

На правах рукописи

**Чинахов Дмитрий Анатольевич**

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ  
ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРУИ АКТИВНОГО ЗАЩИТНОГО  
ГАЗА НА ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в Юргинском технологическом институте (филиале) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор, Козырев Николай Анатольевич, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк;  
д.т.н., Коробов Юрий Станиславович, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией лазерной и плазменной обработки, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН (ИФМ УрО РАН), г. Екатеринбург;  
д.ф.-м.н., профессор, Черепанов Анатолий Николаевич, главный научный сотрудник лаборатории №11 термомеханики и прочности новых материалов, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск.

Ведущая организация: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Защита состоится «19» февраля 2021 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 003.035.02 на базе Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, а также на официальном сайте [http://www.itam.nsc.ru/education/dissertation\\_board](http://www.itam.nsc.ru/education/dissertation_board)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д.ф.-м.н. Сергей Александрович Гапонов



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время сварка применяется для получения неразъемных соединений широчайшей гаммы металлических, неметаллических и композиционных конструкционных материалов в условиях земной атмосферы, Мирового океана и космоса. Несмотря на непрерывно увеличивающееся применение в конструкциях и изделиях легких сплавов, полимерных материалов и композитов, основным конструкционным материалом остается сталь. Мировой рынок сварочной техники и услуг возрастает пропорционально росту мирового потребления стали.

Сварочные процессы протекают по сложным физико-химическим законам при высокой температуре. Совокупность различных факторов и явлений определяет качество сварных соединений. Особенно сильно это влияние сказывается при сварке сталей, склонных к закалке. Холодные трещины, часто образующиеся в сварных соединениях, являются причиной снижения эксплуатационных свойств конструкции, приводя к преждевременному их разрушению. Для повышения эксплуатационной надежности сварной конструкции разрабатывают и применяют разное оборудование и технологии управления свойствами сварных соединений. Уменьшить уровень высокотемпературной химической микронеоднородности (ВХМН), структурной и механической неоднородности в зоне сплавления и в металле сварного шва можно за счет интенсивного перемешивания электродного металла с основным.

Сократить время пребывания металла капли и сварочной ванны в жидкой фазе и одновременно увеличить скорость его перемешивания можно при помощи импульсно-динамических воздействий, например, управления переносом электродного металла в сварочную ванну или управления динамическим воздействием газо-защитной средой и др. Ряд работ указывают на влияние динамики струи защитного газа на процессы в зоне дугового разряда и свойства сварных соединений. А.Г. Потапьевский в своей работе пишет, что на каплю электродного металла при определенных условиях кроме основных сил существенное влияние оказывает сила действия струи защитного газа. Защитный газ при определенных условиях может быть инструментом управления процессами в зоне сварки и свойствами сварных соединений.

Процесс сварки плавящимся электродом в  $\text{CO}_2$  сопровождается экстремальным изменением материала в зоне сварки и неизбежными потерями (выгорание и окисление элементов, разбрызгивание). Снижение стабильности процесса сварки повышает уровень случайных потерь материала и химических элементов при переходе с электрода в шов, что снижает предсказуемость, повторяемость и стабильность химсостава и свойств сварных соединений. Поэтому одной из основных задач управления при сварке плавящимся электродом в защитных газах является обеспечение стабильности процесса сварки и получаемых свойств неразъемных соединений. Управление динамическим воздействием струи активного защитного газа на процессы в зоне сварки является актуальным и перспективным направлением совершенствования технологии сварки плавящимся электродом в защитных газах и позволяет повысить эффективность и стабильность получаемых свойств сварных соединений.

**Целью** работы является совершенствование процесса сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, путем усиления динамического воздействия активного защитного газа на кинетику плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну, стабильность тепломассопереноса, структуру и свойства неразъемных соединений.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Сформировать новые знания о степени влияния динамического воздействия струи активного защитного газа на процессы сварки плавящимся электродом в среде защитных газов.
2. Провести численные оценки динамического воздействия струи  $\text{CO}_2$  на характеристики тепломассопереноса электродного металла в сварочную ванну.
3. Определить степень влияния параметров динамического воздействия струи активного защитного газа на кинетику плавления электрода, гидродинамические процессы в сварочной ванне, химический состав и геометрию металла шва.
4. Провести количественную оценку распределения температурных полей в пластине при автоматической сварке плавлением в среде  $\text{CO}_2$  при двухструйной газовой защите.
5. Исследовать основные закономерности формирования структуры и свойств неразъемных соединений в зависимости от технологических параметров сварки плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой, при которых обеспечивается стабильность высоких эксплуатационных свойств.

#### **Научная новизна.**

1. Получены новые знания о степени влияния динамического воздействия струи активного защитного газа на процессы сварки плавящимся электродом в среде защитных газов. Установлены основные закономерности влияния параметров двухструйной газовой защиты на повышение эксплуатационных свойств, стабильность и кинетику формирования неразъемных соединений. Определены пути совершенствования технологии сварки плавящимся электродом в среде защитных газов.
2. Предложена и апробирована оригинальная методика количественной оценки динамического воздействия струи активного защитного газа на каплю электродного металла при механизированной сварке плавящимся электродом. Теоретически и экспериментально доказано, что в условиях двухструйной газовой защиты сила динамического воздействия струи активного защитного газа соизмерима с основными силами, действующими на каплю электродного металла.
3. Разработан и апробирован метод прогнозирования содержания марганца как основного легирующего компонента для обеспечения отсутствия дефектов в металле шва при сварке плавящимся электродом в среде  $\text{CO}_2$ . Установлена убывающая линейная зависимость содержания марганца в металле шва от скорости истечения защитного газа.
4. Разработана базовая физическая модель динамического воздействия струи защитного газа на гидродинамические процессы в сварочной ванне в условиях двухструйной газовой защиты. Установлено, что скорость истечения защитного газа является дополнительным параметром управления движением металла в сварочной ванне и геометрией сварного шва.
5. Разработана методика количественной оценки распределения температурных полей на поверхности изделия при автоматической сварке плавящимся электродом пластин в условиях двухструйной газовой защиты, позволяющая определить термический цикл и скорость охлаждения на поверхности свариваемых пластин с погрешностью не более 10 %.
6. Разработаны теоретические и практические основы управления стабильностью тепломассопереноса при сварке плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой, параметры которой являются дополнительным инструментальным средством построения структуры и свойств сварных соединений. Установлено, что скорость

истечения активного защитного газа оказывает значимое влияние на химический состав, структуру и свойства металла сварных швов.

### **Значение полученных результатов для теории и практики.**

Результаты выполненных комплексных теоретических и экспериментальных исследований легли в основу разработки новых технологических способов сварки плавящимся электродом в условиях струйной газовой защиты. Установлено доминирующее влияние параметров газовой защиты на стабильность и кинетику формирования неразъемных соединений из сталей, склонных к закалке, при сварке плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой и их эксплуатационные свойства. Предложена методика расчета силы газодинамического воздействия струи защитного газа на каплю электродного металла при механизированной сварке плавящимся электродом. Разработаны методические рекомендации по выбору способа газовой защиты и режимов сварки, позволяющие спрогнозировать количество марганца в металле сварного шва как одного из основных легирующих компонентов, переходящих из электродной проволоки в металл шва. Предложена методика прогнозирования содержания марганца в капле электродного металла и металле шва при сварке плавящимся электродом в зависимости от скорости истечения защитного газа  $\text{CO}_2$  и содержания марганца в электродной проволоке. Экспериментально и теоретически доказано, что скорость истечения защитного газа оказывает существенное влияние на стабильность переноса капель электродного металла, газо- и гидродинамику процессов в зоне дугового разряда и сварочной ванне при сварке плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой. Разработана уточненная методика расчета распределения тепла при автоматической сварке пластин за один проход на основе анализа результатов экспериментальных и теоретических исследований термических циклов при сварке плавлением в  $\text{CO}_2$ . Экспериментально доказано положительное влияние параметров двухструйной газовой защиты при сварке плавящимся электродом на химсостав, микроструктуру и свойства сварных соединений из сталей, склонных к закалке. Доказана возможность газодинамического управления процессами в зоне сварки плавящимся электродом и свойствами сварных соединений. Установлена корреляционная взаимосвязь эксплуатационных свойств сварных соединений и химического состава металла шва с технологическими параметрами режима сварки плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой.

Результаты исследований, разработанный способ сварки и технологические рекомендации его применения при производстве сварных металлоконструкций из сталей, склонных к закалке, использованы на ОАО «Сибметаллургмонтаж» (г. Юрга), ОАО «Сургутнефтегаз» (г. Сургут). Результаты исследований успешно используются в учебном процессе и научно-исследовательской работе студентов специальности «Оборудование и технология сварочного производства» в Юргинском технологическом институте Национального исследовательского Томского политехнического университета в течение нескольких лет.

**Методы исследований.** Экспериментальные исследования производили с применением современных методов и оборудования: осциллографирование современным электронным осциллографом с использованием программного обеспечения: «AWR524 регистратор»; OWON\_Oscilloscope\_2.0.8.26; тепловизионная съемка ThermaCAM P65HS. Обработка результатов проводилась с использованием пакетов прикладных компьютерных программ приложения ThermaCAM Researcher и системы MATLAB, MATCAD, Microsoft Excel. Для металлографического исследования структуры применяли: оптические микроскопы Olympus GX-71, Neophot-21 с фотокамерой Genius

Vilecam. Химический анализ и механические испытания сварных соединений проводились по стандартным методикам на сертифицированном оборудовании. Исследования проводились с применением метода полного факторного эксперимента.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением современных методов исследований, оборудования и стандартных методик определения структуры, химического состава и свойств сварных соединений, сопоставлением полученных теоретических и экспериментальных результатов, в том числе с результатами других авторов, а также применением метода полного факторного эксперимента для проведения опытов и обработки результатов исследований.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика количественной оценки динамического воздействия струи активного защитного газа на каплю электродного металла при механизированной сварке плавящимся электродом. Установлено, что в условиях двухструйной газовой защиты сила динамического воздействия струи активного защитного газа соизмерима с основными силами, действующими на каплю электродного металла.
2. Метод прогнозирования содержания марганца как основного легирующего компонента для обеспечения отсутствия дефектов в металле шва при сварке плавящимся электродом в среде CO<sub>2</sub>. Установлена убывающая линейная зависимость содержания марганца в металле шва от скорости истечения защитного газа.
3. Базовая физическая модель динамического воздействия струи защитного газа на гидродинамические процессы в сварочной ванне в условиях двухструйной газовой защиты. Установлено, что скорость истечения защитного газа является дополнительным параметром управления движением металла в сварочной ванне и геометрией сварного шва.
4. Методика количественной оценки распределения температурных полей на поверхности изделия при автоматической сварке плавящимся электродом пластин в условиях двухструйной газовой защиты, позволяющая определить термический цикл и скорость охлаждения на поверхности свариваемых пластин с погрешностью не более 10 %.
5. Зависимости влияния расхода и скорости истечения активного защитного газа при сварке плавящимся электродом на химический состав, структуру и свойства металла сварных швов. Установлено, что параметры истечения защитного газа из сварочного сопла являются дополнительным инструментальным средством управления структурой и свойствами сварных соединений.

**Финансовая поддержка работы.** Грант Президента РФ на поддержку молодых российских ученых № МК-1850.2003.08 (2003-2004 гг.), Государственный контракт № 02.442.11.7109 (2005 г.), Грант DAAD и Министерства образования и науки РФ для научной стажировки в рамках программы «Михаил Ломоносов» (2006 г.), Грант Губернатора Кемеровской области для поддержки молодых ученых – кандидатов наук (2007 г.), договор № 12-248/08К с ТОО «KazVibroTech» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан, 2008 г.), грант АВЦП № 2.1.2/875 «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 гг.)» (2009–2010 гг.), грант АВЦП № 2.1.2/13557 «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 гг.)» (2011 г.), Грант РФФИ №13-08-98002\_p\_сибирь\_a (2013–2014 гг.).

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержание изложено на 224 страницах основного текста, включая 156 рисунков, 29 таблиц и 230 наименований библиографических ссылок.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен литературный обзор известных способов совершенствования процесса сварки плавящимся электродом в среде защитных газов и управления свойствами сварных соединений из сталей, склонных к закалке. Дана условная классификация известных подходов к решению проблемы повышения эксплуатационной надежности и управления свойствами сварных конструкций. На основе анализа литературных данных определены рациональные технологические рекомендации для получения стабильных качественных равнопрочных сварных соединений из сталей, склонных к закалке. Сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена определению взаимодействия струи активного защитного газа ( $\text{CO}_2$ ) с каплей электродного металла, описана методика расчета газодинамического воздействия струи защитного газа на каплю электродного металла при механизированной сварке плавящимся электродом. Предложена методика прогнозирования содержания марганца в металле шва при сварке плавящимся электродом в среде  $\text{CO}_2$  в зависимости от скорости истечения защитного газа и содержания марганца в электродной проволоке и основном металле.

Дуговая сварка в защитном газе основана на принципе оттеснения воздуха из зоны сварки потоком защитного газа. В настоящее время имеется много способов сварки в защитных газах, которые получили широкое распространение в нашей стране и за рубежом. Наиболее широкое распространение получили следующие способы подачи защитного газа (рис. 1): одноструйная защита, общая защита в камерах, двухслойная.



Рис. 1. Сварка в защитном газе: а) одноструйная газовая защита, б) двухструйная газовая защита

Защитные свойства газовой струи в основном зависят от свойств применяемого газа и газодинамических параметров его истечения из сопла сварочной горелки. Сварка плавящимся электродом в  $\text{CO}_2$  получила широкое применение за счет ряда преимуществ. Основным минусом способа является нестабильность переноса капель электродного металла в сварочную ванну, что приводит к повышенному разбрызгиванию электродного металла и увеличению диапазона получаемых свойств металла шва.

Разработанное в ЮТИ ТПУ двухструйное сварочное сопло обеспечивает лучшую газовую защиту, чем при одноструйном способе защиты области сварки (рис. 1, б). Двухструйная защита формирует две коаксиальные струи из одного газа и одной общей

камеры. В этом случае наблюдается явление прижимания внешним кольцевым газовым потоком отраженного от поверхности свариваемой детали газового фронта. Таким образом, формируется более устойчивый и максимально покрывающий поверхность свариваемого изделия поток защитного газа (рис. 2).

По результатам комплекса проведенных исследований разработан способ многослойной сварки легированных сталей с двухструйной газовой защитой зоны сварки без подогрева и последующей термообработки.

Разработанный способ сварки обеспечивает стойкость внутренней струи подаваемого газа, надежную защиту зоны сварки, снижает завихрение газа в околошовной зоне. Управление газодинамическим воздействием внутренней струей защитного газа на процессы в зоне сварки, жидкий металл капли электродного металла и сварочной ванны приводит к изменению процессов тепломассопереноса в зоне сварки и интенсивному перемешиванию расплавленного электродного металла с основным в сварочной ванне. Увеличивается скорость истечения газа ( $\text{CO}_2$ ) и сокращается время пребывания металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) в области высоких температур. Внешняя кольцевая струя блокирует завихрения газа у поверхности свариваемого изделия и обеспечивает надежную защиту зоны сварки от вредного влияния воздуха.

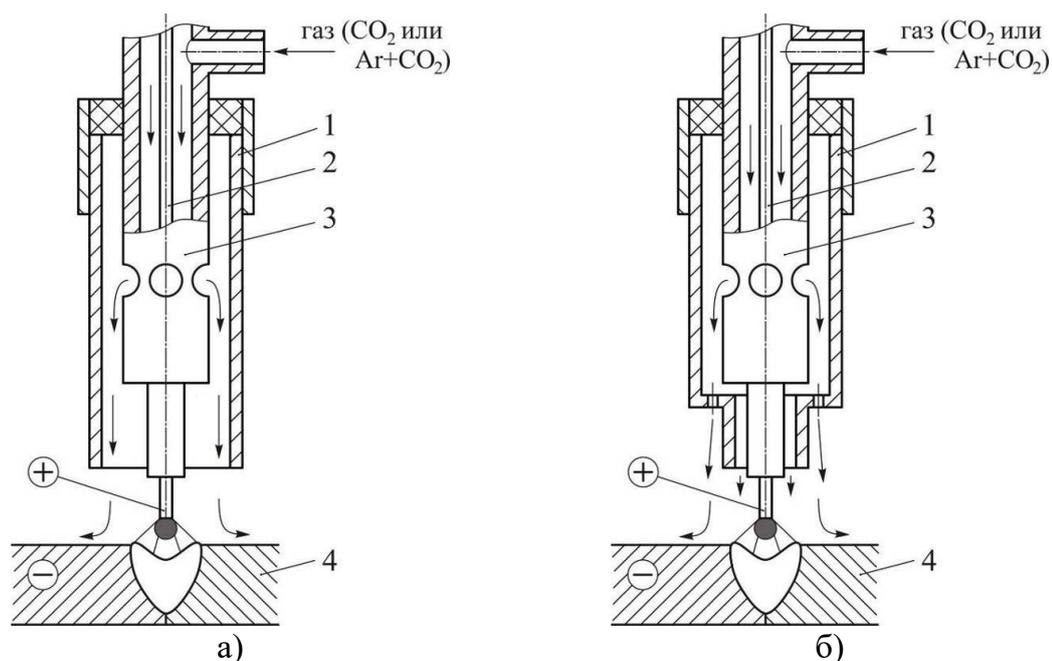


Рис. 2. Схема истечения защитного газа из сварочного сопла: а) традиционная одноструйная газовая защита; б) двухструйная газовая защита: 1 – сопло; 2 – электродная проволока; 3 – сварочная свеча; 4 – деталь

Результаты расчетов скорости истечения и давления газа ( $\text{CO}_2$ ) на срезе сопла при разном расходе газа представлены в табл. 1.

По результатам выполненных расчетов установлено, что при двухструйной газовой защите, по сравнению с одноструйной, на выходе из сопла возрастает скорость истечения газа в 3,5 раза и давление газа в 12 раз (расход газа одинаковый).

Скорость истечения и давление газа на срезе сопла

Способ	Площадь сечения S, мм <sup>2</sup>	Плотность газа $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Расход газа Q, л/мин	Скорость истечения V, м/с	Давление газа P, Па	Число Рейнольдса, Re
Одноструйный	286	1,97	10	0,58	0,33	33
			15	0,87	0,75	50
			20	1,16	1,34	66
Двухструйный	82		10	2,03	4,06	62
			15	3,03	9,07	92
			20	4,05	16,12	123

Для определения направления движения потоков защитного газа ( $\text{CO}_2$ ), оценки изменения его скорости и давления с удалением от среза сопла провели моделирование истечения газовых потоков из сварочного сопла при сварке плавящимся электродом с традиционной и двухструйной газовой защитой. Для моделирования использовали программный комплекс SolidWorks FlowSimulation, предназначенный для расчета задач газо- и гидродинамики. Результаты моделирования представлены на рис. 3, 4.

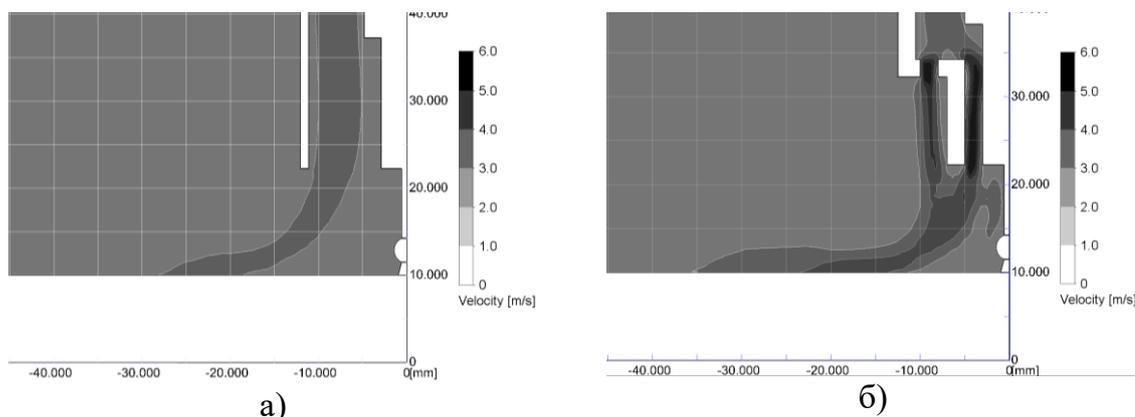
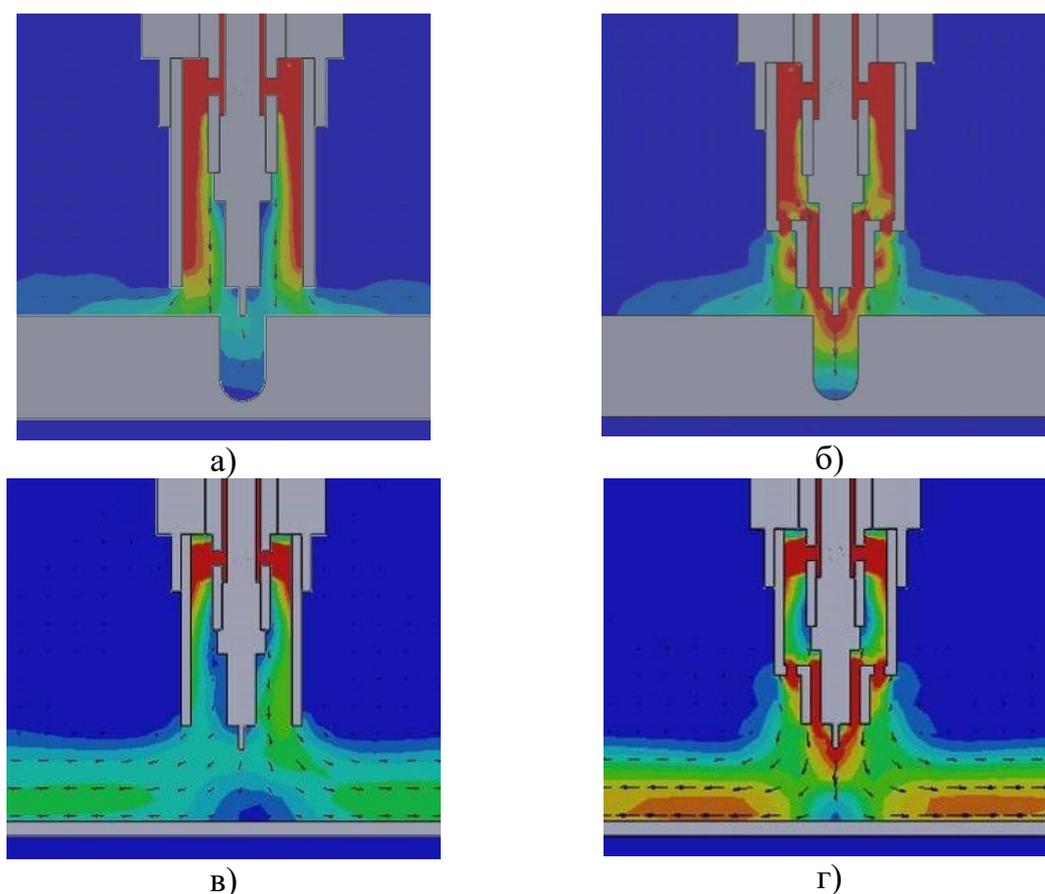


Рис. 3. Результаты моделирования скорости истечения защитного газа из сварочного сопла: а) традиционная одноструйная газовая защита; б) двухструйная газовая защита

Анализ результатов моделирования показал, что форма, скорость и давление потока газа при истечении из традиционного и двухструйного сопла сильно отличаются. Значительное изменение динамики защитного газа влечет за собой изменение процессов, протекающих в зоне сварки (перенос капель электродного металла, металлургические процессы в капле, гидродинамика сварочной ванны и т. д.), и, как следствие, изменение эксплуатационных свойств сварных соединений.

Управление динамикой защитного газа за счет изменения геометрии и формы сварочного сопла позволяет улучшить качество защиты зоны сварки и металла шва, особенно при сварке в узкую разделку (рис. 5).



*Рис. 4. Результаты моделирования изменения движения потоков защитного газа ( $\text{CO}_2$ ) при встрече с щелевой разделкой кромок: традиционная одноструйная газовая защита – а) поперек шва, в) вдоль шва; двухструйная газовая защита – б) поперек шва, г) вдоль шва*

Основная роль при формировании свойств сварных соединений отводится процессам, протекающим в капле расплавленного электродного металла и в сварочной ванне.

Перенос электродного металла зависит от различных факторов и явлений в зоне сварки. Известно, что при сварке в защитных газах с традиционной одноструйной защитой на каплю электродного металла действуют следующие основные силы (рис. 5): сила давления потоков плазмы дуги  $F_{пл}$ , сила поверхностного натяжения  $F_{пн}$ , реактивная сила испаряющегося металла и выделения газа  $F_p$ , сила тяжести  $F_T$ , электродинамическая сила  $F_{эд}$ . При сварке плавящимся электродом в струйной газовой защите на каплю электродного металла существенное влияние оказывает сила действия струи защитного газа. Значительное влияние этой силы отмечено при двухструйной газовой защите в  $\text{CO}_2$ .

Предложена методика определения силы действия струи защитного газа  $F_G$ . Сила направлена вдоль электрода к свариваемому изделию и способствует позиционированию капли вдоль оси электрода (рис. 6).

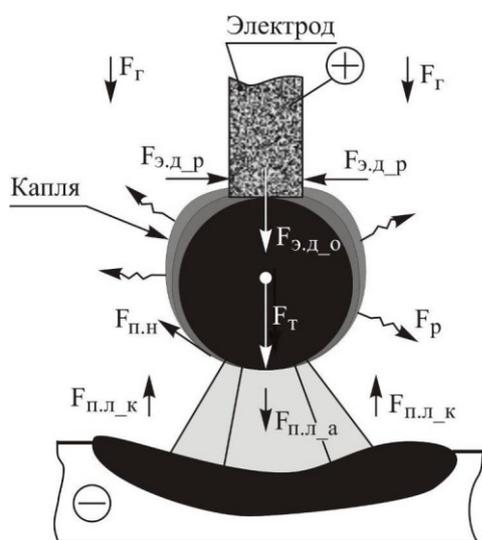


Рис. 5. Силы, действующие на каплю электродного металла:

$F_{п.л.а}$  – сила давления анодного потока плазмы дуги;  $F_{п.л.к}$  – сила давления катодного потока плазмы дуги;  $F_p$  – реактивная сила испаряющегося металла и выделения газа;  $F_{п.н}$  – сила поверхностного натяжения;  $F_{э.д.р}$  – радиальная составляющая электродинамической силы;  $F_{э.д.о}$  – осевая составляющая электродинамической силы;  $F_Г$  – сила тяжести;  $F_Г$  – сила действия струи защитного газа.

Площадь поверхности капли, на которую действует сила струи защитного газа, определяем по формуле расчета площади поверхности сферического пояса:

$$S_k = 2\pi r_k \sqrt{r_k^2 - r_э^2}, \quad (1)$$

где  $r_k$  – радиус капли, м;  $r_э$  – радиус сварочной проволоки, м.

Силу действия струи защитного газа на каплю электродного металла определяем по формуле:

$$F_Г = P c_x S_k = P c_x 2\pi r_k \sqrt{r_k^2 - r_э^2}, \quad (2)$$

где  $P$  – давление защитного газа на поверхность капли, Па;  $r_k$  – радиус капли, м;  $r_э$  – радиус сварочной проволоки, м;  $c_x$  – аэродинамический коэффициент сопротивления шара,  $c_x = 0,48$ .



а)



б)

Рис. 6. Кадры скоростной видеосъемки (скорость 750 кад/с, камера «Видеоспринт»): а) традиционная одноструйная газовая защита; б) двухструйная газовая защита

Результаты расчетов и теоретических исследований показали, что предложенная методика позволяет оценить силу действия струи активного защитного газа на каплю расплавленного электродного металла с учетом диссоциации. Установлено, что для выбранной (средней) температуры диссоциации 3000 °С сила действия струи защитного газа на каплю электродного металла при одноструйной защите составляет  $1,83 \cdot 10^{-4}$  Н, при двухструйной –  $22,05 \cdot 10^{-4}$  Н, т. е. в 22 раза больше, чем без учета диссоциации. При этом сила действия струи защитного газа на каплю электродного металла при двухструйной газовой защите также в 12 раз превышает силу воздействия одноструйной

газовой защиты. График изменения силы действия струи защитного газа от расхода газа представлен на рис. 7.

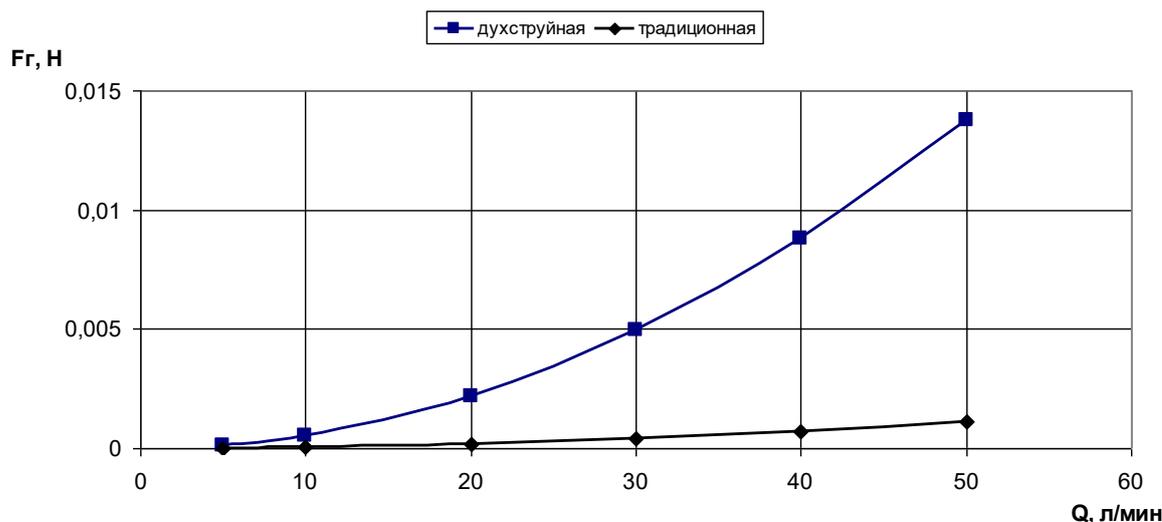


Рис. 7. График изменения силы действия струи защитного газа от расхода газа

Результаты расчетов сил, действующих на каплю за мгновение до ее перехода в сварочную ванну, показали, что сила действия струи защитного газа на каплю электродного металла при двухструйной газовой защите сопоставима с основными силами.

С увеличением давления струи защитного газа на каплю электродного металла при двухструйной газовой защите возрастает частота и стабильность перехода капель в сварочную ванну за счет придания капле соосного с электродом положения и уменьшения хаотичного колебания капли. Результаты анализа кадров скоростной видеосъемки экспериментальных исследований (рис. 8) показали, что время существования капли при сварке в  $\text{CO}_2$  проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм ( $I = 200$  А,  $U = 27$  В,  $Q = 20$  л/мин,  $l = 12$  мм) при одноструйной газовой защите изменяется в пределах  $t_k = 65-100 \cdot 10^{-3}$  с, совпадает с экспериментальными данными, полученными исследователями [11]  $t_k = 78 \cdot 10^{-3}$  с, а при двухструйной газовой защите изменяется в пределах  $t_k = 35-58 \cdot 10^{-3}$  с. Частота переноса капель при сварке с двухструйной газовой защитой (в среднем 30 капель в секунду) по сравнению с традиционной (в среднем 19 капель в секунду) возрастает в среднем в 1,6 раза, при этом наблюдается уменьшение размера капель в среднем с 2,4 до 2,0 мм.

Применение двухструйной газовой защиты приводит к увеличению силы действия струи активного защитного газа на каплю электродного металла и поверхность сварочной ванны. Изменяя газодинамическое воздействие (расход газа, скорость истечения из сварочного сопла), можно управлять переносом капель электродного металла, химическим составом металла шва, тепловыми и другими процессами сварки плавящимся электродом, формировать заданные свойства сварных соединений. В ходе проведения экспериментов отмечено, что процесс горения дуги в условиях двухструйной газовой защиты ( $\text{CO}_2$ ) протекает более стабильно.

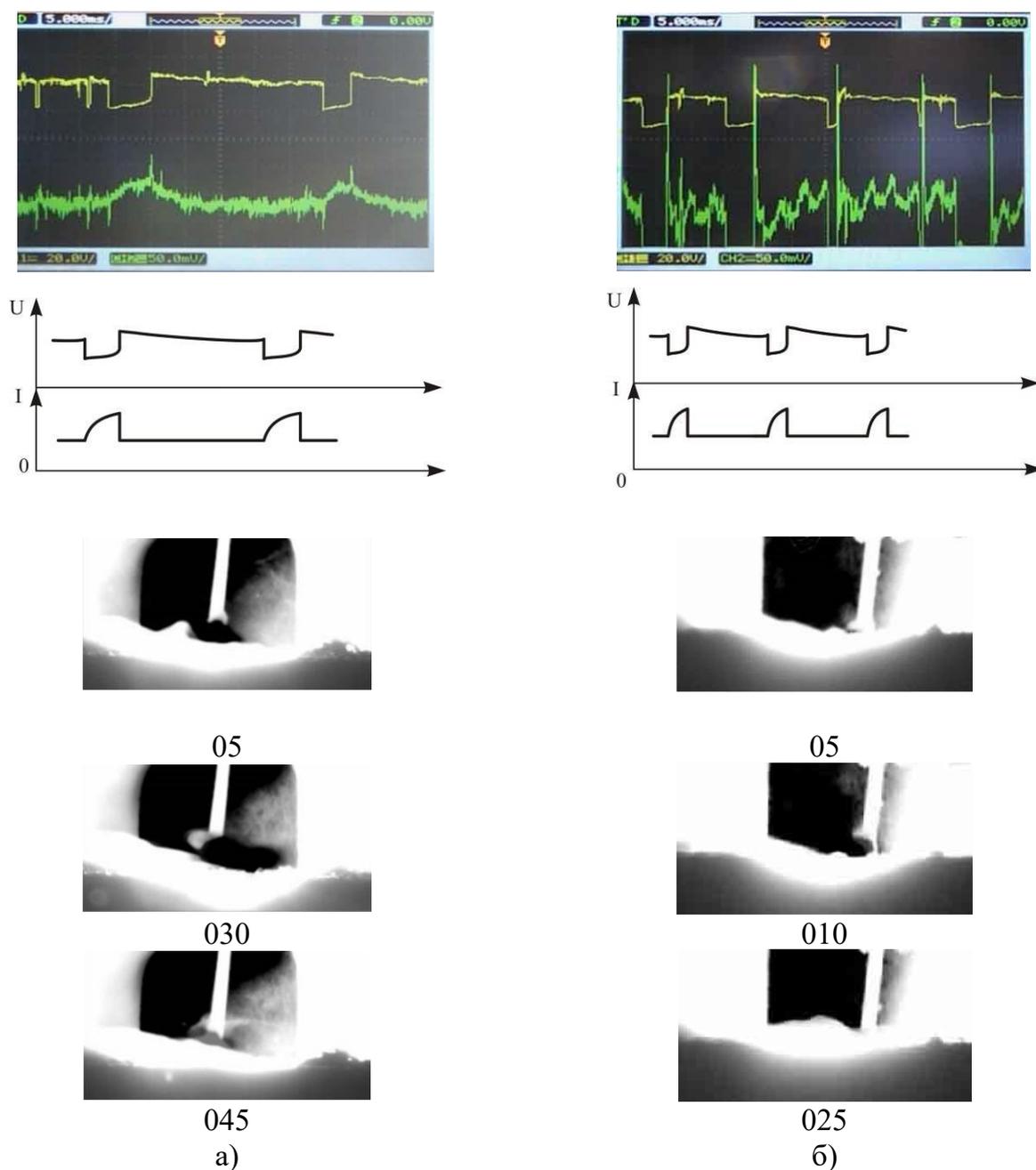


Рис. 8. Осциллограммы и кадры скоростной видеосъемки (скорость 750 кад/с, камера «Видеоспринт»): а) традиционная одноструйная газовая защита; б) двухструйная газовая защита

При сварке плавящимся электродом в  $\text{CO}_2$  происходит интенсивное выгорание и окисление элементов раскислителей, поэтому рекомендуется использовать сварочную проволоку с повышенным содержанием этих элементов (Al, Ti, Mn, Si и др.). Марганец является одним из основных элементов, т. к. обладает низкой раскислительной способностью и может усиливать действие других элементов, что приводит к изменению свойств металла шва.

Увеличение скорости истечения активного защитного газа при сварке плавящимся электродом приводит к увеличению стабильности процесса сварки, уменьшению размера капель, повышению суммарной активной поверхности капель, переносимых с электрода в сварочную ванну за единицу времени, и некоторому уменьшению количества марганца в наплавленном металле шва.

Расчет кинетических характеристик процесса окисления марганца позволяет определить его окислительную активность в данных условиях и количественно описать зависимость содержания марганца в капле. Расчет и прогнозирование количества Mn, перешедшего с электрода в сварной шов, является актуальной задачей, содержание марганца в значительной степени определяет структуру и свойства сварного шва.

Для получения эмпирической зависимости содержания марганца в наплавленном металле шва от скорости истечения защитного газа CO<sub>2</sub> провели экспериментальные исследования. На пластину из стали 45 выполняли механизированную однопроходную наплавку валика сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в CO<sub>2</sub> стационарной дугой с двухструйной газовой защитой. Режим сварки: сварочный ток I = 195...200 А, вылет электродной проволоки L = 12 мм, напряжение дуги U = 26...27 В, скорость сварки V = 20 см/мин. Расход защитного газа Q = 10, 20, 30 л/мин. Используемое оборудование: автоматическая сварочная установка MECOME WP1500, источник питания ВС-300 Б и подающий механизм ПДГО-528М.

Полученные в ходе эксперимента значения содержаний марганца в каплях (в процентах относительно его исходного содержания в проволоке) были аппроксимированы (рис. 9) :

$$\Delta C_{Mn} = 62,3 - K \cdot V_{Г} \quad (3)$$

где K = 1,97 %\*с/м; V<sub>Г</sub> – скорость истечения защитного газа, м/с.

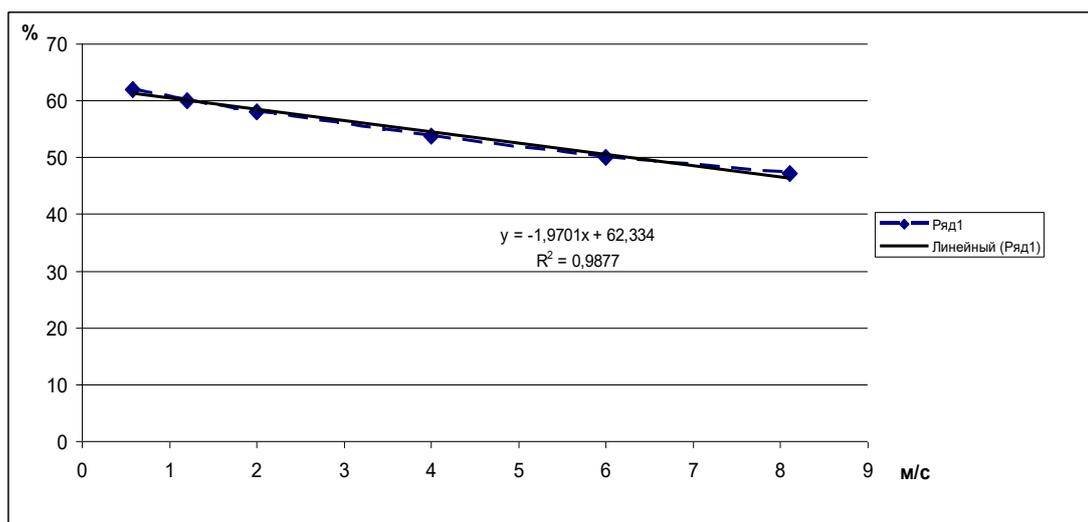


Рис. 9. График зависимости содержания марганца в капле (%) относительно его исходного содержания в проволоке от скорости истечения газа

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика прогнозирования содержания марганца в капле электродного металла при сварке плавящимся электродом в среде CO<sub>2</sub> в зависимости от скорости истечения защитного газа и содержания марганца в электродной проволоке. Прогнозируемое содержание Mn в капле (мас. доля, %):

$$Mn_k = \frac{Mn_{np} \cdot \Delta C_{Mn_k}}{100\%} \quad (4)$$

где Mn<sub>np</sub> – содержание марганца в электродной проволоке (мас. доля, %).

Для расчета и прогнозирования содержания марганца в металле шва при сварке плавящимся электродом в среде CO<sub>2</sub> конструкционных сталей в щелевую разделку разработана методика прогнозирования содержания марганца в металле сварного шва в

зависимости от скорости истечения защитного газа, содержания марганца в электродной проволоке и основном металле.

Таблица 2  
Результаты сравнения прогнозируемых и экспериментальных значений содержания Mn в металле шва

Основной материал + сварочная проволока	Скорость истечения газа, м/с	Прогноз Mn, %	Эксперимент Mn, %	Относительная ошибка, %
30ХГСА (Mn=0,96 %) + СВ-08Г2С (Mn=1,8 %)	0,58 од	1,27	1,29	1,6
30ХГСА (Mn=0,96 %) + СВ-08Г2С (Mn=1,8 %)	2,0 дв	1,23	1,26	2,3
30ХГСА (Mn=0,96 %) + СВ-08Г2С (Mn=1,8 %)	4,95 дв	1,14	1,2	5,0
GL-E36 (Mn=1,25 %) + Union K 52 (Mn=1,5 %)	0,5 од	1,11	1,2	7,5
GL-E36 (Mn=1,25 %) + Union K 52 (Mn=1,5 %)	2,1 дв	1,07	1,05	1,9
Сталь 45 (Mn=0,67 %) + СВ-08Г2С (Mn=1,8 %)	1,45 од	1,2	1,21	0,8
Сталь 45 (Mn=0,67 %) + СВ-08Г2С (Mn=1,8 %)	5,06 дв	1,1	1,11	0,9
Сталь 45 (Mn=0,67 %) + СВ-08ГСМТ (Mn=1,12 %)	1,45 од	0,748	0,796	6,0
Сталь 45 (Mn=0,67 %) + СВ-08ГСМТ (Mn=1,12 %)	5,06 дв	0,685	0,669	2,4
одноструйная (од), двухструйная (дв)				

Прогнозируемое содержание Mn в металле сварного шва (мас. доля, %):

$$Mn_{ш} = \frac{Mn_{пр} \cdot \Delta C_{Mn_{ш}}}{100\%} \quad (5)$$

где  $\Delta C_{Mn_{ш}}$  – содержание марганца в металле сварного шва (%) относительно его исходного содержания в проволоке с учетом скорости истечения защитного газа из сварочного сопла и содержания марганца в основном металле:

$$\Delta C_{Mn_{ш}} = 62,3 + Mn_{ОМ} * 10 - K * V_{Г} \quad (6)$$

где K = 1,55 – коэффициент, %\*с/м;  $Mn_{ОМ}$  – содержание Mn в основном металле (мас. доля, %),  $V_{Г}$  – скорость истечения защитного газа, м/с.

Для сравнения прогнозируемых значений по предлагаемой методике с экспериментальными данными возьмем результаты проведенных экспериментов на стали 45, 30ХГСА и GL-E36.

Пластины из основного материала сваривали механизированной многопроходной сваркой в щелевую разделку сварочной проволокой с содержанием Mn диаметром 1,2 мм в CO<sub>2</sub> стационарной дугой с одноструйной и двухструйной газовой защитой. Режим сварки: сварочный ток I = 195...200 А, вылет электродной проволоки L = 12 мм,

напряжение дуги  $U = 26...27$  В, скорость сварки  $V = 19...21$  см/мин. Расход защитного газа  $Q = 10...30$  л/мин (табл. 2).

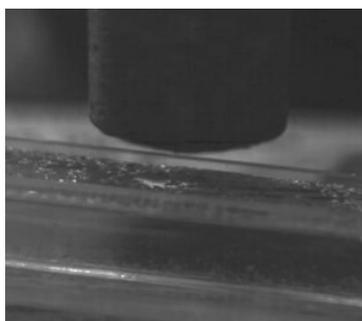
По результатам исследований установлено, что разработанная методика прогнозирования содержания марганца в металле сварного шва в зависимости от скорости истечения защитного газа, содержания марганца в электродной проволоке и основном металле позволяет выполнить расчет содержания марганца с относительной погрешностью не более 10 %.

**В третьей главе рассмотрено взаимодействие струи активного защитного газа ( $CO_2$ ) с поверхностью сварочной ванны, проведена оценка газодинамического влияния струи защитного газа на ее поверхность. Предложена модель газодинамического воздействия струи защитного газа на гидродинамические процессы в сварочной ванне при сварке плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой в среде  $CO_2$ . Описано влияние струи защитного газа на параметры сварочной ванны и геометрию сварного шва.**

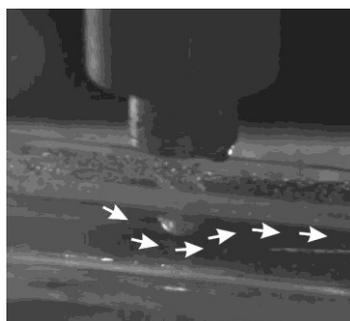
Изменение динамики струи защитного газа при сварке плавящимся электродом в  $CO_2$  приводит к изменению условий протекания процессов в дуговом промежутке, соответственно, изменяются процессы, протекающие в сварочной ванне (металлургические, гидродинамические, кристаллизационные).

Для оценки воздействия струи защитного газа на поверхность сварочной ванны были проведены исследования на физических моделях сварочных ванн с щелевой и V-образной разделкой. Расплавленный жидкий металл сварочной ванны моделировали с помощью глицерина (одинаковая вязкость). Для визуализации и удобства наблюдения за движением жидкости в глицерин добавили алюминиевую пудру. Эксперимент проводили при следующих условиях: расход газа  $Q = 40$  л/мин, скорость сварки  $V = 25$  см/мин, вылет проволоки  $L = 12$  мм (рис. 10).

Проведенный эксперимент показал, что при традиционной одноструйной газовой защите поверхность глицерина слегка подрагивала, а частички пудры в верхнем слое глицерина практически не двигались (рис. 10, а). При двухструйной газовой защите поверхность глицерина прогибалась, образуя углубление диаметром 4–5 мм, а частички пудры в верхнем слое глицерина двигались из передней части по дну углубления, огибая струю газа, в хвостовую часть имитируемой сварочной ванны (рис. 10, б). Таким образом, установлено значительное воздействие струи защитного газа на поверхность сварочной ванны и возможность управления гидродинамическими процессами сварочной ванны при сварке плавящимся электродом в условиях двухструйной газовой защиты.



а)



б)

*Рис. 10. Воздействие струи защитного газа на поверхность глицерина: а) традиционная одноструйная газовая защита; б) двухструйная газовая защита*

Для изучения движения поверхности металла сварочной ванны был проведен эксперимент на реальном объекте исследования с использованием одноструйной (традиционной) и двухструйной газовой защиты (рис. 11). Эксперимент проводился в одинаковых условиях на следующих режимах:  $I = 200$  А,  $U = 27$  В,  $L = 12$  мм,  $V_{св} = 26$  см/мин.

При одноструйной газовой защите наблюдается хаотичное движение металла (рис. 11, а). При движении металла от хвоста ванны к дуге видно, что металл практически достигает столба дуги. При двухструйной газовой защите движение металла более упорядоченное, металл при движении от хвоста ванны к дуге не достигает столба дуги, а при достижении внешней границы внутренней струи газа возвращается в хвостовую часть. Таким образом, уменьшается длина (амплитуда) движения расплавленного металла в сварочной ванне от хвоста ванны к дуге и обратно и увеличивается частота его возвратно-поступательного движения. Это приводит к более интенсивному перемешиванию металла в сварочной ванне, изменяется химический состав, геометрия и механические свойства сварного шва.

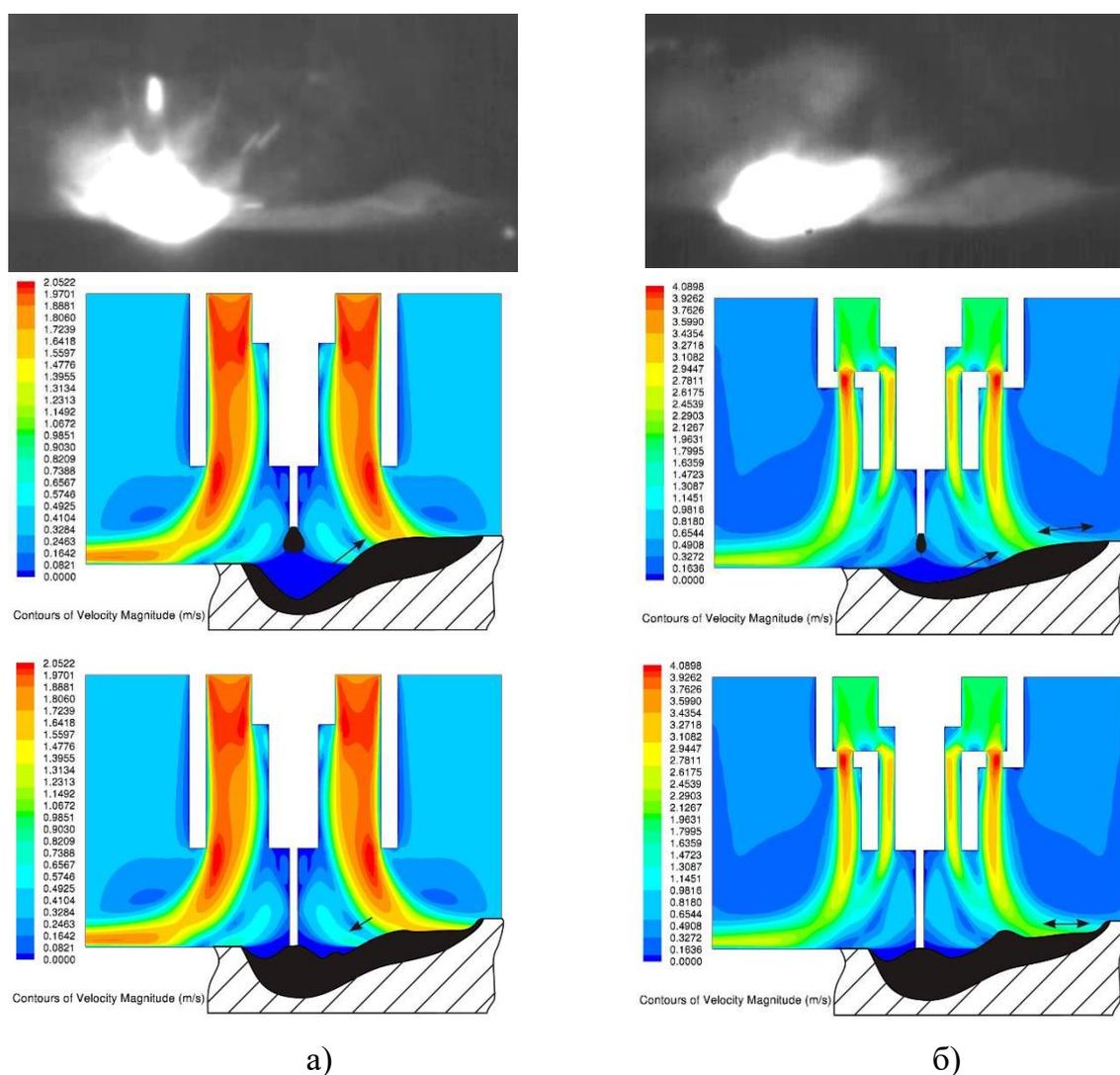


Рис. 11. Движение металла на поверхности сварочной ванны: а) одноструйная газовая защита, б) двухструйная газовая защита

Предложена модель газодинамического воздействия струи защитного газа на динамику сварочной ванны при сварке плавящимся электродом с двухструйной газовой

защитой в среде  $\text{CO}_2$ . Описана физическая природа взаимодействия струи газа с поверхностью сварочной ванны и причины изменения глубины проплавления.

В предложенной физической модели газодинамического воздействия струи защитного газа на динамику сварочной ванны нужно рассматривать и учитывать два аспекта (рис. 12). Во-первых, непосредственное воздействие струи активного защитного газа на жидкий металл ванны вокруг сварочной дуги, что подтверждается экспериментами на глицерине. Во-вторых, воздействие струи защитного газа на каплю электродного металла и сварочную дугу, что приводит к увеличению частоты переноса капель и уменьшению их размера. Это приводит к увеличению суммарной поверхностной активности капель и снижению времени нахождения капли в перегретом состоянии. Указанные факты влияют на гидродинамические и металлургические процессы в сварочной ванне, что оказывает непосредственное влияние на химический состав и структуру металла шва, а также на форму и структуру линии сплавления.

В первом случае защитный газ кольцом вокруг дуги давит на поверхность сварочной ванны. Объем сварочной ванны небольшой и ограничен твердым металлом. При сварке дуга расплавляет основной и присадочный металл, оттесняет расплавленный металл в хвостовую часть сварочной ванны (большую часть) и образует проплавление в основном металле (h). При этом под дугой всегда есть некоторое количество расплавленного металла – жидкая прослойка (b), через которую происходит передача тепла в твердый основной металл (рис. 12, а). Чем меньше жидкая прослойка, тем больше нагревается основной металл и больше глубина проплавления. При двухструйной газовой защите происходит увеличение действия газа на поверхность сварочной ванны. С увеличением действия газа вокруг дуги на поверхность ванны происходит увеличение жидкой прослойки под дугой, т. к. расплавленному металлу некуда деваться в ограниченном твердым металлом объеме, то он начинает подтекать под дугу и поднимать ее (рис. 12, б). Увеличение жидкой прослойки (b) приводит к уменьшению глубины проплавления (h).

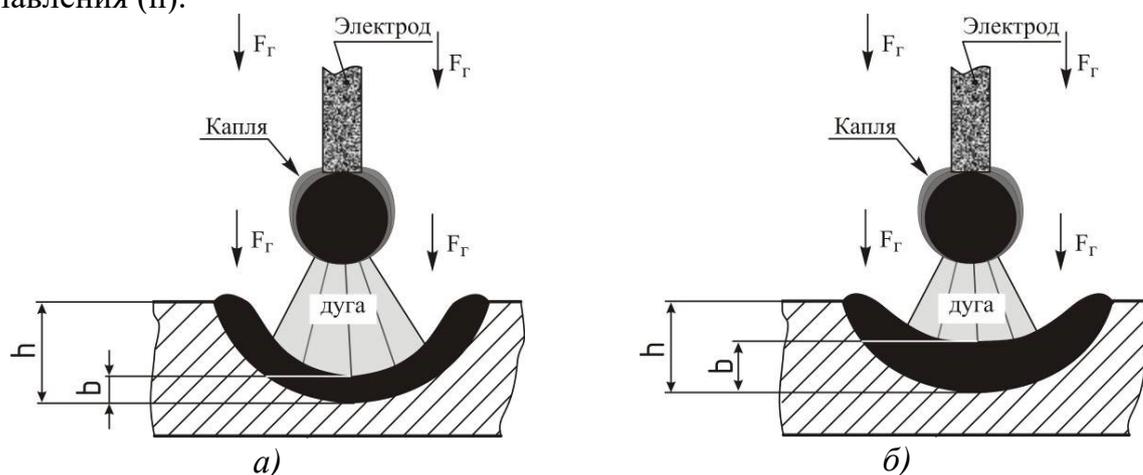


Рис. 12. Схема изменения глубины проплавления и величины жидкой прослойки под дугой в сварочной ванне: а) одноструйная газовая защита, б) двухструйная газовая защита

Во втором случае с увеличением действия струи защитного газа на каплю электродного металла при двухструйной газовой защите возрастает стабильность и частота перехода капель в сварочную ванну и уменьшается размер капель в среднем с 2,4 до 2,0 мм. Увеличение стабильности и частоты переноса капель приводит к сокращению времени между короткими замыканиями, т. е. уменьшается время нагрева изделия и

уменьшается глубина проплавления. Увеличивается повторяемость и прогнозируемость химсостава и свойств сварных швов.

Показано влияние струи защитного газа на геометрию сварного шва. Установлено, что динамическое воздействие струи защитного газа оказывает существенное влияние на формообразование и геометрию сварного шва при сварке плавящимся электродом в двухструйной газовой защите. С увеличением газодинамического воздействия (расход и скорость истечения газа) на поверхность сварочной ванны и процессы в зоне сварки происходит увеличение ширины шва, уменьшение глубины проплавления и незначительное изменение усиления шва. Газодинамическое управление формообразованием и геометрией сварного шва имеет большое практическое значение и дает возможность повысить эксплуатационную надежность сварной конструкции без дополнительных затрат.

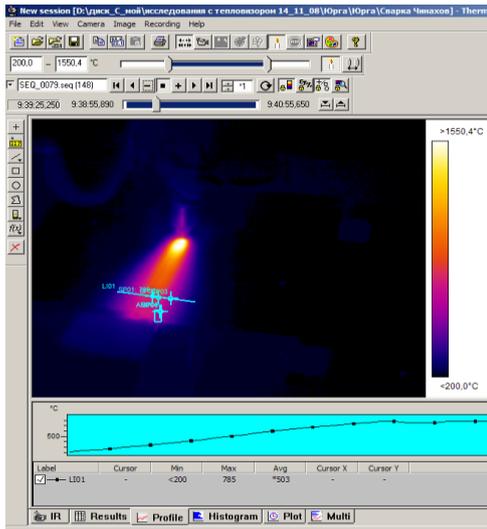
**Четвертая глава посвящена изучению газодинамического влияния струи защитного газа на распределение тепла в изделии при сварке плавящимся электродом в активном защитном газе. Описана уточненная методика расчета распределения тепла в пластине при автоматической сварке плавлением в среде  $\text{CO}_2$  за один проход при двухструйном истечении защитного газа.**

При сварке плавлением качество соединения во многом определяется условиями нагрева и охлаждения. Характер протекания тепловых процессов определяет производительность плавления основного металла и присадочного материала, направление и полноту протекания металлургических процессов в сварочной ванне, условия формирования структуры металла шва и зоны термического влияния, эксплуатационные свойства сварных соединений.

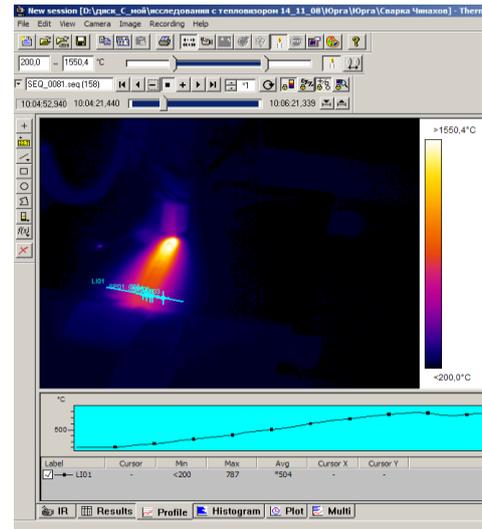
Управление термическим циклом в соединяемом материале является одной из основных задач современного сварочного производства. Теоретические и экспериментальные исследования явлений тепло- и массопереноса имеют большое практическое значение, наряду с изучением сложных физико-химических процессов и структурно-фазовых превращений, протекающих при сварке во время нагрева и охлаждения изделий. В теории сварочных процессов, описываемой отечественными и зарубежными исследователями, значительная роль отводится вопросам определения температурных полей и скоростей охлаждения, что важно при сварке сталей, склонных к закалке.

С целью исследования изменения термического цикла и скорости охлаждения сварных соединений из стали 30ХГСА от условий газовой защиты при сварке плавящимся электродом были проведены эксперименты с применением современной тепловизионной аппаратуры.

Сварку пластин  $300 \times 150$  мм толщиной 8 мм из стали 30ХГСА осуществляли в автоматическом режиме в  $\text{CO}_2$  электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Образцы заваривали по разработанному способу сварки (двухструйная газовая защита) и по традиционному способу сварки (одноструйная газовая защита) на следующих режимах: сварочный ток  $I_{\text{св}} = 190 \dots 195$  А, скорость сварки  $V = 27 \dots 28$  см/мин, расход защитного газа  $Q = 17$  л/мин, вылет электродной проволоки  $L = 12$  мм, напряжение дуги  $U_{\text{д}} = 26 \dots 27$  В. В качестве источника питания использовался сварочный выпрямитель ВСЖ-303.



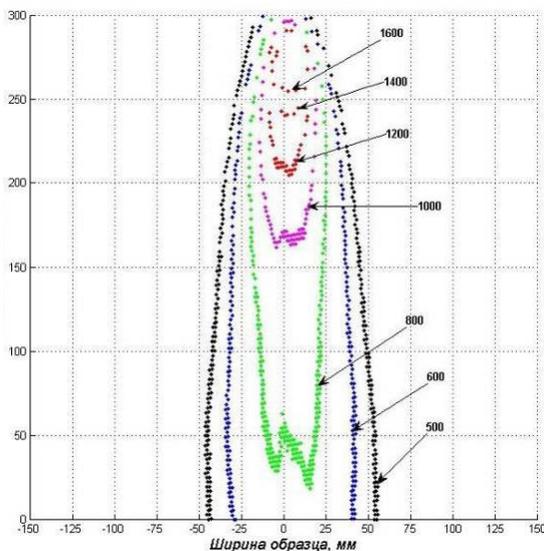
а)



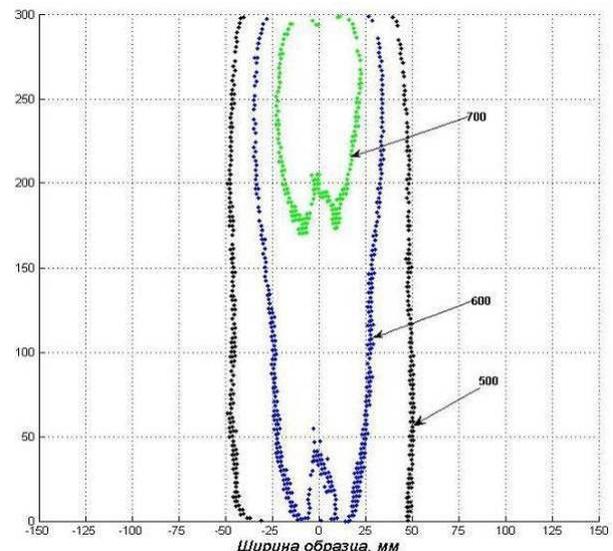
б)

Рис. 13. Термограммы процесса сварки: а) с двухструйной газовой защитой, б) с традиционной газовой защитой

Регистрацию полей осуществляли с помощью тепловизора ThermoCAM P65HS фирмы FLIR. Съемку проводили на протяжении времени сварки одного прохода (60 с) и в течение 60 с после окончания сварки с частотой 5 кад/с. В результате были получены изображения температурных полей (термограмм) нагрева ( $t=60$  с) и охлаждения свариваемого изделия ( $t=120$  с) (рис. 13, 14) и графики термических циклов (рис. 15).



а)



б)

Рис. 14. Температурные поля после обработки: а) сразу после сварки (нагрев)  $t=60$  с; б) через 60 с после сварки (охлаждение)  $t=120$  с

По результатам анализа термограмм установлено, что термические циклы металла шва и околошовной зоны сварных соединений неодинаковы, в диапазоне около  $770...790^{\circ}\text{C}$  происходит выравнивание температур и до этого более горячий металл шва становится менее горячим по сравнению с металлом околошовной зоной при любом способе газовой защиты. Скорость температурного насыщения в свариваемых пластинах при двухструйной газовой защите немного выше, и выравнивание температуры между металлом шва и околошовной зоной происходит на  $1...1,4$  секунды раньше, чем при

традиционной одноструйной защите. Нарастание температуры перед источником нагрева при традиционной одноструйной газовой защите происходит быстрее.

Используя полученные экспериментально термические циклы и значения температур для трех выбранных точек  $Y=0$  см,  $Y=0,5$  см,  $Y=1,4$  см от оси шва, определили скорости охлаждения (табл. 3). Для удобства анализа изменения скоростей охлаждения весь исследуемый температурный интервал был разбит на три группы с учетом температур структурно-фазовых превращений:

- 1) от 1600 до 1100 °С;
- 2) от 1100 до 740 °С;
- 3) от 740 до 500 °С.

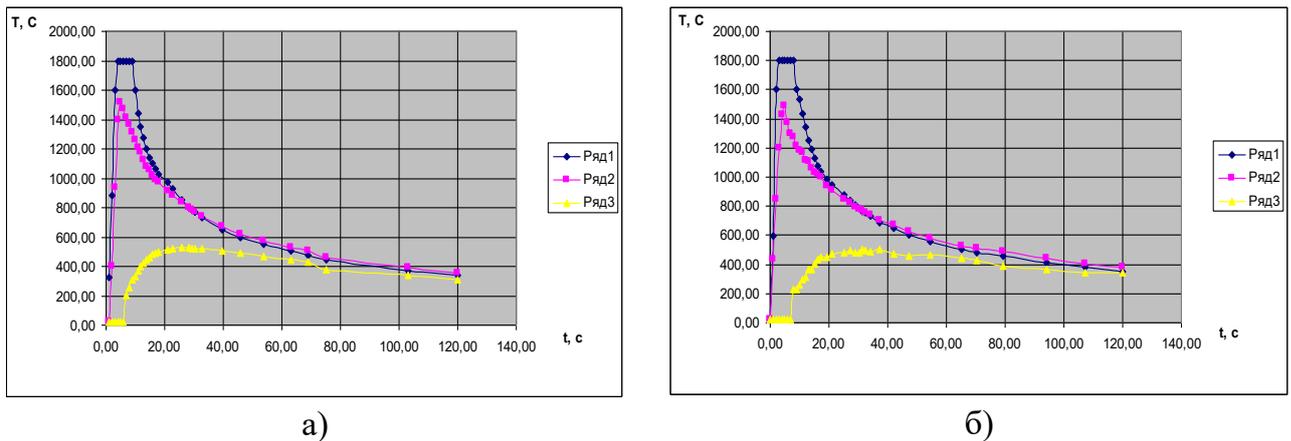


Рис. 15. Термические циклы в точках  $Y=0$  см (Ряд 1),  $Y=0,5$  см (Ряд 2),  $Y=1,4$  см (Ряд 3) от оси шва при сварке в  $CO_2$ : а) с двухструйной газовой защитой, б) с традиционной газовой защитой

Для каждой группы температур была определена линейная скорость охлаждения (°С/с) по формуле:

$$\omega = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{t_{\min} - t_{\max}}, \quad (7)$$

где  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  – значение максимальной и минимальной температуры в выбранной группе температурного интервала;  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  – время достижения максимальной и минимальной температуры в выбранной группе температурного интервала в заданной точке.

Таблица 3

Сравнение скоростей охлаждения  $\omega$  (°С/с) в точках  $Y=0$  см,  $Y=0,5$  см,  $Y=1,4$  см от оси шва при сварке в  $CO_2$  с двухструйной и традиционной (одноструйной) газовой защитой

Способ сварки	Температурный интервал, °С	Скорость охлаждения $\omega$ , °С/с		
		По оси шва	0,5 см от оси шва	1,4 см от оси шва
С двухструйной защитой	1600–1100	83,3	49,4	–
	1100–740	21,9	19,1	–
	740–500	7,5	7	2,5
С традиционной защитой	1600–1100	72,6	47,5	–
	1100–740	19,2	17,3	–
	740–500	7,3	6,2	2

На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований термических циклов при сварке плавлением в CO<sub>2</sub> разработана уточненная формула для расчета распространения тепла при автоматической сварке пластин за один проход в условиях двухструйной газовой защиты:

$$T(y,t) = \frac{q \cdot e^{-\frac{y^2}{4at}}}{v \delta c_p \sqrt{(4 + \theta^2) a (t + \frac{y}{v})}}, \quad (8)$$

где  $\theta$  – безразмерная величина, равная расстоянию от оси шва до выбранной точки (по оси Y, см).

Расчетные значения температур в указанных точках Y=0 см, Y=0,5 см, Y=1,4 см от оси шва представлены в табл. 4, графики расчетных термических циклов представлены на рис. 16. Относительная погрешность вычислений по разработанной уточненной формуле (8) при сравнении с экспериментальными данными не превышает 10 % для точек Y=0 см, Y=0,5 см. Расчетные значения температур в точке Y=1,4 см для соответствия экспериментальным значениям необходимо сместить по времени на 20 секунд.

Таблица 4

*Расчетные значения температур в точках Y=0 см, Y=0,5 см, Y=1,4 см от оси шва, определенные по разработанной формуле (8)*

Время, с	Температура, °С			
	По оси сварного шва	0,5 см от оси сварного шва	1,4 см от оси сварного шва	1,4 см от оси сварного шва со смещением на 20 секунд
1	3943	1212		
2	2788	1473	67	
4	1971	1395	263	
5	1763	1326	335	
15	1018	905	505	
25	789	726	477	335
35	667	623	440	505
55	532	504	379	440
75	455	434	337	379
95	405	387	306	337
115	368	353	282	306

Расчет скоростей охлаждения  $\omega$  (°С/с) был выполнен в выбранных точках по известной формуле (9), автором рекомендовано определять мгновенную скорость охлаждения только для оси шва ввиду их незначительного отличия от скоростей охлаждения околошовных зон и линейную скорость охлаждения (7) с использованием температур, определенных по разработанной уточненной формуле (8). Результаты вычислений представлены в табл. 5.

$$\omega = \frac{-2\pi\lambda(T - T_H)}{q/v}, \quad (9)$$

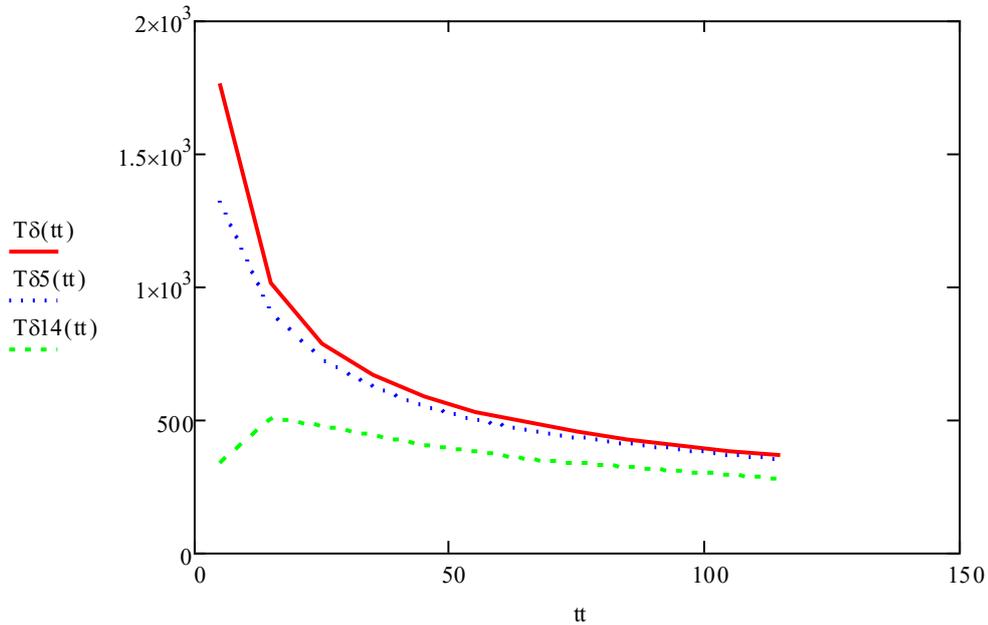


Рис. 16. Термические циклы в точках  $Y=0$  см,  $Y=0,5$  см,  $Y=1,4$  см, рассчитанные по формуле (8)

Таблица 5

Сравнение расчетных скоростей охлаждения  $\omega$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ )

Наименование	Температурный интервал, $^{\circ}\text{C}$	Скорость охлаждения $\omega$ , $^{\circ}\text{C}/\text{с}$		
		По оси шва	0,5 см от оси шва	1,4 см от оси шва
Формула (9)	1600–1100	70,4	–	–
	1100–740	36,5	–	–
	740–500	16,2	–	–
$\omega$ по (7) для температур, определенных по (8)	1600–1100	73,7	52,7	–
	1100–740	22,6	23,6	–
	740–500	7,0	7,3	2,8

Полученные в ходе исследования значения скоростей охлаждения сопоставимы с результатами, приведенными М.Х. Шоршоровым, который указывает оптимальный интервал скоростей охлаждения околошовной зоны при однопроходной сварке стали 30ХГСА, равный 1,6–8,0  $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

Установлено, что значения скоростей охлаждения, полученные по экспериментальным данным и рассчитанные по формуле (7) с использованием температур, определенных по разработанной уточненной формуле (8), совпадают с экспериментальным

данным других авторов. Разработанная уточненная формула для расчета распространения тепла при автоматической сварке пластин за один проход в условиях двухструйной газовой защиты позволяет определить термический цикл точки и скорость охлаждения на поверхности свариваемых пластин с погрешностью не более 10 %.

**В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований и закономерности изменения химического состава, структуры и свойств металла шва и зоны термического влияния сварных соединений при варьировании технологических приемов и параметров их получения, состава и скорости истечения защитного газа как одного из основных способов управления характеристиками тепломассопереноса и физическими условиями существования дугового разряда. Показана корреляционная взаимосвязь эксплуатационных свойств сварных соединений и химического состава металла шва с технологическими параметрами режима сварки плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой.**

Исследованы зависимости и основные закономерности формирования структуры и свойств металла шва и ЗТВ, определены условия сварки плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой, при которых обеспечивается стабильность получения высоких эксплуатационных свойств неразъемных соединений изделий ответственного назначения.

Установлено, что с увеличением расхода защитного газа ( $\text{CO}_2$ ) повышается временное сопротивление разрыву сварных образцов, снижается содержание марганца и кремния в металле сварного шва. Повышение напряжения дуги оказывает аналогичное действие. Увеличение тока сварки в выбранном диапазоне повышает временное сопротивление разрыву сварных образцов, содержание марганца в металле сварного шва. Увеличение вылета электродной проволоки  $L$  приводит к повышению содержания кремния в металле шва. Содержание углерода в металле шва мало зависит от управляемых параметров режима сварки.

Установлено, что разработанный способ сварки многослойных соединений из легированных сталей с щелевой разделкой в условиях двухструйной газовой защиты стационарной дугой обеспечивает уменьшение химической, прочностной и структурной неоднородности в соединениях, надежное качество и требуемые механические свойства сварных соединений, способствует измельчению структуры металла шва и формирует плавный переход от наплавленного металла к основному, что увеличивает эксплуатационную надежность и равнопрочность сварных соединений. Разработанный способ сварки легированных сталей в щелевую разделку можно широко использовать в машиностроении, судостроении, оборонной промышленности, для ремонта и строительства трубопроводов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены вопросы развития теоретических и технологических основ динамического воздействия струи активного защитного газа на процессы в зоне сварки плавящимся электродом. Приведены результаты исследования совершенствования процесса сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, путем динамического воздействия активного защитного газа на повышение стабильности тепломассопереноса, структуру и свойства неразъемных соединений.

По результатам исследований сделаны следующие основные выводы:

1. На основе комплексных исследований установлена возможность управления газодинамическим воздействием струи активного защитного газа процессами, протекающими в зоне сварки, и свойствами соединений при сварке в условиях двухструйной газовой защиты.

2. Установлено значимое влияние параметров газовой защиты на кинетику формирования неразъемных соединений при сварке плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой и их эксплуатационные свойства. На основе теоретических и экспериментальных исследований газодинамического воздействия на процессы, протекающие в зоне дугового разряда, при сварке плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой доказано, что управление динамикой потока защитного газа является перспективным направлением совершенствования технологий сварки плавлением.

3. Разработана методика расчета силы газодинамического воздействия струи активного защитного газа на каплю электродного металла при механизированной сварке плавящимся электродом. Установлено, что при двухструйной газовой защите, по сравнению с одноструйной, на выходе из сопла скорость истечения газа в 3,5 раза больше, а сила действия защитного газа на каплю больше в 12 раз (в заданных условиях). Применение двухструйной газовой защиты приводит к увеличению силы действия струи активного защитного газа на каплю электродного металла, которая способствует увеличению частоты и стабильности переноса капель. Время существования капли при сварке в  $\text{CO}_2$  проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм ( $I = 200$  А,  $U = 27$  В,  $Q = 20$  л/мин,  $L = 12$  мм) при одноструйной газовой защите изменяется в пределах  $65 \dots 100 \cdot 10^{-3}$  с, а при двухструйной газовой защите изменяется в пределах  $35 \dots 58 \cdot 10^{-3}$  с. Частота переноса капель при двухструйной защите по сравнению с традиционной возрастает в среднем в 1,6 раза, при этом наблюдается уменьшение размера капель в среднем с 2,4 до 2 мм, что способствует уменьшению перегрева капли и изделия в целом.

4. Предложена методика прогнозирования содержания марганца в капле электродного металла и металле шва при сварке плавящимся электродом в среде  $\text{CO}_2$  в зависимости от скорости истечения защитного газа, содержания марганца в электродной проволоке и основном металле. Установлена убывающая линейная зависимость содержания марганца в металле шва от скорости истечения защитного газа. Разработанная методика позволяет выполнить расчет содержания марганца в металле шва при сварке плавящимся электродом в среде  $\text{CO}_2$  конструкционных сталей в целевую разделку с погрешностью не более 10 %.

5. Экспериментально и теоретически доказано, что скорость истечения активного защитного газа оказывает существенное влияние на перенос капель электродного металла, газо- и гидродинамику процессов в зоне дугового разряда и сварочной ванне при сварке плавящимся электродом. Характер движения металла в сварочной ванне при двухструйной газовой защите значительно отличается от движения металла при

одноструйной защите, уменьшается амплитуда движения расплавленного металла в сварочной ванне от хвоста ванны к дуге и обратно, увеличивается частота его возвратно-поступательного движения. Это приводит к более интенсивному перемешиванию металла в сварочной ванне, изменяется химический состав, геометрия и механические свойства сварного шва. Предложена модель газодинамического воздействия струи защитного газа на динамику жидкого металла сварочной ванны при сварке плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой в среде  $\text{CO}_2$ . Описана физическая природа взаимодействия струи газа с поверхностью сварочной ванны и причины изменения глубины проплавления.

6. Разработана методика обработки экспериментальных данных распределения температурных полей, полученных с помощью тепловизионной аппаратуры под углом к поверхности изделия, отличной от нормали. Установлено, что термические циклы металла шва и околошовной зоны сварных соединений неодинаковы, в диапазоне около  $770...790\text{ }^\circ\text{C}$  происходит выравнивание температур и до этого более горячий металл шва становится менее горячим по сравнению с металлом околошовной зоной при любом способе газовой защиты. Скорость температурного насыщения в свариваемых пластинах при двухструйной газовой защите немного выше, и выравнивание температуры между металлом шва и околошовной зоной происходит в среднем на 1,4 секунды раньше, чем при традиционной одноструйной защите. Нарастание температуры перед источником нагрева при традиционной одноструйной газовой защите происходит быстрее. На основе анализа результатов экспериментальных и теоретических исследований термических циклов при сварке плавлением в  $\text{CO}_2$  разработана уточненная методика расчета распространения температурных полей на поверхности изделия при автоматической сварке плавящимся электродом пластин за один проход в условиях двухструйной газовой защиты, которая позволяет определить термический цикл точки и скорость охлаждения на поверхности свариваемых пластин с погрешностью не более 10 %.

7. Теоретически и экспериментально доказано, что управление параметрами струи защитного газа при сварке плавящимся электродом является дополнительным инструментарием управления стабильностью тепломассопереноса и характера протекания металлургических процессов в зоне дугового разряда, обеспечивающим стабильные эксплуатационные свойства сварных соединений. Установлено, что газодинамическое воздействие оказывает существенное влияние на формообразование и геометрию сварного шва при сварке плавящимся электродом в двухструйной газовой защите. С увеличением газодинамического воздействия (расход и скорость истечения газа) на поверхность сварочной ванны и процессы в зоне сварки происходит увеличение ширины шва, уменьшение глубины проплавления и незначительное изменение усиления шва. Газодинамическое управление формообразованием и геометрией сварного шва имеет большое прикладное значение и дает возможность повысить эксплуатационную надежность сварной конструкции без дополнительных затрат. Практическое применение созданного инструментария обеспечивает принципиально новые возможности формирования сварных соединений.

8. Экспериментально доказано положительное влияние параметров двухструйной газовой защиты при сварке плавящимся электродом на химический состав, микроструктуру и свойства сварных соединений из сталей, склонных к закалке. Установлено, что разработанный способ сварки плавящимся электродом многослойных соединений из легированных сталей с щелевой разделкой в условиях двухструйной газовой защиты стационарной дугой обеспечивает уменьшение химической, прочностной и структурной неоднородности в соединениях, надежное стабильное качество и

требуемые механические свойства сварных соединений, способствует измельчению структуры металла шва и формирует плавный переход от наплавленного металла к основному, что увеличивает эксплуатационную надежность и равнопрочность сварных соединений. Разработаны регрессионные зависимости эксплуатационных свойств сварных соединений и химического состава металла шва от технологических параметров режима сварки плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой. Относительная погрешность вычислений не превышает 10 %.

9. На основе результатов проведенных исследований сформулированы общие зависимости содержания марганца и кремния в металле шва от управляемых параметров режима сварки плавящимся электродом в активном газе. Разработаны рациональные технологические рекомендации для сварки легированных сталей с щелевой разделкой кромок, обеспечивающие надежное сплавление кромок с наименьшим тепловложением. Разработанный способ сварки легированных сталей в щелевую разделку можно широко использовать в машиностроении, судостроении, оборонной промышленности, для ремонта и строительства трубопроводов.

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 175 печатных работах, из них 22 в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, 19 в журналах, индексируемых базой данных Scopus, 3 монографии, 1 патент на изобретение, 4 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ, 124 статьи в сборниках и трудах российских, международных и зарубежных конференций.

Публикации в журналах рекомендованных ВАК:

1. Сараев Ю.Н. Способы повышения трещиностойкости сварных соединений легированных сталей типа 30ХГСА / Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов, О.И. Шпигунова // Технология машиностроения. – 2001. – № 1. – С. 35–39.
2. Чинахов Д.А. Сварка в щелевую разделку стали 30ХГСА без подогрева / Д.А. Чинахов, Ю.Н. Сараев // Сварочное производство. – 2002. – № 7. – С. 18–20.
3. Чинахов Д.А. Регрессионные модели механических свойств многослойных сварных соединений стали 30ХГСА / Д.А. Чинахов, Ю.Н. Сараев // Сварочное производство. – 2002. – № 5. – С. 3–5.
4. Сараев Ю.Н. Сварка в щелевую разделку стали 30ХГСА без подогрева / Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов // Технология машиностроения. – 2002. – № 5. – С. 21–23.
5. Чинахов Д.А. Сварка легированных сталей в щелевую разделку без термической обработки / Д.А. Чинахов, В.Т. Федько, Ю.Н. Сараев // Технология металлов. – 2005. – № 10. – С. 27–29.
6. Чинахов Д.А. Сварка многослойных соединений из стали 30ХГСА / Д.А. Чинахов // Технология металлов. – 2005. – № 11. – С. 31–36.
7. Чинахов Д.А. Исследование и разработка технологии сварки многослойных соединений из стали 30ХГСА, обеспечивающей гарантированное качество сварных соединений с минимальными ресурсо- и трудозатратами / Д.А. Чинахов // Современные наукоемкие технологии. – 2006. – № 3. – С. 73–75.
8. Сравнительный анализ способов дуговой сварки закаливающихся сталей в щелевую разделку / Д.А. Чинахов, В.Т. Федько, О.Г. Брунов, Ю.Н. Сараев // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 2. – С. 192–195.
9. Изменение микроструктуры и механических свойств многослойных соединений из стали 30ХГСА при сварке плавлением разными способами / Д.А. Чинахов, М.К. Скаков, А.В. Градобоев, Б.К. Увалиев, В.В. Шаров // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313, № 2. – С. 119–122.

10. Чинахов Д.А. Измерение температурных полей при сварке / Д.А. Чинахов, А.А. Давыдов // Фотоника. – 2009. – № 4. – С. 30–31.
11. Павлов Н.В. Сравнительный анализ расчетных значений распределения температур при сварке с экспериментальными / Н.В. Павлов, Д.А. Чинахов, Д.П. Ильященко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 3, № 12. – С. 433–438.
12. Чинахов Д.А. Методика обработки тепловизионных термограмм при сварке плавлением легированной стали 30ХГСА / Д.А. Чинахов, А.А. Давыдов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 3, № 12. – С. 439–446.
13. Павлов Н.В. Исследование экспериментального и теоретического распределения температурных полей при сварке плавлением / Н.В. Павлов, Д.А. Чинахов, А.В. Крюков // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 8. – С. 25–27.
14. Чинахов Д.А. Исследование термического цикла и скорости охлаждения сварных соединений из высокопрочной стали 30ХГСА / Д.А. Чинахов // Перспективные материалы. – 2011. – № 13. – С. 944–948.
15. Чинахов Д.А. Моделирование истечения газовых потоков из сопла при сварке плавящимся электродом с традиционной и двухструйной газовой защитой / Д.А. Чинахов, А.В. Воробьев, А.А. Томчик // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2011. – № 4 (53). – С. 83–87.
16. Ильященко Д.П. Сравнительный анализ распределения тепла в изделии при дуговой сварке плавлением / Д.П. Ильященко, Н.В. Павлов, Д.А. Чинахов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – № 3. – С. 35–37.
17. Чинахов Д.А. Влияние условий газовой защиты при сварке плавящимся электродом на распределение тепла в сварных соединениях из стали 30ХГСА / Д.А. Чинахов // Технология металлов. – 2012. – № 12. – С. 27–34.
18. Чинахов Д.А. Газодинамическое влияние двухструйной газовой защиты на химический состав и свойства сварных соединений из стали 30ХГСА / Д.А. Чинахов, А.А. Давыдов, А.А. Томчик // Технология металлов. – 2012. – № 5. – С. 19–23.
19. Чинахов Д.А. Газодинамическое влияние при сварке в условиях двухструйной газовой защиты на свойства и геометрию однопроходных сварных соединений из стали 30ХГСА / Д.А. Чинахов // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 29–34.
20. Чинахов Д.А. Газодинамическое влияние на микротвердость и геометрию шва при сварке в условиях двухструйной газовой защиты / Д.А. Чинахов // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2013. – № 2 (15). – С. 61–66.
21. Чинахов Д.А. Влияние активного защитного газа на распределение тепла в зоне сварки / Д.А. Чинахов, А.В. Воробьев, А.А. Томчик // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 1. – С. 23–26.
22. Чинахов Д.А. Влияние расхода активного защитного газа и сварочного тока на содержание марганца и кремния в металле сварного шва / Д.А. Чинахов // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 8. – С. 39–44.

Публикации в журналах, индексируемых базой данных Scopus и Web of Science:

1. Chinakhov D.A. Computer simulation of thermo-mechanical processes at fusion welding of alloyed steels/ D.A. Chinakhov, E.P. Agrenich // Materials Science Forum. – 2008. – V. 575–578. – P. 833–836.
2. Chinakhov D.A. Increasing Reliability of Welded Joints of Hydraulic Cylinders in Heading Machines/ D.A. Chinakhov// Journal of Iron and Steel Research International. – 2010. – V.17. – P. 4–7.
3. Chinakhov D.A. Study of thermal cycle and cooling rate of steel 30ХГСА single-pass weld joints / D.A. Chinakhov // Applied Mechanics and Materials. – 2011. – V. 52–54. – P. 442–447.
4. Simulation of active shielding gas impact on heat distribution in the weld zone of consumable electrode welding / D.A. Chinakhov, A.V. Vorobyov, A.A. Davydov, A.A. Tomchik // The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST2012, September 17–21, 2012 / Tomsk Polytechnic University. – Tomsk, 2012. – V. II. – P. 136–138.

5. Chinakhov D.A. Simulation of active shielding gas impact on heat distribution in the weld zone / D.A. Chinakhov, A.V. Vorobyov, A.A. Tomchik // *Materials Science Forum*. – 2013. – V. 762. – P. 717–721.
6. Chinakhov D.A. Calculation of Gas-dynamic Impact of the Active Shielding Gas on the Electrode Metal Drop in Gas Jet Shielded Welding / D.A. Chinakhov // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – V. 379. – P. 188–194.
7. Chinakhov D.A. Gas-dynamic Impact of a Shielding Gas Jet on the Drop Transfer When Welding with a Consumable Electrode / D.A. Chinakhov, A.V. Zuev, A.G. Filimonenko // *Advanced Materials Research*. – 2014. – V. 1040. – P. 850–853.
8. Chinakhov D.A. Simulation of Wind Influence on the Thermal Processes in Gas-Shielded Welding / D.A. Chinakhov, A.V. Vorobyev, Yu.M. Gotovshchik // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – V. 682. – P. 91–95.
9. Chinakhov D.A. Gas Dynamic Control of Properties of Welded Joints from High Strength Alloyed Steels / D.A. Chinakhov // *China Welding*. – 2014. – V. 23, № 3. – P. 27–31.
10. Influence of welding with two-jet gas shielding on the shaping of a welding joint / D.A. Chinakhov, E.D. Chinakhova, Y.M. Gotovschik, S.V. Grichin // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 125, 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012013
11. Chinakhov D.A. Study of gasdynamic effect upon the weld geometry when consumable electrode welding / D.A. Chinakhov, E.G. Grigorieva, E.I. Mayorova // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 127, 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012013
12. The influence of shielding gas flow rate on the transfer frequency of electrode metals drops / D.A. Chinakhov, E.G. Grigorieva, E.I. Mayorova, D.S. Kartsev // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 142, 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012005
13. Chinakhov D.A. Manganese content control in weld metal during MAG welding / D.A. Chinakhov, E.D. Chinakhova, A.S. Sapozhkov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 142, 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012026
14. Chinakhov D.A. Influence of the Gas Shielding Method upon the Properties of the Weld Joints / D.A. Chinakhov, A.S. Sapozhkov // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – V. 1783, 020026. DOI: 10.1063/1.4966319
15. Chinakhov D.A. Dynamic Action of the Shielding Gas Jet upon the Process of Consumable Electrode Welding / D.A. Chinakhov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 221. – 2017. – 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/221/1/012002
16. Influence of Gas Dynamic Processes on Chemical Composition of Hardfaced Layer When Restoring Machine Parts Manufactured From 40H Steel / D.A. Chinakhov, S.A. Solodsky, E.G. Grigorieva, E.I. Mayorova // *Materials Science Forum*. – 2017. – V. 906. – P. 142–146.
17. Comparative Analysis of Hygiene and Sanitary Characteristics of Consumable Electrode Gas-Shielded Welding / D.A. Chinakhov, N.V. Pavlov, A.V. Kryukov, D.P. Il'yaschenko // *Materials Science Forum*. – 2017. – V. 906. – P. 137–141. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.906.137
18. Chinakhov D.A. Influence of Gas Shielding Method in Welding with Consumable Electrode on Heat Distribution in a Welded Product / D.A. Chinakhov, E.G. Grigorieva, E.I. Mayorova // *Solid State Phenomena*. – 2017. – V. 265. – P. 463–469. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.463
19. Dependence of Manganese Content in the Weld Metal on the Velocity of Active Shielding Gas Flow / D.A. Chinakhov, E.G. Grigorieva, E.I. Mayorova, S.A. Solodsky, V.F. Torosjan // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – V. 253, 012034. DOI: 10.1088/1757-899X/253/1/012034

#### Дополнительные публикации

1. Исследование влияния потока защитного газа на геометрические параметры сварного шва / Д.А. Чинахов, Е.И. Майорова, Е.Г. Григорьева, Д.С. Карцев // *Тяжелое машиностроение*. – 2016. – № 9. – С. 10–13.
2. Чинахов Д.А. Газодинамическое управление свойствами сварных соединений из высокопрочных легированных сталей / Д.А. Чинахов // *Тяжелое машиностроение*. – 2017. – № 6. – С. 24–27.

## Монографии:

3. Чинахов Д.А. Влияние режимов сварки плавлением на структуру и свойства соединений из легированных сталей: моногр. / Д.А. Чинахов; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 114 с.
4. Чинахов Д.А. Роль газодинамического воздействия струи защитного газа на процессы сварки плавящимся электродом: моногр. / Д.А. Чинахов; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 151 с.
5. Потапьевский А.Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: моногр. / А.Г. Потапьевский, Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 208 с.

## Патенты и свидетельства ЭВМ:

1. Патента на изобретение № RU 2233211 С1 Российская Федерация, 7 В 23 К 9/173//В 23 К 103:04. Способ сварки: заявл. 27.05.2003: опубл. 27.07.2004 / Чинахов Д.А., Федько В.Т., Сараев Ю.Н. – 5 с.
2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003611840 от 06.08.2003г. Программа расчета и моделирования формы сварного шва / Д.А. Чинахов, А.С. Тепляков. Бюл. «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». 2003. № 4. – С. 59.
3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007612643 (РФ) Расчет режимов сварки по заданным геометрическим параметрам сварного шва / Д.А. Чинахов, Е.П. Агренич // Бюл. «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». – 2007.
4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007612644 (РФ). Автоматизированный расчет формы шва и распределения тепла в сварном соединении при сварке плавлением / Д.А. Чинахов, Е.П. Агренич // Бюл. «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». – 2007.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612255 «Моделирование тепловых полей при сварке» / Н.В. Павлов, А.В. Крюков, Д.А. Чинахов. Заявка № 2009616454, дата поступления 16 ноября 2009, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 25 марта 2010. – 2010.

*Научное издание*

**Чинахов Дмитрий Анатольевич**

**Развитие теоретических и технологических основ динамического  
воздействия струи активного защитного газа на процессы в зоне сварки  
плавающимся электродом**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук**

Подписано к печати \_\_\_\_\_2020. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать CANON. Усл. печ. л. 1,80. Уч.-изд. л. 1,63.

Заказ \_\_\_\_\_-20. Тираж 150 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ