(1)	36,551	$6,94 \cdot 10^2$	$4,78 \cdot 10^3$
(2)	1,818	0,402	0,147
(3)	8,991	9,813	10,202

Из элементов, оксиды которых обычно входят в состав плавящихся флюсов, переменной валентностью обладают Ti, Fe и Mn. Были выбраны высшие оксиды марганца, так как возможная степень окисленности железа меньше, высшие оксиды титана очень прочны и в процессе сварки практически не восстанавливаются

В работе показана возможность существенного повышения стойкости швов против пористости при сварке меди под флюсом АН-60, окисленным переводом входящего в его состав оксида марганца в высшие оксиды прокалкой при 700-750 °С. Однако в производственных условиях повышение степени окисленности флюса таким способом часто затруднено из-за отсутствия средств высокотемпературной прокалки. В связи с этим проведены исследования по разработке керамических добавок, которые способствовали бы развитию в зоне сварки процессов снижения парциального давления водорода.

В качестве основы добавок были взяты марганцевая руда, состоящая практически из  $MnO_2$ , и мрамор. Чтобы уменьшить внесение добавками в зону дуги влаги, в качестве связующего использовалось натриевое стекло, не содержащее в отличие от калиевого кристаллизационной воды.

Применялись опытные добавки следующего состава (в процентах по массе):

№ 1

Марганцевая руда                      50

Рутиловый концентрат	50
Натриевое стекло	более 100
№ 2	
Мрамор	100
Натриевое стекло	более 100

Добавки испытывались в смеси с получившими наиболее широкое применение флюсами АН-348-А, АН-26С и АН-60

Влияние добавки № 1 на стойкость швов против пористости оценивалось при наплавке на пластины из хромовой бронзы проволокой такого же состава по канавкам с дозированными количествами Р возбуждителя пор - кристаллогидрата хлористого бария - на 100 мм длины шва. Критерием оценки служило максимальное количество возбуждителя, не вызвавшее поры.

Представленные (рисунок 33) зависимости показывают, что керамическая добавка № 1 существенно повышает стойкость швов против пористости. При этом оптимальное количество добавки для примешивания к флюсу составляет около 15 % по массе.

Была также предпринята попытка усилить действие добавки № 1 за счет интенсификации процесса образования в зоне дуги фтористого кремния. В состав добавки вводились отдельно фтористый алюминий, криолит и кремнефтористый натрий. Испытание добавок проводилось в смеси с флюсом АН-60 в количестве 15 % по массе.

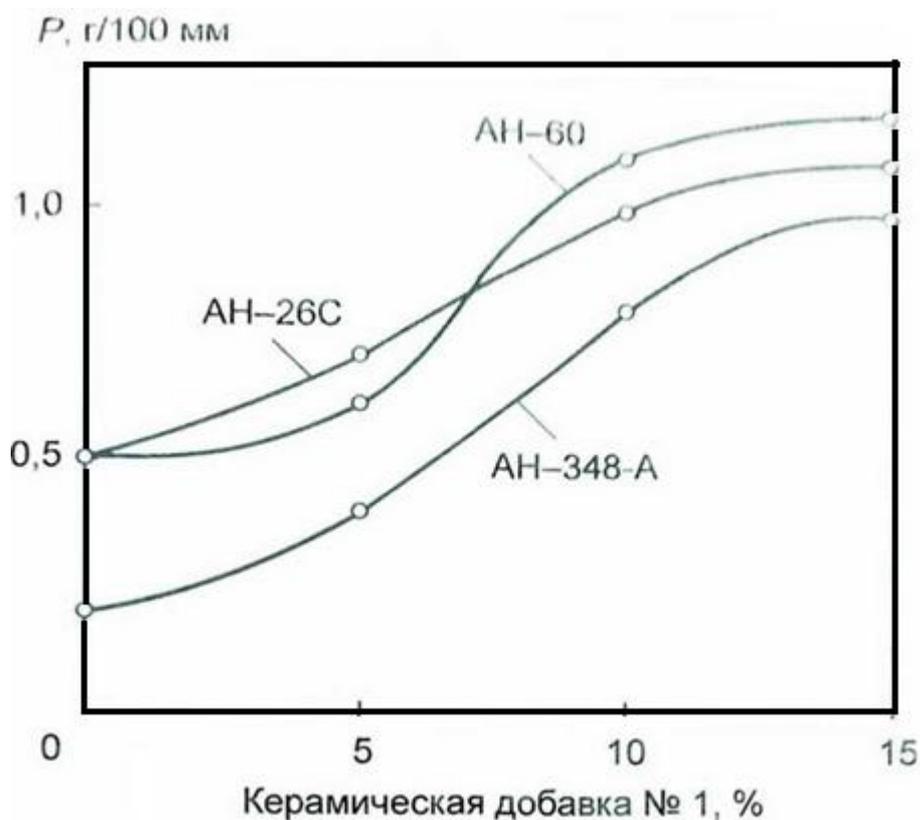


Рисунок 33 - Влияние керамической добавки № 1 во флюсовой смеси на стойкость швов против пористости

Результаты испытаний показали, что введение кремнефтористого натрия позволяет несколько повысить стойкость швов против пористости. Швы выдержали 1,4 г возбуждителя пор против 1,2 г при использовании добавки без кремнефтористого натрия. При этом оптимальным является следующий состав добавки в процентах по массе (добавка № 3):

Марганцевая руда	30-50
Натрий кремнефтористый	10-30
Рутил	остальное
Натриевое стекло	более 100

Использование керамической добавки из мрамора для борьбы с пористостью известно при наплавке алюминиевых бронз. В этом случае добавку примешивают к флюсу в количестве 10-20 % по массе. Применение такой смеси для сварки меди встречает значительные затруднения: в

результате обильного газовыделения ухудшается формирование швов и уменьшается глубина проплавления. Однако учитывая, что склонность меди к пористости швов меньше, чем алюминиевых бронз, следовало ожидать, что положительное влияние мрамора проявится и при значительно меньшем его содержании во

флюсовой смеси. Поэтому исследовалось влияние малых количеств добавки № 2 на пористость швов.

Опыты приводились при сварке меди М1 проволоками М1 и БрХ0,7. Поскольку при этом швы получались пористыми под всеми указанными выше флюсами, добавка № 2 испытывалась по другой методике. На пластинах толщиной 10 мм выполнялись швы с полным проплавлением, а о их стойкости против пористости судили по количеству пор  $N$  на длине 100 мм при анализе рентгенограмм. Оценивали также формирование швов и глубину проплавления  $h$ .

Результаты исследований показывают, что керамическая добавка из мрамора также обеспечивает существенное повышение стойкости швов на меди против пористости. Из (рисунок 34) видно, что оптимальная массовая доля добавки № 2 во флюсовой смеси при сварке металла толщиной 10 мм составляет 2-4 %. При этом процесс сварки протекает сравнительно спокойно, а поры в швах уже не образуются.

Керамическая добавка основе марганцевой руды и кремнефтористого натрия (№ 3) была также испытана в производственных условиях. Смесью из 16-17 % указанной добавки с флюсом АН-60 сваривались продольные и кольцевые швы на трубах из хромовой бронзы толщиной 40 мм.

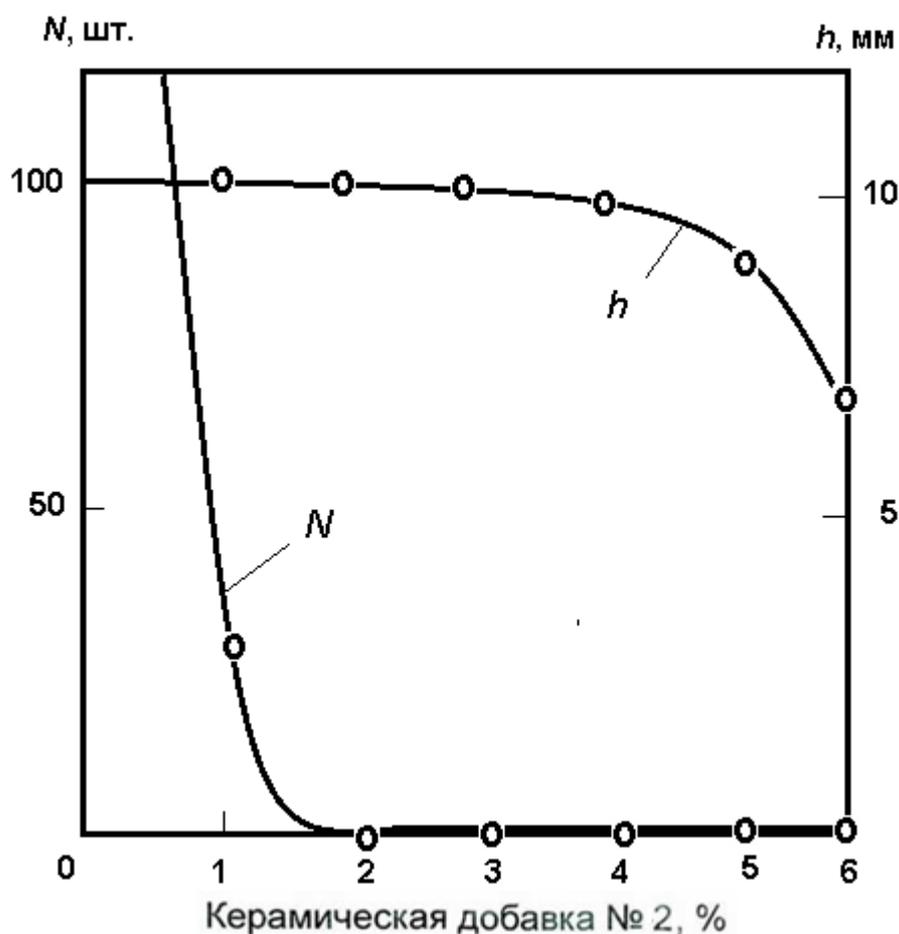


Рисунок 34 - Влияние керамической добавки № 2 во флюсовой смеси на количество пор в шве и глубину проплавления

Сварные соединения подвергались рентгенконтролю. Пор в швах не обнаружено.

#### 4.3 Отделимость шлаковой корки при сварке меди под силикатными флюсами

Толстая шлаковая корка удаляется сравнительно легко с поверхности шва на меди, сваренного медной электродной проволокой под плавленными силикатными флюсами. Однако на поверхности шва зачастую остаются сравнительно тонкие пленки шлака, прочно удерживаемого металлом

Исследованиями показано, что при сварке сталей удерживание шлака на шве возможно в результате механического и химического сцепления

Механическое удерживание шлаковой корки на поверхности стыкового шва в процессе остывания может происходить в тех случаях, когда коэффициенты термического расширения шлака и металла шва одинаковы или близки по значению. Коэффициенты термического расширения меди и флюса марки АН-26, измеренные по обычной методике, приведены на (рисунок 35). Значительная разница между этими коэффициентами позволяет заключить, что при сварке стыковых швов на меди под флюсом АН-26 механическое удерживание шлака играет второстепенную роль.

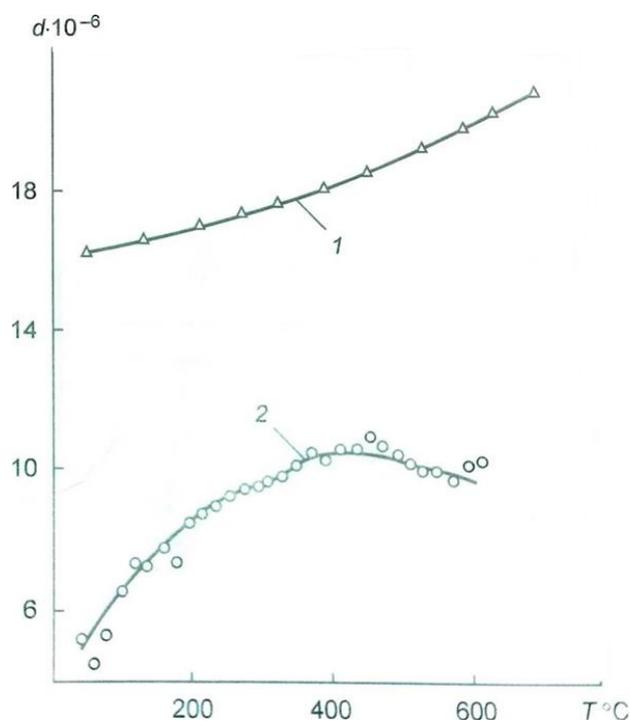
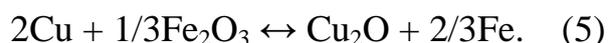
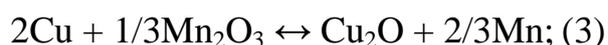


Рисунок 35 - Зависимость коэффициентов термического расширения меди (1) и флюса АН-26 (2) от температуры

Согласно данным, химическое сцепление шлака со сталью происходит вследствие окисления поверхности металла шва расплавленным шлаком и достраивания ее затвердевающим шлаком.

Для оценки вероятности взаимодействия жидкого шлака с твердой медью предположим, что активность каждого компонента флюса равна единице и закись меди выделяется на поверхности металла в виде отдельной фазы. В таком случае возможны следующие реакции:



Свободная энергия реакций (1)-(5), вычисленная по данным А. Гласснера [5], приведена на рис. 2, из которого видно, что медь не взаимодействует с  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  и  $\text{MnO}$ . Следует отметить, что при сварке меди под флюсами, содержащими  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  могут найти некоторое развитие реакции (3) и (5). Вероятность протекания реакций (1)-(5) в действительности будет меньше вычисленной, поскольку активность компонентов флюса меньше единицы.

Для изучения причин химического удерживания шлака на шве был изготовлен флюс марки АН-20 состава, %: 20,9  $\text{SiO}_2$ , 12,7  $\text{CaO}$ , 21,4  $\text{CaF}_2$ , 11,9  $\text{MgO}$ , 30,8  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2,8  $\text{K}_2\text{O}$  путем сплавления химически чистых реактивов в графитовом тигле.

При сварке меди толщиной 6 мм под указанным флюсом шлаковая корка удерживалась, хотя шлак не содержал ни окислов железа, ни окислов марганца.

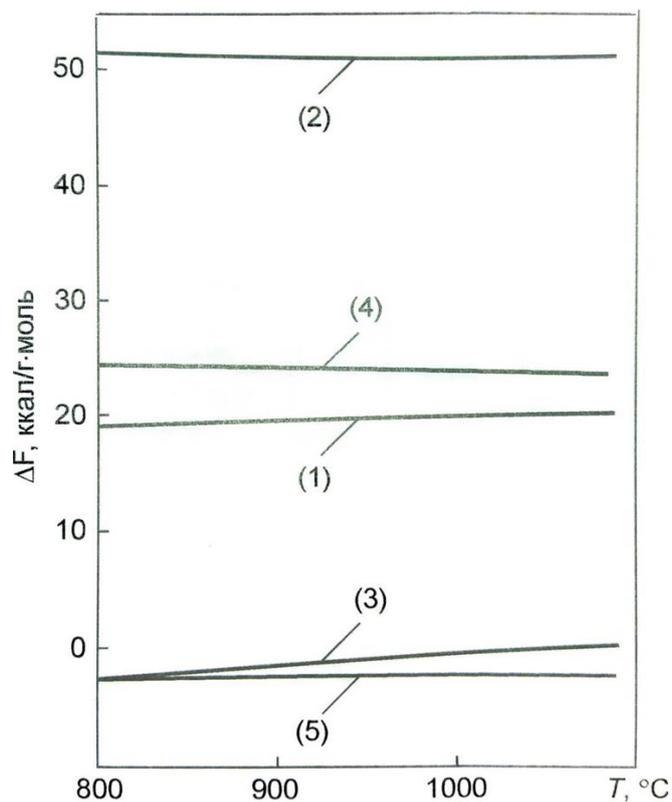


Рисунок 36 - Свободные энергии реакции (1)-(5) (в скобках над кривыми указаны номера формул)

Прочность удержания шлака на шве зависит также от количества кислорода в металле шва. Так, при сварке технической меди марки МЗ, содержащей 0,03 % O, шлак удерживается на шве значительно прочнее, чем на бескислородной меди МБ при прочих равных условиях. В то же время при введении в металл шва некоторых энергичных раскислителей, например лития или фосфора, отделимость корки улучшается и являются косвенным доказательством того, что в удерживании шлака на медном шве первостепенное значение имеет окисная пленка.

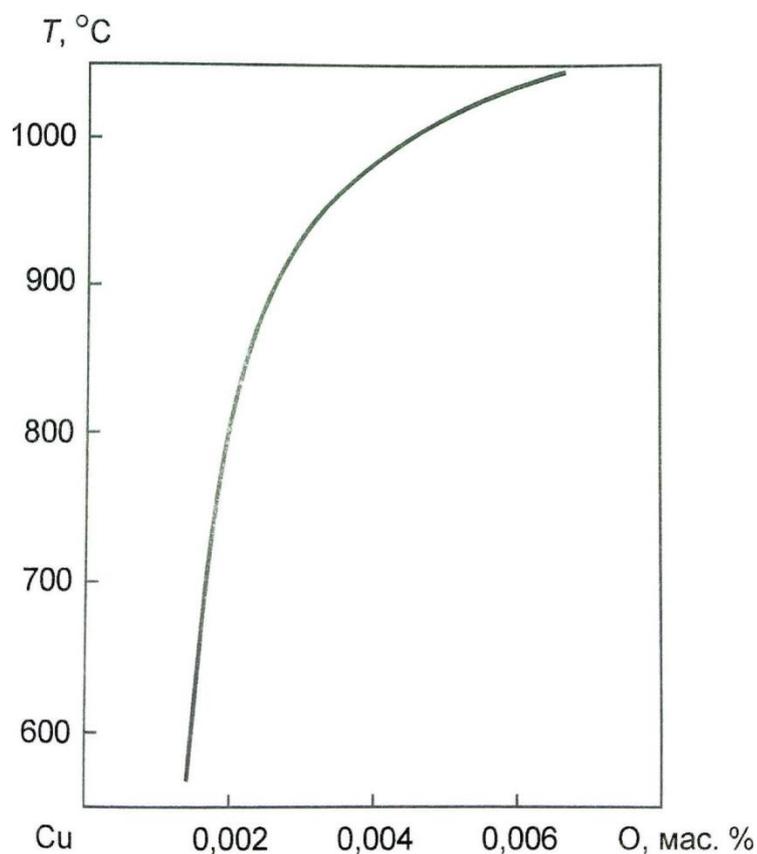


Рисунок 37 - Растворимость кислорода в твердой меди

Вышеописанные экспериментальные данные и расчеты показывают, что в случае сварки меди под флюсом окисление поверхности шва жидким шлаком не обязательно и основное влияние на удерживание шлака оказывает наличие кислорода в металле шва. По данным Филлипса и Скиннера [7], растворимость кислорода в твердой меди уменьшается с понижением температуры (рисунок 37).

При определенном переохлаждении относительно точки равновесия в остывающем металле системы медь-кислород появляются условия, необходимые для зарождения и роста новой фазы - закиси меди. Наличие готовых поверхностей раздела, какими являются границы зерен и поверхность металла, уменьшает работу образования зародышей  $\text{Cu}_2\text{O}$  и способствует кристаллизации закиси меди, как на границах зерен, так и на поверхности шва. Одним из путей торможения распада твердого раствора является введение в металл шва элементов, более поверхностно-активных по

отношению к меди, чем кислород. К таким элементам можно отнести висмут, свинец, сурьму, мышьяк, фосфор, серебро и др.

Нами был выбран висмут, поскольку он не является раскислителем меди и его можно рассматривать как чисто поверхностно-активную добавку. Висмут в количестве 0,017 % вводился в шов при сварке меди МЗ электродной проволокой  $d_э = 3$  мм той же марки. Режим сварки металла толщиной 6 мм:  $U_д = 40$  В,  $I_{св} = 380 - 400$  А,  $V_{св} = 27,5$  м/ч. Внешний вид швов показан на (рисунок 38). Металл шва, содержащий 0,017 % Вi, имеет чистую поверхность, в то время как шов без висмута прочно удерживает остатки шлака.

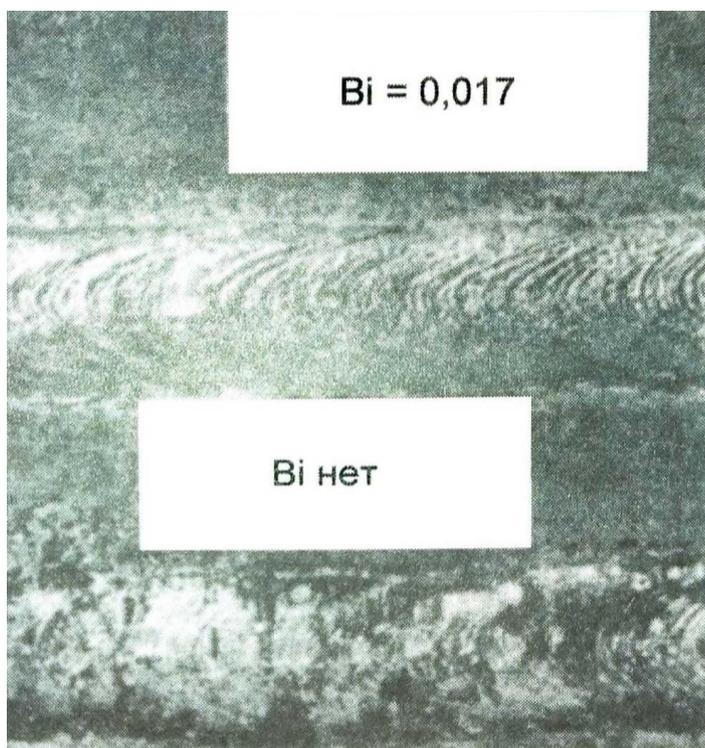


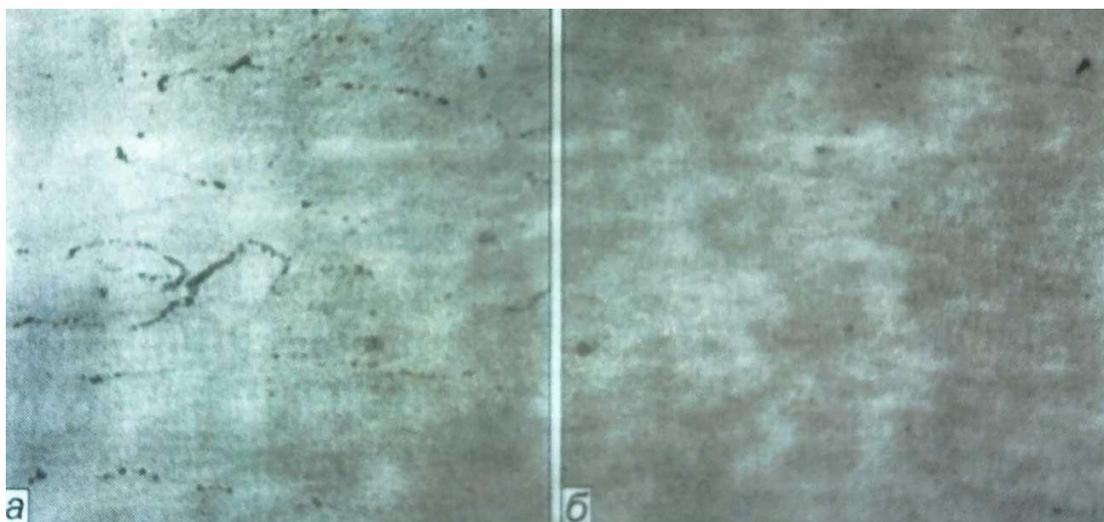
Рисунок 37 - Внешний вид швов на меди с добавкой висмута и без него

Данные о влиянии поверхностно-активных элементов на распад твердого раствора кислорода в меди и описанные выше опыты позволяют предположить, что при сварке меди под флюсом в отсутствие висмута

образуются прослойки закиси меди по границам зерен и поверхности шва вследствие распада твердого раствора кислорода в меди. Висмут тормозит распад твердого раствора (рисунок 38). Непосредственное окисление металла шлаком не наблюдается.

Кристаллизующаяся на поверхности шва пленка закиси меди соприкасается с расплавленным шлаком. От физико-химических свойств, состава и температуры шлака зависит подвижность в нем тех или иных частиц.

В.И. Малкин [11] показал, что подвижность частиц в силикатных расплавах обуславливается их кислотно-основными свойствами.



а — без висмута; б — 0,17 % Вi

Рисунок 38 - Микроструктура (х200) шва на меди МЗ, сваренного под флюсом АН-26 Шлиф не травлен

Со снижением основности шлака возрастает подвижность сложных кремнекислородных и, возможно, алюмокислородных анионов по сравнению с катионами щелочных и щелочноземельных металлов. Кремне и алюмокислородные анионы, а также щелочные и щелочноземельные катионы, проникая в кристаллизующуюся на поверхности шва прослойку закиси меди, поляризуют последнюю. В результате между прослойкой закиси

меди и основной массой шлака также будут находиться катионы меди. При дальнейшем охлаждении пленка закиси меди будет достраиваться шлаком через переходные соединения типа силикатов и алюминатов меди. Предполагаемый механизм сцепления шлака с пленкой закиси меди подобен сцеплению припоя с металлом при пайке.

Как и при сварке стали под флюсом, замечено, что при введении во флюс щелочных окислов отделимость шлаковой корки со швом на меди улучшается.

Исследовалось влияние щелочных окислов лития, натрия и калия на отделимость корки. С этой целью в графитовом тигле были выплавлены флюсы по типу АН-26 с добавками 3 % мол.  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  соответственно. Опытные флюсы испытывались при сварке меди толщиной 6 мм на указанном выше режиме. Отделимость шлака была наилучшей при введении во флюс  $\text{K}_2\text{O}$  и наихудшей при  $\text{Li}_2\text{O}$  (рисунок 39).

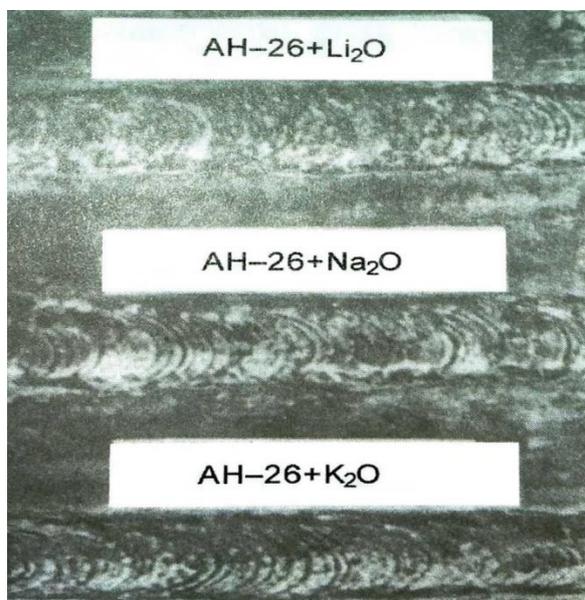


Рисунок 39 - Отделимость шлаковой корки при сварке меди толщиной 6 мм под флюсом АН-26 с добавками 3 % мол. щелочных окислов

Таблица 12

Реакция	$\Delta F$ при 1000 °С, кал/моль
$\text{Li}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \leftrightarrow \text{Li}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	-27800
$\text{Na}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \leftrightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	-55600
$\text{K}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \leftrightarrow \text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	-63750

Из сравнения (рисунок 39) с данными таблицы [12] видно, что отделимость шлака улучшается по мере увеличения сродства добавки к  $\text{SiO}_2$ . Щелочные окислы, связывая  $\text{SiO}_2$  и, возможно,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в сложные соединения, препятствуют их прониканию в кристаллизирующуюся на поверхности шва прослойку закиси меди. Если связь между щелочными окислами и  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$  будет настолько прочна, что последние не смогут образовать с закисью меди переходных силикатов или алюминатов, то шлак затвердеет сам по себе, не достраивая пленку закиси меди. В таком случае химическое сцепление шлака со швом не произойдет, что и наблюдается при сварке меди под флюсом АН-26 с 3 % мол.  $\text{K}_2\text{O}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения исследовательской работы решены поставленные задачи, а именно:

1. Повышение качества и надежности сварных конструкций из меди и сплавов на ее основе необходимость дальнейшего изучения вопросов металлургии сварки меди плавлением и, прежде всего, исследованы причины образования пор, трещин и подбор эффективных мер их предупреждения.

2. Было изучено влияние применения хрома на свариваемость меди и применение хромовой бронзы Бр.Х08 в качестве конструкционного материала при изготовлении сварных изделий ответственного назначения.

3. Проведен анализ результатов исследований и химического состава различных марок меди, выпускаемых отечественной промышленностью

4. Предложен технологический процесс сварки меди расщепленным электродом, обеспечивающему оптимальное качество сварного соединения

5. Проведена оптимизация параметров дополнительной газовой защиты при сварке и наплавке меди и ее сплавов под флюсом

6. Рассмотрены особенности технологии сварки под флюсом замкнутых швов на крупногабаритных изделиях из меди больших толщин

7. Исследованы вопросы влияния флюсов на пористость швов, а также отделимость шлаковой корки при сварке меди.

Наиболее значимыми результатами работы являются

1. Проведение исследования по разработанным методикам.

2. Обработка результатов исследования и оценка полученных результатов.

3. Разработаны рекомендации сварки меди расщепленным электродом, выполнена оптимизация параметров дополнительной газовой защиты при сварке и наплавке меди и ее сплавов под флюсом .

Разработанные рекомендации и исследования позволяют повысить качество сварки меди и сплавов на ее основе и получить качественные сварные соединения отвечающие современным технологическим требованиям.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Актуальные проблемы сварки цветных металлов//Докл. Всесоюзный конф. – Киев: наук. думка, 1980.-С. 211-217.
2. Сварка и наплавка тяжелых цветных металлов// Материалы Всесоюзной конф.- Киев: Наук. думка, 1980.-С. 211-217.
3. Шашков А.Н., Хромова Ц.С. Азотодуговая сварка меди //Там же. — 1951. — № 9.
4. Клячкин Я.Л. Сварка цветных металлов. — Машгиз, 1950.
5. Дмитриев П.Т., Степанов-Гребенников Н.М., Макеев Н.И. Электродуговая сварка меди медным электродом с качественным покрытием // Там же. — 1952. — № 8.
6. Ольшанский Н.А. Автоматическая сварка меди под флюсом // Там же. — 1950. — №11
7. Ормонт Б.Ф. Структуры неорганических веществ — ИТТЛ, 1950.
8. Подгаецкий В.В. Влияние флюса на формирование сварного шва // Автомат, сварка. — 1951. — №2.
9. Цейдлер А.А. Metallургия тяжелых цветных металлов. - Т. 1. Медь, никель. — Metallургиздат, 1951.
10. Маслов И.А. Литье слитков цветных металлов и сплавов. — Metallургиздат, 1951.
11. Брицке Э.В., Капустинский А.Ф и др. Термические константы неорганических веществ. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948.
12. Фрумин И.И. Легирование наплавленного металла при сварке под флюсом // Автомат, сварка. — 1952. — N2 1.
13. Сварка под газонасыщенным флюсом / В.В. Подгаецкий, С.М. Мендельберг, В.С. Бендер и др. // Автомат, сварка. — 1973. — № 6. — С. 28-31.
14. Илюшенко В.М., Босак Л.К. Влияние степени окисленности флюса на пористость при сварке меди // Там же. — 1984. — № 4. — С. 67-68.

15. В.В. Подгаецкий. Сварка под флюсом меди и ее сплавов металлическим электродом // Автомат. сварка. — 1953. — № 5.
16. Коренюк Ю.М. Сварка меди под флюсом. — М.: Машиностроение, 1967. — 64 с.
17. Сычев Р.М. Вопросы технологии автоматической сварки толстолистовой меди и улучшение качества стыковых соединений // Сб. «Межвузовская конференция по сварке». — Машгиз, 1958.
18. Илюшенко В.М., Аношин В.А., Бондаренко А.Н., Николаев А.К. Свариваемость меди, раскисленной фосфором // Автомат, сварка. — 1981. — № 12. — С. 59-60.
19. Джевага И.И. О связи между структурой и стойкостью сварных швов на меди и ее сплавах против образования кристаллизационных трещин // Там же. — 1962. — № 8. — С. 52-62.
20. Коренюк Ю.М. Стойкость против образования трещин в швах, содержащих примеси Вi и РЬ при сварке меди // Свароч. пр-во. — 1967. — № 4. — С. 8-10.
21. Коренюк Ю.М. Сварка меди под флюсом. — М.: Машиностроение, 1967. — 64 с.
22. Коренюк Ю.М. Сварка меди под флюсом. — М.: Машиностроение, 1967. — 64 с.
23. Тимофеев В.Н. Исследование влияния режима сварки на механические свойства сварных соединений кислородсодержащей меди // Автомат, сварка. — 1962. — № 10. — С. 32-36.
24. Лайнер Д.И., Черкашина Н.В., Брик Л.М. Влияние малых количеств примесей на свойства меди // Цветные металлы. — 1968. — № 5. — С. 86-87
25. Куликов И.С. Раскисление металлов. -М.: Metallurgy, 1975. - 504 с.
26. Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. — М.: Metallurgy, 1974. — 488 с.

- 27.Шоршоров М.Х., Чернышева Т.А., Красовский А.И. Испытания металлов на свариваемость. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
- 28.Integrated evaluation of effect of main impurities on weldability of copper  
URL: <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2014/pdfarticles/11/5.pdf>-  
(дата обращения 22.12.2017)
- 29.Центральный металлический портал РФ [Электронный ресурс]. URL: <http://metallicheckiy-portal.ru/> - (дата обращения 15.11.2018).
- 30.Оборудование и Технология сварочного производства [Электронный ресурс]. URL: <http://oitsp.ru:88/kategorii-statey/svarka-medi> - (дата обращения 12.03.2019).
- 31.Сварка Резка Металлообработка [Электронный ресурс]. URL: [https://www.autowelding.ru/publ/1/1/vlijanie\\_primesej\\_na\\_svarivaemost\\_medi/4-1-0-539](https://www.autowelding.ru/publ/1/1/vlijanie_primesej_na_svarivaemost_medi/4-1-0-539)- (дата обращения 20.05.2019).
- 32.Peculiarities of structure of Cu–Cu, Ni–Cu and Steel–Cu joints produced by overlap friction stir welding method [Электронный ресурс].  
URL: <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2016/pdfarticles/06/14.pdf>  
- (дата обращения 22.12.2019).
- 33.Boundary Cracking in CuNi10Fe Alloy Weldments; Stephenson, Dr. Norman, NiDI Reprint Series No. 14016.
- 34.Copper and Cu-Ni Clad Plates, Prager, M., Keay, L.K., Thiele, Jr., E.W. Welding Journal, September 1978.
35. Lining Mild Steel Components with 90-10 Cu-Ni Alloy Sheet; Ridgeway, W.F. and Heath, D.J., Welding and Metal Fabrication, October 1969.
- 36.Этус А.Е. Материаловедение. [Текст] : [учебник для техникумов] / А.Е. Этус – М.: Стройиздат, 1975. – 240 с.
- 37.Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов [Текст] / А.С. Зубченко - М. : Машиностроение, 2003. - 784 с. : ил.