

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Васюхно Антон Юрьевич

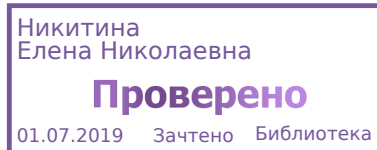
**Исследование процесса формирования структуры и
свойств алюминиевого сплава при затвердевании в
ограниченном объеме**

Направление подготовки

15.04.01 «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2019



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре
государственном университете» на кафедре «Машиностроение и металлургия»

Научный руководитель

заслуженный изобретатель
Российской Федерации,
доктор технических наук, профессор
Марьин Борис Николаевич

Научный консультант

заведующий кафедрой
«Машиностроение и металлургия»,
кандидат технических наук, доцент
Бахматов Павел Вячеславович

Рецензент

кандидат технических наук, доцент,
и.о. заведующего лабораторией
химических и фазовых превращений
в материалах, ведущий научный
сотрудник, ИМиМ ДВО РАН,
г. Комсомольск-на-Амуре,
Жилин Сергей Геннадьевич

Защита состоится 28 июня 2019 года в 9 часов 30 минут на заседании
государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки
15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном уни-
верситете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд.
221/2.

Автореферат разослан 20 июня 2019 г.

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

А.В. Свиридов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Эксплуатационные свойства металлов и сплавов зависят от напряженного состояния, температуры, эрозионного воздействия внешней среды, облучения и других факторов. Создание сплавов, хорошо сопротивляющихся всем этим воздействиям, во многих случаях невозможно или не оправдано с экономической точки зрения. Учитывая высокие требования к современным материалам и неоднородность внешнего воздействия на отдельные части изделий, целесообразно использовать композитные материалы и конструкции, сваренные из разнородных металлов и сплавов.

В настоящее время разнородные сплавы находят широкое применение в судостроении для строительства корпусов судов и их надстроек, а также для изготовления различного судового оборудования, трубопроводов и других устройств.

Главная цель применения разнородных сплавов при строительстве судна – максимально возможное его облегчение с использованием освободившейся массы для повышения грузоподъемности или улучшения технических характеристик судна (повышение скорости, совершенствование оборудования, улучшение устойчивости, увеличение дальности перевозок и пр.).

Наиболее значительная часть массы судна относится к его корпусу (25 – 40 % от водоизмещения). В связи с этим в целях максимального снижения массы судна целесообразно для изготовления корпусных конструкций шире использовать алюминиевые сплавы.

На военном корабле корвет проекта «Совершенный» конструктор заложил технологию сварки алюминия к стали через биметаллическую проставку, что не является технологичным процессом, так как при этом способе создания неразъёмного соединения алюминия со сталью используются два разных способа сварки, при которых применяются разные материалы, оборудование, сварщики, подготовительные мероприятия и т.д.

Проведённый анализ возможных способов сварки, предусматривающих создание неразъёмного соединения алюминия со сталью выявил, что из-за габаритов конструкции ни один из способов сварки не подходит, кроме способа алитирования с непосредственной сваркой путём высокотемпературной заливки расплавленным алюминием и выдержкой его при определённой температуре.

Целью данной работы является получение соединения двух разнородных металлов 12Х18Н10Т и АМг-6 способом совмещённой операции алитирования и сварки-пайки, путем заливки соединения расплавом алюминия.

Для реализации цели работы поставлены следующие **задачи**:

- оценка технологичности сварных конструкций с биметаллическими проставками;
- проведение литературного обзора работ, касаемых проблем непосредственного соединения алюминия и стали;
- определение возможности совмещения процедуры алитирования и сварки-пайки алюминия и стали в одной технологической операции;
- выбор методики экспериментального исследования, для определения механических свойств получаемых соединений;
- проведение анализа микроструктуры, микротвердости сварных соединений;
- проведение анализа распределения легирующих элементов по диффузионному соединению;
- обработка результатов исследования;
- подготовка общих выводов.

Объект исследования: биметаллическое соединение нержавеющей стали и алюминиевого сплава.

Предмет исследования: процессы создания неразъёмного соединения в операции, объединяющей алитирование и диффузионную сварку-пайку.

Научная новизна:

- предложен способ создания неразъемного соединения, путем алитирования и создания диффузионного соединения за одну технологическую операцию;
- предложена методика проведения механических испытаний биметаллического соединения;
- оценен размер диффузионного соединения по результатам анализа рассредоточения легирующих элементов с применением растрового электронного микроскопа и распределения микротвердости.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов основывается на использовании комплекса контрольно-измерительного оборудования для проведения экспериментальных исследований, использованием методик определения физико-механических свойств и макро- и микроструктурных параметров, а также соответствием полученных результатов экспериментальных данных.

Практическая значимость. Применение полученного способа сварки-пайки значительно уменьшает вес конструкции, поскольку отпадает необходимость использования биметаллической проставки, которая предусмотрена базовой технологией, соответственно, предусматривается снижение затрат сварочных материалов и использование дополнительного оборудования, а также сокращается время подготовительных и сборочно-сварочных мероприятий.

Личный вклад автора. Соискатель активно участвовал в постановке и проведении экспериментов: произвел сборку-сварку образцов для исследований, проводил микроструктурные исследования, механические испытания, обработку и анализ полученных результатов исследования, принимал активное участие в подготовке и написании научных публикаций.

Основные положения, выносимые на защиту:

- способ создания биметаллического соединения алюминия и нержавеющей стали;
- методики проведения экспериментальных исследований;
- анализ результатов механических испытаний;
- анализ микроструктуры и микротвердости сварных соединений;
- анализ распределения легирующих элементов по диффузионному соединению.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 2 Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», Комсомольск-на-Амуре (апрель 2019 г.)

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 1 публикации в сборнике РИНЦ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка используемых источников. Диссертация содержит 60 страницы, 44 рисунка, 28 таблиц; список используемых источников, состоящий из 20 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, указаны объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертации. В данной главе рассмотрены основные трудности сварки алюминия со сталью. Произведен обзор применяемого в судостроении конструкционного биметалла алюминий-сталь марок 12Х18Н10Т и АМг-6. Рассмотрены способы создания неразъемного соединения алюминия со сталью в твердом состоянии и сваркой плавлением и наплавкой. Описана биметаллическая конструкция на корабле корвет проекта 20380, а также основные материалы, используемые при создании данной биметаллической конструкции, проведен анализ базовой технологии сборки-сварки биметаллической конструкции (рисунок 1).

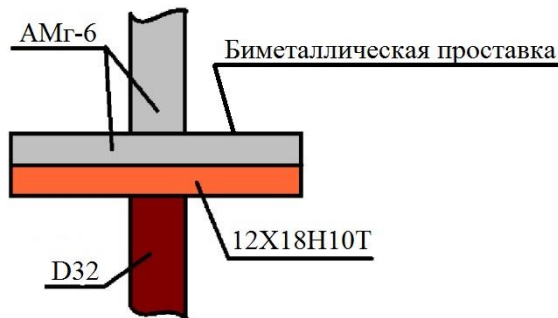


Рисунок 1 – Схема выполнения сварного соединения элементов базовой технологии

Во второй главе изложены общие вопросы методики исследований: создание образцов, методика проведения механических испытаний, определения химического состава, макро- и микроструктурных параметров диффузионного слоя.

Для исследования способа соединения двух разнородных металлов 12Х18Н10Т и АМг-6 способом алитирования изготовлены образцы – стальные формы (рисунок 2) в количестве 4 штук, высотой 25 мм, 24 мм, толщиной стенки 2 мм из материала 12Х18Н10Т. Днище формы изготовлено из листа стали 12Х18Н10Т толщиной 2 мм. К днищу формы был приварен прутки из стали 12Х18Н10Т диаметром 2 мм и длиной 8 мм для дальнейшего испытания на вырывание. Детали сварены с использованием лазерной сварки с частотным режимом лазера, рабочим напряжением 400 В, длительностью импульса 13,5 мс, частотой импульсов 4 Гц.

Стальные формы, находящиеся при комнатной температуре, были залиты предварительно расплавленным в муфельной печи, при температуре 750°C, алюминиевым сплавом АМг-6 с последующим его затвердеванием на воздухе. Заполненные формы (рисунок 3) в дальнейшем подверглись нагреву в печи до 850 °С и выдержке при 5, 10, 30, 60 минут соответственно.



Рисунок 2 – Внешний вид стальной формы для заливки алюминия



Рисунок 3 – Залитые образцы



Рисунок 4 – Схема проведения механических испытаний на вырывание

Перед испытаниями образцов на вырывание, зона сварки прутка и днища высверливалась, для удаления места стыка. Испытание образцов на вырывание производилось с помощью универсальной электромеханической машины Instron 3382. Схема проведения механических испытаний на вырывание показана на рисунке 4.

Перед испытаниями замеряется штангенциркулем с точностью до 0,1 мм диаметр рабочей поверхности и длину образца, так как при их изготовлении возможны отклонения от стандартных размеров. Результаты замеров заносятся в протокол испытаний. Образец устанавливается в захватах испытательной машины INSTRON 3382 так, чтобы не было люфта. Поэтому машины, предназначенные для испытаний на растяжение, устроены так, что расстоя-

яние от одного захвата образца до другого можно увеличивать, причем один из них непосредственно связан с динамометром, а другой – с движущейся траверсой. Движение осуществляется по отношению к станине, воспринимающей действующие нагрузки. В возникающую при этом силовую цепь включают электронный сила измеритель. Удлинение измеряют по движению траверсы.

Испытания на растяжение проводили с постоянной скоростью 1 (Н/(мм² *с)), так как соотношение между напряжением и деформацией зависит от скорости испытания.

Для исследования величины и свойств диффузионного слоя, полученного в процессе одновременного алитирования и создания биметаллического соединения алюминия (АМг-6) и стали (12Х18Н10Т) в зависимости от времени выдержки расплава алюминия при температуре 850°С образцы были распилены поперек на две части с помощью отрезного станка Delta AbrasiMet. Шлифы поперечного сечения были подготовлены с помощью шлифовально-полировального станка EcoMet 250 Pro, внешний вид макрошлифов приведен на рисунке 5.

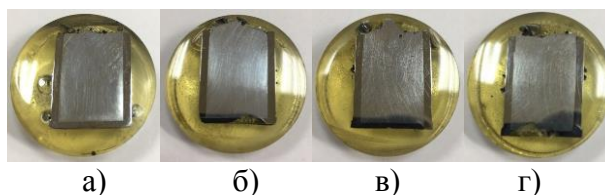


Рисунок 5 – Макрошлифы образцов биметаллического соединения с выдержкой в расплаве алюминия при температуре 850 °С, а) 5 мин, б) 10 мин, в) 30 мин, г) 60 мин

Исследование структуры материала проводилось на инвертированном металлургическом микроскопе Nikon Eclipse MA200. Исследование величины диффузионного слоя проводилось на растровом электронном микроскопе Hitachi S-3400N с использованием приставки для проведения химического анализа. Микротвёрдость переходного слоя и свариваемых образцов определяли на микротвердомере Micro hardness tester HМV-2.

В третьей главе представлены результаты механических и микроструктурных исследований, а также результаты исследования диффузионного слоя и измерения микротвердости.

На рисунках 6 – 9 представлены диаграммы растяжения полученных биметаллических образцов в целом свойственных алюминиевым сплавам (отсутствует площадка текучести) и характеризующее их хрупкое разрушение.

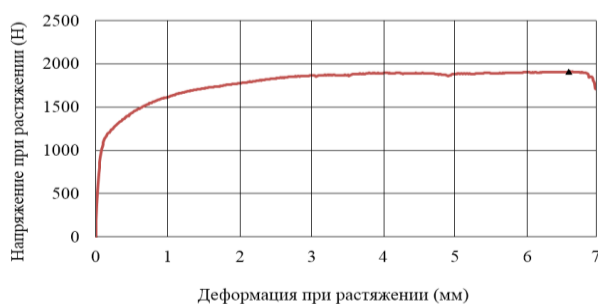


Рисунок 6 – Диаграмма растяжения образца 1

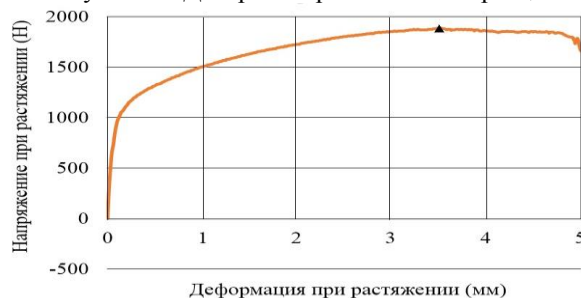


Рисунок 8 – Диаграмма растяжения образца 3

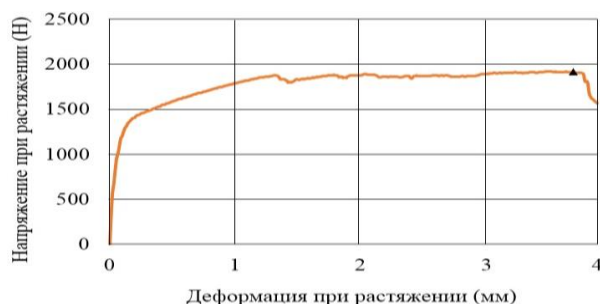


Рисунок 7 – Диаграмма растяжения образца 2



Рисунок 9 – Диаграмма растяжения образца 4

В таблице 1 приведены значения максимальной нагрузки для каждого образца при испытаниях на вырывание.

Таблица 1 – Максимальная нагрузка образцов при испытаниях на вырывание в Н

№ образца	Максимум нагрузки
1	1909,26550
2	1918,38086
3	1885,30530
4	2045,01306

Микроструктурный анализ периметра всех соединений показал наличие несплавлений и дефектов (трещины, неслитины) в литом алюминии. На рисунках 10 – 13 показаны микроструктуры образцов с увеличением 1:100. По периферии всех образцов наблюдается неравномерный граничный слой, имеющий различную толщину, величина которой зависит от времени выдержки в расплаве алюминия, также отчетливо видны щели на границах сплавления алюминия со сталью, вследствие механических испытаний на вырывание. Так, для выдержки 5 мин. ее средняя величина составляет 3-5 мкм, для 10 мин. - 5 – 7 мкм, для 30 мин- 10-12 мкм, а для 1 ч.- 20-25 мкм.

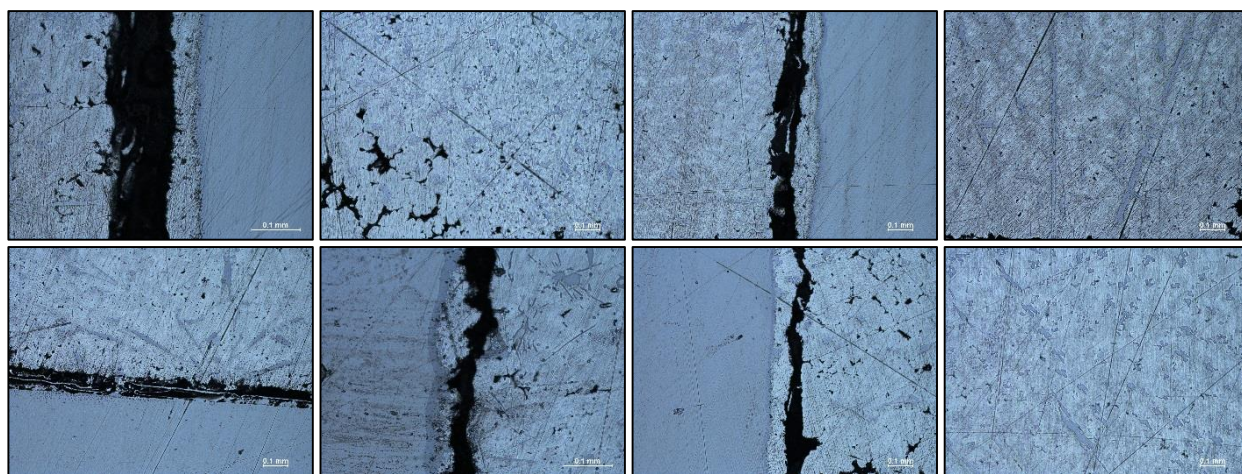


Рисунок 10 – Микроструктура образца 1

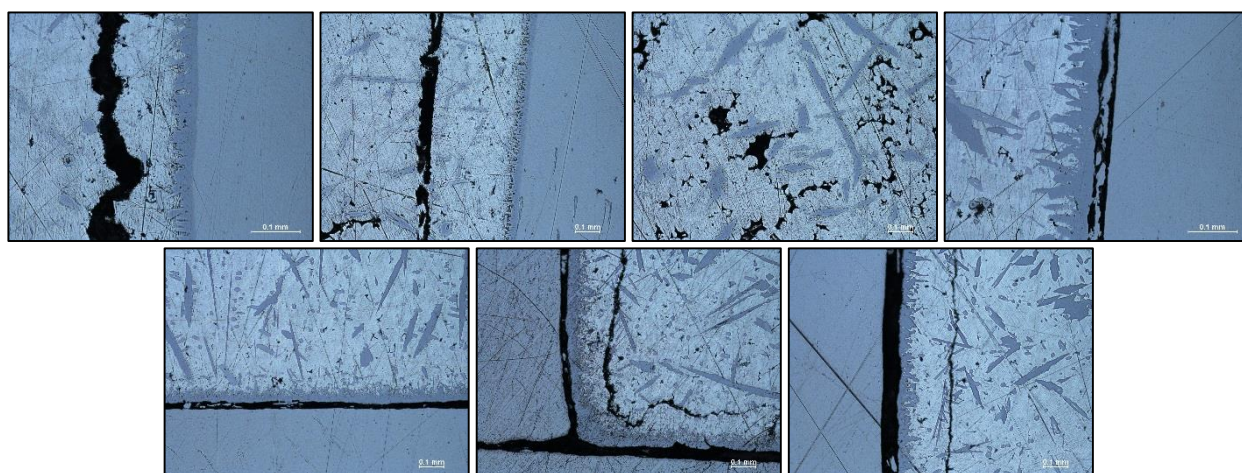


Рисунок 11 – Микроструктура образца 2

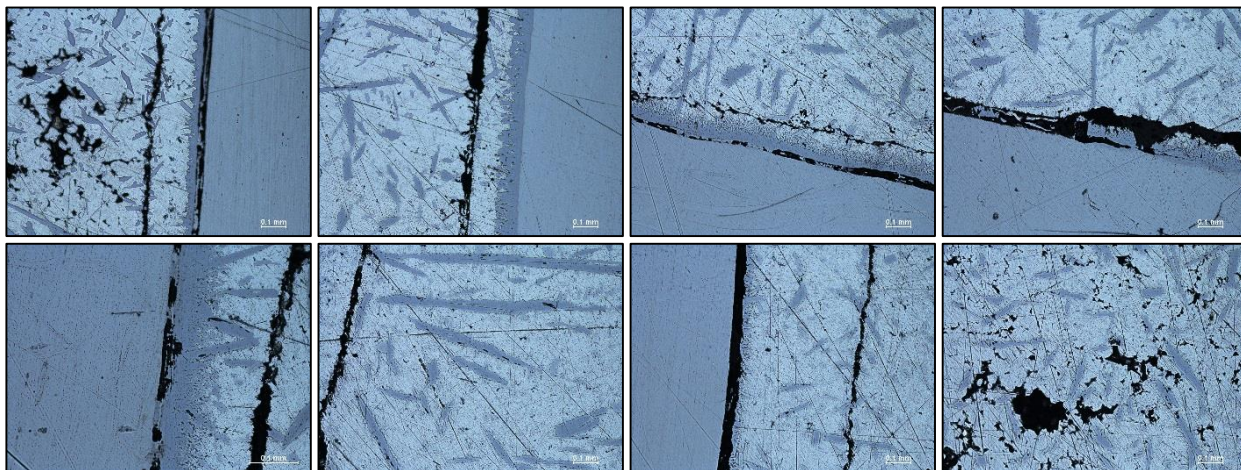


Рисунок 12 – Микроструктура образца 3

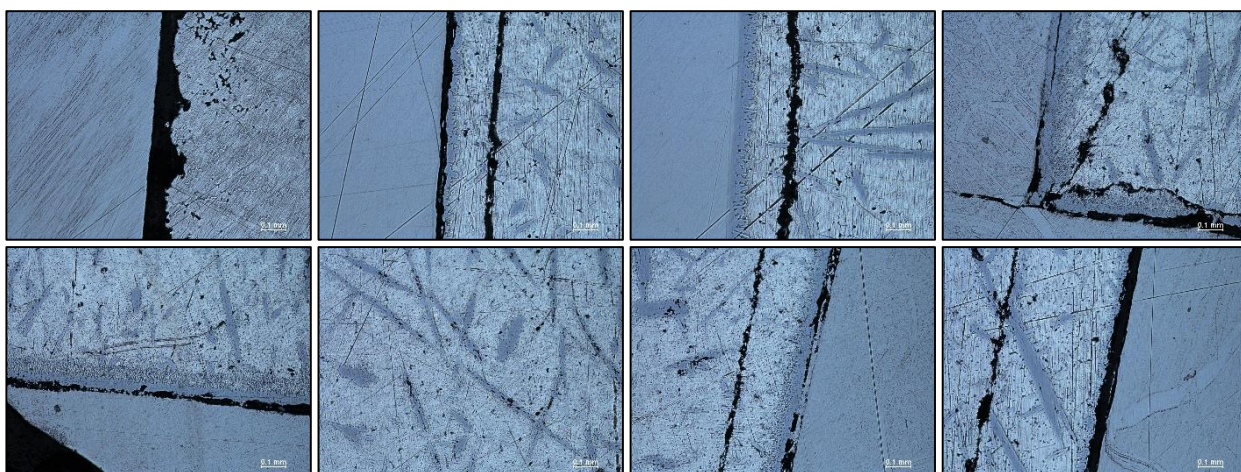


Рисунок 13 – Микроструктура образца 4

Результаты исследования диффузионного слоя показали, что ближе к стали граничный слой плотный и равномерный, а к алюминию разделяется на отдельные хлопьевидные элементы.

На рисунке 14 показана поверхность биметаллического соединения первого образца, полученного при выдержке 850 °С, 5 мин.

Анализ распределения легирующих элементов (рисунок 15) показал наличие диффузионного слоя алюминия более 40 мкм уже при выдержке 5 минут.

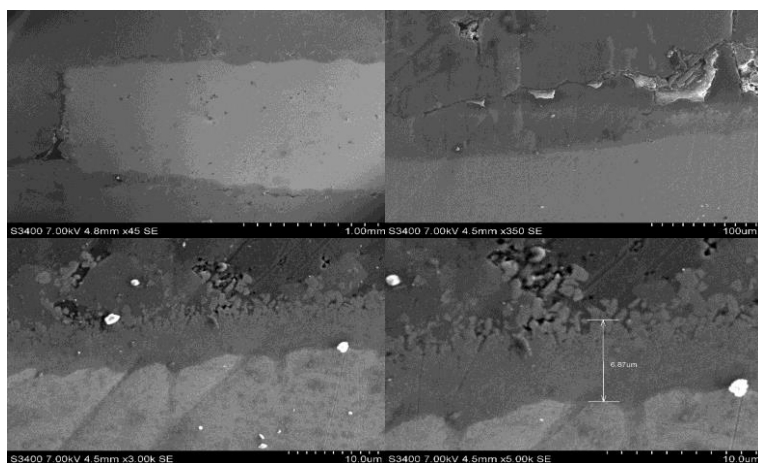


Рисунок 14 – Поверхность биметаллического соединения образца 1

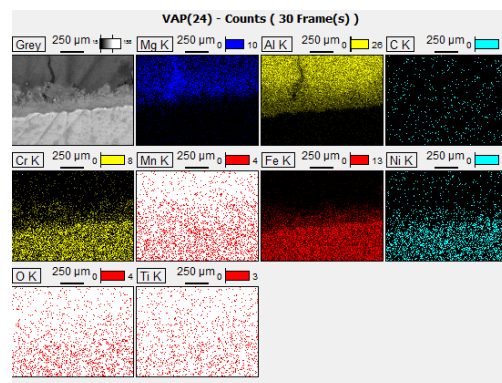


Рисунок 15 – Распределение легирующих элементов образца 1

Результаты химического анализа первого образца, выдержка которого 850 °С 5 минут представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты химического анализа первого образца

в процентах							
C	Mg	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
2,5	8,16	57,15	0,15	6,71	0,47	22,40	2,45

На рисунке 16 показана поверхность биметаллического соединения второго образца, полученного при выдержке 850 °С, 10 мин.

Распределение легирующих элементов второго образца при выдержке 850 °С, 10 мин. представлены на рисунке 17.

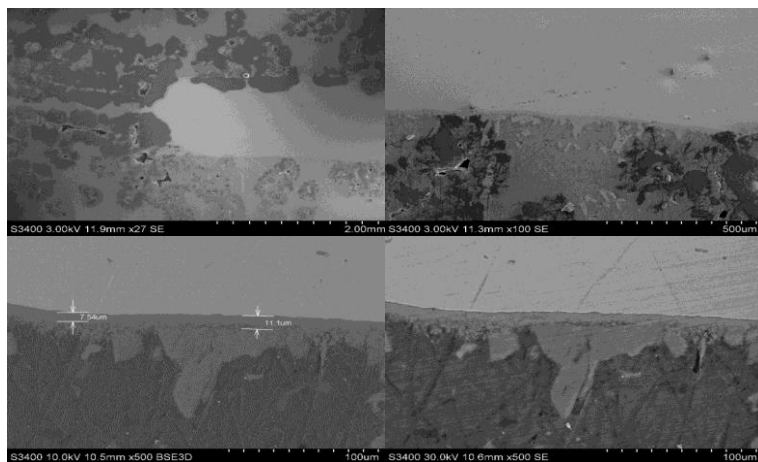


Рисунок 16 – Поверхность биметаллического соединения образца 2

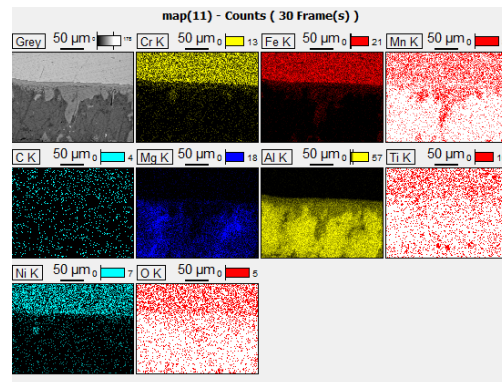


Рисунок 17 – Распределение легирующих элементов образца 2

Результаты химического анализа второго образца, выдержка которого 850 °С 10 минут представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты химического анализа второго образца

в процентах								
C	Mg	O	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
2,51	5,24	1,13	64,2	0,34	5,38	1,14	17,8	2,21

Структура залитого алюминия при выдержке 30 мин также имеет дефекты (поры, неслитины, расслоения) как в объеме, так и по периферии стальной заготовки (рисунок 18). Граничный слой хоть и имеет большую толщину по отношению к предыдущему образцу, но менее плотный, имеет расслоения. Причиной образования граничного слоя может являться значительный градиент температур стальной заготовки и алюминиевого расплава, завязанного со значительной разницей в теплопроводности двух материалов. Поэтому, находящийся при комнатной температуре стальной образец послужил образованием центров кристаллизации алюминия на его поверхности.

Распределение легирующих элементов образца при выдержке 850 °С, 30 минут представлены на рисунке 19.

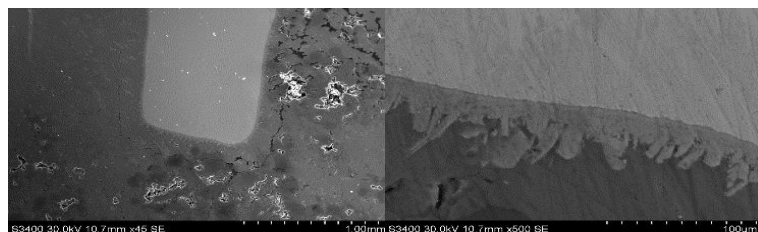


Рисунок 18 – Поверхность биметаллического соединения образца 3

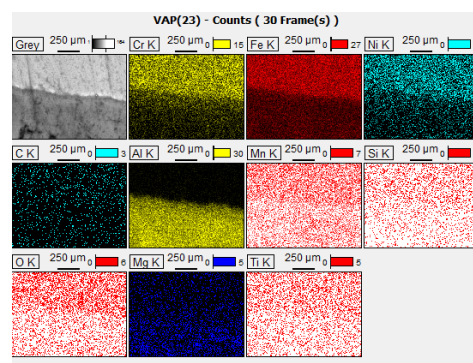


Рисунок 19 – Распределение легирующих элементов образца 3

Результаты химического анализа третьего образца, выдержка которого 850 °С 30 минут представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты химического анализа третьего образца

в процентах									
C	Mg	O	Al	Ti	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2,03	0,34	0,89	38,77	0,07	0,29	10,05	0,95	42,48	4,13

На рисунке 20 показана поверхность биметаллического соединения четвертого образца, полученного при выдержке 850 °С, 60 мин.

Распределение легирующих элементов образца при выдержке 850 °С, 60 минут представлены на рисунке 21.



Рисунок 20 – Поверхность биметаллического соединения образца 4

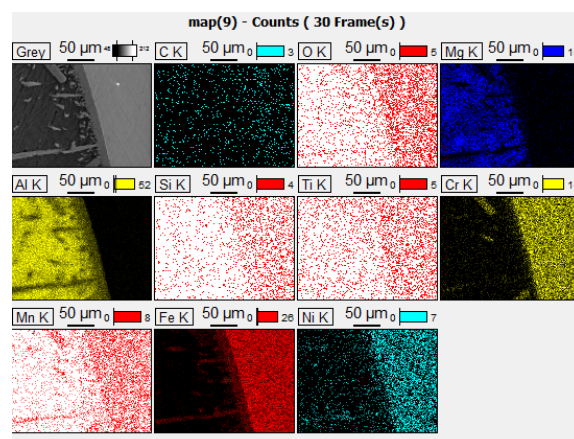


Рисунок 21 – Распределение легирующих элементов образца 4

Результаты химического анализа четвертого образца, выдержка которого 850 °С 60 минут представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты химического анализа четвертого образца

в процентах									
C	Mg	O	Al	Ti	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1,58	5,29	0,86	60,65	0,07	0,03	6,36	0,62	22,11	2,42

Данные по микротвердости приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты определения микротвердости

Образец	12X18H10T	Переходная зона			АМг 6 литой
		К 12X18H10T	центр	К АМг6	
5 мин	709	634	474,5	216	166
10 мин	564	457	443	396	396
30 мин	486	457	365	319	286
60 мин	778,5	550	425	347	223
Примечание: В таблице приведены средние значения					

По результатам определения микротвёрдости, для наглядного их отображения построен график её распределения по сечению биметаллического соединения (рисунок 22).

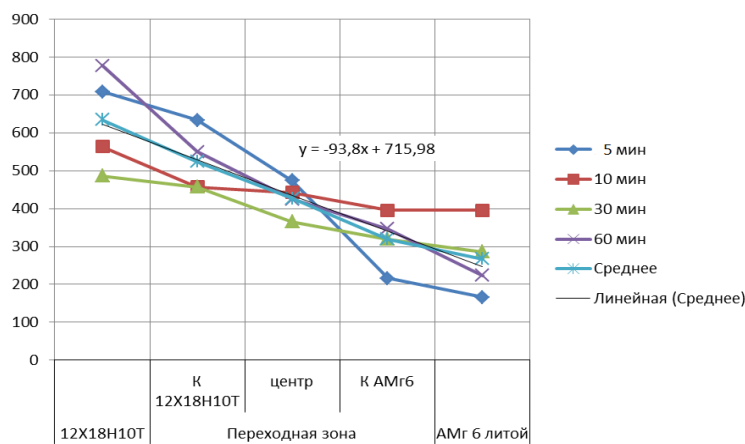


Рисунок 22 – Характер распределения микротвёрдости в образцах биметаллического соединения с различной выдержкой

Из рисунка 22 видно, что микротвёрдость от стали к алюминиевому сплаву, снижается и в центре диффузионного соединения среднее его значение составляет 426 МПа, средняя твёрдость литого алюминия составила 267 МПа, а образца из стали 12Х18Н10Т 634 МПа.

Уравнение, полученное по линии тренда усреднённого значения микротвёрдости $y = -93,8x + 715,98$.

Так, с увеличением времени выдержки до 60 минут увеличивается и микротвёрдость стали 12Х18Н10Т. В отношении выдержки 30 минут разница составляет 300 МПа (37,5 %). Так же имеется разница в значениях микротвёрдости при выдержке 10 минут и её значения колеблется в интервале 564 – 709 МПа. Причина расхождения не выявлена.

На рисунках 23-26 показаны измерения микротвёрдости четырех образцов по Виккерсу, нагрузка 0,01 НВ.

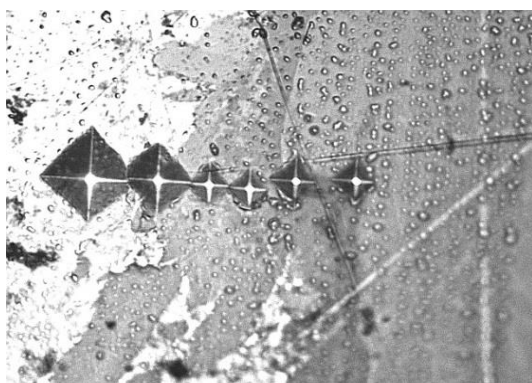


Рисунок 23 – Измерения микротвёрдости первого образца

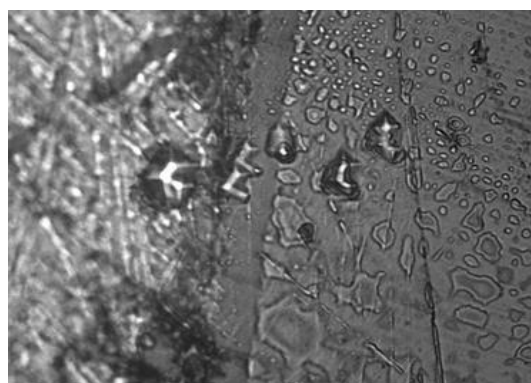


Рисунок 24 – Измерения микротвёрдости второго образца



Рисунок 25 – Измерения микротвёрдости третьего образца

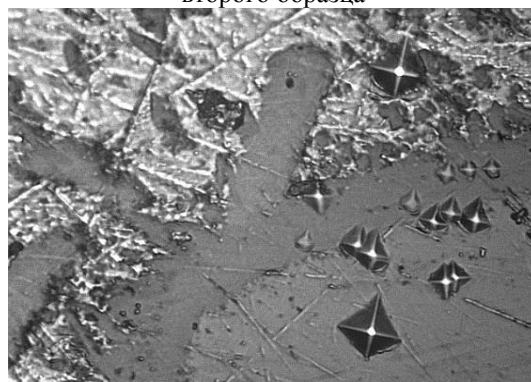


Рисунок 26 – Измерения микротвёрдости четвертого образца

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В данной работе была рассмотрена базовая технология сварки биметаллической конструкции корабля корвет проекта 20380. Установлена недостаточная технологичность конструктивного решения с применением биметаллической проставки для создания сварного соединения стального корпуса с алюминиевой переборкой. Это решение приводит к применению различных способов сварки, сварочных материалов и оборудования, по-разному подготовленных сварщиков и т.п.

Проанализированы возможные способы создания неразъёмного соединения алюминия со сталью для сварки секции палубы и выявлено, что подходящим способом является алитирование с непосредственной сваркой путём высокотемпературной заливки расплавленным алюминием и выдержкой его при определённой температуре. Предпосылками для этого способа является тот факт, что исключительно для процесса алитирования необходим нагрев алюминия до температуры плавления, тому же условию соответствует процесс создания сварного соединения. Одновременное объединение этих условий способствует как процессу образования диффузионного слоя алюминия на стальной детали, так и образованию сварного соединения алюминий-алюминий.

В работе проведены исследования по определению условий протекания одновременного процесса диффузионного легирования и сварки, которыми являются температура нагрева расплава, время выдержки сварного соединения в расплаве алюминия, минимальный объём расплавленного алюминия. Подобраны оптимальные режимы сварки, обеспечивающие механические свойства сварного соединения, соответствующие свойствам алюминиевой детали (как наименее прочной по отношению к стальной).

В ходе микроструктурных исследований установлено, что время выдержки определяет величину диффузионного слоя, так при выдержке 5 мин на стальной детали образуется слой, толщиной 3-5 мкм, 10 мин - 5-7 мкм, 30 мин - 10-12 мкм, 60 мин – 20-25 мкм.

Предел прочности лучшего образца составил 66,7 МПа при заливке расплавом алюминия, при температуре 750 °С и выдержкой в печи при температуре 850 °С, а диффузионный слой составил 40 мкм, что говорит о том, что сварное соединение получено.

При таком способе сварки можно значительно уменьшить вес конструкции, поскольку отпадает необходимость использования биметаллической проставки, которая предусмотрена базовой технологией, значительно сокращается время на подготовительные и сборочно - сварочные операции, снижаются материальные затраты.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Васюхно, А.Ю. Способ сварки биметалла / А.Ю. Васюхно, П.В. Бахматов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных Комсомольск-на-Амуре, 8-12 апреля 2019г. – Комсомольск-на-Амуре ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019.