

На правах рукописи
УДК 621.791.75.04

Доронин Юрий Викторович

**РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАТНОЙ
СТОРОНЫ ШВА С УЧЕТОМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В СВАРОЧНОЙ ВАННЕ И СОЗДАНИЕ НОВЫХ СВАРОЧ-
НЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОДНОСТОРОННЕЙ
ДУГОВОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

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



Москва 2010

Работа выполнена в Московском государственном индустриальном университете
и ООО «НПО Армцентр»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ямпольский Виктор Модестович

доктор технических наук, профессор
Потапов Николай Николаевич

доктор технических наук
Полосков Сергей Иосифович

Ведущее предприятие: **ОАО «НИКИМТ-Атомстрой»**

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1942260

Доронин Ю.В. Разработка 1

Защита состоится "15" апреля 2010г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана.

Телефон для справок: (499) 267 - 09 - 63

Автореферат разослан "2" апреля 2010 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.141.01
доктор технических наук, доцент

Коновалов А.В.

Сл. КСН.

20.11.11

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Переход на рыночные методы управления экономикой, осуществляемые в России в последние 15 лет, потребовал разработки новых подходов к понятию производительности труда, экономии материалов, снижению брака при производстве сварных конструкций.

Разработка передовых технологий, оборудования и сварочных материалов осуществляемая в различных отраслях промышленности направлена на повышение качества сварного шва в том числе и при односторонней дуговой сварке. В первую очередь, это относится к проблемам формирования обратного валика при дуговой сварке плавящимся электродом с использованием принудительного формирования, как процесса сварки, наиболее часто применяемого при сварке стыковых соединений металлоконструкций. Многочисленные исследования, выполненные по этому вопросу, не привели до сих пор к окончательному его решению, ввиду сложности процессов, происходящих в донной части сварочной ванны. Таким образом, развитие теоретических представлений о динамике движения металла сварочной ванны при сквозном проплавлении, механизме перемещения пограничных слоев металла сварочной ванны с пограничными слоями шлака и твердыми поверхностями формирующих устройств, изучение физико-химических свойств металлошлаковых слоев в условиях ограниченного взаимодействия по температуре и времени, является актуальной задачей.

Актуальность этой проблемы подчеркивали в своих трудах российские ученые: Акулов А.И., Ерохин А.А., Бельчук Г.М., Веселков В.Д., Чернышов Г.Г., украинские специалисты Богдановский В.А., Галинич В.И., Колисник В.Н., а также К. Тераи, М. Арикава, Р.Кейси, Л. Корнелл, М.Бредстрит, У.Чадбенд, С.Уайли и другие зарубежные исследователи.

Научные исследования по теме диссертационной работы проводились в соответствии с научно-технической программой «Методы сварки и монтажа резервуаров и технологических трубопроводов на 1981-1985 гг. Минмонтажспецстроя СССР и научно-технической программой по проблеме 0.72.01. на 1986-1990гг. (Постановление ГКНТ СССР и АН СССР от 10 ноября 1985г).

Цель работы. Определение роли основных физических, физико-химических и гидродинамических процессов в сварочной ванне и разработка на их основе способов управления формированием обратной стороны шва, создание сварочных материалов для односторонней дуговой сварки сталей, обеспечивающих повышение качества сварных соединений и производительности процесса сварки. В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

- теоретически и экспериментально исследовать физические и физико-химические свойства шлаковых систем, участвующих в процессе формообразования обратной стороны шва;

- сформулировать основные требования к шлаковым системам, обеспечивающим

качество формы обратного валика при принудительном формировании и на весу при дуговой сварке сталей;

- изучить влияние и закономерности гидродинамических процессов в сварочной ванне и их связь с качеством формы обратного валика шва при различных шлаковых системах;
- синтезировать параметрический ряд составов сварочных материалов для формирования обратного валика шва при односторонней сварке сталей и создать технологию их изготовления;
- разработать технологические приемы, обеспечивающие качественную форму обратного валика шва в различных пространственных положениях.

Научная новизна работы. В результате теоретического и экспериментального анализа процесса формирования корневого валика одностороннего шва, установлено, что обратный валик одностороннего стыкового соединения образуется в результате взаимодействия потоков жидкого металла в донной части сварочной ванны и шлакового расплава формирующего устройства под действием объемных и поверхностных сил, перемещающих металл в сварочной ванне;

- установлено, что поверхностные слои шлакового расплава формирующего устройства неоднородны по составу из-за расслоения в результате разрушения гетерополярных и гомеополярных связей как внутри окислов, так и между окислами шлаковой системы;

- качественное формирование обратного валика в условиях двухфазного течения слоя металл-шлак в донной части сварочной ванны обеспечивается поверхностным натяжением шлакового расплава в диапазоне 480-650 мДж/м² и вязкостью шлакового расплава в диапазоне 2-5 Па·с при температуре взаимодействия слоев 1450-1650°С;

- указанные физико-химические свойства достигаются созданием в пограничном макрослое шлакового расплава упорядоченных зон (кластеров), состоящих из соединений окислов кремния, бора и алюминия при содержании SiO₂ не менее 50% и наличие в составе не менее 10% Me₂O или 20% MeO₂;

- шлаковые системы сварочных материалов, формирующих лицевую и обратную сторону шва при односторонней сварке в процессе взаимодействия проявляют химическую активность с жидким металлом донной части сварочной ванны и способствуют прохождению металлургических процессов в корне шва;

- применяемые в настоящее время для формирования обратного валика шва шлаковые расплавы имеют поверхностное натяжение в диапазоне 300...350 мДж/м², а вязкость 0,2...0,6 Па·с и состоят из разупорядоченных зон не гарантирующих стабильность формы обратного валика шва.

Практическая ценность и результаты работы. Теоретические положения и результаты исследований и расчетов были использованы при разработке новых шлаковых систем, обеспечивающих качественное формирование обратного валика при дуговой сварке сталей. На основе разработанных шлаковых систем были созданы керамические флюсы, многослойные стеклоткани, стеклоленты и стеклостержни, а также технология их производства, производительностью до 500

тыс. погонных метров в год на ОАО «Тверьстеклопластик» г.Тверь и в НПО «Стеклопластик». Материалы и технология односторонней сварки в среде защитных газов прошла проверку в аттестационном центре Немецкого союза сварщиков в г.Дуйсбурге и рекомендованы для использования при сварке сталей марок А...D в судостроении.

Технология односторонней дуговой сварки металлоконструкций, технологических и магистральных трубопроводов внедрена в монтажном и специальном строительстве, в тресте Севкавэнергомонтаж, в ОАО «Промприбор», в ЗАО «Комиэнергомонтаж», в тресте «Севертрубопроводстрой» г. Надым, на предприятии ВЗМЭО (г. Волгодонск).

Новизна разработанных шлаковых систем, технологических приемов и оснастки подтверждена 7 авторскими свидетельствами СССР, 2 патентами РФ, патентами США и ФРГ. В процессе работы созданы: методика измерения жидкой прослойки под дугой; методика измерения донных потоков в сварочной ванне; методика определения основного и электродного металла в корне шва при помощи радиоактивных изотопов; методика определения подтеканий, влияющих на формирование обратной стороны шва и способы их предотвращения. Экспериментально подтвержден метод измерения скорости донных потоков, направленных в виде подтеканий по ходу сварки. Разработаны способ получения корневого валика при сварке толстостенных конструкций. Разработаны методы и промышленная технология изготовления многослойных двухкомпонентных стекловолоконных лент и стержней.

Специализированные сварочные материалы – подкладные ленты и стержни удостоены серебряной медали ВДНХ в 1986 году. Экономический эффект от использования предложенных разработок составляет в среднем 234 руб. на погонный метр шва.

По результатам выполненных исследований **на защиту выносятся:**

1. Результаты численной оценки влияния окислов металлов, солей, ферросплавов, входящих в состав подкладки, на формирование обратной стороны шва и образование дефектов.
2. Количественный критерий оценки физикохимических свойств шлакового слоя подкладки – поверхностного натяжения, динамической вязкости, краевого угла смачивания, температур плавления и затвердевания и их влияния на соотношение объемных и поверхностных сил в пограничном слое металл-шлак в корне шва.
3. Количественный критерий расчета поля скоростей перемещения металла сварочной ванны в зоне сквозного проплавления и перехода из головной в хвостовую часть и методы снижения влияния гидродинамических процессов на образование дефектов обратной стороны шва, обеспечивающие увеличение толщины свариваемого за один проход стыкового шва.
4. Методы оценки качества формы обратного валика шва по краевому углу смачивания шлаковой системы формирующего слоя подкладки и углу перехода усиления обратного валика и основного металла.

5. Способы создания многослойных подкладных лент для односторонней дуговой сварки плавящимся электродом с учетом плотности формирующего слоя и способа дуговой сварки за счет соотношения количества шлаковой фазы, образующейся при плавлении флюса, шихты порошковой проволоки, покрытия электродов с одной стороны, и шлака, выделяемого при плавлении подкладки, с другой.

6. Алгоритмы и номограммы расчета параметров режима односторонней дуговой сварки на основе моделей формирования обратного валика шва и с использованием параметрического ряда многослойных подкладных лент для различных способов сварки.

Апробация работы. Результаты работы были опубликованы:- на 2-ой Всесоюзной научно-технической конференции «Прогрессивные методы сварки в тягелом машиностроении и наплавки в черной металлургии» г.Жданов, 1977г.

- на Всесоюзной межвузовской конференции МВТУ им. Н.Э. Баумана 1983г., на Всесоюзной конференции по сварке в судостроении и судоремонте. 1987г. г.Николаев., в монографии « Односторонняя сварка в строительстве» Стройиздат.1990 г., на международной Конференции « Сварка-2008» ,Санкт-Петербург. май 2008г.

-на межрегиональной конференции « Безопасность атомных станций» г. Волгодонск. 2008г.

Работа в целом обсуждалась на заседании кафедры оборудования и технологий сварочного производства Московского государственного индустриального университета, заседании кафедры « технологии сварки и диагностика» Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана, заседании кафедры « технология сварки и сварочного производства » Волгодонского филиала Южно-Русского технического университета.

Публикации По материалам диссертации опубликовано 36 работ, из них одна монография, 17 научных статей (7 по перечню ВАК), 8 докладов на научных конференциях, 6 авторских свидетельств СССР, 2 патента РФ, 1 патент ФРГ, 1 патент США.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, изложенных на 353 страницах текста и иллюстрирована 51 таблицей, 125 иллюстрациями. Список литературы состоит из 155 наименований. Приложение (справки и другие материалы) содержит 10 страниц.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве: в работах [1,2,3,4] обосновал конструкцию и составы формирующих слоев подкладок. В работе [6] выполнил количественный расчет вязкости пограничных слоев шлака. В работе [10] разработал технологию нанесения формирующего слоя. В работе [11] предложил методику расчет химической активности шлаковой системы. В работах [12, 13] обосновал технологию текстурирования формирующих слоев. В работах [14, 15, 16, 17] сформулировал предмет изобретений. В работе [19] по результатам эксперимента определил долю электродного металла в сварном шве. В работе [20] обосновал необходимость использования критерия Пекле при оценке температурного влияния различных формирующих подкладок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, сформулирована цель диссертационной работы, приведены формулировки основных положений, выносимых на защиту.

Первая глава "Анализ способов, технологии, оборудования и сварочных материалов для односторонней дуговой сварки сталей" дает современное представление об односторонней дуговой сварке сталей и краткую характеристику способов односторонней дуговой сварки, обеспечивающих двустороннее формирование шва.

За последние четыре десятилетия односторонняя дуговая сварка сталей получила широкое распространение в отечественной промышленности и за рубежом. Важнейшие работы в этом направлении были выполнены в МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИЭС им. Е.О. Патона, ЦНИИТС, ЦНИИ «Прометей», ВНИИСТ, ЛПИ им. Калинина, ВНИИмонтажспецстрой, а также в ряде зарубежных исследовательских центров, таких как Институт сварки в Кембридже (Великобритания), компании «ЗМ» (США), «Линкольн Электрик» (США), судостроительных компаниях Японии, Канады, Австралии.

Тем не менее, как в России, так и за рубежом основной проблемой односторонней дуговой сварки плавящимся электродом по-прежнему является сложность получения качественного обратного валика. Решение этой проблемы в основном, базируется на использовании традиционных способов формирования обратной стороны шва - на медной подкладке, флюсовой подушке, флюсомедной подкладке при сварке плосколистовых конструкций и использовании малогабаритных подкладок при сварке криволинейных конструкций - трубопроводов, обечаек, резервуаров. Разработанные в последние годы источники питания сварочной дуги фирмы «Линкольн» обеспечивают стабильную форму корня шва при сварке в среде защитных газов за счет применения специальных циклограмм, исключающих прожог и позволяющих влиять на вектор давления дуги в сочетании с плавным перетеканием жидкого электродного металла в сварочную ванну без ударных нагрузок. Тем не менее, как электроды при сварке на весу, так и источники питания со специальными циклограммами, в основном, гарантируют формирование корня шва при сравнительно невысоких токовых нагрузках.

Работами А.И. Акулова, Г.Г. Чернышова, Э.А. Гладкова, Г.М.Еремеева, А.М. Рыбачука, В.Д. Тарлинского, И.Л. Емельянова и других исследователей установлено, что стабильную форму обратного валика шва при односторонней сварке сталей, как плавящимся, так и неплавящимся электродом можно обеспечить в отдельных случаях, лишь комплексно влияя на сочетание факторов, определяющих бездефектное формирование и прочностные характеристики одностороннего однопроходного соединения.

Предварительные исследования, проведенные автором при односторонней сварке стыковых швов толщиной до 16мм плавящимся электродом на малогабаритных формирующих устройствах показали, что стабильность размеров обратной стороны шва при однопроходной односторонней сварке возможна без использования стационарных громоздких пневматических

или электромагнитных стенов с усилиями поджатия более 100 кг/мм^2 . Цель достигается путем подбора физических и физикохимических свойств шлака подкладной керамики, являющегося изложницей для металла сварочной ванны в условиях статического и динамического равновесия.

Известно, что условия формирования обратного валика отличаются от условий формирования лицевой поверхности, а именно:

- время пребывания металла и шлака в расплавленном состоянии в корне шва значительно меньше;

- температура в корне шва сварочной ванны на $250-300^\circ\text{C}$ ниже;

- условия перемещения пограничного слоя донной части сварочной ванны в область кристаллизации существенно отличаются от аналогичной на лицевой поверхности;

- физико-химические явления на границе «металл-шлак» в корне шва значительно отличаются от аналогичных на поверхности лицевого валика;

Однако до настоящего времени для односторонней сварки применяются стандартные сварочные материалы - флюсы, порошковые проволоки и электроды, не учитывающие особенностей условий формирования и металлургических процессов, происходящих в корне шва;

Поэтому, пути решения основных проблем односторонней сварки связаны с рассмотрением основного вопроса:

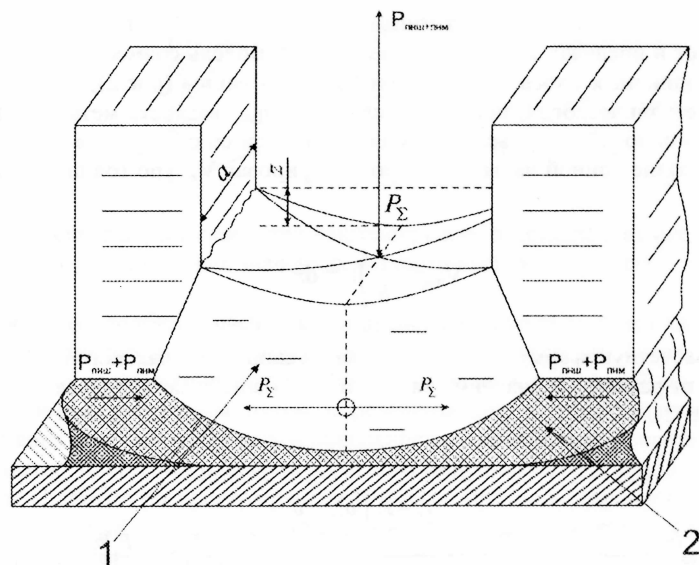
- формирующий обратный валик сварочный материал, должен создаваться на основе результатов основных металлургических и физико-химических процессов на границе «металл сварочной ванны - шлак подкладки», определяющих требования к физико-химическим свойствам шлаковой системы материала, обеспечивающих получение заданных параметров обратного валика;

- шлаковые системы сварочных материалов, используемых при односторонней сварке (флюсы, электроды, порошковые проволоки) для стабилизации процесса формирования обратного валика должны соответствовать по металлургическим и термодинамическим свойствам шлаковым системам формирующих подкладок;

Вторая глава "Исследование и разработка теоретических основ формирования обратной стороны шва при односторонней дуговой сварке сталей" посвящена статическим и динамическим моделям равновесия сил, действующих в сварочной ванне.

В главе представлены результаты исследований формирования корня шва, показывающие, что в условиях принудительного формирования корня шва стабильность размеров обратного валика зависит от поверхностных свойств шлаковой ванны, в которой происходит процесс формирования и кристаллизации жидкого металла. Установлено, что макронатеки по ширине обратного валика появляются в результате прорыва жидкого металла в естественные зазоры между подкладкой и основным металлом и могут быть устранены за счет увеличения поверхностного натяжения шлака.

Модельные расчеты, основанные на действии статических и динамических сил в сварочной ванне при односторонней сварке стыковых швов (рис.1), показали, что при зазоре между подкладкой и основным металлом в 1,5...2мм, поверхностное натяжение шлака в диапазоне температур 1550...1650°С должно быть не менее 500 мдж/м², в то время как поверхностное натяжение флюсов, используемых в настоящее время для формирования обратной стороны шва при односторонней сварке не превышает 350 мдж/м². Данные расчеты показывают, что возникающие дефекты - макронатеки по ширине обратного валика невозможно устранить только при помощи мощных пневматических и гидравлических порталов, поджимающих формирующие устройства к обратной стороне стыкового соединения, так как обеспечить перекося кромок менее 1,5мм, в современных условиях при сборке металлоконструкций не представляется возможным. При рассмотрении статической модели установлено, что металл донной части сварочной ванны и шлак формирующего устройства совместно перемещаются из головной в хвостовую часть сварочной ванны.



P_{Σ} - сумма сил действующих со стороны дуги, $P_{\text{ДД}}+P_{\text{Г}}$; $P_{\text{ПШ}}$ - сила поверхностного натяжения верхнего и нижнего зеркал сварочной ванны;

$P_{\text{ПШ}}$ - сила поверхностного натяжения шлака в зазоре между подкладкой и металлом стыка. 1- расплав металла; 2- шлаковый расплав;

Рис. 1. Упрощенная статическая схема силового взаимодействия в сварочной ванне на керамической расплавляемой подкладке

Приведенные в работах Ерохина А.А., Демянцевича В.М., Размышляева Д.М. Чернышова Г.Г., Столбова В.И., Исидзаки, Хорри и Мори и других исследователей, данные о гидродинамических процессах в сварочной ванне, свидетельствующие о высоких скоростях перемещения металла сварочной ванны из головной в хвостовую часть под действием объемных и поверхностных сил меняют представления о процессе взаимодействия между металлом сварочной ванны и жидким шлаком в донной части сварочной ванны. Так, по данным из работ Демянцевича В.П., Болдырева А.М. и Размышляева А.Д., скорости истечения жидкого металла достигают 1,5-2 V_{св.} при сварке неплавящимся электродом и 20-30 V_{св.} при сварке плавящимся электродом. Наибольший порядок скоростей наблюдается именно в корне шва, в зоне сквозного проплавления, на границе взаимодействия слоев металла и шлака. Однако в этих работах не рассматривали формирование корня шва шлаковым расплавом. Расчеты показали, что если вязкость шлакового слоя в диапазоне температур 1450-1650°С будет не менее 5 Па·с для углеродистых и низколегированных сталей и 2...3 Па·с для легированных сталей, то граница совместного перемещения под действием градиента давления будет минимальной, а время совместного перемещения будет в пределах 2-3 с. Если представить модель совместного перемещения пограничных слоев шлака в донной части ванны (рис.2), где b_c и $b_{шл}$ - толщина металлического и шлакового слоя, η_c и $\eta_{шл}$ - вязкость металла и шлака, P_0 и P_L - силовой импульс, перемещающий слои со скоростями V_c и $V_{шл}$ в начале и в конце донной части L, то проинтегрировав $V_z^{шл}$ по толщине шлакового слоя,

$$V_{шл} = -\frac{1}{b} \int_0^b V_z^{шл} dx \quad (1)$$

получим расчетную формулу для определения скорости шлакового слоя в зависимости от различных значений вязкости шлакового и металлического расплавов (рис. 2).

$$V_{ср}^{шл} = \frac{1}{b_{шл}} \int_0^b \left(\frac{(P_0 - P_L) b_{шл}^3}{6\eta_{шл} L} - \frac{\frac{P_0 - P_L}{2L} \left(\frac{b_{шл}^2}{\eta_{шл}} - \frac{b_c^2}{\eta_c} \right) - V_c}{\eta_{шл} \left(\frac{b_c}{\eta_c} + \frac{b_{шл}}{\eta_{шл}} \right)} \frac{b_{шл}^2}{2} - \frac{(P_0 - P_L) b_{шл}^2}{2\eta_{шл} L} + \right. \\ \left. + \frac{\frac{P_0 - P_L}{2L} \left(\frac{b_{шл}^2}{\eta_{шл}} - \frac{b_c^2}{\eta_c} \right) - V_c}{\frac{b_c}{\eta_c} + \frac{b_{шл}}{\eta_{шл}}} \frac{b_{шл}^2}{\eta_{шл}} \right) dx; \quad (2)$$

Скорость перемещения шлакового слоя определяем с известными допущениями:

- температура слоя по толщине одинакова и не меняется по длине сварочной ванны;
- вязкость металлического и шлакового слоя по толщине в условиях взаимного перемещения постоянна;
- донная часть сварочной ванны в условиях взаимного перемещения слоев не превышает 10мм.

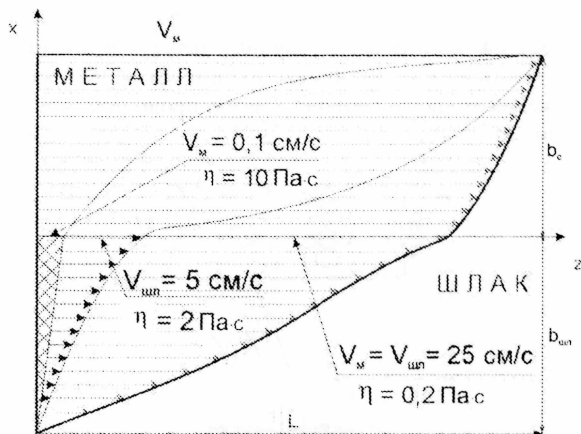


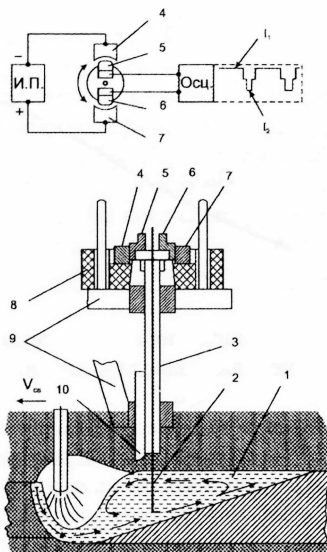
Рис. 2. Распределение скоростей движения слоев в металле и шлаке при различных значениях вязкости шлакового расплава

В результате, подбирая расчетным и экспериментальным путем вязкость шлакового слоя, можно снижать скорость взаимного перемещения слоев, стабилизировать высоту обратного валика и избежать шлаковых включений в корне шва. Таким образом, расчетным путем определены два основополагающих свойства шлакового расплава - вязкость и поверхностное натяжение, влияющие на возникновение нестабильных размеров обратного валика-высоты и ширины.

Одним из самых распространенных дефектов при односторонней сварке стыковых соединений под флюсом толщиной более 16мм, являются утяжины, образующие обратный мениск в корне шва.

Для выявления причин образования дефектов в виде утяжин была разработана методика оценки возможности получения качественного одностороннего однопроходного соединения. Было высказано предположение, что появление дефектов вызывается неблагоприятной гидродинамической обстановкой в сварочной ванне, а именно изменением направления течения металла сварочной ванны различного объема. Для определения направления течения жидкого металла было разработано специальное устройство, позволяющее фиксировать направление течения металла в хвостовой части ванны (рис.3).

В хвостовую часть ванны помещен загнутый конец стержня 2, ориентированный по направлению движения потока жидкого металла. При этом замыкаются контакты 4-5 и 6-7 или 4-6 и 5-7, что фиксируется на осциллографе в результате протекания токов I_1 и I_2 . В результате экспериментальных исследований было установлено, что направление движения металла периодически изменяется, вблизи дна металл начинает течь в сторону головной части сварочной ванны, а вблизи поверхности в хвостовую часть (рис.4). Предполагается, что донный поток, встречаясь с поверхностным потоком, увеличивает объем металла под дугой, в результате чего появляются подтекания, которые при наличии гарантированного зазора проникают на значительную глубину между кромками, снижая проплавленную способность дуги и увеличивая толщину жидкой прослойки. Изучение явления подтекания жидкого металла в зазор проводились с помощью вольфрамового шупа (рис.3)



- 1 - сварочная ванна; 2 - вольфрамовый стержень; 3 - вольфрамовая трубка;
4, 7 - неподвижные контакты; 5, 6 - клеммы гальванометра; 8 - кольцо;
9 - кронштейны; 10 - защитный экран из вольфрама.

Рис. 3. Схема устройства для определения направления течения жидкого металла

Изучение явления подтекания жидкого металла в зазор проводились с помощью вольфрамового шупа (рис.3) диаметром 0,5мм, покрытого тонким слоем жаропрочной кварцевой нити. Шуп помещался в зазор между кромками на расстоянии L от электрода. В момент появления подтекания происходит замыкание электрической цепи, если его величина $L_n > L$, что фиксируется на осциллографе. Таким образом, можно определить длину подтеканий L и частоту появления подтеканий τ .

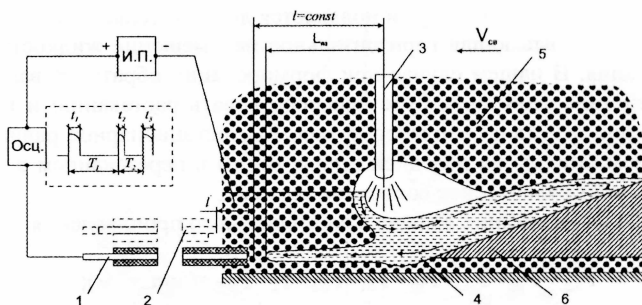
Обработка полученных данных значений L и τ , выявила их зависимость от толщины свариваемого металла (таб.1). С увеличением толщины свариваемого металла (глубины проплавления и объема сварочной ванны) среднестатистические значения L и τ растут. Приведенный метод регистрации подтеканий металла позволяет определить и скорость его течения в зазор между кромками перед дугой. Для этого в зазоре установили еще один шуп 2, конец которого совмещен относительно конца первого шупа на расстоянии l' . Время t' , за которое расплавленный металл преодолевает расстояние l' , фиксируется по осциллограмме, а скорость его течения ($v=l'/t'$) составляет 4...20см/с. при односторонней сварке.

Таблица 1.

Зависимость частоты и длины подтеканий от толщины свариваемого металла

Толщина металла, мм	Частота подтеканий, 1/с;		Длина подтеканий, мм	
	$\tau_{\max}$	$\tau_{\text{ср.статистич.}}$	$L_{\max}$	$L_{\text{ср.статистич.}}$
12	-	-	14	-
14	0,1	0,04	22	18
16	0,1	0,08	35	25
18	0,12	0,09	53	32
20	0,14	0,12	65	40
22	0,18	0,14	67	46

Одновременно, использование приведенных методик позволяет не только выявить особенности гидродинамической обстановки в сварочной ванне, но и установить их взаимосвязь, благодаря чему в конечном счете можно полнее представить процесс образования некоторых дефектов корня шва при односторонней сварке. Анализ проведенных исследований показал, что при сварке под флюсом корневых стыковых швов происходят самопроизвольные колебательные движения расплавленного металла в сварочной ванне (гидродинамические возмущения),



1-первый вольфрамовый шуп; 2- второй вольфрамовый шуп; 3- электрод;
4- сварочная ванна; 5- флюс.

Рис.4. Методика и схема определения подтекания жидкого металла

в результате которых изменяются условия теплопередачи от дуги в корень разделки и условия вытеснения расплавленного металла на обратную сторону шва. Причем, наиболее высокие скорости достигаются на передней стенке ванны и в зоне сквозного проплавления.

Это позволяет предположить, что высокие скорости перемещения металла в корне шва могут привести к дефектам при формировании обратного валика. Для оценки влияния течения металла необходимо определить изменение объемных и поверхностных сил на разных стадиях формирования обратного валика в корне шва. Это особенно важно в момент окончательного завершения процесса, когда происходит физико-химическое взаимодействие на границе металл-шлак. В этом случае, когда импульс объемных и поверхностных сил, перемещающих элементарный объем жидкого металла из головной в хвостовую часть ванны иссякает, окончательная геометрическая форма обратного валика создается за счет поверхностных сил капли жидкого металла на границе с затвердевающим шлаковым расплавом, называемым тянущим усилием и описывается формулой:

$$F_t = 2\pi r \sigma \Delta y = 2\pi r \sigma_2 (\cos v - \cos v') \quad (3)$$

где: r - радиус периметра смачивания; σ - межфазное натяжение; v и v' - углы смачивания (рис.4). Капиллярное давление или давление Лапласа в любой точке поверхности составляет:

$$P_d = \sigma [(1/r_1) - (1/r_2)], \quad (4)$$

где: r_1 и r_2 - главные радиусы кривизны поверхности в данной точке.

Как следует из уравнения (4), капиллярное давление существенно лишь при наличии сильно искривленных поверхностей, но при малой кривизне оно уменьшается, а при плоской поверхности обращается в нуль. Если растекание жидкости массой m сопровождается снижением ее центра тяжести на dh , то потенциальная энергия снижается на $-dU = -mgh$ и появляется дополнительная радиальная сила $F_p = -mg(dh/dr)$, вызывающая горизонтальное перемещение жидкости по периметру смачивания. В нашем случае при формировании обратного валика гравитационное действие этой силы будет способствовать растеканию и направлено перпендикулярно действию лапласовых сил. Квазистационарное равновесие между плавлением металла на передней стенке ванны и перетеканием в хвостовую часть предполагает равновесное состояние всех сил, $\sum F_{ix} = \Delta(\sum mV_x)$ действующих в ванне в зоне сквозного проплавления:

$$F_{э.д.} + F_{pg} + F_{г.д.} - F_{тр} - F_{\sigma 1} - F_{\sigma 2} - F_t - F_p - \tau(\text{шл., к, м});$$

Проекция сил на ось «х» количества движения в зоне соприкосновения двух фаз несколько меняется. В рассматриваемой зоне угол α минимален, поэтому проекция сил тяжести и трения запишутся в виде:

$$F_x = \int_{x_1}^{x_2} \rho g y dx; \quad (5)$$

$$F_{тр} = \int_{x_2}^{x_1} \eta v^2(x) dx; \quad (6)$$

Поверхностное давление от поперечной кривизны верхней и нижней сварочной ванны будут соответственно равны:

$$P_{п.в.} = \frac{\sigma_1}{r_1}; P_{п.н.} = \frac{\sigma_2}{r_2}; \text{ где:}$$

σ_1 - поверхностное натяжение металла;

σ_2 - межфазное натяжение на границе металл-подложка;

Давление скоростного напора $F_{г.д.}$ равно $\frac{\rho V_{ме}^2}{2}$, где ρ - плотность жидкого металла.

Уравнение равновесия в общем виде записывается следующим образом:

$$\int_{x_1}^{x_2} f_{дл}(x) y dx + \int_{x_1}^{x_2} \rho g y dx + \frac{\rho V^2}{2} - \frac{-k\eta v}{\delta} - \frac{\sigma_1}{r_1} - \frac{\sigma_2}{r_2} - mg(dh/dr) - 2\pi\sigma(\cos v - \cos v') - \tau(\text{шл, к, м}) = 0;$$

где:

η - коэффициент внутреннего трения жидкого металла;

$\tau_{шл, к, ме}$ - касательные напряжения на границе: жидкий металл- металл подкладки, жидкий металл-керамика подкладки; жидкий металл-жидкий шлак подкладки;

r_1, r_2 - радиус кривизны верхней и нижней поверхности сварочной ванны;

$F_p = -mg(dh/dr)$ - радиальное усилие капли;

$F_t = 2\pi\sigma(\cos v - \cos v')$ - тянущее усилие капли;

Таким образом, процесс влияния импульса сил, действующих в донной части ванны выглядит следующим образом:

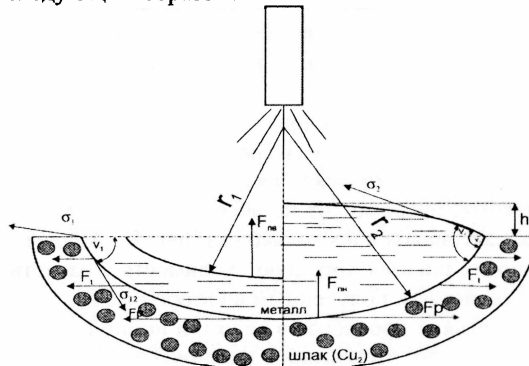


Рис. 5. Силы, действующие на каплю при растекании жидкого металла по шлаковому расплаву

Выделенный объем жидкого металла под действием сил давления дуги, электромагнитных, гравитационных и центробежных сил, преодолевая силы вязкого трения перемещается по передней стенке сварочной ванны (рис. 6), вступает в контакт с металлической, керамической или расплавленной шлаковой подложкой, достигая в точке В максимальной скорости перемещения. За счет более высокой плотности жидкий металл внедряется в шлаковую ванну или втекает в медную или керамическую изложницу, образуя усиление. За счет касательных напряжений на границе шлак-металл, а также в результате теплоотвода, скорость перемещения снижается и в хвостовой части поверхностные силы, превалируя над объемными, завершают процесс окончательного формирования валика при помощи тянущего усилия растекания капли.

В целом, можно считать, что высота обратного валика, при прочих благоприятных условиях формируется на ранней стадии, в головной части ванны, в то время как ширина валика и окончательная форма сопряжения обеспечивается тянущим усилием капли и межфазного натяжения на границе металл-шлак.

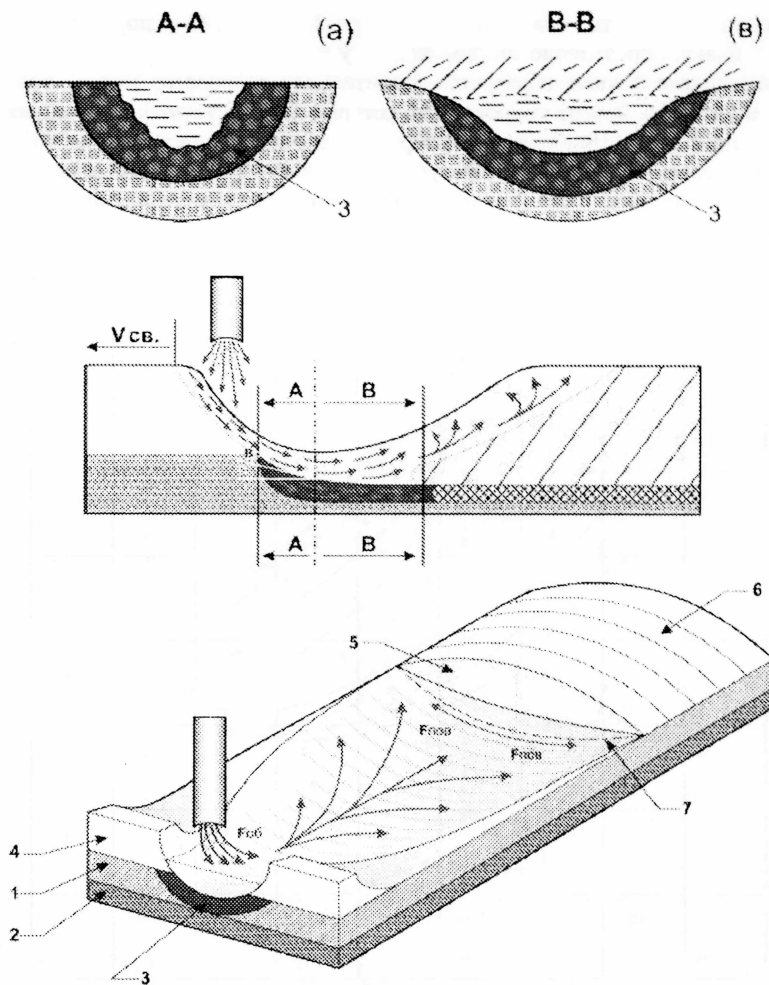
Третья глава "Разработка оптимальных составов формирующих корень шва и исследование физико-химических свойств шлаковых расплавов" посвящена разработке оптимальных составов формирующих обратную сторону шва слоев и исследованию физико-химических свойств шлаковых расплавов.

Используя методы математической статистики, качественную и количественную оценку параметра оптимизации - форму обратного валика шва, определили оптимальный состав шихты, включающий следующие компоненты: рутил - 40%, плавиковый шпат - 25 %, кремнезем - 18,5 %, ферросилиций - 15 %, глинозем - 1,5 %.

Поверхностные свойства навесок проверялись по методикам лежащей капли и максимального давления в газовом пузырьке, погруженном в шлаковый расплав. Исследования показали, что поверхностные свойства специализированных шлаковых систем, предназначенных для односторонней сварки значительно отличаются от поверхностного натяжения стандартных сварочных флюсов в диапазоне температур 1450-1650°C и составляют 480...610 мДж/м² (рис.7). Одновременно, проводились сравнительные испытания шлаковых систем гибких подкладок SJ-1 и SJ-2 (3M, США), которые подтвердили необходимые требования к свойствам формирующих слоев.

Вязкость шлаковых расплавов исследовалась на ротационном вискозиметре, в динамическом температурном режиме, в среде азота. В результате исследований удалось обнаружить, что динамическая вязкость экспериментальных навесок, в том числе и зарубежных, превосходит по абсолютным значениям вязкость стандартных сварочных материалов в несколько раз (рис. 8). Анализ полученных экспериментальных данных показал хорошую сходимость с расчетными характеристиками по данным свойствам, полученным во второй главе.

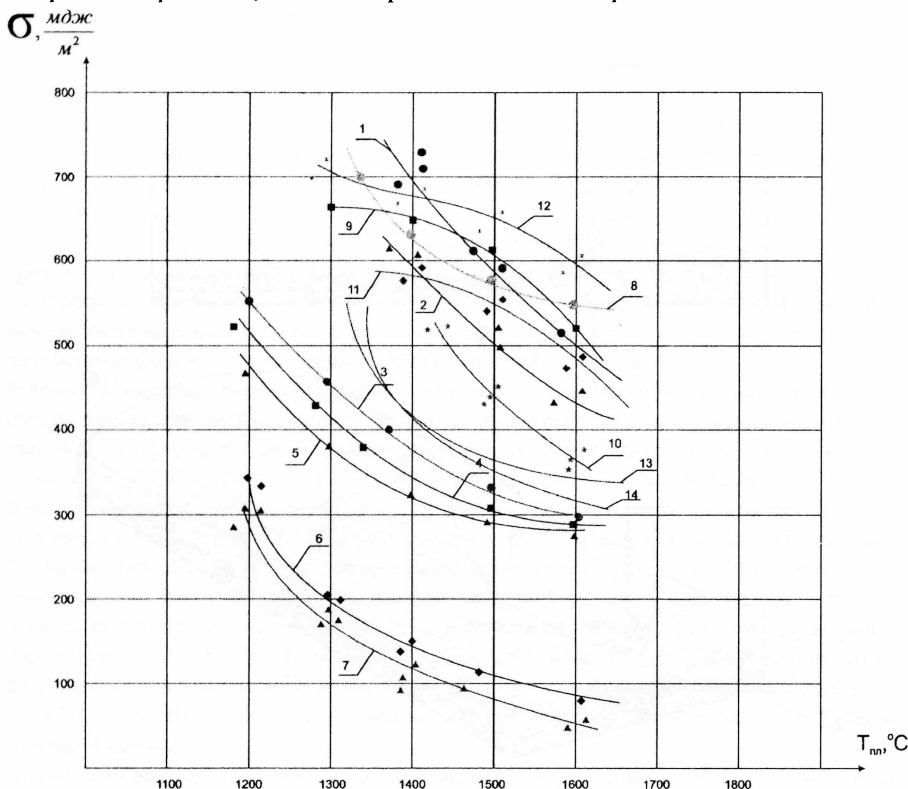
Из теории металлургических процессов в целом, и ионной теории шлаковых расплавов в частности, известно, что катионы и анионы с мощными силовыми полями притягиваются друг к другу, а слабые ионы вытесняются на периферию, в зону более высоких температур.



1-формирующий слой; 2-тугоплавкий слой; 3-шлаковая ванна; 4-основной металл; 5- хвостовая часть ванны; 6-шов; 7- граница формы валика;
Рис. 6. Феноменологическая модель образования обратного валика

Этим обуславливается микронеоднородность и расслоение шлаковых расплавов. В этой связи квазиполикристаллическая модель растворов, разработанная И.А. Новохатским и А.В. Архаровым, показывает направление, в соответствии с которым, можно решить проблему стабилизации поверхностных свойств расплава за счет увеличения в пограничном слое упорядоченных зон (сиботаксисов или кластеров) и уменьшения разупорядоченной зоны.

Надо однако заметить, что при температуре 1550-1650°C в пограничном слое «металл-шлак», определение зон достаточно условно. В условиях взаимодействия металла и шлака в зонах образуется значительное количество газов - водорода, двуокиси углерода, других гидроксидов, которые способствуют увеличению разупорядоченной зоны. Наиболее характерным дефектом формы обратного валика шва, характеризующим наличие разупорядоченной зоны в корне шва, является шевронная пористость, типичная при использовании керамических подкладок.

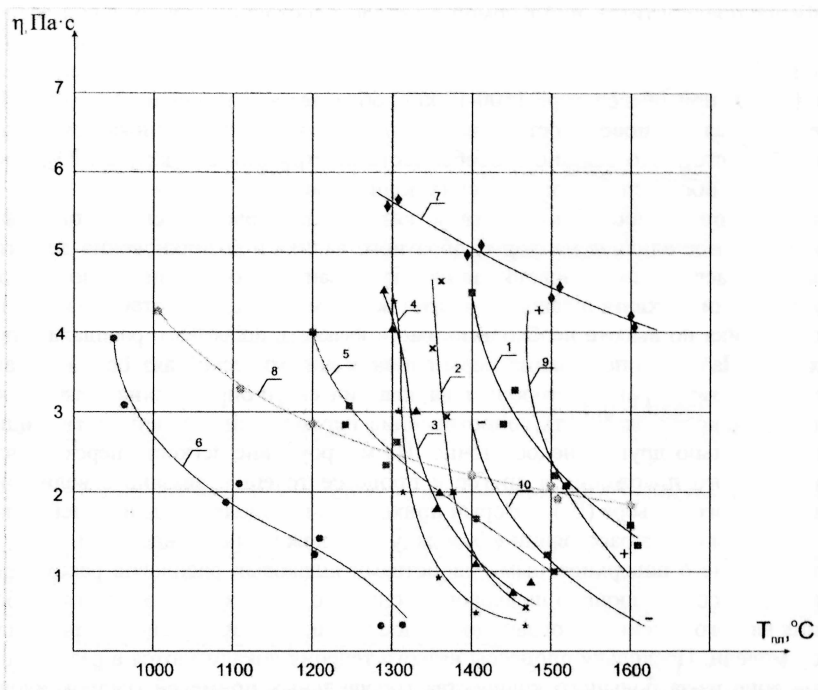


1 - расплав №1; 2 - расплав №2; 3 - расплав флюса АН-28; 4 - расплав флюса АН-18; 5 - расплав флюса АНФ-14; 6 - расплав флюса АН-60; 7 - расплав №2; 8 - расплав SJ-1; 9 - расплав SJ-2; 10 - расплав №1 (метод давления в газовом пузырьке); 11 - расплав SJ-1(метод давления в газовом пузырьке); 12 - расплав SJ-2 (метод давления в газовом пузырьке); 13 - флюс АН-348А; 14 - флюс ОСЦ-45;

Рис. 7. Поверхностное натяжение экспериментальных шлаковых расплавов и сварочных флюсов

Шевронная пористость представляет собой наружные и внутренние газовые каналы, расположенные на поверхности обратного валика.

В свою очередь, использование в качестве формирующих материалов неорганических стекловолокон, технология производства которых устраняет насыщение влагой и построена на использовании свободных от промежуточных и нестабильных в условиях высоких температур соединений, окислов устраняет появление указанных дефектов.



1 - расплав №1 (SiO₂-TiO₂-Al₂O₃); 2 - расплав флюса АН-28; 3 - расплав флюса АН-18; 4 - расплав флюса АНФ-14; 5 - расплав флюса АН-60; 6 - расплав шлака № 3 (SiO₂-TiO₂-MgO); 7 - расплав шлака SJ-1; 8 - расплав шлака SJ-2; 9 - расплав флюса 348А; 10 - расплав флюса ОСЦ-45.

Рис.8. Вязкость шлаковых расплавов формирующих подкладных устройств и сварочных флюсов

В зоне кластеров окислы группируются в сложные комплексы, характерные относительно стабильными физическими и физико-химическими свойствами. В разупорядоченной зоне данные свойства нестабильны. Таким образом, квазиполикристаллическая модель, в целом, поясняет структуру и свойства пограничного слоя шлакового расплава, объясняет возможность стабилизации поверхностных свойств, предлагает направления и требования к системам сварочных материалов

для формирования корня шва при односторонней сварке плавящимся электродом. Применительно к поверхностным свойствам их можно сформулировать следующим образом: (рис.8).

- преобладающей в структуре шлакового расплава должна быть зона сиботаксисов (кластеров);

- для «кластеризации» расслаивающегося шлакового слоя и минимизации газовых примесей в расплаве, рекомендуется использование стабилизирующих кластерообразование и поверхностные свойства окислов: SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 ;

- наиболее предпочтительной формой в твердом состоянии для создания сварочного материала являются стеклянные волокна. Наибольшее влияние на стабильность поверхностных свойств оказывает двуокись кремния. В расплавленном состоянии SiO_2 при температуре 1500-1700°C обладает аномальным эффектом. При росте температуры поверхностное натяжение этого окисла не снижается, а даже несколько растет. Это связано с особенностями строения структуры SiO_2 , представляющей собой цепь неорганических полимеров.

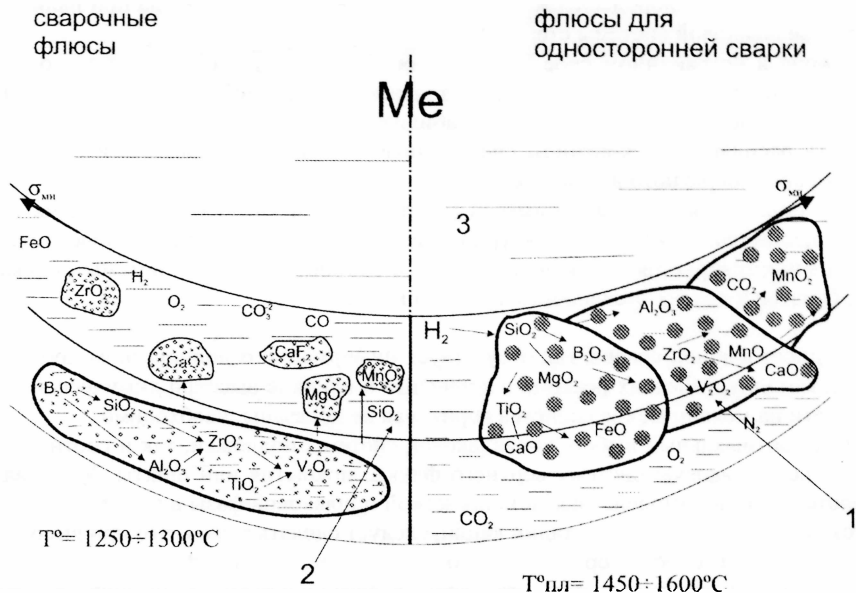
Аналогично поверхностным свойствам, вязкость шлакового расплава оказывает не менее важное влияние на форму обратного валика и возникновение дефектов корня шва. Расчетное определение вязкости пограничного слоя показало, что для предотвращения захвата шлаковых частиц жидким металлом и стабилизации обратного валика по высоте необходимо иметь вязкость шлакового расплава в пределах 2...5 Па·с. Для понимания меры влияния динамической вязкости на благоприятную форму обратной стороны шва, классического определения вязкости как свойства жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой, недостаточно. На микроуровне легкость перехода частицы из одного положения в другое в процессе течения, связано с величиной энергетического барьера (E_n), который приходится преодолевать движущейся частице размером «г» на расстоянии «d» между ее положениями равновесия.

Как и в случае с поверхностными свойствами шлаковых расплавов рассмотрим структурную составляющую шлакового расплава с точки зрения вязкости и обоснования вязкого течения в пограничном слое с точки зрения квазиполикристаллической модели. Поскольку процессы вязкого течения локализуются в разупорядоченной зоне из-за большого количества горофильных примесей (гидроксидов и газов), то данный механизм имеет место лишь при небольших перегревах выше линии ликвидуса (как в нашем случае), когда большую часть шлака (расплава) составляют кластеры. А наиболее термически устойчивыми кластерообразователями являются алюмосиликаты и боросиликаты.

Исходя из вышеуказанных рассуждений, кластерная модель с точки зрения вязкого течения представляет собой следующую картину (рис.10). Активация вязкого течения определяется силами связи внутри окислов между металлом и кислородом, в отличие от поверхностных процессов, где изменение поверхностных свойств происходит из-за расслоения между окислами расплава на молекулярном уровне.

Анализируя общие положения квазиполикристаллической модели как одного из вариантов развития представлений о микрогетерогенности расплавов применительно к поверхностным процессам и процессам вязкого течения,

происходящим на границе металл-шлак при односторонней сварке, можно сделать следующие выводы:



1- зона кластеров; 2-разупорядоченная зона ; 3- зона расплавленного металла.

Рис. 9. Кластерная модель и ее влияние на поверхностные свойства шлаковых расплавов

- при температуре взаимодействия в диапазоне 1550-1650°C окисный расплав шлаковой ванны состоит из кластеров и разупорядоченной зоны;
 - кластеры окисного расплава представляют собой зону комплексных соединений, состоящую из силикатов различного состава;
 - разупорядоченная зона представляет собой локальную область из одноатомных ионов, расположенных в зоне расслоения пограничных с жидким металлом сварочной ванны слоев;
 - на основании ионной теории расплавов пограничный слой сварочной ванны подвержен расслоению и представляет собой микронеоднородные слои с различными поверхностными и вязкими свойствами.
- В системах MeO-SiO_2 установлен эффект макрорасслоения при определенном содержании SiO_2 , что является переходом от микронеоднородности к макронеоднородности;
- при росте в составе системы $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ окислов кремния более 50% происходит стабилизация химического состава слоев близких к пограничному слою с образованием кристаллических групп, состоящих из тридимита и кристобалита;

- исследование политерм вязкости шлаковых расплавов показало, что кластеризация пограничного слоя с минимальным содержанием горофильных примесей (гидроксидов и кислородсодержащих газов) может быть обеспечена при наличии в составе шлаковой системы стеклообразных силикатов;
- наличие в пограничном слое большого объема разупорядоченной зоны одноатомных ионов, локализирующего вязкое течение и поверхностные эффекты на отдельных участках приводит к дестабилизации структурно чувствительных свойств расплава и, в конечном счете, влияет на газонасыщенность и стабильность формы обратного валика шва;
- объем горофильных примесей (гидроксидов и кислородсодержащих газов), дестабилизирующих структурно чувствительные свойства шлакового расплава минимизируется при использовании в составе шлаковой системы силикатов, боратов и других стеклообразующих примесей.

При односторонней сварке, где отсутствует информация о полновесном прохождении металлургических реакций в корне шва и влияние высокой химической активности на механические свойства корня шва не доказаны, необходимо сделать оптимальный выбор, как шлаковой системы подложки, так и соотнесенную с ней шлаковую систему верхнего флюса, покрытия или шихты. Учитывая скоротечность взаимодействия металлической и шлаковой фазы в корне шва и отсутствие влияния флюса на стадии капли, следует сделать вывод, что при высокой химической активности корневой шлаковой системы, верхний флюс должен быть малоактивным при сохранении стандартных сварочно-технологических свойств шва в процессе сварки углеродистых и низколегированных сталей. Таким образом, наиболее предпочтительной стекловолоконной шлаковой системой будет состав, где содержание SiO_2 не превысит 50...55 %. При этом, шлаковый расплав с учетом кластерной модели сохранит стабильные поверхностные свойства и высокую вязкость для диссипации гидродинамических процессов. С точки зрения верхней шлаковой системы, предпочтительна минимизация активных (кислых) окислов с сохранением необходимых сварочно-технологических свойств по формированию и нейтральности по отношению к составу корневой шлаковой системы.

В связи с этим, наличие в составе шлакового расплава, обеспечивающего стабильные формирующие свойства с минимальным содержанием горофильных примесей и значительного количества силикатов (более 50 %), приведет к появлению металлургического взаимодействия на границе металл сварочной ванны - шлак. Это приведет к проявлению кремневосстановительных процессов и термодинамической активности отдельных, входящих в расплав окислов.

Важно также знать поведение отдельных окислов в системах и их активность в процессе использования в сварочных материалах, с целью прогнозирования их влияния на свойства шлакового расплава при односторонней сварке.

Для шлаковых систем, в составе которых двуокись кремния составляет не менее 50 %, важен вывод о том, что химическая активность флюса по кремнию

зависит одновременно и от концентрации кремнезема в шлаке и от основности флюса-шлака:

$$A_{SiO_2} = (SiO_2)_\Phi / 100B,$$

где: $(SiO_2)_\Phi$ - содержание кремнезема в шлаковой системе, % по массе;
B - основность флюса,

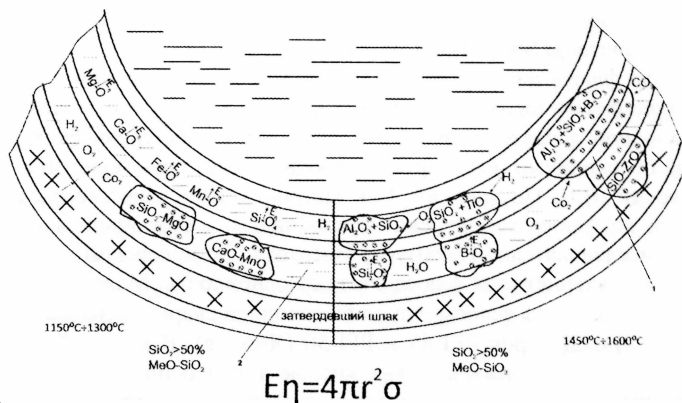


Рис. 10. Кластерная модель и механизм вязкого течения. 1-упорядоченная зона;
2-разупорядоченная зона

В четвертой главе исследуется возможность серийного производства формирующих обратную сторону шва материалов для односторонней сварки листовых металлоконструкций и трубопроводов. На основании общей конструктивной схемы переносных подкладных устройств была разработана технология производства расплавляемых керамических подкладок. Для разработки составов и конструкций гибких подкладных лент были использованы рекомендованные в исследованиях 3 главы стекловолоконные материалы. Мировое производство стекловолокна базируется на использовании марок А, Е, С с широким диапазоном представленных в составах окислов. Синтез необходимого состава был выполнен с учетом квазиполикристаллической модели растворов и преимущественном характере кластерообразующих элементов. В результате были получены два состава следующего содержания:

1. $SiO_2 = 55\%$; $Al_2O_3 = 15\%$; $B_2O_3 = 6\%$; $MgO = 8\%$; $R_2O = 15\%$; остальное - 1%;
2. $SiO_2 = 53\%$; $Al_2O_3 = 20\%$; $B_2O_3 = 7\%$; $MgO = 8\%$; $R_2O = 11\%$; остальное - 1%;

Для создания новых конструкций подкладных лент были подобраны оптимальные макеты формирующих слоев для различных способов сварки, различных пространственных положений, наиболее часто употребляемых при односторонней сварке марок сталей. Синтез стекла, промышленная технология производства лент, стержней и стеклотрикотажа позволили разработать параметрический ряд

стекломатериалов, которые послужили основой для создания различных конструкций подкладных лент и стержней для формирования обратной стороны и корня шва при односторонней и двусторонней сварке прямолинейных и криволинейных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей.

Для сварки под флюсом была поставлена и решена задача разработки керамического флюса для односторонней сварки низколегированных и легированных конструкционных сталей для целей энергомашиностроения и судостроения. В качестве базовой основы были взяты малоактивные основные сварочные флюсы ЦНИИТМАШ системы $\text{SiO}_2\text{-MgO-CaF}_2\text{-ZrO}_2$.

При разработке флюса для двустороннего формирования шва при односторонней сварке углеродистых и низколегированных сталей важно оценить, какой параметр является основной характеристикой исследования металлургических процессов, но также и обеспечивает стандартные прочностные характеристики шва. Так, К.В. Любавский, В.В. Подгаецкий, Г.Л. Петров в этом качестве рассматривают концентрации во флюсе термически неустойчивых и сварочной ванне окислов. Зарубежные исследователи: Накамура, Насотока, Бонишевский главной металлургической характеристикой флюса считают основность. Малоактивными и высокоосновными являются флюсы для односторонней сварки низколегированных и легированных сталей марок PFI-45 и PFI-50 (Япония). В мировой практике для односторонней сварки применяют как кислые так и основные флюсы. Кислые флюсы по данным К.Тераи, имеют значительные преимущества перед основными, обеспечивая лучшее формирование с обратной стороны сварного соединения, однако, уступают основным по значениям ударной вязкости металла шва. В связи с этим, при сварке металлов большой толщины для обеспечения высоких значений ударной вязкости необходимо применять основные флюсы. Таким образом, предполагаются использовать следующие критерии для создания универсальной шлаковой системы для двустороннего формирования шва при сварке на флюсо-медной подкладке и флюсовой подушке:

- ограничение кислых окислов SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 ;
- оптимизация основных окислов MgO , CaO ;
- введение в состав флюса солей фтора;
- введение в состав флюса металлических порошков для увеличения скорости сварки и раскисления металла сварочной ванны в корне шва;
- технология производства флюса должна быть на основе керамического изготовления;

В результате расчета с использованием латинского и греко-латинского квадратов было выяснено, что наиболее оптимальным является следующий состав: SiO_2 - 20 %, MgO - 28 %, CaO - 10 %, Fe - порошок - 20 %, CaF_2 и ZrO_2 по 7 %, Al_2O_3 - 6 %, FeSi и FeMn - остальное. В качестве параметра оптимизации помимо качества формирования выбрано наличие или отсутствие газовых и шлаковых включений в корне шва.

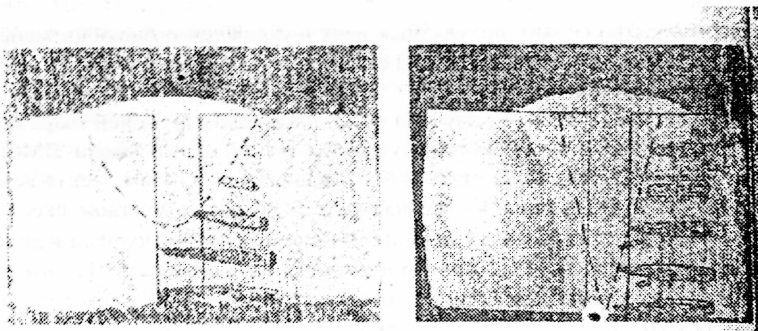
В пятой главе рассматриваются результаты внедрения всепозиционной технологии сварки с двусторонним формированием шва.

Организованное в ОАО «Тверстеклопластик» и НПО «Стеклопластик» промышленное производство гибких подкладных лент и стержней позволило распространить технологию односторонней сварки сталей в различных отраслях промышленности и строительства.

Наибольшее распространение получила технология односторонней сварки в среде углекислого газа на многослойной двухкомпонентной ленте марки ЛМС-3 при сборке металлоконструкций из стали 09Г2 толщиной 12...14 мм. Лента использовалась дважды. Применялась V-образная разделка кромок с углом скоса одной кромки 20°. Сварку стыкового соединения толщиной 12мм выполняли в два прохода, стыковых соединений 14...16мм в три прохода. Расход газа 10...12 л/мин. Проволока Св-08Г2С диаметром 1,2мм. В качестве оборудования использовался полуавтомат ВНИИМСС УПС-1 с источником питания ПСО-500. Техника сварки с поперечными колебаниями амплитудой на первом проходе 4...6 мм, на втором проходе 8...10 мм, на третьем проходе 14...16 мм. Частота колебаний от 40 до 120 колебаний в минуту. Сварка вертикальных стыков выполнялась способом «снизу вверх» с поперечными колебаниями на 2-м и 3-м проходах. Первый проход выполнялся без поперечных колебаний.

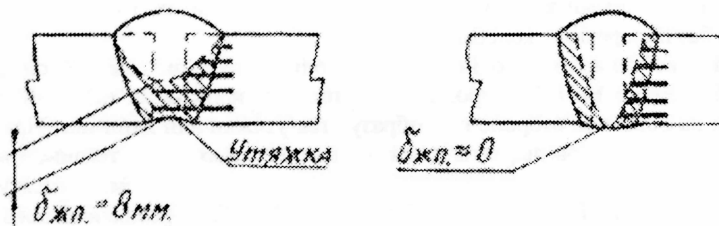
При отработке технологии односторонней однопроводной сварки под флюсом стыковых соединений из углеродистых и низколегированных сталей толщиной 16...18мм на обратной стороне шва образуются утяжки или наплывы. При сварке в среде защитных газов дефекты такого рода объясняются подтеканием металла сварочной ванны под дугу и впереди дуги, в результате чего меняются условия формирования сварного шва. Естественно, что подтекания расплавленного металла сварочной ванны под дугу и перед дугой вызывают изменения толщины и формы жидкой прослойки под дугой. С целью выявления предполагаемых колебаний жидкой прослойки и изменений ее формы при автоматической сварке под флюсом был проведен ряд экспериментов по выбору оптимальных режимов сварки.

В результате работы по подбору режимов сварки было выяснено, что при сварке образцов толщиной 16 и 18мм, формирование обратной стороны шва было неудовлетворительным из-за образования местных утяжек и неравномерной ширины обратного валика шва. Имеющиеся дефекты на обратной стороне шва совпадали с зафиксированными на осциллограммах отклонениями сварочного тока. Дальнейшие эксперименты по определению колебаний $\delta_{ж.п.}$ и $F_{ж.п.}$ проводились на специально подготовленных к сварке пластинах толщиной 16мм. Параметры толщины и площади жидкой прослойки определялись по границам расплавления вольфрамовых вставок. Фотографии макроструктур сварного шва (рис. 11) в поперечном сечении шва отражают наличие под дугой изменяющейся по толщине и форме жидкой прослойки. Если полученные изображения представить в плоскости, перпендикулярной оси шва, то значения « δ » будут равны: при подтекании металла (рис. 12.а)-8мм, а без подтеканий (рис.12.б) $\approx 0,5$ мм. Заштрихованные участки дают представление не только о качественном, но и о количественном изменении размеров жидкой прослойки. При формировании обратного валика в момент подтекания расплавленного металла под дугу образуются утяжки.



а - при подтекании жидкого металла под дугу; б - без подтекания жидкого металла под дугу

Рис.11. Макроструктура швов



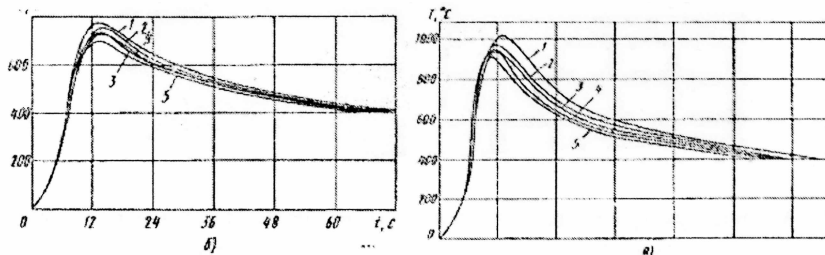
а - при подтекании металла под дугу; б - без подтекания металла под дугу.

Рис.12. Схематичное изображение жидкой прослойки по форме нерасплавившихся остатков вольфрамовых стержней

Совместно с Николаевским филиалом ЦНИИТС для условий односторонней сварки сталей 10ХСНД толщиной 12...14 мм была разработана технология сборки стыковых соединений судокорпусных конструкций, исключающая операцию строжки и подварки корня шва с использованием подкладной ленты ЛМС-4. Крепление ленты к обратной стороне стыкового соединения осуществлялась с помощью фольгошлена. Механизированная сварка в среде защитных газов выполнялась на типовом оборудовании, п/автомате ПДПГ-500 проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2...1,4 мм. При отработке технологии сварки было установлено, что самым оптимальным является зазор в диапазоне 3...6 мм.

При сварке судового набора из стали 09Г2 возникают проблемы технологической прочности конструкций сваренных односторонней сваркой на различного рода формирующих устройствах. Это привело к необходимости выделить и изучить особенность температурных условий формирования обратной стороны шва при сварке на подкладной ленте и стержне, а также, для сравнения при сварке на медной подкладке с тонким слоем стекловолоконной ленты, керамической и медной подкладке. В ходе эксперимента записывали термические циклы в контролируемых точках с помощью многоканального светолучевого осциллографа.

Проведенные испытания особенностей технологического процесса позволили установить изменения температуры в шести контрольных точках, расположенных вдоль оси шва для каждой схемы применения формирующих материалов. Время пребывания выше температуры критических точек Ac_1 и Ac_3 различно и имеет большее значение для сварки на стекловолоконных материалах и наименьшее значение для сварки на медной подкладке (рис. 13).



1,2 - гибкая подкладная лента и стержень; 3 - медная подкладка с тонкой стеклолентой; 4 - керамика; 5 - медная подкладка.

Рис. 13. Кривые распространения теплоты в точке $y=0,5$ см (а) и $y=0,8$ см (б) при сварке на подкладных материалах

При односторонней автоматической сварке под флюсом стыковых соединений в горизонтальном положении на вертикальной плоскости основные трудности возникают из-за несимметричного валика с обратной стороны шва. Отсутствие данных о формировании обратного валика при односторонней сварке в горизонтальном положении на вертикальной плоскости и роли основного и электродного металла в этом процессе создало трудности при разработке технологии сварки. С целью оценки влияния и распределения основного и электродного металла в объеме сварочной ванны были проведены испытания особенностей технологического процесса при сварке стали 0Н6 проволокой 06Х15Н6М15 диаметром 2 мм под керамическим флюсом ЖР-5. Для решения этой задачи была отработана методика с использованием радиоактивных изотопов (индикаторов). В качестве индикатора применяли радиоактивный изотоп углерод-14, первоначально вводимый в проволоку, а затем наносимый на поверхности свариваемых кромок.

Сварку пластин $11 \times 200 \times 600$ мм с односторонней разделкой кромок проводили на опытном образце автомата для сварки под флюсом в горизонтальном положении на вертикальной плоскости. Режим сварки: ток сварки - 280...320 А, напряжение на дуге - 30...34 В, скорость сварки - 20...25 м/ч. Ток постоянный, обратной полярности.

Для формирования обратной стороны шва использовались подкладные ленты с тугоплавкими и легкоплавкими формирующими слоями. В первом случае обеспечивалось минимальное проплавление и небольшое усиление обратного валика шва (рис. 14,а). Во втором, размеры обратного валика шва оказались более значительны. (рис. 14,б).

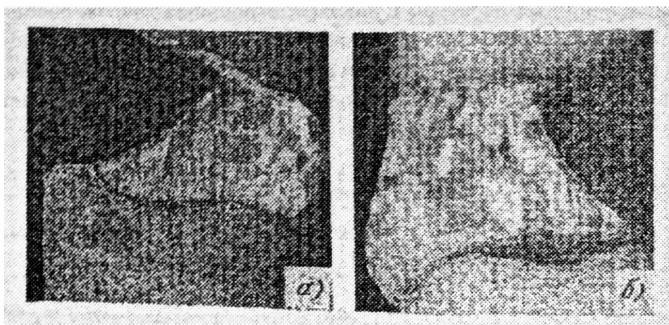


Рис.14. Макроструктура швов, выполненных односторонней сваркой на тугоплавкой (а) и легкоплавкой (б) подкладной ленте

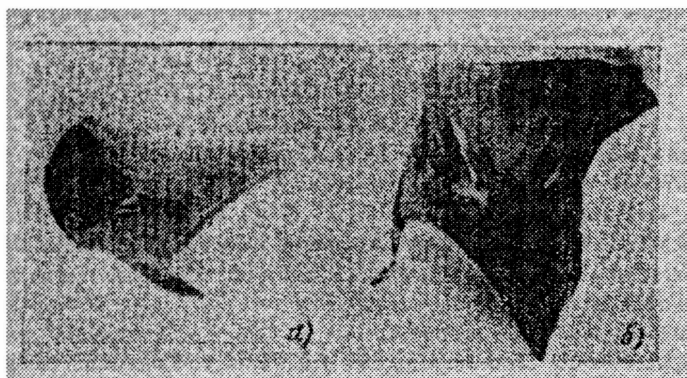


Рис. 15. Распределение углерода при сварке на гибких подкладных лентах с использованием тугоплавкого (а) и легкоплавкого (б) формирующих слоев при введении углерода в сварочную проволоку

Авторадиограммы, представленные на рис. 15, показывают распределение изотопа углерода-14 в корне шва и усиления с обратной стороны. В первом случае, при ограниченном усилении, обратный валик почти полностью состоит из электродного металла. При использовании легкоплавкого формирующего материала развар нижней кромки основного металла способствует перемешиванию основного и электродного металла, о чем свидетельствует интенсивность почернения авторадиограмм.

Широкий опыт внедрения технологии односторонней сварки плавящимся электродом углеродистых и легированных сталей с использованием гибких лент и стержней в СССР позволил запатентовать данные технические решения в ФРГ и США

и провести испытания с целью использования данных материалов и технологии при производстве металлоконструкций из сталей нормальной прочности марок А...Д, в том числе А32, А36, Д32, Д36 для судостроения. Испытания проводились в учебно-исследовательском центре немецкого союза сварщиков в г. Дуйсбурге (DVS).

На основе проведенных сварочно-технологических и механических испытаний, Germanisher Lloyd от 11.09.1991 г. подтвердил допуск к эксплуатации в соответствии с нормами на сварочные работы в судостроении следующие методы сварки:

- полуавтоматическая сварка в среде смеси CO_2 и аргона («Коргон 2») сварочной проволокой типа Хеш Беко 2 (WDI) на сталях марок А...Д толщиной от 4 до 25 мм с использованием подкладных лент марки ГПЛ и стержней марки ГПС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Формирование обратной стороны шва в настоящее время обеспечивается стандартными сварочными материалами - флюсами, порошковыми проволоками, электродами для ручной дуговой сварки, созданными без учета многочисленных гидродинамических, физических и физико-химических особенностей формирования обратного валика шва.

2. Гидродинамические схемы перемещения расплава в сварочной ванне идентифицируют возникновение неустойчивости размеров обратного валика по ширине и высоте. Объемные силы влияют на образование валика по высоте, а поверхностные силы ответственны за стабильность валика по ширине и форму перехода от усиления шва к основному металлу.

3. Поверхностное натяжение шлакового расплава в диапазоне 480...650 мДж/м² и динамическая вязкость расплава в диапазоне 2...5 Па·с при температуре 1550...1650°C гарантируют стабильность размеров обратного валика с отклонениями ± 1 мм по высоте и $\pm 1,4$ мм по ширине обратного валика.

4. Стабильность размеров обратного валика шва характеризуется $K_{\kappa} = (0,2-2,0)$ безразмерным коэффициентом устойчивости кластерных систем в шлаковом расплаве в соотношении $E_{\eta} = K4\pi r^2 \sigma$ и объемом разупорядоченной зоны, отличающихся друг от друга различной энергией активации вязкого течения и силой ионно-моллекулярного взаимодействия.

5. Расчет химической активности шлаковой системы $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ и других сварочных шлаков и стекол показал наличие необходимых условий для прохождения металлургических процессов в пограничном слое металл-шлак в донной части сварочной ванны.

6. Стекловолоконные материалы, созданные на базе системы $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ и сотканые в виде многослойной, многокомпонентной ленты и гибкого стержня, являются наиболее универсальными устройствами для формирования обратной стороны шва при односторонней дуговой сварке сталей в различных пространственных положениях.

7. Керамический флюс системы $\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO-CaF}_2\text{-ZrO}_2$ обеспечивает двустороннее формирование шва при односторонней сварке углеродистых и низколегированных сталей под флюсом со стабильными размерами обратного валика по высоте, ширине и плавности перехода к основному металлу с углом не менее 150° .
8. Гибкие подкладные ленты марки ЛМС и гибкие подкладные стержни марки ГПС серийно выпускаются предприятиями НПО «Стеклопластик» и ОАО «Тверьстеклопластик».
9. Разработанная технология всепозиционной односторонней сварки углеродистых и легированных сталей плавящимся электродом толщиной 3...20 мм с использованием гибких подкладных лент марки ЛМС и гибких подкладных стержней марки ГПС использована на предприятиях: ЗАО «Коминэнергомонтаж», ОАО «Севкавтехмонтаж», ВЗМЭО(г.Волгодонск), ОАО «Промприбор» (г.Ливны).
10. Материалы и технология прошли испытания в испытательном центре Немецкого Союза сварщиков и допущены к применению Germanisher Lloyd при производстве судовых конструкций на верфях ФРГ из сталей типа А...D.
11. Экономическая эффективность технологических процессов односторонней сварки с использованием разработанных материалов - подкладных лент, стержней и флюса составляет от 120 до 230 рублей на погонный метр шва.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. А.С. СССР 625885 МКИ В23К 36/22. Состав подкладки для односторонней сварки. Доронин Ю.В., Акулов А.И. и др.// Б.и. - 1978. - № 36.
2. А.С.631294 СССР МКИ В23К 37/06 Состав подкладки для формирования обратной стороны шва. Доронин Ю.В. Акулов А.И. и др.// Б.и. - 1978. - № 41.
3. А.С. 732141 СССР МКИ В23К 37/06 Подкладка для формирования обратной стороны шва при односторонней сварке плавлением. Акулов А.И., Доронин Ю.В.// Б.и. - 1980. - № 17.
4. А.С. СССР 1237358 МКИ В23К 37/06 Подкладка для формирования обратной стороны шва. Доронин Ю.В., Оботуров В.И., Соколов Ю.В., Сячинов В.И., Барыба Я.В.// Б.и. - 1986. - № 22.
5. Доронин Ю.В. Исследование формирования шва при односторонней сварке плавящимся электродом на подкладках: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.06. - М.: МВТУ, 1979. – 141 с.
6. Физико-химические свойства расплавленного шлака флюсовой подушки и их влияние на формирование обратной стороны шва при сварке плавящимся электродом / А.И. Акулов, Ю.В. Доронин, Г.Г. Чернышов // Сварочное производство. - 1981. - № 3. - С. 18-20.
7. Влияние гидродинамических явлений в сварочной ванне на формирование стыковых швов при сварке плавящимся электродом / А.И. Акулов, Г.Г. Чернышов, Ю.В. Доронин, А.В. Чернов, А.В. Сас // Изв. Вузов. Машиностроение. - 1976. - № 12. С. 135 - 140.

8. Доронин Ю.В., Ханапетов М.В. Односторонняя сварка в строительстве: Монография. М.: Стройиздат. 1990. – 150 с.
10. Доронин Ю.В., Култасова Н.Н. Материалы и оборудование для сварочных работ фирмы «Лотинторг» // Сварочное производство. 1993. - № 5. С. 24-26.
11. Патент ФРГ.41 20 177 С1 МКИ В23К 37/06.Подкладная лента для сварки. Ю.В.Доронин, А.И. Речкин // Заявлено: 19.06.1991. - Опубликовано: 4.06.1992.
12. Патент США. 5,451,741 МКИ В23К 9/32 Подкладная лента для сварочной технологии. Доронин Ю.В., Речкин А.И.// Заявлено: 18.06.1992 г. Опубликовано: 19.09. 1995.
13. А.С. СССР 1512747 МКИ В23К 37/06. Гибкая двухслойная подкладка для формирования обратной стороны шва. Доронин Ю.В., Акулов А.И., Райков Р.В., Еровенкова В.И.// Б.и. - 1986. - № 22.
14. А.С. 903010 СССР МКИ В23К 9/02 37/06. Подкладка для формирования обратной стороны шва при односторонней сварке сталей. Акулов А.И., Доронин Ю.В., Райков Р.В., Иванов Е.А., Мышкин А.Ю., Асонова Р.Д. // Б.и. - 1982. - № 5.
15. Патент Российской Федерации 2047439 МКИ В23К 9/16. 37/06. Способ дуговой сварки. Доронин Ю.В. Котенин В.П., Солоухин А.Б., Кибардина А.И.// Б.и. - 1995. - № 31.
16. Патент Российской Федерации 2073755 МКИ Основовязанный трикотаж. Зиновьева В.А., Карякина Р.Г., Шленникова О.А., Доронин Ю.В. // Заявлено: 28.06.1991.
17. Доронин Ю.В. Технологические особенности формирования шва при односторонней сварке сталей // Региональная научно-практическая конференция «Состояние и перспективы строительства и ввода в эксплуатацию второго блока Ростовской АЭС. Безопасная эксплуатация энергоблоков АЭС». Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. 2008. - С. 14-15.
18. Некоторые особенности формирования горизонтальных швов на вертикальной плоскости / Ю.В.Доронин, А.И.Акулов, А.Ю.Мышкин // Сварочное производство. - 1983. - №4. - С. 11-12.
19. Температурные условия формирования обратной стороны шва при односторонней полуавтоматической сварке в CO_2 на материалах с различными теплофизическими свойствами / И.В.Сулимов, А.И.Акулов, Ю.В.Доронин // Сварочное производство. - 1991. - С. 17-19.
20. Доронин Ю.В. Некоторые особенности конструирования формирующих слоев подкладочных устройств для односторонней дуговой сварки сталей. // Сварочное производство. - 2007. - №3. - С. 25-28.
21. Доронин Ю.В., Волобуев Ю.С. Особенности физико-химических свойств шлаковых систем сварочных материалов, формирующих обратную сторону шва при односторонней дуговой сварке // Сварка и диагностика. 2008 - №2.- С. 17-23.