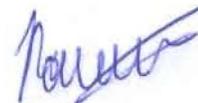


На правах рукописи

УДК 621.791.754

ГРНТИ 81.35.15



Вайнерман Александр Абрамович

**Разработка технологии сварки алюминиевых бронз и медно-никелевых  
сплавов с коррозионно-стойкой азотсодержащей сталью  
для создания перспективных изделий морской техники**

Специальность: 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2019 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии  
«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов  
«Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

**Научный руководитель:**

**Орыщенко Алексей Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Шиганов Игорь Николаевич**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

**Ольшанская Татьяна Васильевна**  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита диссертации состоится «20» ноября 2019 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д411.006.01, созданного на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт»-ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте: <http://dissovet.crismprometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=29>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д411.006.01  
д.т.н., профессор



Е.И. Хлусова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В судостроении и других отраслях промышленности для изготовления изделий судового машиностроения таких, как переборочные стаканы, узлы трения, опоры, вварыши, комингсы и многие другие, требуется сварка медных сплавов со сталями. Наиболее часто соединения разнородных металлов применяются в сварных конструкциях медно-никелевых трубопроводов и приварных деталей из алюминиевых бронз со стальными конструкциями судна. В последние годы в мировой практике увеличивается объем использования сталей, легированных азотом, из-за их высокой прочности, пластичности, ударной вязкости и коррозионной стойкости. В новых перспективных проектах в АО «ЦКБ МТ «Рубин» для изготовления изделий судового машиностроения востребованным оказалось получение сварных соединений медных сплавов с коррозионно-стойкой азотсодержащей сталью аустенитного класса 04X20H6Г11M2AФБ. К ним помимо качества и механических свойств может предъявляться такое специальное требование, как маломангнитность (магнитная проницаемость  $\mu$  сварного соединения должна быть менее 1,01). Аналогов технологии получения подобных маломангнитных сварных соединений в России и за рубежом нет.

По мнению одного из ведущих предприятий в области проектирования судовой арматуры АО «ЦТСС» КБ «Армас» и завода-изготовителя АО «Армалит» другой актуальной проблемой судового машиностроения является повышение срока службы судовой арматуры систем забортной воды из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1. Решение этой проблемы может быть предложено путем наплавки коррозионно-стойким материалом уплотнительных полей ее узлов затворов, наиболее уязвимых в отношении коррозионной стойкости в морской воде.

**Цель работы.** Целью настоящей работы являлась разработка технологии аргодуговой сварки медных сплавов с азотсодержащей сталью аустенитного класса 04X20H6Г11M2AФБ для изготовления изделий судового машиностроения и повышение коррозионной стойкости судовой арматуры систем забортной воды из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1 перспективных заказов морской техники.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) исследование особенностей и разработка принципиальной технологии сварки медных сплавов со сталью 04X20H6Г11M2АФБ;
- 2) разработка композиции металла подслоя и технологии его наплавки на основной металл;
- 3) выбор композиции сварочной проволоки и разработка технологии сварки подслоя с основным металлом;
- 4) исследование качества рассматриваемых сварных соединений, их структур, механических, магнитных и коррозионных свойств наплавленного металла;
- 5) разработка технологии наплавки уплотнительных поверхностей узлов затворов судовой арматуры из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1.

**Методы исследования.** В работе использовались традиционные и специальные методы исследований: оптическая металлография, химический анализ, рентгеноспектральный микроанализ, рентгеноструктурный фазовый анализ, EBSD-анализ; стандартные методики испытаний механических и коррозионных свойств и магнитной проницаемости образцов.

### **Научная новизна.**

1. Впервые предложены и обоснованы композиции металла подслоя, обеспечившие разработку технологии сварки азотсодержащей стали 04X20H6Г11M2АФБ с маломагнитными медно-никелевыми сплавами и алюминиевыми бронзами с получением временного сопротивления сварных соединений не менее 250 МПа и их магнитной проницаемости  $\mu < 1,01$ .

2. Установлено, что при наплавке медного сплава [Cu основа –(5-6,5%)Ni] на никелевые сплавы композиций [Ni основа-(18-22%)Cr-Fe-Mn-Nb] и [Ni основа-(18-22%)Cr-Fe-Mn-Nb-Mo] в них могут образоваться трещины и межкристаллитные проникновения медного сплава, аналогичные таковым при наплавке медных сплавов на сталь. Это вызвано поверхностно-активным воздействием меди в наплавляемом металле на железо, содержащееся в никелевых сплавах этих композиций. Предложен критерий  $k_{\text{ТМП}}$  образования межкристаллитных проникновений и трещин в никелевом сплаве:  $k_{\text{ТМП}} = [\text{Fe}] / ([\text{Ni}] + [\text{Fe}])$ , где [Fe] и [Ni] – содержание никеля и железа в никелевом сплаве. Показано, что при  $k_{\text{ТМП}} \leq 0,12$  трещин и межкристаллитных проникновений не образуется.

3. Установлено, что при наплавке никелевых сплавов композиции [Ni основа-(18-22%)Cr -Mn-Nb-Mo] на сплавы [Cu основа-Ni-Al] образующиеся в зоне сплавления скопления фазы на основе молибдена приводят к образованию трещин. Предотвращение трещинообразования при наплавке никелевых сплавов этой композиции с содержанием молибдена 8-10 % обеспечивается увеличением содержания никеля в сплавах [Cu основа-Ni-Al] до 30% и более, повышающего растворимость молибдена.

4. Установлено влияние структурной и химической неоднородности на трещиностойкость металла, наплавленного сплавом [Ni основа-(18-22%)Cr -Mn-Nb] на сплавы [Cu основа-Ni-Al]. Переход меди в наплавленный металл приводит к образованию в нем трещин при образовании двухфазной структуры  $\gamma$ -Ni и  $\gamma$ -Cu по телу фазы  $\gamma$ -Cu и по границе фаз  $\gamma$ -Ni и  $\gamma$ -Cu, что вызвано значительной химической и структурной неоднородностью, протяженной межфазной границей, значительным содержанием хрома в  $\gamma$ -Cu фазе и переходом в эту фазу в результате перемешивания алюминия, ниобия, снижающих пластичность медного сплава. При кристаллизации наплавленного металла только в виде  $\gamma$ -Ni фазы при прочих равных условиях наплавки трещин обнаружено не было.

5. Установлено, что фаза на основе железа в наплавленном медном сплаве при наличии в нем элементов-аустенитизаторов может кристаллизоваться не только в виде  $\alpha$ -Fe фазы, но и в виде  $\gamma$ -Fe фазы. Показана возможность получения соединений с магнитной проницаемостью  $\mu < 1,01$  с наплавленным медно-никелевым сплавом вне зависимости от среднего содержания в нем железа. Получена зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  от содержания железа для сплава [Cu основа -(5-6,5%)Ni] при его однопроходной ручной аргонодуговой наплавке на низкоуглеродистую сталь при кристаллизации фазы на основе железа в виде  $\alpha$ -Fe фазы:  $[\%Fe] \leq 3,7\%$   $\mu = 1,001 - 1,003$ ;  $[\%Fe] \geq 4\%$ ,  $\mu([\%Fe]) \approx 0,007 * [\%Fe] + 1$ .

#### **Практическая значимость.**

- Разработаны технологии ручной и механизированной аргонодуговой сварки медно-никелевых сплавов и алюминиевых бронз с азотсодержащей сталью аустенитного класса 04X20H6Г11M2АФБ, обеспечивающие получение сварных соединений с временным сопротивлением не менее 250 МПа и магнитной проницаемостью  $\mu < 1,01$ . Определены требования к композициям состава металла подслоя и металла шва и выбраны присадочные материалы для их получения. Технология сварки прошла практическую проверку в АО «Армалит» (оформлен акт внедрения).

- Выпущены «Технологические указания на сварку медно-никелевого сплава марки МНЖ 5-1 с азотистой аустенитной сталью 04Х20Н6Г11М2АФБ» и «Технологические рекомендации на выполнение сварки бронзы БрАМц 9-2 с азотсодержащей сталью 04Х20Н6Г11М2АФБ для изготовления маломагнитных узлов трения».

- Выпущена документация на наплавку ручным, механизированным и автоматическим аргонодуговыми способами опытной партии судовой арматуры – РД5.УЕИА.3659-2015, РД5.УЕИА.3665-2015 и РД5.УЕИА.3661-2015. Наплавлена с положительным результатом опытная партия промышленной судовой арматуры. Разработанные технологии наплавки внедрены в АО «Армалит» (оформлен акт внедрения).

**Достоверность результатов** обеспечена большим объемом выполненных экспериментов с применением комплекса современных методов исследования. Выводы и рекомендации работы подтверждены результатами испытаний образцов из сварных соединений медных сплавов с азотсодержащей сталью, соединений, полученных наплавкой медно-никелевых сплавов на алюминиевую бронзу, и стендовых испытаний корпусов судовой арматуры с наплавленным уплотнительным полем.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Технология аргонодуговой сварки медных сплавов со сталью 04Х20Н6Г11М2АФБ.
2. Структура, композиции металлов подслоя и шва и их фазовый состав, критерии образования межкристаллитных проникновений медного сплава в металл подложки и трещин в нем, трещинообразования и пористости наплавленного металла и металла шва, образования трещин в стали под воздействием меди;
3. Результаты исследования влияния химического и фазового состава медных сплавов на их магнитную проницаемость;
4. Технология наплавки уплотнительного поля узлов затворов судовой арматуры из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1 коррозионно-стойкой сварочной проволокой Св-МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1. Результаты исследования его качества, герметичности, прочности, коррозионной стойкости.

**Личный вклад автора** заключается в:

- разработке научно обоснованных композиций металла подслоя и металла шва, обеспечивающих отсутствие недопустимых дефектов в сварных соединениях, требуемые механические и магнитные свойства сварных соединений медных сплавов с азотсодержащими сталями;

- выборе сварочных материалов, разработке режимов и технологии сварки медных сплавов с азотсодержащими сталями и наплавки судовой арматуры из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1;
- обработке данных, полученных с применением оптической металлографии, фазового, микрорентгеноспектрального и EBSD- анализов сварных соединений;
- разработке технологической документации и техническом сопровождении сварки образцов соединений медных сплавов с азотсодержащими сталями и наплавки уплотнительных полей узлов затворов опытной партии судовой арматуры.

Результаты диссертационных исследований подготовлены и опубликованы автором диссертации. При совместных работах в составе творческих коллективов все соавторы поименно включены в публикации.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы докладывались на: Международной ежегодной конференции молодых ученых и специалистов, г. Санкт-Петербург, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 г.г. ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»; Международной конференции «Передовые технологии и развитие сварочной науки и практики» (15-18 мая 2012 года, г. Санкт-Петербург, Ленэкспо); 12-й международной конференции «Сварка и диагностика» (г. Екатеринбург, 4-6 декабря 2012 года, Экспо); XI молодёжной научно-технической конференции «Взгляд в будущее» (АО «ЦКБ МТ «Рубин», 29-30 мая 2013 г., г. Санкт-Петербург); 15-й международной научно-технической конференции «Сварка и родственные технологии» (г. Екатеринбург, 24-25 ноября 2015 года, Экспо).

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 16 печатных работах, в том числе в 3 изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК, в 2 изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus, в 4 патентах РФ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы из 123 наименований, 1 приложения. Общий объем составляет 147 страниц, включая 81 рисунок и 15 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена цель и сформулированы основные задачи работы, показаны научная новизна, практическая значимость, личный вклад автора и апробация работы.

В **главе 1** приводится литературный обзор особенностей соединения меди и ее сплавов со сталями методами сварки и наплавки, свойств их сварных соединений, магнитных свойств медных сплавов и влияния их химического состава на магнитную проницаемость, данные по проблеме увеличения сроков эксплуатации судовой арматуры систем забортной воды.

Анализ литературных источников показал, что особенности сварки медных сплавов с азотсодержащей сталью 04X20H6Г11M2АФБ не отражены в отечественной и зарубежной литературе. Также практически не исследовались магнитные свойства наплавленного металла, металла шва и сварных соединений этих материалов.

До сих пор вопрос увеличения ресурса арматуры забортной воды из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1 до конца не является решенным. Одним из вариантов решения этой проблемы в мировой практике является наплавка уплотнительных полей узлов затворов арматуры более коррозионно-стойкими материалами, чем бронза. Медно-никелевые сплавы с высоким содержанием никеля обладают комплексом высоких коррозионных и механических свойств, хорошей свариваемостью, что может обеспечить увеличение срока службы арматуры.

В **главе 2** приведены химический состав основных и присадочных материалов, механические свойства основных металлов, использованных при выполнении работы, методики исследований и испытаний.

**Глава 3** посвящена исследованию возможности непосредственной сварки медно-никелевого сплава и алюминиевых бронз с азотсодержащей сталью аустенитного класса 04X20H6Г11M2АФБ. Были наплавлены на сталь ручным аргонодуговым способом сварочные проволоки МНЖКТ 5-1-0,2-0,2, БрАМц9-2 и БрАЖНМц8,5-4-5-1,5 на разных режимах и с разным проплавлением стали.

Установлено, что с увеличением проплавления стали наблюдается увеличение разбрызгивания, визуальное увеличение концентрации сварочного аэрозоля белого цвета над сварочной ванной, образование значительной пористости в наплавленном металле (последнее – при наплавке медно-никелевого сплава). При наплавке с минимальным расплавлением стали указанных явлений не наблюдалось. Был сделан вывод о том, что это связано с выделением азота из стали вследствие ее проплавления. Выявлено наличие нитридов алюминия и нитридов титана в наплавленном металле, что обусловлено азотом, выходящим из стали в результате ее расплавления и активно взаимодействующим с алюминием и титаном в наплавленном металле.

Вместе с тем установлено, что основным фактором, препятствующим получению качественных сварных соединений медных сплавов со сталью 04X20H6Г11M2АФБ, является образование трещин в стали, частично заполненных медным сплавом, вне зависимости от режимов, степени проплавления и техники наплавки (рисунок 1).

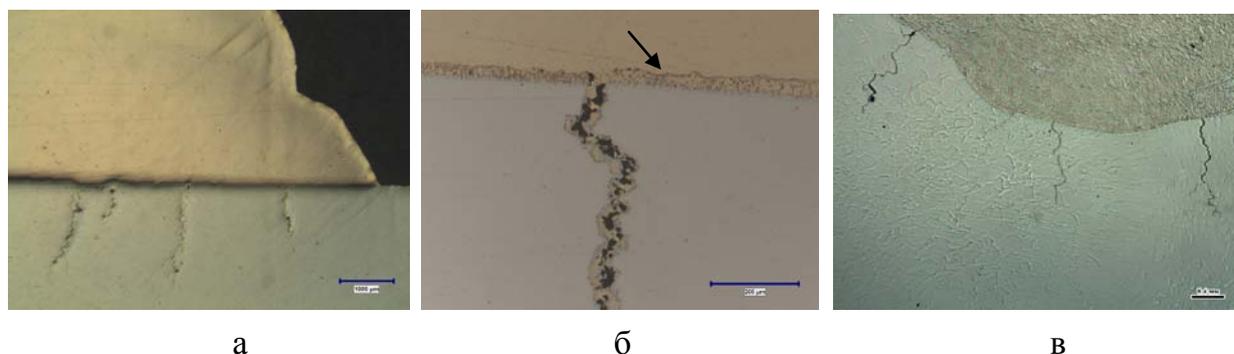


Рисунок 1 – Трещины в стали под металлом, наплавленным проволоками марок МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 (а), БрАМц9-2 (б) и БрАЖНМц8,5-4-5-1,5 (в) на сталь 04X20H6Г11M2АФБ (стрелкой указаны скопления выделений нитридов алюминия  $AlN$  в наплавленном металле вдоль границы сплавления со сталью).

Предложен механизм образования этих трещин в стали 04X20H6Г11M2АФБ. В результате контакта жидкого медного сплава со сталью происходит ее смачивание им и адсорбционное понижение прочности при одновременно действующих сварочных напряжениях (эффект Ребиндера). Склонность сталей аустенитного класса к образованию межкристаллитных трещин в околошовной зоне, наличие более легкоплавкого медного сплава в зоне сплавления, адсорбционное понижение прочности этой стали приводят к ее растрескиванию по границам зерен и частичному заполнению трещин медным сплавом. Поэтому сварку стали 04X20H6Г11M2АФБ с медными сплавами МНЖ 5-1, БрАМц9-2 и БрАЖНМц9-4-4-1 необходимо производить с применением подслоя. При этом следует учесть, что подслоя должен обеспечивать не только отсутствие недопустимых дефектов, требуемые механические свойства, но и, при необходимости, получение сварных соединений со специальными требованиями по магнитной проницаемости  $\mu < 1,01$ .

**Глава 4** посвящена разработке технологии сварки маломагнитных медных сплавов со сталью 04X20H6Г11M2АФБ, обеспечивающей получение сварных соединений с магнитной проницаемостью  $\mu < 1,01$  и временное сопротивление не менее 250 МПа. В качестве основного медного сплава была взята алюминиевая бронза БрАМц9-2, как маломагнитный ( $\mu < 1,01$ ) и антифрикционный материал.

На основании литературного обзора выбраны известные сплавы и сварочные проволоки для проверки возможности их применения для наплавки подслоя: сплавы с высоким содержанием никеля – Св-МН18, Св-МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1, чистый никель НП1, монель-металл НМЖМц28-2,5-1,5, медно-марганцевый сплав типа «Аврора», бронза БрКМц3-1, аустенитно-ферритные проволоки с различным содержанием ферритной фазы. Установлено, что при наплавке медно-никелевых проволок, сплава типа «Авроры», БрКМц3-1, монель-металла в стали образуются трещины от воздействия меди. Было отмечено, что с увеличением содержания никеля количество и размеры трещин уменьшаются. Эксперименты показали, что с увеличением содержания никеля в медно-никелевых проволоках увеличивается склонность к разбрызгиванию и порообразованию наплавленного металла (рисунок 2 а, б). Порообразование объяснено расплавлением стали, выделением из нее азота и воздействием его на наплавленный металл.



а

б

в

Рисунок 2 – Поры и свищи в металле, наплавленном чистым никелем НП1(а), НМЖМц28-2,5-1,5 (б) и ХН78Т (в) на сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ

Применяемые аустенитно-ферритные подслои, как известно и проверено в работе, приводят к увеличению магнитной проницаемости заметно больше, чем 1,01. Исследования показали, что наплавка НП1 и монель-металла на сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ также приводит к получению соединений с магнитной проницаемостью соединения заметно большей, чем 1,01.

Следовательно, медные сплавы, монель-металл, чистый никель, аустенитно-ферритные подслои не подходят для наплавки промежуточного подслоя. По этой причине необходимо было разработать композицию маломангнитного металла подслоя и выбрать сварочные материалы для его наплавки и последующей сварки с основным металлом.

Основными химическими элементами в композиции присадочного материала, которые могут обеспечить указанные требования, были предложены никель и хром. Никель, как известно, эффективно снижает поверхностно-активное воздействие меди на сталь. Однако в настоящей работе показано, что никель в чистом виде (НП1) при

наплавке на сталь не обеспечивает качество наплавленного металла из-за пористости от азота и требуемую магнитную проницаемость соединения. По этой причине для обеспечения требуемой магнитной проницаемости и увеличения растворимости азота необходимо включить в композицию хром. Экспериментальная наплавка сварочной проволоки на основе никеля со значительным содержанием хрома марки ХН78Т на сталь показала, что полученные значения магнитной проницаемости соединения заметно меньше 1,01. При этом была обнаружена значительная пористость по сечению наплавленного металла, не выходящая на поверхность (рисунок 2 в), поэтому увеличение растворимости за счет только добавления хрома неэффективно. Следовало понизить активность азота в наплавленном металле за счет добавления других нитридообразующих элементов.

Для оценки стойкости против порообразования различных составов наплавленного металла и выбора вариантов присадочной проволоки были произведены экспериментальные аргодуговые наплавки никелевых сплавов на сталь, в том числе с добавлением в сварочную ванну титана, ниобия, меди, никеля. По результатам экспериментальных наплавов была построена диаграмма, позволяющая разделить области композиций наплавленного металла, стойкие против пор и склонные к значительной пористости (рисунок 3).

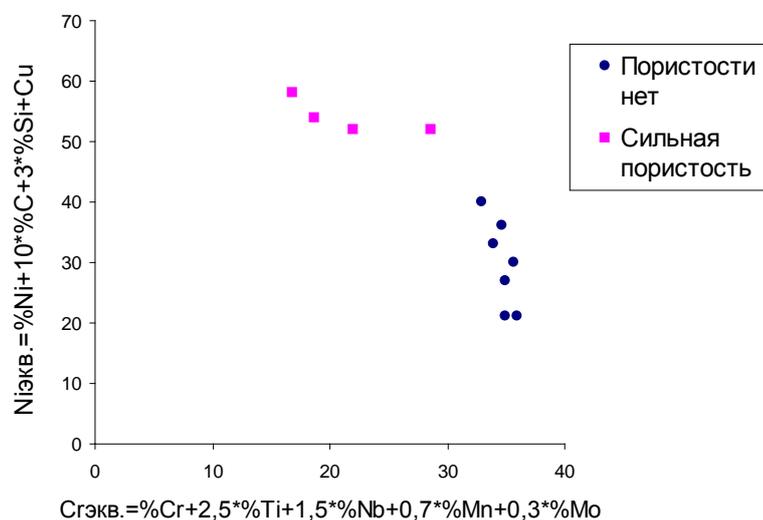


Рисунок 3 – Влияние  $Ni_{\text{экв.н.м.}}$  и  $Cr_{\text{экв.н.м.}}$  различных составов наплавленного на сталь 04X20H6Г11М2АФБ металла на его пористость.

Предложены эмпирические коэффициенты  $Ni_{\text{экв.н.м.}} = \%Ni + 10*\%C + 3*\%Si + \%Cu$  и  $Cr_{\text{экв.н.м.}} = \%Cr + 2,5*\%Ti + 1,5*\%Nb + 0,7*\%Mn + 0,3*\%Mo$ , представляющие собой сумму элементов-эквивалентов, повышающих ( $Ni_{\text{экв.н.м.}}$ ) и понижающих ( $Cr_{\text{экв.н.м.}}$ ) химическую активность азота в наплавленном металле. Множители при элементах-

эквивалентах рассчитаны как отношение значений активностей самих элементов к значениям соответственно активности никеля и активности хрома с учетом литературных данных для никелевых сплавов  $\mu$  -Fe. Как показали исследования, наилучшие результаты по уменьшению порообразования наплавленного металла в целом показали присадочные проволоки на основе никеля с содержанием в них углерода до 0,03%, хрома 18-22%, легированные ниобием, молибденом и титаном. С точки зрения стойкости против порообразования при наплавке на сталь особенно эффективны добавки титана и ниобия. По экспериментальным точкам были получены следующие соотношения для наплавленного металла в части пористости от выделения азота при расплавлении стали:  $Ni_{\text{ЭКВ.Н.М.}}/Cr_{\text{ЭКВ.Н.М.}} \leq 1,2$  – отсутствие пористости;  $Ni_{\text{ЭКВ.Н.М.}}/Cr_{\text{ЭКВ.Н.М.}} \geq 1,8$  – значительная пористость.

В результате были взяты для дальнейших исследований общие композиции Ni-Cr-Mn-Mo-Nb и Ni-Cr-Mn-Nb, которым соответствовали следующие сварочные материалы: Св-02Х22Н64М9БЗ, Св-02Х20Н72ГЗБЗ, прутки LNT NiCrO 60/20. При наплавке этих прутков и проволок в аргоне на сталь были обеспечены отсутствие недопустимых дефектов (рисунок 4) и магнитная проницаемость 1,001-1,002.

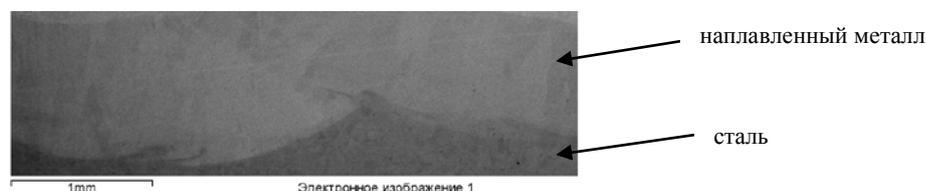


Рисунок 4 – Соединение, полученное наплавкой LNT NiCrO 60/20 на сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ

Опытная сварка алюминиевой бронзы БрАМц9-2 со сталью 04Х20Н6Г11М2АФБ сварочным материалом LNT NiCrO 60/20 показала, что напрямую их сварку производить нельзя, что связано с образованием трещин в стали, вызванным переходом меди в шов из бронзы в результате проплавления, и в металле шва и зоне сплавления его с бронзой, вызванного образованием в них интерметаллидной фазы (Ni, Al).

Было рассмотрено 2 варианта наплавки подслоя: на сталь и на бронзу.

В случае получения сварного соединения вида [сталь]-[подслой]-[шов]-[алюминиевая бронза], на сталь наплавляется проволока Св-02Х20Н72ГЗБЗ (без молибдена, так как он практически не растворим в медных сплавах и может привести к образованию новых фаз, негативно влияющих на качество и свойства соединения), обеспечивая отсутствие непосредственного контакта жидкого медного сплава со сталью, поверх – сварочная проволока марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2 с целью понижения со-

держания никеля во избежание образования интерметаллидных фаз (Ni, Al). Последующая сварка производится также сварочной проволокой марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2.

По литературным данным известно, что наличие железа в медных сплавах заметно увеличивает их магнитную проницаемость. По этой причине необходимо было установить зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  наплавленного медного сплава [Cu основа –(5-6,5%)Ni] при различном содержании в нем железа (рисунок 5). В случае однопроходной ручной аргонодуговой наплавки, если фаза на основе железа представляет собой  $\alpha$ -Fe, то при  $[\%Fe] \leq 3,7\%$   $\mu=1,001-1,003$ , а при  $[\%Fe] \geq 4\%$   $\mu([\%Fe]) \approx 0,007*[\%Fe] + 1$ . При многопроходной наплавке или многочисленных последующих нагревах магнитная проницаемость возрастает.

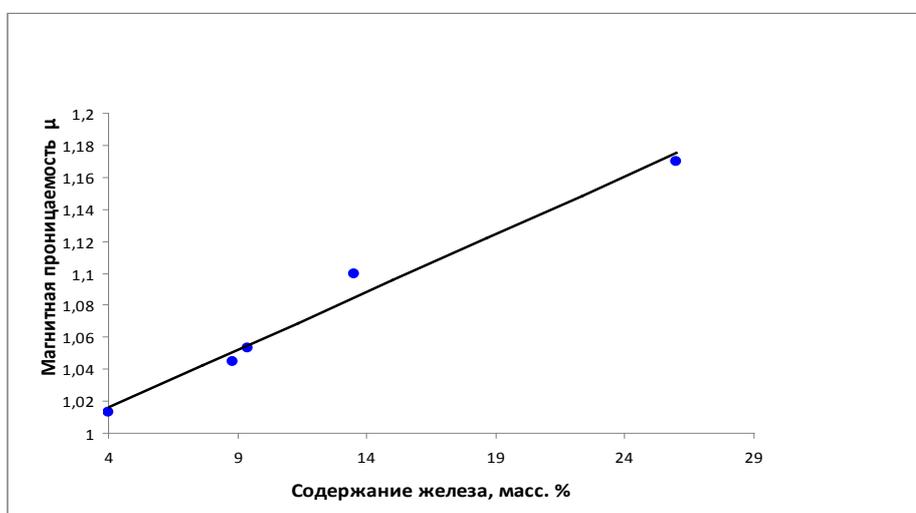


Рисунок 5 – Зависимость магнитной проницаемости наплавленного медного сплава [Cu основа –(5-6,5%)Ni] от содержания в нем железа

В работе впервые показано, что магнитная проницаемость медного сплава зависит не только от содержания железа. При наличии в наплавленном медном сплаве помимо железа значительного количества элементов-аустенитизаторов фаза на основе железа может кристаллизоваться в виде  $\gamma$ -Fe фазы (рисунок 6).

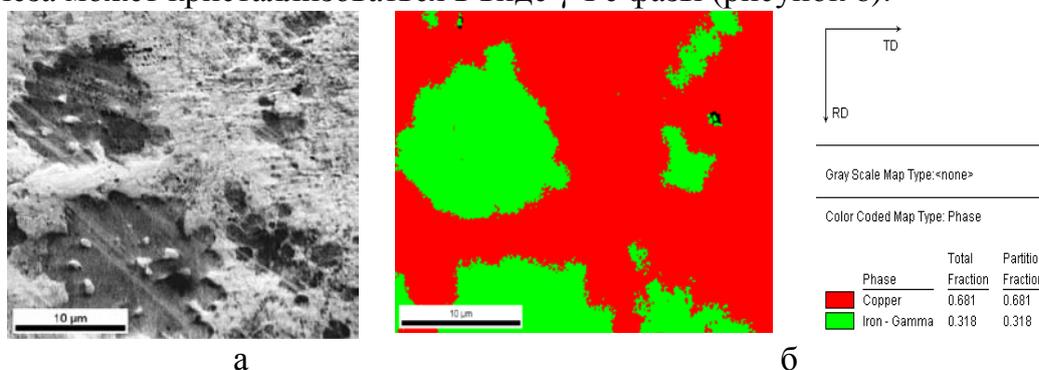


Рисунок 6 – Вид фазы на основе железа (а) в металле, наплавленном проволокой МНЖКТ5-1-0,2-0,2 на никелевую подложку, и результаты отображения фазового EBSD-анализа (б)

В этом случае магнитная проницаемость наплавленного медного сплава и всего соединения в целом может быть менее 1,01 даже при значительном содержании в нем железа. Полученные результаты исследований обосновывают применение для сварки (наплавки) присадочной проволоки МНЖКТ5-1-0,2-0,2.

Также в работе было установлено, что наплавка проволоки марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2 может привести к образованию трещин и межкристаллитных проникновений медного сплава в никелевом сплаве. В работе показано, что это вызвано влиянием меди в наплавленном металле на железо в металле подложки на основе никеля, перешедшее из стали, аналогичным воздействием меди на сталь при сварочных процессах. Разработана количественная оценка стойкости против образования трещин и межкристаллитных проникновений медного сплава в никелевый сплав при постоянстве режимов, состояния поставки материала, техники сварки, толщины материала, жесткости конструкции на основе диаграммы влияния соотношений никеля и меди в медном сплаве  $Cu_{\text{экв.}} = [Cu]/([Ni]+[Cu])$  и соотношения железа и никеля в никелевом сплаве  $Fe_{\text{экв.}} = [Fe]/([Ni]+[Fe])$  (рисунок 7).

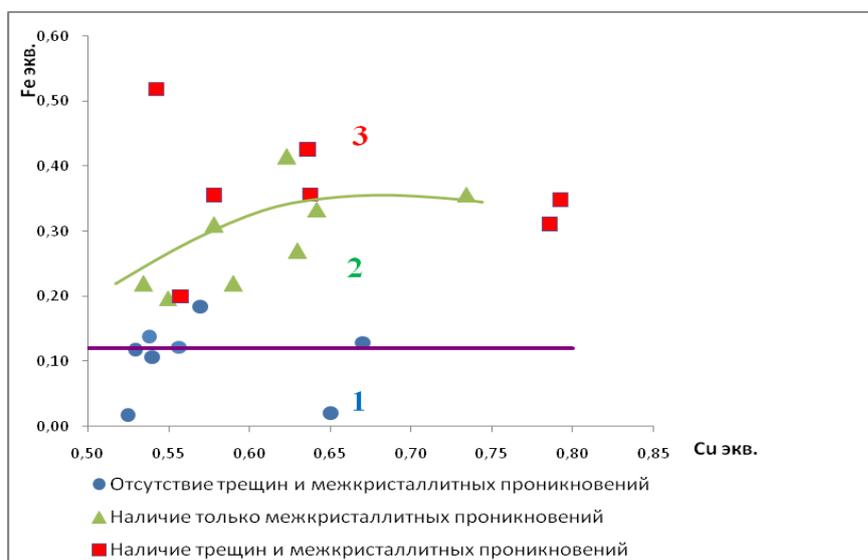


Рисунок 7- Влияние  $Cu_{\text{экв.}}$  и  $Fe_{\text{экв.}}$  на образование трещин и межкристаллитных проникновений медного сплава в рассматриваемых наплавленных никелевых слоях после наплавки на них сварочной проволоки марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2 (область 1 – отсутствие трещин и межкристаллитных проникновений, область 2 – наиболее вероятно образование межкристаллитных проникновений, область 3 – вероятно образование как трещин, так и межкристаллитных проникновений)

В рамках постоянства остальных параметров в данном эксперименте  $Cu_{\text{экв.}}$  и  $Fe_{\text{экв.}}$ , главным образом, влияют на образование трещин и проникновений и их отсутствие. Показано, что в наплавленном никелевом сплаве трещин и межкристаллитных проникновений при соотношении массовых долей  $[Fe]/([Ni]+[Fe]) \leq 0,12$  под наплавленным медным сплавом не образуется. Предложен критерий  $k_{\text{тмп}} = [Fe]/([Ni]+[Fe]) \leq 0,12$ , обеспечивающий отсутствие в наплавленном никелевом сплаве трещин и межкристаллитных проникновений в рамках условий проводимого эксперимента. Следует отметить, что если допустимое межкристаллитное проникновение образовалось глубиной на весь слой подслоя и само по себе не влияет на работоспособность конструкции в целом, оно может привести, как было установлено в одном из экспериментов, к образованию трещины в низлежащем слое от границы сплавления этих слоев подслоя в направлении стали. По этой причине необходимо наплавливать слои никелевого подслоя, обеспечивающие  $k_{\text{тмп}} \leq 0,12$ .

Кроме того, в ряде экспериментов по наплавке МНЖКТ5-1-0,2-0,2 на подслое по сечению наплавленного медного сплава были обнаружены трещины. Такая склонность к трещинообразованию в наплавленном медном сплаве может быть объяснена переходом в него из подслоя значительного количества хрома и частично железа, которые могут заметно снижать стойкость против образования трещин при наплавке медного сплава из-за снижения пластических свойств материала. Хром в наплавленном металле приводит к расслоению однофазной области  $\gamma$ -твердого раствора на основе никеля на  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  ( $\gamma_1$  – твердый раствор на основе никеля и  $\gamma_2$  – твердый раствор на основе меди) и область с выделением  $\alpha$ - твердого раствора на основе хрома. Трещины образуются именно по телу  $\gamma_2$  и по ее границе с  $\gamma_1$ .

Таким образом, проведенный анализ особенностей процесса наплавки и сварки, формирования состава, структуры и свойств сварного соединения [сталь]-[подслой]-[шов]-[алюминиевая бронза] показал, что вариант композиции подслоя на основе сварочных материалов – [02Х20Н72Г3Б3-МНЖКТ5-1-0,2-0,2] – может не обеспечить необходимое качество и свойства наплавленного металла.

Была рассмотрена также другая схема: [медный сплав]- [подслой]-[шов]-[сталь]. Во избежание образования трещин из-за интерметаллидной фазы (Ni, Al) в никелевом материале, целесообразно первые слои на бронзу наплавить проволокой МНЖКТ5-1-0,2-0,2, обеспечивающей понижение содержания алюминия до необходимых значений. На подслое, наплавленный МНЖКТ5-1-0,2-0,2, были наплавлены Св-

02X20H72ГЗБ3 и LNT NiCro 60/20. Оба варианта не дали качественного результата (рисунок 8).

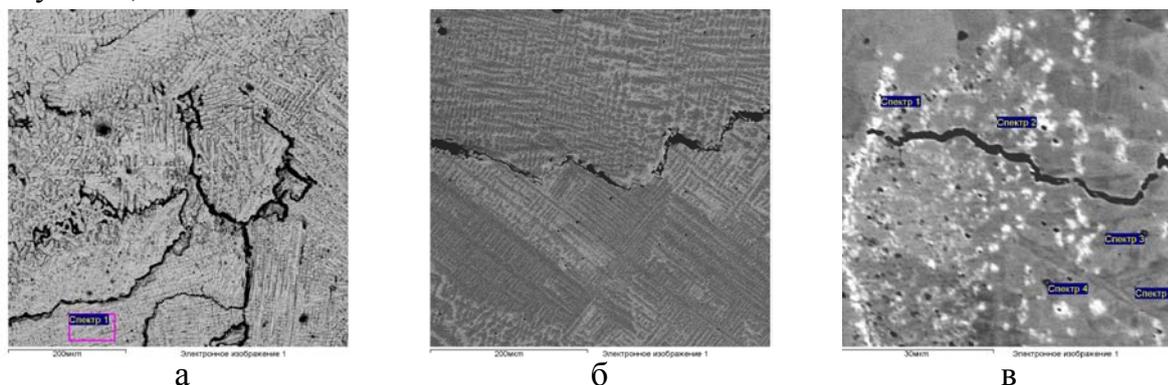


Рисунок 8 – Трещины в металле, наплавленном сварочной проволокой Св-02X20H72ГЗБ3 на металл композиции [Cu основа-Ni-Al] (а, б); трещина в зоне сплавления металла, наплавленного прутком LNT NiCro 60/20 на [Cu основа-Ni-Al] (в).

В случае композиции без молибдена образование трещин объясняется, как было сказано выше, образованием фаз  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  в системе медь-никель-хром-алюминий. Определено, что наиболее устойчивой против трещинообразования областью является однофазная область  $\gamma_1$ . Образование твердых растворов на основе меди с хромом, никелем и алюминием будут заметно снижать стойкость против образования трещин. В случае наплавки композиции с молибденом трещины образовывались только по зоне сплавления с металлом, наплавленным проволокой МНЖКТ5-1-0,2-0,2, и вызваны образованием фазы на основе молибдена (фаза белого цвета на рисунке 8), который выделился, как было установлено в работе, из-за низкого содержания никеля в этой зоне. Было экспериментально определено, что предотвращение трещинообразования в зоне сплавления при содержании в такой композиции никелевого сплава до 10% молибдена обеспечивается увеличением содержания никеля в зоне сплавления до 30% , растворяющего молибден. Такой состав может обеспечить наплавка сварочной проволоки Св-МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1. В работе установлено, что для качественной наплавки Св-МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1 необходимо, чтобы в ее наплавленном металле содержалось не более 1,5% алюминия (рисунок 9). При большем его содержании в наплавленном металле обнаруживалась фаза  $Ni_3Al$ , вызывающая образование в нем трещин.

Последующая наплавка проволок LNT NiCro 60/20 и Св-02X22H64М9Б3 на высоконикелевый медный сплав к дефектам не привела. Эксперименты показали, что содержание меди необходимо ограничить до 1,5% в корне шва для исключения образования в нем жидких межкристаллических прослоек и трещин в них, а также трещин

в околошовной зоне стали. Также были опробованы варианты сварки композиций подслоев с молибденом и без молибдена с применением проволок Св-02Х20Н72Г3Б3, LNT NiCro 60/20 и Св-02Х22Н64М9Б3.

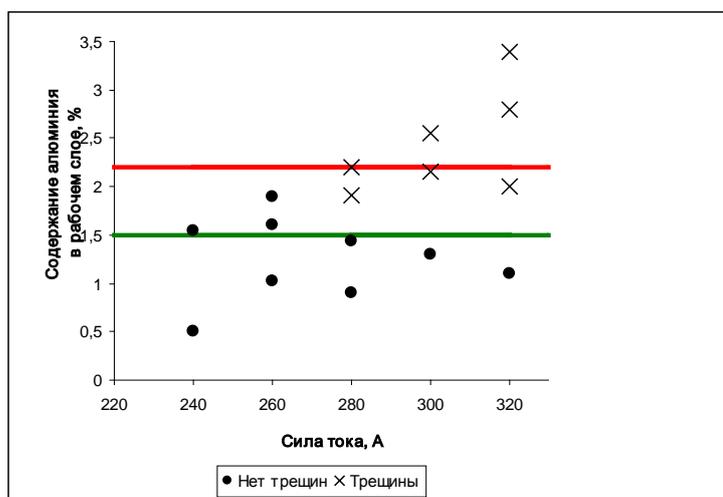


Рисунок 9 – Возможность трещинообразования в металле, наплавленном сварочной проволокой Св-МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1 на металл композиции [Cu основа-Ni-Al].

Молибден в присадочных проволоках LNT NiCro 60/20 и Св-02Х22Н64М9Б3, являясь модификатором, обеспечил отсутствие горячих трещин в металле шва в отличие от присадочных материалов без молибдена (Св-02Х20Н72Г3Б3), применение которых приводило к образованию продольных трещин в его корне. Это объясняется снижением стойкости металла шва против образования горячих трещин из-за перехода в него железа из стали и меди из подслоя.

Внешний вид и поперечное сечение сварного соединения композиции бронза БрАМц9-2-[Cu основа –(5-6,5%)Ni] – [Cu основа –(30-42%)Ni] -[Ni основа-(18-22%)Cr -Mn-Nb-Mo]-шов-сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ, обеспечиваемой последовательной аргонодуговой наплавкой подслоя сварочными проволоками МНЖКТ5-1-0,2-0,2, Св-МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1, LNT NiCro60/20 и сваркой подслоя со сталью прутками марки LNT NiCro 60/20(шов), представлены на рисунке 10.

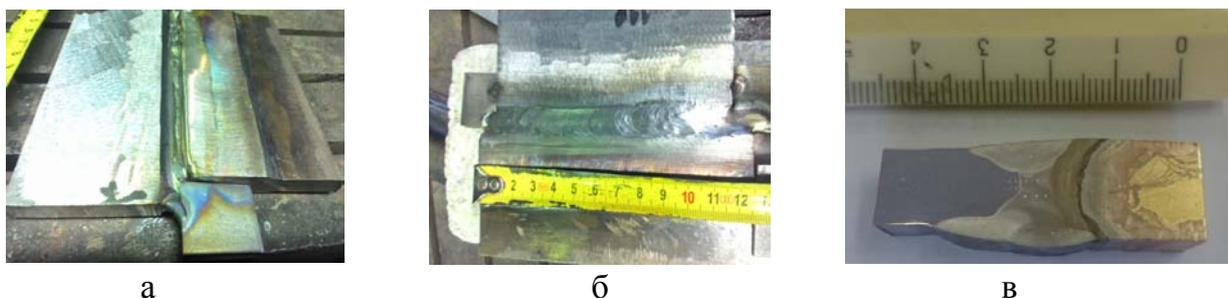


Рисунок 10 – Обратное формирование корня шва (а), внешний вид (б) и макрошлиф (в) сварного соединения по схеме [медный сплав]-[подслой]-[шов]-[сталь].

Радиографический контроль и металлографический анализ не выявили недопустимых дефектов в виде трещин, заметной пористости, свищей, несплавлений. Магнитная проницаемость сварного соединения составила менее 1,01. Временное сопротивление соединений – 408-422 МПа.

Таким образом, разработанная технология аргодуговой сварки обеспечила необходимые требования к соединению. Сварка маломагнитного узла трения выполняется в следующей последовательности. Наплавка МНЖКТ5-1-0,2-0,2 на бронзу производится минимум в 2 слоя для понижения количества алюминия; далее производится наплавка Св-МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1 минимум в 2 слоя, обеспечивая в наплавленном металле не менее 30% никеля; после этого производится наплавка минимум в 4 слоя LNT NiCr60 60/20 или Св-02Х22Н64М9Б3, понижающих содержание меди в подслое не более 1,5%; далее производится механическая обработка подслоя, установка втулки и сборка под сварку со сталью. Сварка производится с применением присадочных материалов LNT NiCr60 60/20 или Св-02Х22Н64М9Б3. Наплавка и сварка может производиться аргодуговыми способами как плавящимся электродом на токе обратной полярности, так и неплавящимся электродом на переменном токе (в связи с возможностью образования пленки  $Al_2O_3$ , отрицательно влияющей на качество наплавленного металла).

**Глава 5** посвящена сварке сплава МНЖ5-1 со сталью 04Х20Н6Г11М2АФБ при отсутствии специальных требований по магнитной проницаемости.

Для изделий, к которым нет строгих требований по магнитной проницаемости, была исследована возможность применения более дешевых аустенитно-ферритных подслоев, наплавленных на сталь. Из опубликованного опыта наплавки медных сплавов на азотистую сталь НН-3Б рекомендуется для подслоя применение проволок Св-08Х20Н9С2БТЮ (ЭП-156), 08Х19Н9Ф2С2 (ЭИ-606) и 07Х25Н12Г2Т (ЭП-75). Однако подслои ЭП-156 и ЭИ-606 имеют в своём составе высокое содержание кремния. Кремний в таких количествах может привести к образованию трещин при сварке со сплавом МНЖ 5-1. Подслои на основе ЭП-75, как отмечается, эффективен в случае принудительного охлаждения основного металла водой для получения необходимой доли и типа феррита.

Поэтому в настоящей работе был выбран альтернативный вариант подслоя на базе металла, наплавленного на сталь сварочной проволокой с высоким содержанием ферритной фазы марки ЭП-263Ш (08Х32Н8Ш). Показано, что слоев подслоя, необхо-

димых для обеспечения отсутствия трещин от воздействия меди, должно быть не менее двух. Расчетным путем по диаграмме Шеффлера установлено, что при содержании ферритной фазы в подслое не менее 40-50% на кромке при сварке сплава марки МНЖ 5-1 со сталью 04Х20Н6Г11М2АФБ толщинами до 13 мм трещинообразования в металле подслоя и в стали, а также недопустимых межкристаллитных проникновений медного сплава в подслоя и в сталь можно избежать. Сварка подслоя со сплавом МНЖ5-1 выполняется сварочной проволокой марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2.

В работе показано, что при сварке подслоя, наплавленного проволокой ЭП-263Ш на сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ, со сплавом МНЖ5-1 с применением сварочной проволоки МНЖКТ5-1-0,2-0,2 возможно образование трещин в крупных прослойках фазы на основе железа, кристаллизующейся в металле шва вследствие проплавления подслоя. Эти прослойки кристаллизуются с прожилками медного сплава, в которых и происходит образование трещин (рисунок 11, а). Поэтому рекомендуется перед сваркой на стальной подслоя ручным аргодуговым способом наплавить два слоя проволоки марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2 с применением эффективного приема уменьшения проплавления основного металла, названных их разработчиком «наплавкой полунезависимой дугой» (рисунок 11, б-в).

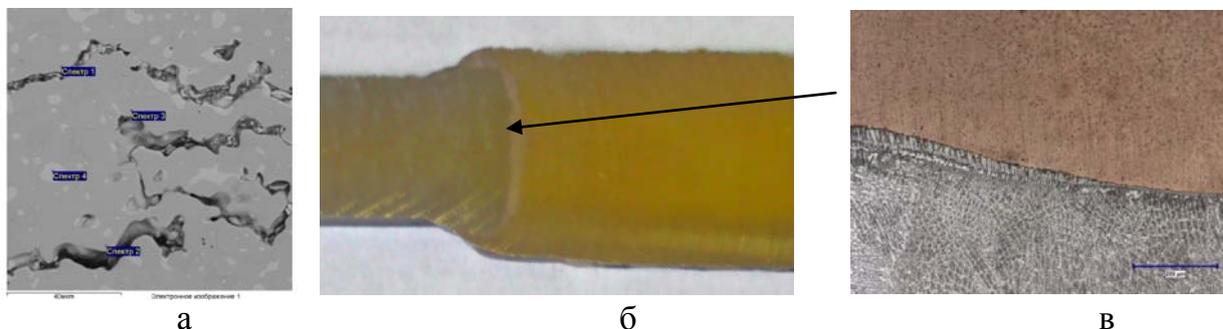


Рисунок 11 – Трещины в прожилках медного сплава в прослойке фазы на основе железа в металле шва (а); вид сварного соединения медного сплава со сталью 04Х20Н6Г11М2АФБ с применением приемов уменьшения проплавления слоя, наплавленного ЭП-263Ш на сталь (б); зона сплавления [МНЖКТ5-1-0,2-0,2 - ЭП-263Ш] с применением приемов для уменьшения проплавления стальной подложки на основе ЭП-263Ш, отсутствие крупных выделений фазы на основе железа в наплавленном медном сплаве (в).

Возможен альтернативный вариант уменьшения проплавления – использование способов сварки и наплавки с применением ленточных облицовок, на которые получены патенты на изобретение №2470752 «Способ дуговой сварки меди и медно-никелевых сплавов со сталью» и №2470750 «Способ дуговой наплавки меди и медных сплавов на сталь».

Получены следующие механические свойства сварного соединения сплава МНЖ5-1 со сталью (на каждый вид испытывалось не менее трех образцов):  $\sigma_{\text{в}}=280-286$  МПа, ударная вязкость (KCV): при надрезе по зоне сплавления подслоя-шов – 71-100 (84) Дж/см<sup>2</sup>, при надрезе по центру шва – 158-201 (184) Дж/см<sup>2</sup>, при надрезе по металлу стального подслоя – 147-152 Дж/см<sup>2</sup>.

Следует отметить, что азот, перейдя из стали в наплавленный медно-никелевый сплав, образует азотсодержащие соединения (Ti,N), в основном вблизи или прямо в самих выделениях фазы на основе железа, но на качество, временное сопротивление и ударную вязкость соединения это не оказало влияния заметным образом. Механические свойства соединения получены на уровне основного металла. Полученные результаты позволяют применять разработанную технологию для сварки конструкций из сплава МНЖ5-1 со сталью 04Х20Н6Г11М2АФБ без требований по магнитной проницаемости.

В **Главе 6** показана практическая возможность использования полученных научных результатов по сварке медных сплавов с азотсодержащими сталями для повышения ресурса судовой арматуры из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1 для новых проектов АО «Армалит» и АО «ЦТСС» КБ «Армас».

Известно, что медно-никелевые сплавы с содержанием никеля 40% и более обладают высокой коррозионной стойкостью в морской воде. По этой причине применение таких сварочных материалов для наплавки уплотнительного поля может быть решением проблемы повышения коррозионной стойкости уплотнительных полей узлов затворов судовой арматуры из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1. В главе 5 были исследованы особенности и разработана технология наплавки медно-никелевой сварочной проволоки марки Св-МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1 с содержанием никеля 40-42% на алюминиевую бронзу БрАМц9-2, как составной части подслоя. Коррозионные испытания материала МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1 показали его стойкость против струевой коррозии (0,0182 г/м<sup>2</sup>час), заметно более высокой, чем у бронзы БрА9Ж4Н4Мц1 (0,046 г/м<sup>2</sup>час), отсутствие склонности к язвенной (питтинговой) коррозии в отличие от бронзы БрА9Ж4Н4Мц1, а также к избирательной коррозии.

На основании полученных коррозионных свойств сплава МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1, можно утверждать, что его применение для наплавки уплотнительного поля арматуры позволяет повысить ее фактический ресурс не менее, чем в 2 раза. Учитывая исследованные в работе особенности наплавки медно-никелевых сплавов на алюми-

ниевую бронзу БрАМц9-2, разработаны технологии аргодуговой наплавки уплотнительных полей корпусов судовой арматуры из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1 сварочной проволокой Св-МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1 ручным способом неплавящимся электродом на переменном токе, механизированным и автоматическим способами плавящимся электродом на постоянном токе обратной полярности. На бронзу производится наплавка проволоки МНЖКТ5-1-0,2-0,2 минимум в 2 слоя толщиной не менее 2,5 мм для понижения количества алюминия, чтобы не допустить образования фазы  $Ni_3Al$  в рабочем слое. Далее производится наплавка рабочего слоя проволокой Св-МНЖМцТК40-1-1-0,3-0,1 в 2-3 слоя, обеспечивая необходимую коррозионную стойкость уплотнительного поля. Временное сопротивление наплавленных по данной технологии образцов составляет 356-406 МПа (среднее – 394 МПа), что удовлетворяет требованиям к рассматриваемому узлу арматуры.

По разработанной технологии наплавлена опытная партия корпусов арматуры (рисунок 12), которая прошла стендовые гидравлические испытания. Получены патенты на изобретение №2610656 «Способ дуговой наплавки медно-никелевого сплава с содержанием никеля от 40 до 50% на алюминиево-никелевые бронзы» и на полезную модель №168835 «Седло клапана в корпусе судовой арматуры». Разработанные технологии освоены и внедрены на одном из ведущих заводов-изготовителей судовой арматуры в России – АО «Армалит». Выпущена технологическая документация на наплавку.

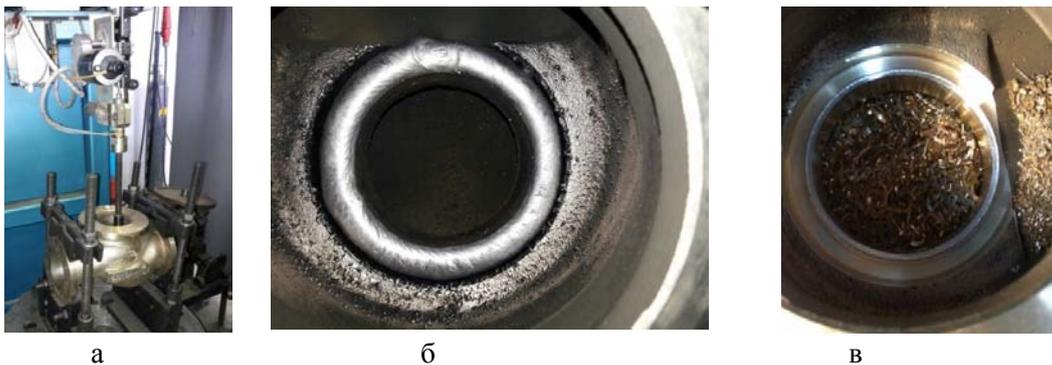


Рисунок 12 - Уплотнительное поле судовой арматуры из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1 после автоматической наплавки на него сварочной проволокой Св-МНЖМцТК 40-1-1-0,3-0,1:  
 а – корпус арматуры установлен на вращатель и закреплен перед началом наплавки  
 б – вид уплотнительного поля после окончания наплавки  
 в – вид уплотнительного поля после окончательной механической обработки

### Общие выводы по работе

1. Выполнен комплекс исследований и определены основные особенности аргонодуговой сварки медных сплавов с азотсодержащей сталью аустенитного класса 04X20H6Г11M2АФБ, устанавливающие необходимость применения промежуточного подслоя по следующим причинам:

- трещинообразование в азотсодержащей стали, вызванное воздействием поверхностно-активным медным сплавом совместно и образующимися сварочными напряжениями растяжения;

- порообразование в наплавленном металле (металле шва), вызванное азотом, содержащимся в стали и взаимодействующим при ее расплавлении с наплавленным металлом (металлом шва).

2. Рассмотрен вариант получения маломагнитных соединений медных сплавов со сталью 04X20H6Г11M2АФБ с применением наплавки подслоя на сталь [Ni основа-(18-22%)Cr-Fe-Mn-Nb] - [Cu основа -(5-6,5%)Ni]. Установлены особенности взаимодействия медного сплава при его наплавке на никелевый сплав на межфазной границе в виде образования межкристаллитных проникновений и трещин в нем, установлены особенности влияния химического и фазового состава на магнитную проницаемость наплавленного металла.

3. Разработана композиция металла подслоя, наплавленного на медный сплав, [Cu основа -(5-6,5%)Ni] – [Cu основа -(30-42%)Ni] -[Ni основа-(18-22%)Cr -Mn-Nb-Mo], обеспечивающая магнитную проницаемость  $\mu < 1,01$  и временное сопротивление не менее 250 МПа сварных соединений медно-никелевых сплавов и алюминиевых бронз со сталью 04X20H6Г11M2АФБ. Выбраны сварочные материалы и разработана технология наплавки подслоя на медный сплав.

4. Установлено, что молибден в присадочной проволоке в сплавах [Ni основа-(18-22%)Cr -Mn-Nb-(8-10%)Mo], являясь модификатором, обеспечивает отсутствие трещин в металле шва, вызываемых переходом в него железа из стали и меди из подслоя. Применение аналогичных присадочных материалов системы [Ni основа-(18-22%)Cr -Mn-Nb] без молибдена приводит к образованию продольных трещин в корне шва.

5. Предложены критерии пористости в металле, наплавленном на сталь 04X20H6Г11M2АФБ присадочными материалами на основе никеля, на основании

влияния их элементов на активность азота, выделяющегося из стали в процессе наплавки. Установлены соотношения:  $Ni_{\text{ЭКВ.Н.М.}}/Cr_{\text{ЭКВ.Н.М.}} \leq 1,2$  – отсутствие пористости в шве;  $Ni_{\text{ЭКВ.Н.М.}}/Cr_{\text{ЭКВ.Н.М.}} \geq 1,8$  – значительная пористость в шве. При применении выбранных для сварки присадочных материалов на основе никелевых сплавов повышению стойкости шва против порообразования способствует содержание в них углерода до 0,03%, содержание хрома 18-22% и применение в них ниобия.

6. Сформулирован критерий по применению аустенитно-ферритных подслоев, обеспечивающих необходимые качество и свойства сварных соединений медно-никелевых сплавов со сталью 04X20H6Г11M2АФБ в случае отсутствия требований по магнитной проницаемости – содержание ферритной фазы в подслое по диаграмме Шеффлера должно быть не менее 40-50%. Такое содержание обеспечивается применением присадочной проволоки ЭП-263Ш для наплавки подслоя.

7. Установлено, что в случае отсутствия применения технологических приемов проплавления подслоя, наплавленного сварочной проволокой ЭП-263Ш на сталь 04X20H6Г11M2АФБ, при последующей его сварке с медным сплавом в металле шва образуется значительное количество фазы на основе железа с прослойками в ней на основе медного сплава, в которых образуются трещины. Поэтому рекомендуется применять предварительную наплавку медного сплава на аустенитно-ферритный подслей с применением приемов полунезависимой дуги, позволяющих снизить количество фазы на основе. Новизна разработанных технических решений защищена патентами РФ №2470752 и №2470750 на сварку и наплавку с применением ленты для уменьшения проплавления основного металла.

8. Разработаны технологии сварки медных сплавов со сталью 04X20H6Г11M2АФБ. Выпущена технологическая документация на сварку.

9. На основании выполненных в работе исследований разработаны технологии наплавки судовой арматуры из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1 с применением сварочной проволоки марки Св-МНЖМцТК 40-1-1-0,3-0,1, обеспечивающие получение качественного наплавленного металла и увеличение ресурса судовой арматуры не менее, чем в 2 раза. Новизна разработанных технических решений защищена патентами РФ на изобретение №2610656 на способ наплавки и на полезную модель №168835 для седла клапана в корпусе судовой арматуры. Наплавлена опытная партия судовой арматуры. Проведены ее стендовые испытания с положительным результатом. Выпущена технологическая документация на наплавку.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАУЧНЫХ ТРУДАХ

1. Вайнерман А.А., Вайнерман А.Е. Исследование особенностей формирования химического состава и структуры металла в различных зонах сварных соединений судовых трубопроводов из медно-никелевого сплава МНЖМц 11-1,1-0,6//**Вопросы материаловедения**. 2012. №1(69). с. 99-106.
2. Вайнерман А.А., Вайнерман А.Е., Веретенников М.М. Некоторые особенности аргонодуговой сварки медных сплавов с азотистой аустенитной сталью марки 04X20H6Г11М2АФБ// **Вопросы материаловедения**. 2013. №4(76). с.108-122.
3. Вайнерман А.А., Вайнерман А.Е. Сварка сплава марки МНЖ 5-1 с азотсодержащей аустенитной сталью//**Цветные металлы**. 2015. №4. с.39-43.
4. Pichuzhkin S.A., Chernobaev S.P., Vainerman A.A., Veretennikov M.M. ASPECTS OF THE WELDING OF BRONZE BR.A9ZH4N4MTS1 WITH COPPER-NICKEL ALLOYS. **Metallurgist**. 2016. T. 59. № 9-10. pp. 968-973.
5. Pichuzhkin S.A., Chernobaev S.P., Vaynerman A.A., Veretennikov M.M. SPECIAL FEATURES OF THE FORMATION OF THE COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE METAL DEPOSITED WITH THE SV-MNZHMTSTK40-1-1-0.3-0.1 WIRE ON BRA9ZH4N4MTS1 BRONZE. **Welding International**. 2017.T.31. №11.pp. 892-896.
6. А.Е.Вайнерман С.А.Пичужкин, С.П.Чернобаев, М.М.Веретенников, А.А.Вайнерман. Работы ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» в области сварки и наплавки медных сплавов и разнородных металлов// Сварка и диагностика. Сборник докладов международного форума. 2012. с. 52-61.
7. А.Е. Вайнерман С.А.Пичужкин, С.П.Чернобаев, М.М.Веретенников, А.А.Вайнерман. Новые сварочные материалы и технологические особенности сварки и наплавки ими изделий из медных сплавов и разнородных металлов//«Сварочные материалы -2012» к 100-летию «ЦНИИМ». Доклады Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции 16-18 октября 2012 г. с.141-147.
8. А.А.Вайнерман, А.Е.Вайнерман, М.М.Веретенников. Особенности сварки (наплавки) медных сплавов с азотистыми сталями//Сборник материалов молодёжной научно-технической конференции «Взгляд в будущее - 2013». 2013. с. 61-65.
9. Вайнерман А.А., Вайнерман А.Е., Орыщенко А.С. Разработка технологии аргонодуговой сварки медных сплавов со сталями с получением улучшенной структуры

металла шва сварных соединений// Сборник «Труды конференции молодых ученых и специалистов ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей». 2013 г. с.89-95.

10. А.Е. Вайнерман А.В.Баранов, С.А.Пичужкин, С.П.Чернобаев, М.М. Веретенников, А.А. Вайнерман. Некоторые работы ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» в области сварки и наплавки медных сплавов и разнородных металлов// Металлургия сварки и сварочные материалы Сборник докладов юбилейного научно-практического Семинара 100-летие со дня рождения Петрова Г.Л. Санкт-Петербург 2013. с.53-60.

11. Вайнерман А.А., Пичужкин С.А. Особенности наплавки медно-никелевых сплавов с различным содержанием никеля на алюминиевую бронзу Бр. А9Ж4Н4Мц1// Сварка и диагностика. Сборник докладов международного форума. 2015. с. 28-34.

12. Пичужкин С.А., Чернобаев С.П., Вайнерман А.А., Веретенников М.М. Особенности наплавки седла клапана судовой арматуры из бронзы БрА9Ж4Н4Мц1 для повышения ее срока службы. Арматуростроение. 2016. №4(103) с.66-68.

13. Патент на изобретение №2470752. Способ дуговой сварки меди и медно-никелевых сплавов со сталью/ Орыщенко А.С., Вайнерман А.Е. , Баранов А.В., Пичужкин С.А., Вайнерман А.А.; опубл. 27.12.2012.

14. Патент на изобретение №2470750. Способ дуговой наплавки меди и медных сплавов на сталь/ Орыщенко А.С., Вайнерман А.Е. , Баранов А.В., Пичужкин С.А., Вайнерман А.А., Попов О.Г.; опубл. 27.12.2012.

15. Патенты на изобретение №2610656. Способ дуговой наплавки медно-никелевого сплава с содержанием никеля от 40 до 50% на алюминиево-никелевые бронзы/Пичужкин С.А., Чернобаев С.П., Вайнерман А.А., Вайнерман А.Е., Веретенников М.М.; опубл. 14.02.2017.

16. Патент на полезную модель №168835. Седло клапана в корпусе судовой арматуры/ Пичужкин С.А., Чернобаев С.П., Вайнерман А.А., Веретенников М.М, Конон А.И.; опубл. 21.02.2017.