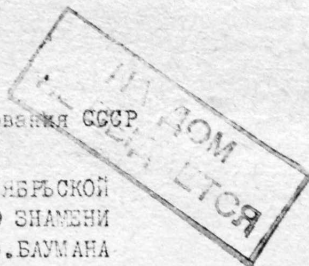


14388334

Министерство
высшего и среднего специального образования СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ, ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ имени Н.Э.БАУМАНА



На правах рукописи

СИМАНЕНКОВ Леонид Нестерович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-
ДУГОВОЙ СВАРКИ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ МАРКИ
Бр.ОЦ10-2

Специальность 05.04.05
Технология и машины сварочного производства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва 1981 г.

Работа выполнена в Николаевском ордена Трудового Красного
Знамени кораблестроительном институте имени адмирала С.О.Макарова.

Научный руководитель - к.т.н., доцент **ДЖЕВБАГА И.И.**

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор **О.И.СТЕКЛОВ**
к.т.н., с.н.с. **В.Д.ХОДАКОВ**

Будущее предприятие - Херсонское судостроительное производ-
ственное объединение имени Ленинского
комсомола

Защита диссертации состоится " " _____ 1981г.
на заседании Совета Д.О.З.15.07 "Технология и машины сварочного
производства" Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Рево-
люции и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического
училища имени Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы в 2-х экземпля-
рах высылать по адресу: 107005,

С диссертацией можно озна-

комиться в Автореферате разослан " _____

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВ
д.т.н. профессор

Л-86711 от 6/XI.81 г. С

Типографи

М 388337

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Оловянная бронза марки Бр.ОЦО-2 широко применяется в судостроении для изготовления облицовок гребных валов судов, запорной арматуры забортной воды, а также в химическом и бумагоделательном машиностроении для насосного литья и рубашек отсасывающих валов бумагоделательных машин.

При литье заготовок из указанной бронзы возникает литейные дефекты. С увеличением размеров отливок количество литейных дефектов повышается, поэтому крупногабаритные бронзовые облицовки гребных валов судов более экономично изготавливать литосварными из отдельных заготовок. Вследствие плохой свариваемости Бр.ОЦО-2 сварка кольцевых стыков крупногабаритных отливок сопровождается образованием трещин в металле шва или околошовной зоне (ОШЗ).

В настоящее время сварка отливок из Бр.ОЦО-2 выполняется различными сварочными проволоками (Бр.МцЗ-1, Бр.ОЦ-3, Бр.ОФ 6,5-0,4) как под флюсами (ОСЦ-45, МН-26) так и в аргоне. При этом не всегда удается получить качественное сварное соединение, что увеличивает расход дефицитной и дорогостоящей оловянной бронзы, а также трудовые затраты. Поэтому исследование свариваемости и разработка технологии сварки оловянной бронзы Бр.ОЦО-2 является актуальной задачей.

Целью работы является исследование и разработка технологии сварки бронзы Бр.ОЦО-2, повышающей качество сварных конструкций, надежность их эксплуатации и снижающей материалоемкость изделий за счет экономии дорогостоящей оловянной бронзы.

Методы исследования. Микрораспределение элементов в бронзе исследовалось на микрорентгеноспектральном анализаторе "Камера". Микроструктура металла изучалась на оптическом микроскопе МИМ-7 и электронном ЭМР-100К. Локальная концентрация водорода в ОШЗ определялась методом эмиссионного спектрального анализа с фотографической регистрацией спектра на спектрографе ИСП-51. Вертикальная составляющая межзеренного проскальзывания в ОШЗ Бр.ОЦО-2 замерялась на интерференционном микроскопе МИМ-4 на 80-100 границах зерен с последующей обработкой результатов методами математической статистики. Исследование износостойкости бронзы производилось методом трения-скольжения на установке типа МИ-2. Опыты по сварке выполнялись с использованием оборудования и источников питания, серийно выпускаемых промышленностью.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1388337

Симаненков Л. Н. Исследования

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Научная новизна. Проведенные исследования позволили уточнить особенности процессов, протекающих при сварке бронзы Бр.ОЦО-2.

1. Вблизи границы сплавления сварного соединения бронзы Бр. ОЦО-2 образуется локальное увеличение концентрации водорода, вызванное его термодиффузией из ОЦЗ. С повышением эффективной мощности дуги локальная концентрация водорода у границы сплавления увеличивается, так как образующийся вблизи границы сплавления неравновесный эвтектид препятствует термодиффузии водорода в металл шва. Автором впервые установлено, что снижение механических свойств металла ОЦЗ бронзы при непрерывной многопроходной сварке проволоками диаметром ≥ 3 мм вызвано сегрегацией водорода у границы сплавления и охрупчиванием бронзы вследствие длительного пребывания в температурном интервале 620...720 К.

2. Стойкость металла ОЦЗ Бр.ОЦО-2 против образования горячих трещин зависит от величины межзеренного проскальзывания и сегрегации легкоплавких примесей - свинца и висмута. Автором впервые установлено, что с повышением температуры предварительного отжига величина межзеренного проскальзывания в ОЦЗ бронзы Бр.ОЦО-2 уменьшается. Увеличение температуры предварительного отжига свыше 900 К резко снижает стойкость ОЦЗ против образования горячих трещин, что обусловлено не уменьшением деформационной способности сплава, а сегрегацией легкоплавких примесей (свинца и висмута) на стенках микропор, образовавшихся при распаде эвтектида.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

На основании проведенных исследований разработаны сварочная проволока, флюс и технология механизированной электродуговой сварки Бр.ОЦО-2 применительно к изготовлению литосварных облицовок гребных валов судов, обеспечивающая повышение износостойкости облицовок и дейдвудного набора. Предложена новая конструкция комбинированных (бронзовых с латунной средней частью) облицовок гребных валов судов и разработана технология их сварки, что обеспечивает значительную экономию дорогостоящей оловянной бронзы Бр.ОЦО-2. Разработана технологическая инструкция на автоматическую сварку внахлест комбинированных облицовок гребных валов.

Технологии сварки литосварных и комбинированных облицовок гребных валов судов внедрены на Черноморском судостроительном заводе. Экономический эффект в результате внедрения составляет 61 тыс.руб. в год.

Апробация работ. Основные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях Николаевского кораблестроительного института, семинаре "Коррозионностойкие наплавки и их применение в промышленности" (Ленинград, ЛДНП, 1975), семинаре "Современные методы восстановления деталей в судоремонте (сварка, наплавка, напыление)" (Клайпеда, 1976г.), I Всесоюзном семинаре "Сварка и наплавка тяжелых цветных металлов" (Киев, 1977г.), I Всесоюзной конференции по сварке легких цветных и тугоплавких металлов и сплавов (Киев, 1978г.), научно-технической конференции по передовым методам сварки, посвященная 125-летию со дня рождения Н.Г.Славянова (Пермь, 1979г.), семинаре "Новые прогрессивные разработки в области сварки и наплавки тяжелых цветных металлов" (Запорожье, 1980г.), научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" в МВТУ им.Н.Э.Баумана (Москва, 1981г.).

Объем и структура работ. Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов по работе. Содержит 23 таблицы, 53 рисунка и 137 наименований использованных литературных источников, изложена на 107 страницах машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору литературы по общим сведениям о свойствах бронзы Бр.ОЦО-2 и анализу существующих способов ее сварки, а также постановке цели и задач работы.

Сварка меди и ее сплавов затруднена ее специфическими свойствами: высокой тепло- и электропроводностью, наличием легкоплавких примесей и провала пластичности при повышенных температурах. Изучению особенностей металлургических процессов, протекающих при сварке меди и ее сплавов посвящены работы советских ученых: Фролова В.В., Подгаецкого В.В., Гуревича С.М., Петрова Г.Л., Джеваги И.И., Вайнермана А.Е., Илюшенко В.М., Коренюка Ю.М. и др.

Оловянная бронза марки Бр.ОЦО-2 обладает широким интервалом кристаллизации, микропористостью, рассеянной по всему объему металла отливки, что обуславливает ее плохую свариваемость.

Для ручной электродуговой сварки оловянных бронз в работах Петрова Г.Л., Коренюка Ю.М., Гейликмана В.М. разработаны составы электродных стержней и покрытий, которые применяются для заварки дефектов литья. Многопроходную сварку кольцевых стыков крупногабаритных отливок экономично производить механизированными способами. Для автоматической сварки оловянных, оловянно-свинцовых и оловянно-

инженеров бронзы Дзеваской И.И., Илюшенко В.М., Петровым Г.Л. и Байнорманом А.Б. разработаны составы порошковых проволок. Однако порошковые проволоки из медных сплавов не поставляются централизованно. Длительное хранение порошковых проволок повышает их газонасыщенность, что вызывает образование пор в металле шва.

В настоящее время для сварки оловянной бронзы Бр.ОЦО-2 используются проволоки сплошного сечения (Бр.КМЦ-1, Бр.ОЦ4-3, Бр.ОЦ6,5-0,15 и Бр.ОЦ6,5-0,4). Сварка бронзы производится в аргоне или под флюсами СОЦ-45 и АН-26, которые разработаны для сварки сталей. Применение указанных материалов не обеспечивает требуемого качества сварных соединений Бр.ОЦО-2 по механическим свойствам и однородности металла шва основному металлу. Основные дефекты, возникающие при сварке Бр.ОЦО-2: образование пор в металле шва и трещин в шве и ОЦЗ.

Таким образом, исходя из цели работы - исследованию и разработке технологии сварки бронзы Бр.ОЦО-2, повышающей качество и надежность эксплуатации сварных конструкций - необходимо было решить следующие задачи: исследовать свойства металла отливок Бр.ОЦО-2, определяющие ее свариваемость и разработать режимы термообработки, улучшающие ее механические и эксплуатационные свойства; исследовать влияние состава сварочных материалов на структуру и механические свойства металла шва и сварного соединения и разработать оптимальный состав сварочных материалов, обеспечивающих получение качественных сварных соединений; исследовать влияние диффузионных процессов водорода, погонной энергии сварки и температуры предварительного отжига на стойкость ОЦЗ против образования горячих трещин и разработать технологические мероприятия, повышающие стойкость металла ОЦЗ против образования горячих трещин. На основании результатов исследований разработать технологию сварки крупногабаритных отливок из Бр.ОЦО-2 и проверить ее в производственных условиях.

Вторая глава посвящена исследованию свойств металла отливок, полученных центробежным способом, и влияния на них термической обработки. Установлено, что в заготовках, отлитых центробежным способом наблюдается структурная и химическая неоднородности, выражающиеся в концентрических ликвационных полосах обогащения оловом и, соответственно, эвтектоидом. Это вызывает анизотропию механических свойств отливок и ухудшает свариваемость бронзы. Поэтому в

работе исследовалась возможность уменьшить указание неоднородности путем отжига металла в температурном интервале 570...1070 К в течение 1...25 часов.

Отжиг при $T = 720$ К в течение $t = 1...10$ ч приводит к протеканию в зоне границ зерен превращений гранецентрированной кубической α -фазы в метастабильную гексагональную плотноупакованную α' -фазу.

С увеличением температуры отжига $T \geq 870$ К и длительности $t \geq 5$ ч происходит распад эвтектоида. В местах его бывшего расположения наблюдается образование микропор. Исследованиями на микроанализаторе "Камака" установлено, что после отжига при $T = 920$ К существенно уменьшается химическая микрон неоднородность распределения олова, что оказывает влияние на механические свойства сплава.

Установлено, что отжиг в температурном интервале 820...920 К улучшает и стабилизирует механические свойства бронзы. После отжига в температурном интервале 620...720 К наблюдается снижение пластичности и ударной вязкости сплава. Охрупчивание вызвано выпадением по границам зерен метастабильной α' -фазы, т.е. фазовым разупрочнением, которое связано с перестройкой кристаллической решетки и прохождением атомами области лабильного состояния.

Установлено, что отжиг бронзы при $T = 820...920$ К предупреждает охрупчивание сплава при последующем отжиге в температурном интервале $T = 620...720$ К.

На стойкость металла против образования горячих трещин оказывают влияние его прочность и пластичность при высоких температурах. Установлено, что с повышением температуры прочность и, особенно, пластичность бронзы Бр.ОЦО-2 снижаются. Отжиг бронзы при

$T \geq 920$ К улучшая ее механические свойства при нормальной температуре, практически не оказывает влияния на прочность и пластичность сплава при высоких температурах. Следовательно отжиг Бр.ОЦО-2 при $T = 920$ К не обеспечит повышение стойкости ОЦС против образования горячих трещин.

Важной характеристикой бронзовой облицовки гребного вала является ее износостойкость при работе в паре трения с бакаутом и капролоном в морской воде. Установлено, что отжиг Бр.ОЦО-2 при $T \geq 920$ К значительно уменьшает износ бронзы и работающего в паре с ней бакаута и капролона. Уменьшение износа бронзы и набора происходит вследствие распада твердых частиц эвтектоида ($K_{\text{м}} =$

2950...3070 МПа). Это подтверждает целесообразность применения отжига в температурном интервале 870...970 К отливок из Бр.ОЦО-2 при изготовлении облицовок гребных валов судов.

Третья глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию влияния металлургических и технологических факторов на свариваемость бронзы Бр.ОЦО-2. Изучалось влияние состава сварочных материалов и некоторых легирующих элементов (фосфора, кремния, циркония и ниобия), защитной среды и способа сварки на плотность, микроструктуру и механические свойства металла шва и сварного соединения Бр.ОЦО-2. Для исследований использовались технологические пробы: многопроходная сварка пластин размерами 350х1250х25, вырезанных из центробежных отливок Бр.ОЦО-2. Исследовалась ручная аргонодуговая и автоматическая сварка плавящимся электродом.

Ручная аргонодуговая сварка выполнялась с применением близких по составу к свариваемой бронзе присадочных прутков марки Бр.ОЦ6,5-О,4; Бр.ОЦ8-О,3; Бр.ОЦ17-О,7-О,2 и неоднородных, обладающих сверхпластичностью при высоких температурах марки Бр.АМц9-2.

Прочность сварных соединений, выполненных проволоками из оловянно-фосфористых бронз Бр.ОЦ6,5-О,4 и Бр.ОЦ8-О,3 и алюминиевой бронзы Бр.АМц9-2 не удовлетворяет требованиям, предъявляемым ГОСТ 5.9208-75 к Бр.ОЦО-2 (табл.1). Исследованиями на микроанализаторе "Камека" установлено, что структура металла шва оловянно-фосфористой бронзы состоит из α -фазы и тройной фосфидной эвтектики ($\alpha + \delta + \text{Cu}_3\text{P}$). В металле шва содержатся микропоры, которые и являются причиной снижения механических свойств сварного соединения. Поры образуются вследствие протекания реакции раскисления закиси меди фосфором, с образованием газообразного продукта раскисления P_2O_5 . При ручной сварке скорость кристаллизации металла шва неравномерная. Это способствует тому, что газообразный продукт раскисления P_2O_5 не успевает выделиться на поверхность кристаллизующегося металла и образует поры. Для предотвращения образования пятиоксида фосфора металл шва необходимо легировать более активным, чем фосфор, раскислителем, не образующим газообразного продукта раскисления. По термодинамическим расчетам кремний обладает более высокой раскислительной способностью и не образует газообразного продукта раскисления.

Металлографические исследования металла шва, выполненного

Таблица 1

Механические свойства сварных соединений Бр.ОЦО-2, выполненных ручной аргодуговой сваркой

Присадочный материал	Прочность сварного соединения		Механические свойства металла шва				Содержание элементов в металле шва, % (масс.)	
			σ _т , МПа		δ ₅ , %			
	σ̄	δ̄	σ̄	δ̄	δ̄	δ̄	Sn	P
Бр.АМц9-2	175	21	375	26	12,7	1,8	1,3	-
Бр.0Ф6,5-0,4	155	13	157	15	5,1	1,6	7,0	0,3
Бр.0Ф8-0,3	193	20	201	22	10,8	1,7	3,7	0,2
Бр.ОКМ7-0,7-0,2	192	22	214	24	8,8	2,1	3,7	0,1
Бр.0Ф3-0,3 с добавлением буре	281	21	286	18	22,7	2,6	3,4	0,2
Бр.ОКМ7-0,7-0,2 с добавлением борного шлака	303	12	328	21	16,1	2,1	6,9	0,2
Бр.0Ф3-0,3 с добавлением борного шлака	323	14	343	19	25,3	1,8	8,6	0,2

композитной проволокой Бр.ОКМ7-0,7-0,2 показали, что легирование металла шва кремнием предупреждает образования пор, но по границам зерен наблюдаются шлаковые включения. Жидкотекучесть металла сварочной ванны ухудшается, формирование шва и механические свойства сварного соединения неудовлетворительные (табл.1).

Эффективной мерой по улучшению структуры и механических свойств металла шва является металлургическое воздействие на металл сварочной ванны через шлаковую фазу. Введение в зону дуги буре или борного шлака - активного поверхностного раскислителя, обеспечивает получение плотного металла шва и удовлетворительных механических свойств сварного соединения. Борный шлак активно связывает окислы в нерастворимые в металле соединения - бораты, которые обладают хорошей жидкотекучестью и всплывают в виде шлака на поверхность сварочной ванны.

Проведенными исследованиями установлено, что при ручной аргодуговой сварке бронзы Бр.ОЦО-2 получение качественного соединения обеспечивает применение близкого по химическому составу присадочного материала (Бр.0Ф3-0,3) с введением в зону дуги 0,03...0,04 н борного шлака на 1 н наплавленного металла.

Автоматическая сварка плавлением электродом выполнялась под флюсами (ОСЦ-45, АН-26) и в аргоне. Исследовалось влияние состава сварочных материалов на прочностные свойства металла шва и сварного соединения. В качестве сварочной проволоки использовались проволоки из алюминиевой и оловянных бронз (Бр.АМц9-2, Бр.ОЦ4-3 и Бр.ОЦ3-0,3).

Установлено, что при сварке Бр.ОЦ4-3 проволокой Бр.АМц9-2 под флюсами ОСЦ-45, АН-348А, АН-20 и АН-26 процесс сварки нестабильный, формирование шва неудовлетворительное, что приводит к образованию отколов по линии оплавления. Исследования дуговой сварки плавлением электродом в аргоне показали, что хорошее формирование шва обеспечивается в широких пределах режимов сварки, механические свойства металла шва зависят от его состава. Снижение прочности и пластичности наблюдается у металла шва, содержащего менее 7% алюминия и более 2% олова. Оптимальные механические свойства металла шва обеспечиваются при доле участия основного металла в шве не более 20%, что достигается выбором соответствующих режимов сварки.

Прочность сварного соединения зависит от свойств исходной бронзы и теплового воздействия процесса сварки на металл ОЦ3. Сварка с $q_n = 1800$ кДж/м и охлаждением стыка между проходами обеспечивает лучшие механические свойства сварного соединения, чем непрерывная сварка с $q_n = 2300$ кДж/м (табл.2).

Металлографическими исследованиями установлено, что структура шва двухфазная и состоит из α -фазы и эвтектоида ($\alpha + \gamma$). После отжига при $T = 920$ К $t = 5$ ч эвтектоид в шве и ОЦ3 распадается, что повышает механические свойства сварного соединения.

В настоящее время штатные облицовки из Бр.ОЦ4-3, сваренные проволокой Бр.АМц9-2 в аргоне успешно эксплуатируются на судах.

Сварные швы, выполненные проволокой Бр.АМц9-2 необходимо располагать на нетрущихся поверхностях облицовок, так как в морской воде у Бр.АМц9-2 наблюдается значительный коррозионно-механический износ. Поэтому при расположении сварных швов в районе трущихся поверхностей облицовок необходимо применять сварочные проволоки из оловянных бронз.

Исследования показали, что сварка проволоками Бр.ОЦ4-3 и Бр.ОЦ3-0,3 под флюсом ОСЦ-45 обеспечивает более высокую прочность сварного соединения, чем сварка под флюсом АН-26 или в аргоне. С

Таблица 2
Механические свойства сварных соединений Бр.ОЦО-2,
выполненных автоматической сваркой плавящимся
электродом

Марка и диа- метр свароч- ной прово- локи	Защитная среда	Прочность сварного соединения		Механические свойства ме- талла шва				Содержание элементов в металле шва, %(мас.)		
		σ_t , МПа		σ_s , МПа		δ_5 , %		Σn	Zn	Al
		$\bar{\sigma}$	σ_T	$\bar{\sigma}$	σ_T	$\bar{\delta}$	δ_T			
Бр. АМЦ9-2 ϕ 3 мм	Аргон х)	215	II	348	22	16,2	1,2	2,2	0,4	6,9
		295	8	527	10	22,2	1,8	1,6	0,3	7,3
Бр. ОЦ4-3 ϕ 3 мм	Флюс ОСЦ-45	252	12	295	10	17,3	1,5	6,8	3,0	-
	Флюс АН-26	205	14	212	12	12,6	1,8	6,5	2,8	-
	Аргон	183	19	315	13	28,5	2,1	6,6	2,2	-
Бр. ОЦ4-3 ϕ 2 мм	Флюс ОСЦ-45	290	II	338	9	19,5	1,7	6,2	2,9	-
	Флюс АН-26	280	13	285	10	15,1	2,0	6,2	3,1	-
	Аргон	200	14	319	12	30,9	1,9	6,1	2,3	5
Бр. ОФ 8-0,3 ϕ 3 мм	Флюс ОСЦ-45	240	12	243	10	11,8	2,2	8,9	0,4	0,2
	Флюс АН-26	201	17	195	13	9,9	2,4	8,7	0,8	0,2
	Аргон	192	19	291	14	13,8	2,1	8,7	0,1	0,2
Бр. ОФ 8-0,3 ϕ 2 мм	Флюс ОСЦ-45	305	8	315	8	14,6	1,7	8,6	0,5	0,2
	Флюс АН-26	260	11	293	10	10,3	1,9	8,3	0,9	0,2
	Аргон	200	14	298	9	16,9	2,0	8,4	0,3	0,2

Примечание: х) Многопроходная сварка шва выполнялась непре-
рывно. Остальные швы сваривались с охлаждени-
ем между проходами до $T \leq 370$ К.

уменьшением диаметра сварочной проволоки и, соответственно, погон-
ной энергии сварки механические свойства металла шва и сварного
соединения улучшаются (табл.2). Это показывает необходимость выпол-
нения сварки Бр.ОЦО-2 проволоками диаметром ≤ 2 мм на минималь-
ной погонной энергии, достаточной для удовлетворительного формиро-
вания шва и сплавления с основным металлом.

Определялось влияние фосфора на стойкость против образования
пор и механические свойства металла шва, выполненного проволоками

из оловянных бронз. Установлено, что фосфор в количестве 0,3... 0,45% снижает пластические свойства металла шва. Механизированная сварка под высококремнистыми флюсами обеспечивает лучшую стойкость против образования пор, чем сварка под низкокремнистыми флюсами и в аргоне и допускает максимальное содержание фосфора до 0,4%.

Применение проволоки Бр.0Ф8-0,3 для электродуговой сварки под флюсом бронзы Бр.0ЦЮ-2 обеспечивает получение металла шва по содержанию олова близкого к Бр.0ЦЮ-2, что повышает его коррозионную стойкость, износостойкость и снижает коэффициент трения. Однако по механическим свойствам металла шва, проволока Бр.0Ф8-0,3 не обеспечивает преимуществ по сравнению с Бр.0Ц4-3. Поэтому требуются поиски металлургических факторов, улучшающих механические свойства металла шва, выполненного проволокой Бр.0Ф8-0,3.

Легирование сварочной проволоки кремнием в количестве 0,3... 0,7% незначительно повышает механические свойства металла шва. Так при сварке под флюсом и в аргоне композитной проволокой Бр.0КФ 7-0,7-0,2 прочность и пластичность металла шва составляет $\sigma_s = 300...350$ МПа, $\delta_s = 14...16\%$.

В работе исследовалось влияние активных модификаторов циркония и ниобия на структуру и механические свойства металла шва, выполненного проволокой Бр.0Ф8-0,3 под флюсом ОСЦ-45. Установлено, что наиболее эффективное повышение механических свойств металла шва обеспечивает легирование его ниобием в количестве 0,3...0,7%. Металлографические исследования показали, что с увеличением концентрации легирующих элементов - ниобия и циркония размеры кристаллитов металла шва уменьшаются. Повышение содержания ниобия в шве до 0,7% способствует более равномерному распределению олова в объеме кристаллита и искривлению границ зерен.

На основании результатов экспериментов определен оптимальный состав сварочной проволоки Бр.0Н68-0,5 для сварки и наплавки оловянных бронз: $Sn = 7,5...8,5\%$, $Nb = 0,3...0,7\%$, $P < 0,05\%$, $Si < 0,02\%$, Cu - остальное. На предложенный состав сварочной проволоки получено авторское свидетельство № 593868.

Одним из способов улучшения структуры и механических свойств металла шва является металлургическое воздействие на металл сварочной ванны через шлаковую фазу.

В работе установлено, что введение во флюс ОСЦ-45 и АН-348А 3...7% борного шлака приводит к измельчению микроструктуры метал-

ла шва, искривлению границ кристаллитов. С повышением концентрации борного шлака до 10% эффект измельчения структуры снижается, границы зерен становятся прямолинейными и по ним наблюдается выпадение мелких включений эвтектоида в виде цепочек, что приводит к снижению прочности и пластичности металла шва. Оптимальная концентрация борного шлака во флюсе, обеспечивающая повышение механических свойств металла шва на 30...36% составляет 5%.

В работах В.В.Фролова показано, что снижение механических свойств сварного соединения при электродуговой сварке меди и некоторых ее сплавов вызвано возрастающим изостерическим давлением диффундирующего к границе сплавления водорода. При непрерывной многопроходной сварке Бр.ОЦО-2 проволоками диаметром ≥ 3 мм наблюдается снижение механических свойств металла ОШЗ. Поэтому в работе исследовалось влияние термодиффузии водорода на прочность сварных соединений Бр.ОЦО-2.

Диффузия водорода в ОШЗ описывается следующими тремя уравнениями:

$$1) \text{ теплопроводности (Фурье)} \quad \frac{dT}{dt} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

$$2) \text{ термодиффузии (В.В.Фролов)} \quad \frac{dv_r}{dt} = D \cdot C_0 \cdot \frac{\Delta H}{RT^2} \cdot \frac{dT}{dt} \cdot S \quad (2)$$

$$3) \text{ концентрационной диффузии (Фик)} \quad \frac{dv_k}{dt} = -D \frac{dc}{dy} \cdot ds \quad (3)$$

Система уравнений (1)...(3) решалась методом конечных разностей. Максимальный объем водорода, переместившегося под действием термодиффузии наблюдается у границы сплавления, где возникают наибольшие градиенты температуры. Неравномерность распределения водорода в ОШЗ вызывает протекание концентрационной диффузии. Расчеты показали, что влиянием концентрационной диффузии водорода на уменьшение его сегрегации в ОШЗ Бр.ОЦО-2 можно пренебречь.

Экспериментальное исследование сегрегации водорода в сварных соединениях бронзы Бр.ОЦО-2 показало, что концентрация водорода у границы сплавления зависит от способа сварки и погонной энергии. С увеличением погонной энергии сварки концентрация водорода у границы сплавления возрастает, что вызвано образованием вблизи границы сплавления зоны неравновесного эвтектоида, препятствующего диффузии водорода в металл сварочной ванны. Минимальную сегрегацию водорода в ОШЗ обеспечивает механизированная сварка под флюсом проволокой $\phi 2$ мм. Установлено, что при электродуговой сварке бронзы Бр.ОЦО-2 проволоками диаметром 3 мм локальная концентрация водорода у грани-

цы сплавления увеличивается в 2,2...2,4 раза, что снижает пластические свойства металла. Следовательно снижение механических свойств сварных соединений, полученных многопроходной непрерывной сваркой с $q_{\text{н}} > 1800 \text{ кДж/м}$ вызвано охрупчиванием металла ОШЗ вследствие длительного пребывания в области повышенных температур и термодиффузией водорода к границе сплавления. Предотвратить указанное охрупчивание и уменьшить исходную концентрацию водорода в основном металле можно путем предварительного отжига Бр.ОЦО-2 при $T \geq 870 \text{ К}$ в течение $t = 5 \text{ ч}$. Однако при этом будет изменять фазовый состав металла, что окажет влияние на стойкость ОШЗ против образования трещин.

Образование горячих подсолидных трещин связано с термически активируемой миграцией границ зерен, процессами переползания дислокаций и межзеренного проскальзывания. Для оценки стойкости ОШЗ против образования трещин в работе исследовалось влияние погонной энергии сварки, количества проходов и температуры предварительного отжига на величину межзеренного проскальзывания в ОШЗ Бр.ОЦО-2.

Установлено, что максимальное проскальзывание наблюдается вблизи границы сплавления по границам зерен, расположенных под $\angle 45...90^\circ$ к оси шва. С повышением погонной энергии сварки и количества проходов величина проскальзывания увеличивается. Увеличение температуры предварительного отжига приводит к снижению величины межзеренного проскальзывания, что должно улучшить стойкость ОШЗ бронзы против образования трещин. Исследованиями влияния отжига на стойкость Бр.ОЦО-2 против образования трещин, выполненными на пробах "Холдкрофта" и реальных отливках установлено, что отжиг при температуре $T = 720 \text{ К}$ $t = 5 \text{ ч}$ незначительно ухудшает стойкость ОШЗ против образования трещин, а увеличение температуры отжига $T \geq 920 \text{ К}$ $t = 5 \text{ ч}$ резко ее снижает. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что это вызвано сегрегацией легкоплавких примесей - свинца и висмута на стенках микропор, образовавшихся при распаде эвтектоида, где концентрация свинца достигает 4,5%, а висмута 10,2% при их среднем содержании в сплаве 0,05 и 0,005% соответственно. При термодформационном воздействии цикла сварки указанные примеси располагаются в виде жидких прослоек по границам зерен, резко снижая стойкость ОШЗ против образования трещин.

При многопроходной сварке бронзовых отливок происходит накопление сварочных напряжений, что способствует образованию трещин в

стыке. Применением промежуточного отжига можно снизить уровень напряжений. Установлено, что отжиг при $T = 750 \text{ K}$ в течение $t = 4 \dots 5 \text{ ч}$ значительно снижает уровень напряжений в бронзе Бр.ОЦО-2.

Четвертая глава посвящена разработке технологии сварки бронзы Бр.ОЦО-2 применительно к изготовлению литосварных облицовок гребных валов судов. Результаты выполненных исследований послужили основой для разработки комплекса технологических мероприятий, направленных на увеличение стойкости металла ОЦЗ бронзы против образования трещин и повышения качества сварных соединений из Бр.ОЦО-2. Для экономии дорогостоящей оловянной бронзы предложено среднюю часть облицовки, достигающую $1/3$ ее длины и не являющейся трущейся поверхностью, изготавливать из более дешевого коррозионно-стойкого сплава, обладающего хорошей свариваемостью - латуни ЛМцЖ 55-3-1 или ЛМцЖ9-1-1. Соприжение бронзы Бр.ОЦО-2 и латуни указанных марок при работе в морской воде по ГОСТ 5.9208-75 оценивается баллом 1, т.е. допускается любая площадь контактирующих поверхностей. Сварку заготовок следует выполнять вне вала механизированным способом под флюсом - смесью ОЦ-45 + 5% борного шлака проволоками марок Бр.ОН68-0,5 или Бр.ОН8-0,3 диаметра 1,5...2,0 мм с минимальной погонной энергией достаточной для удовлетворительного формирования шва и сплавления с основным металлом, которая составляет $q_{\text{п}} = 800 \dots 1200 \text{ кДж/м}$ в зависимости от диаметра сварочной проволоки. После каждого прохода зону стыка следует охлаждать до

$T \leq 370 \text{ K}$. После заварки половины толщины заготовок необходимо производить промежуточный отжиг при $T = 750 \text{ K}$ $t = 4 \text{ ч}$ для уменьшения уровня напряжений и снижения локальной концентрации водорода в стыке. Затем выполняется полная заварка стыка. Для повышения механических свойств металла отливки и сварного соединения, снижения сегрегации водорода у границы сплавления и уменьшения коррозионно-механического износа бронзы при работе в паре трения с бакаутом и капроном после сварки следует произвести отжиг заготовок при $T = 920 \text{ K}$ в течение $t = 5 \text{ ч}$. Посадка обработанных облицовок на гребной вал рекомендуется производить на клеювую основу.

На основании выполненных исследований на Черноморском судостроительном заводе разработана и внедрена в производство типовая технологическая инструкция на автоматическую сварку вне вала комбинированных облицовок гребных валов. Гребной вал с комбинированной облицовкой из Бр.ОЦО-2 с латунной средней частью был установ-

лен на т/х "Бабушкин" и отработал гарантийный моторесурс - 40 тыс. часов.

Основные выводы по работе:

1. Металл центробежных отливок из Бр.ОЦО-2 обладает полосчатой структурой и химической микронеоднородностями, анизотропией механических свойств, микропористостью, низкими прочностью и пластичностью при высоких температурах. Это обуславливает низкую стойкость ОЦЗ против образования горячих трещин.

2. Разработаны оптимальные режимы термосоорботки, повышающие механические и эксплуатационные свойства Бр.ОЦО-2. Рекомендуется производить отжиг сваренных заготовок облицовок при температуре 920 K в течение $t = 5$ часов, что значительно снижает химическую микронеоднородность и повышает пластичность, ударную вязкость и износостойкость сплава.

3. Установлено, что механизированная сварка под высококремнистым флюсом за счет легирования металла сварочной ванны активным раскислителем - кремнием обеспечивает лучшую стойкость металла шва против пор, чем сварка под низкокремнистыми флюсами или в аргоне и допускает максимальное содержание фосфора до 0,4%. Фосфор снижает стойкость металла шва против пор вследствие протекания реакции раскисления закиси меди фосфором с образованием газообразного продукта раскисления - пятиокси фосфора. Максимальная концентрация фосфора в сварочной проволоке, не вызывающая образования пор зависит от способа сварки и состава защитной среды.

4. Разработан состав сварочной проволоки и флюса, обеспечивающих получение качественных сварных соединений Бр.ОЦО-2. Эффективное повышение механических свойств металла шва, выполненного оловянной бронзой, достигается легированием сварочной проволоки активным модификатором - ниобием в количестве 0,3...0,7%. При этом искривляются границы зерен и измельчается микроструктура шва, что повышает его прочность и пластичность. Такой же результат можно получить за счет металлургического воздействия на металл сварочной ванны через шлаковую фазу путем введения во флюс ОСЦ-45 борный шлак в количестве 5%.

5. Установлено, что электродуговая сварка бронзы Бр.ОЦО-2 под флюсом проволокой диаметром 2 мм обеспечивает у границы сплавления минимальную концентрацию термодиффузионного водорода $[H] =$

$0,8 \cdot 10^{-5}$ м³/кг) по сравнению с автоматической сваркой в аргоне и ручной аргонодуговой сваркой. С увеличением диаметра сварочной проволоки локальная концентрация водорода у границы сплавления повышается в 2,2...2,4 раза, что снижает пластические свойства сплава. Теоретическими расчетами установлено, что уменьшением сегрегации водорода у границы сплавления за счет его концентрационной диффузии можно пренебречь. Снижение механических свойств металла ОШЗ бронзы при непрерывной многопроходной сварке проволоками диаметром ≥ 3 мм вызвано охрупчиванием металла ОШЗ вследствие длительного пребывания в области повышенных температур и термодиффузией водорода к границе сплавления. Для уменьшения концентрации водорода необходимо применять промежуточный и последующий отжиг сварного соединения.

6. Стойкость металла ОШЗ Бр.ОЦО-2 против образования горячих трещин зависит от величины межзеренного проскальзывания и сегрегации легкоплавких примесей — свинца и висмута. Установлено, что с повышением температуры предварительного отжига величина межзеренного проскальзывания в ОШЗ бронзы Бр.ОЦО-2 уменьшается. Повышение температуры предварительного отжига выше 900 К резко снижает стойкость ОШЗ против образования горячих трещин, что обусловлено не уменьшением деформационной способности сплава, а сегрегацией легкоплавких примесей (свинца и висмута) на стенках микропор, образовавшихся при распаде эвтектоида.

7. Для предупреждения образования горячих трещин в ОШЗ бронзы Бр.ОЦО-2 необходимо уменьшить величину пластической деформации (т.е. межзеренного проскальзывания) вблизи границы сплавления, время пребывания металла ОШЗ при повышенных температурах и локальную концентрацию водорода у границы сплавления. Это достигается путем механизированной многопроходной сварки под флюсом проволоками диаметром ≤ 2 мм с погонной энергией $q_n = 800 \dots 1200$ кДж/м, охлаждением стыка между проходами до $T \leq 370$ К и применением промежуточного отжига при $T = 750$ К в течение 4...5 часов.

8. В результате комплексного решения поставленных задач исследований разработана технология изготовления комбинированных облицовок гребных валов с латуной (ЛМц55-3-1 или ЛМц59-1-1) средней частью на нетрущейся поверхности облицовки, которая обеспечивает значительную экономию дорогостоящей оловянной бронзы. Разработанная технология внедрена на Черноморском судостроительном заводе с

экономическим эффектом 61 тыс.руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Симаненков Л.Н. Влияние свойств оловянных бронз на их свариваемость. - Труды НКМ. - Николаев: НКМ, 1974, вып.80, с.57...62.

2. Джевага И.И., Симаненков Л.Н., Иващенко Г.М., Ральков А.Ф. Механизированная электродуговая сварка бронзы Бр.ОЦО-2 проволокой Бр.АМц9-2. - Сварочное производство, 1974, № II, с.19...22.

3. Симаненков Л.Н. Заварка дефектов литых рубашек отсасывающих валов из бронзы Бр.ОЦО-2. В сб.: Тезисы докладов семинара "Коррозионностойкие наплавки и их применение в промышленности". Л., ЛДНП, 1975, с.67...73.

4. Симаненков Л.Н. Исследование электродуговой механизированной сварки Бр.ОЦО-2 проволокой Бр.ОФ8-0,3. - Труды НКМ. - Николаев: НКМ, 1976, вып.108, с.61...66.

5. Симаненков Л.Н., Джевага И.И. Влияние борного шлака на механические свойства металла, наплавленного бронзой Бр.ОФ8-0,3. - Труды НКМ. - Николаев: НКМ, 1977, вып.121, с.56...59.

6. А.с. № 593863 (СССР). Состав сварочной проволоки./Джевага И.И., Симаненков Л.Н. Б.И., 1978, № 7.

7. Симаненков Л.Н., Джевага И.И. Исследование стойкости околошовной зоны Бр.ОЦО-2 против образования горячих трещин. В сб.: Тезисы докладов I конференции по сварке легких, цветных и тугоплавких металлов и сплавов. - Киев, 1978, с.58...59.

8. Симаненков Л.Н. О диффузии водорода в околошовной зоне Бр.ОЦО-2. - Труды НКМ. - Николаев: НКМ, 1979, вып.147, с.74...80.

9. Джевага И.И., Балабаев Г.М., Иващенко Г.М., Ральков А.Ф., Симаненков Л.Н. Изготовление комбинированных облицовок деформируемых валов судов. В сб.: Пародовой опыт наплавки в судоремонте. - М.: ЦНТИ ММФ. Серия Судоремонт, 1979, с.81...86.

Джевага