

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Омский государственный университет  
им. Ф.М. Достоевского»  
(ФГБОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского»)

Пр. Мира, 55-А, г. Омск, 644077,  
Тел.: (3812) 67-01-04, факс: (3812) 22-36-41

E-mail: rector@omsu.ru

http://www.omsu.ru

ОКПО 02069007, ОГРН 1025500532947,  
ИНН/КПП 5501003925/550101001

29. 03. 2021 № Мех. 2021-1345

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Институт теоретической и прикладной  
механики им. С.А. Христиановича  
СО РАН

Ученому секретарю диссертационного  
совета Д 003035.02

Гапонову С.А.

630096, г. Новосибирск  
ул. Институтская, 4/1

Уважаемый Сергей Александрович!

Направляем в Ваш адрес отзыв официального оппонента Струнина Владимира Ивановича на диссертацию Д.А. Чинахова «Развитие теоретических и технологических основ динамического воздействия струи активного защитного газа на процессы в зоне сварки плавящимся электродом», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Приложение: Отзыв оппонента Струнина В.И. в 2 экз.

Проректор по научной работе

П.В. Прудников

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Чинахова Дмитрия Анатольевича

«Развитие теоретических и технологических основ динамического воздействия струи активного защитного газа на процессы в зоне сварки плавящимся электродом», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Представленная диссертационная работа Чинахова Д.А. посвящена изучению повышения эффективности и стабильности 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. Тема управления динамическим воздействием струи активного защитного газа на процессы в зоне сварки является актуальной и перспективной, совершенствование технологии сварки плавящимся электродом в защитных газах позволяет повысить эффективность и стабильность получаемых свойств сварных соединений.

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. По структуре и содержанию диссертации замечаний нет.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, показана степень разработанности темы, определены цель исследований и задачи, решение которых необходимо для ее достижения, сформулирована научная новизна и ценность работы, показана практическая значимость и связь с государственными программами и НИР, описаны методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе приведен литературный обзор известных способов совершенствования процесса сварки плавящимся электродом в среде защитных газов и управления свойствами сварных соединений. Дана условная классификация известных подходов к решению проблемы повышения эксплуатационной надежности и управления свойствами сварных конструкций.

Во второй главе определено взаимодействие 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.

В третьей главе рассмотрено взаимодействие струи активного защитного газа ( $\text{CO}_2$ ) 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  $\text{CO}_2$ . Описано влияние струи защитного газа на параметры сварочной ванны и геометрию сварного шва.

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.

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.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

К основным новым научным результатам работы можно отнести:

1. Сформулированы принципы управления газодинамическим воздействием струи активного защитного газа процессами, протекающими в зоне сварки, и свойствами соединений при сварке в условиях двухструйной газовой защиты.
2. Определено влияние параметров газовой защиты на кинетику формирования и эксплуатационные свойства неразъемных соединений при сварке плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой.
3. Теоретически и экспериментально доказано, что управление динамикой потока защитного газа является перспективным направлением совершенствования технологий сварки плавящимся электродом.
4. 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).
5. Показано, что 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. Частота переноса капель при двухструйной защите по сравнению с традиционной возрастает в среднем в 1,6 раза, при этом наблюдается уменьшение размера капель и повышение качества неразъемного соединения.

6. 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 щелевую разделку с погрешностью не более 10 %.

7. Теоретически и экспериментально установлены закономерности влияния скорости истечения активного защитного газа на газо- и гидродинамику процессов в зоне дугового разряда и сварочной ванне при сварке плавящимся электродом.

8. 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.

9. Разработана методика обработки экспериментальных данных распределения температурных полей, полученных с помощью тепловизионной аппаратуры под углом к поверхности изделия, отличной от нормали.

10. Разработана 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 %.

11. 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 стабильное структурно-фазовое состояние шва и стабильные механические свойства неразъемных соединений.

12. Экспериментально доказано положительное влияние двухструйной газовой защиты на химический состав, микроструктуру и свойства сварных соединений из склонных к закалке сталей. 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 и структурной неоднородности, измельчение структуры металла шва, плавный

переход от наплавленного металла к основному, эксплуатационную надежность и равнопрочность сварных соединений.

13. Сформулированы общие зависимости содержания марганца и кремния в металле шва от управляемых параметров режима сварки плавящимся электродом в активном защитном газе.

14. 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 перспективен для применения в машиностроении, судостроении, оборонной промышленности, для ремонта и строительства трубопроводов.

Значимость работы для науки и практики заключается в развитии теории влияния динамики истечения активного защитного газа на газо- и гидродинамику процессов в зоне дугового разряда и сварочной ванне при сварке плавящимся электродом. 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. Установлена корреляционная взаимосвязь эксплуатационных свойств сварных соединений и химического состава металла шва с технологическими параметрами режима сварки плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой.

Практическая значимость работы подтверждается актами внедрения разработки способа сварки плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой на предприятиях ОАО «Сургутнефтегаз» и ОАО «Металлургмонтаж».

Достоверность основных положений, выносимых на защиту, результатов и выводов работы подтверждается представительным объемом экспериментальных данных, высокой степенью воспроизводимости результатов экспериментов, использованием статистических методов обработки экспериментальных данных, а также эффективностью предложенных технических решений, подтвержденной результатами лабораторных испытаний и внедрением в производство.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию, отражает актуальность работы, ее цель и задачи, научную новизну, практическую значимость, обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов.

Результаты научных исследований, представленных в диссертации опубликованы 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. Работа прошла апробацию на международных и всероссийских конференциях.

Диссертационная работа Чинахова Дмитрия Анатольевича отличается большим количеством используемых и разработанных методов измерений и оценки характеристик исследуемых систем и процессов:

- методика прогнозирования содержания марганца;
- методика определения воздействия струи защитного газа на поверхность сварочной ванны;
- методика исследования температурных полей при сварке.

Следует отметить большой объем результатов исследований процессов, сопровождающих двухструйную газовую защиту, их весьма представительного методического обеспечения и убедительное обоснование эффективности предложенного направления развития сварочных технологий.

#### Замечания по работе

1. В параграфе 2.1 приводится схема течения защитного газа, поясняющая преимущества двухструйного способа защиты области сварки от атмосферы внешней среды и динамических воздействий на каплю расплава электрода. На основании приведенной в работе схемы потоков защитного газа (см. рис.2.3) и расчетных формул определения скорости потоков газа (2.1, 2.2) для одноструйного и двухструйного истечения защитного газа производится оценка скорости истечения газа для определения числа Рейнольдса, определяющего ламинарность потока защитного газа, определяющего условия «защищенности» дугового-капельного объема взаимодействия электрода с поверхностью и динамики формирования капель электродного металла в окрестности формирования «лунки».

Скорости истечения газа определяются в том числе перепадом давления – это означает, что скорости истечения защитного газа «внутренней» и «внешней» струй должны различаться, отсюда определяются и условия перехода в турбулентный режим течения. Очевидно, что скорости истечения газа будут определяться соотношением эффективных площадей сечений сопел двух уровней формирования потока, соответственно необходимо определить скорости истечения потоков по двум системам сопел и оценить критерий турбулентности между ними как уровень оценки защиты локации дуги. Хорошо бы оценить как влияет разница в отношениях площадей сопел дистанций двух уровней на скорости истечения газа и на параметры потоков.

2. В части объяснения динамики формирования капли расплава электрода наличие «резкого расширения газа в момент диссоциации можно рассматривать как взрыв» с использованием соотношения 2.14 (см. стр.56) не является корректным без приведения условий применения ограничений физической модели процессов диссоциации защитного газа  $\text{CO}_2$ , а именно:



- «температура взрыва» (2.14) не может определяться как температура диссоциации, так как энергия связи углерода в молекуле углекислого газа составляет порядка 5 эВ, что в термодинамическом эквиваленте равно 58 000 К,

- формула 2.14 не может быть применима для описания процессов увеличения давления, так как взрыв происходит с увеличением температуры в следствие цепной реакции окисления (как пример), диссоциация же как процесс разделения составных частиц (молекул) протекает при поглощении внешней энергии,

- правильнее было бы оценить «Р взр» как эквивалент реальному давлению в составе двуокиси углерода по степени диссоциации  $\text{CO}_2$  на основе расчета термодинамического равновесного состояния смеси газов и его состава,

- степень диссоциации  $\text{CO}_2$  при температуре 3000 градусов не может быть равна 100%, потому значения  $m=2$  требует уточнения.

Сделанные замечания не ставят под сомнение общую положительную оценку работы и не опровергают ее основные результаты.

Диссертация Чинахова Дмитрия Анатольевича «Развитие теоретических и технологических основ динамического воздействия струи активного защитного газа на процессы в зоне сварки плавящимся электродом» представляет собой законченную научно-квалификационную работу в которой изложены новые научно обоснованные технические решения, позволяющие с помощью усиления динамического воздействия активного защитного газа на кинетику плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну обеспечивать стабильность тепломассопереноса, структуру и свойства неразъемных соединений, что соответствует п. II.9 «Положения о присуждения ученых степеней».

По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы п.15 «Тепломассоперенос в газах и жидкостях» и п.17. «Экспериментальные методы исследования динамических процессов в жидкостях и газах», а ее автор Чинахов Дмитрий Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент,  
д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой  
Экспериментальной физики и радиофизики  
Омский государственный университет  
им. Ф.М. Достоевского

ДВИЧ

**Служебный адрес:**

644077, пр. Мира, 55а, г. Омск, Омский государственный университет им.

Ф.М.Достоевского

Тел: 8-913-971-44-24,

E-mail: strunin@omsu.ru

*Я, Струнин Владимир Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.*

Струнин Владимир Иванович

Подпись Ст

яю.

Ученый сек

Рогалева Ольга Сергеевна

29.03.2021



Председателю  
диссертационного совета  
Д 003035.02  
академику В.М. Фомину

## ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Я, **Струнин Владимир Иванович**, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Чинахова Дмитрия Анатольевича на тему: Развитие теоретических и технологических основ динамического воздействия струи активного защитного газа на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Доктор физико-математических наук. Диплом ДДН №001638 от 24 ноября 2006 года.  
№45д/1

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

Профессор. Аттестат ПР №002861 от 17 октября 2007 года 32151/328-п

Тел: 8-913-971-44-24,

E-mail: [strunin@omsu.ru](mailto:strunin@omsu.ru)

Д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой Экспериментальной физики и радиофизики, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского.

644077, пр. Мира, 55а, г. Омск, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

Тел.: +7 (3812) 67-01-04 (приемная ректора)

Факс: +7 (3812) 22-36-41 (факс)

E-mail: [rector@omsu.ru](mailto:rector@omsu.ru)

<https://omsu.ru/>

По теме рассматриваемой диссертации имею 19 научных работ, в том числе 5 в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (список прилагается).

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

доктор ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой  
Экспериментальной ф  
Омский государственн  
им. Ф.М. Достоевского

Струнин Владимир Иванович

Подпись Струнина Вла

Проректор по научной

Фомников Павел Владимирович

Список основных публикаций Струнина Владимира Ивановича, оппонента

по теме диссертации Чинахова Дмитрия Анатольевича на тему: «Развитие теоретических и технологических основ динамического воздействия струи активного защитного газа»  
в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет,

1. Baranova L.V., Strunin V.I., Khudaibergenov G.Z. Supersonic plasma outflow in a plasmochemical method of amorphous silicon thin films formation. Journal of Physics: Conference Series. 2018. С. 012008.
2. Ляхов А.А., Струнин В.И. Коэффициенты переноса электронов в слабоионизованной плазме с пылевыми частицами Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т. 61. № 5 (725). С. 109-114.
3. Ляхов А.А., Струнин В.И. Численный анализ кинетики химических реакций в аргон-силановой плазме тлеющего разряда Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 50. С. 79-89.
4. Strunin V.I., Baranova L.V., Khudaibergenov G.Zh. Study on influence of metastable state of helium on atomic silicon concentration. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2016. 2016. С. 7819088.
5. Струнин В.И., Баранова Л.В. Влияние температуры подложки на оптические свойства тонких пленок аморфного гидрогенизированного кремния, полученных струйным плазмохимическим методом. Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т. 18. № 3. С. 428-438.

доктор ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой  
Экспериментальной физики и радиофизики  
Омский государственный университет  
им. Ф.М. Достоевского

Владимир Иванович

дата

Подпись Струнина  
Проректор по научной работе

Прудников Павел Владимирович