

На правах рукописи

УДК 621.791

Линник Антон Александрович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ
МОДИФИЦИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА ШВА НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК
ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре технологий сварки и диагностики
МГТУ имени. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук
КОБЕРНИК Николай Владимирович

МГТУ имени. Н.Э. Баумана, доцент

Официальные оппоненты: доктор технических наук
ДОРОНИН Юрий Викторович
ООО «АЦГХ», начальник лаборатории сварки

кандидат технических наук, доцент
ТЕРЕНТЬЕВ Егор Валериевич
НИУ «МЭИ», кафедра технологий металлов,
доцент

Ведущая организация: **Донской государственный технический
университет (Ростов-на-Дону)**

Защита состоится «21» декабря 2017 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Коновалов А.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время большой объем сварных конструкций, изготавливают из низколегированных, низкоуглеродистых сталей. К таким конструкциям также относятся конструкции, входящие в перечень опасных производственных объектов, к ним предъявляются жесткие требования к качеству сварных соединений, одним из которых является ударная вязкость металла шва и околосшовной зоны при отрицательных температурах, а также увеличение стабильности этих характеристик для сварного соединения.

Традиционными способами решения этой проблемы является применение легирования металла шва через сварочные материалы, а также различные технологические меры, направленные на уменьшение перегрева околосшовной зоны. Одним из современных перспективных способов управления механическими свойствами металла шва является модифицирование металла шва тугоплавкими частицами наноразмерного диапазона, выступающими в расплаве в роли центров кристаллизации. При этом стоит отметить, что количество вводимых элементов составляет сотые доли процентов от массы расплава.

Перспективность этого способа подтверждается большим количеством научных трудов в области литья, сварки и наплавки. Авторы этих работ отмечают измельчение структуры наплавленного металла функциональных покрытий, увеличение пластических свойств металла шва, на фоне измельчения его структуры. Однако работы в данном направлении носят поисковый характер и в своем большинстве не раскрывают механизм воздействия наноразмерных частиц на структуру и эксплуатационные свойства металла шва и наплавленного металла. В некоторых работах отмечается чувствительность наноразмерных частиц к температурному воздействию. При этом, в основном их вводят в составе электродных материалов, что приводит к существенному перегреву частиц. Для ограничения перегрева наноразмерных частиц при их введении в сварочную ванну, наиболее целесообразно вводить их в составе присадочного материала. Одним из перспективных материалов в данном случае является порошковая проволока, в состав шихты которой входят наноразмерные частицы. При этом появляется возможность подавать наноразмерные частицы в низкотемпературную область сварочной ванны.

Исходя из вышеизложенного, создание сварочного материала в виде присадочной порошковой проволоки, содержащей в своем составе тугоплавкие наноразмерные частицы, является актуальной задачей.

Актуальность выбранной темы диссертационного исследования подтверждается его выполнением в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014 – 2020 годы» по теме «Разработка принципов модифицирования металла шва сварных соединений низкоуглеродистых низколегированных сталей за счет применения наноразмерных частиц» (Соглашение № 14.548.21.0216 от 28.09.2016 г., уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57816X0216).

Цель работы – повышение ударной вязкости металла шва сварных соединений из низкоуглеродистых низколегированных сталей за счет применения порошковых проволок, содержащих наноразмерные тугоплавкие частицы.

Задачи исследования:

1. На основе литературного анализа определить составы тугоплавких соединений, опробованных в качестве модификаторов для дуговых и лучевых процессов сварки и наплавки.

2. На основе термодинамического расчета взаимодействия тугоплавких соединений в условиях сварочной ванны данных определить перспективный способ введения наноразмерных модификаторов в сварочную ванну.

3. Разработать состав присадочной проволоки, содержащей наноразмерные тугоплавкие модификаторы и обеспечивающей их транспортировку в хвостовую часть сварочной ванны.

4. Исследовать влияние наноразмерных частиц, вводимых в хвостовую часть сварочной ванны на структуру металла шва при реализации различных схем процесса дуговой сварки под флюсом.

5. Провести экспериментальные исследования, влияния наноразмерных частиц, введенных в сварочную ванну посредством порошковой проволоки, на ударную вязкость металла шва.

6. Разработать технологические рекомендации по использованию наноразмерных частиц в качестве модификаторов при дуговой сварке под флюсом.

Методы исследования: результаты работы получены путем теоретических и экспериментальных исследований. Эксперименты по сварке под флюсом с дополнительной горячей присадкой проводили на модернизированном подвесном автомате для сварки под флюсом. Металлографический анализ структуры сварных швов проводили с использованием оптического микроскопа Биомед MMP-2, Zeiss Axiovert 200. Испытания металла шва на ударную вязкость по Шарпи (с V-образным надрезом) при температуре -20⁰С проводили в соответствии с ГОСТ 6996, с использованием маятникового копра ИО 5003-0,3-1. Фрактограммы изломов и химический состав металла шва исследовали с помощью электронных микроскопов VEGA TESCAN II и Gelios. Термодинамический расчет возможных реакций тугоплавких соединений с элементами сварочной ванны проводили с использованием программного комплекса моделирования фазовых и химических равновесий «Terra». Обработку полученных данных проводили с использованием стандартных программ пакета Office и Mathcad.

Ценность выполненных исследований: показана перспективность применения наноразмерных частиц карбида вольфрама, нитрида титана и оксида алюминия для модификации металла шва при автоматической сварке под флюсом с применением порошковых проволок с целью повышения ударной вязкости. Даны практические рекомендации по применению порошковых проволок содержащих наноразмерные частицы.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что при введении наноразмерных частиц нитрида титана и оксида алюминия в хвостовую часть сварочной ванны в металле шва образуются

микропоры, в связи с диссоциацией вводимых частиц под действием температуры сварочной ванны;

2. Установлено, что наноразмерные частицы карбида вольфрама сохраняют свою стабильность при введении их в хвостовую часть сварочной ванны и приводят к незначительному увеличению среднего значения ударной вязкости металла шва (около 10%), но при этом происходит существенное снижение разброса ее значений на 40% и 86% при введении частиц 0,03масс.% и 0,07масс.% соответственно. Влияние наноразмерных частиц карбида вольфрама на ударную вязкость металла шва связано с уменьшением среднего значения ширины первичных кристаллов металла в 2 раза и снижением разброса этих значений;

3. Применение наноразмерных частиц нитрида титана при их введении через хвостовую часть сварочной ванны приводит к росту среднего значения ударной вязкости металла шва на 43% и 65% при введении 0,03масс.% и 0,07масс.% соответственно, за счет модифицирующего действия сохранившихся наноразмерных частиц, а также за счет микролегирования металла шва титаном. При этом наблюдается увеличение разброса значений ударной вязкости, что связано с наличием микропор, размером не более 12 мкм, в металле шва.

4. Применение наноразмерных частиц оксида алюминия при их введении через хвостовую часть сварочной ванны приводит к росту среднего значения ударной вязкости металла шва на 42% при введении 0,07масс.%, за счет модифицирующего действия сохранившихся наноразмерных частиц, а также за счет микролегирования металла шва продуктами частичной диссоциации оксида алюминия. При этом наблюдается увеличение разброса значений ударной вязкости, что связано с наличием микропор, размером не более 17 мкм, в металле шва.

На защиту выносятся:

1. Результаты моделирования, подтверждающие возможность химического взаимодействия тугоплавких соединений карбида вольфрама, нитрида титана и оксида алюминия с элементами сварочной ванны;

2. Результаты экспериментальных исследований, направленных на определение технологических возможностей дуговой сварки под флюсом с дополнительной горячей присадкой;

3. Результаты исследований влияния наноразмерных частиц WC, TiN и Al₂O₃ на структуру металла шва, при их введении через электродную и присадочную проволоку;

4. Результаты исследования влияния наноразмерных частиц WC, TiN и Al₂O₃ на ударную вязкость металла шва, при их введении через электродную и присадочную проволоку.

Практическая значимость: предложен вариант введения наноразмерных частиц карбида вольфрама, нитрида титана и оксида алюминия в хвостовую часть сварочной ванны при автоматической сварке под флюсом. Показана нецелесообразность использования предложенных порошковых проволок в качестве электродных при сварке под флюсом. Установлено, что количество порошковой проволоки, подаваемой в хвостовую часть сварочной ванны не должно превы-

шать 50% от наплавленного металла в связи с нарушением формирования сварного шва. Результаты работы были использованы при разработке электродной и присадочной порошковой проволоки, содержащей наноразмерные частицы в шихте.

Достоверность результатов и выводов подтверждается использованием апробированных методик, современного поверенного оборудования, совпадением расчётных и экспериментальных данных.

Апробация работы: основные положения работы докладывались на научном семинаре кафедры технологий сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2016 г.), Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2015 и 2016 г.). Международной научно-практической конференции «Технические науки: научные приоритеты ученых» (г. Пермь, 2016), III Международной научно-практической конференции «Новые технологии и проблемы технических наук» (г. Красноярск, 2016 г.)

Публикации: по теме диссертации опубликованы 6 научных работ, 3 из них в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (общий объем 1,39 п.л.).

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе и заключения, списка литературы из 84 наименований. Диссертация представлена на 156 страницах и содержит 71 рисунка и 20 таблиц.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранного направления исследований и сформулирована цель работы.

В первой главе определены требования к сварным соединениям опасных производственных объектов из низколегированных низкоуглеродистых сталей и показана перспективность увеличения ударной вязкости металла шва. Проведен анализ возможностей современных сварочных материалов и способов повышения ударной вязкости металла шва и окколошовной зоны. Так современные сварочные материалы позволяют добиться требуемых значений ударной вязкости металла шва (МШ), однако при дополнительном легировании молибденом, никелем и др., что повышает стоимость сварочных материалов. Отмечен существенный разброс значений ударной вязкости МШ в пределах одного стыка, что связано с непостоянством химического состава сварочных материалов, а также значительными объемами сварочной ванны, характерных для сварки под флюсом. Определено, что модифицирование литого металла имеет наибольший потенциал по увеличению свойств сварных соединений. Рассмотрены основные принципы модифицирования расплавов, в частности МШ.

Модифицированием МШ занимаются такие ученые Г.Н. Соколов, С.В. Макаров, Д.А. Гущин, В.Д. Кузнецов, А.Н. Черепанов, Б.Ф. Якушин и др. Модификация МШ может протекать по двум принципам воздействия модификатора

на расплав: ингибиторы и инокулянты. В первом случае модификаторы сдерживают рост кристаллов, адсорбируясь на границах растущих кристаллов. Во втором случае модификаторы выступают в роли готовых зародышей кристаллизации, тем самым интенсифицируя образование большего количества зерен и измельчая структуру литого металла. Наиболее предпочтительным из них является второй вариант, так как адсорбция модификатора на границах кристаллов снижает ударную вязкость металла шва. Модификаторы могут быть синтезированы из отдельных элементов непосредственно в расплаве или введены извне в готовом виде.

Согласно анализу, литературных данных для низкоуглеродистых низколегированных сталей, размеры частиц, выступающих в роли центров кристаллизации, должны лежать в пределах от 10 до 500 нанометров. В связи с чем, применение частиц, вводимых извне, стало возможным лишь в последние несколько лет, с появлением апробированных технологий получения наноразмерных тугоплавких частиц, размеры которых находятся в диапазоне от 10 до 100 нанометров. Наиболее часто используемыми частицами, удовлетворяющими вышеперечисленным требованиям, являются оксиды, нитриды и карбиды. В частности, карбид вольфрама (WC), нитрид титана (TiN), оксид алюминия (Al_2O_3) и др.

Одной из важнейших задач модифицирования МШ наноразмерными частицами является разработка способа их введения в расплав сварочной ванны. В работах Г.Н. Соколова, С.В. Макарова, В.Д. Кузнецова, А.Н. Черепанова и др. предложено вводить модификатор через сварочные материалы в составе композиционных гранул (КГ). КГ представляют собой смесь микроразмерных частицносителей из мягкого металла и наноразмерных частиц, совместно обработанных в высокоэнергетической мельнице.

КГ вводят в состав покрытых электродов, нанося их поверх обмазки в виде суспензии на основе жидкого стекла или вводя непосредственно в обмазку электродов. Кроме того, КГ вводят в состав керамических флюсов для автоматической сварки под флюсом, в состав шихты порошковых проволок для частично механизированной наплавки в защитных газах, аргонодуговой наплавки и электрошлиаковой сварки, изготавливают прессовки (лигатуры), предварительно укладываемые в разделку перед сваркой. Существуют примеры применения наноразмерных частиц в свободном виде, такие как: нанесение суспензии, содержащей наноразмерные частицы, на кромки пластин при лазерной сварке и подача частиц через защитный газ при дуговой наплавке плавящимся электродом в защитных газах.

Большинство исследователей вводят наноразмерные частицы в сварочную ванну через электродные сварочные материалы. При этом частицы проходят че-

рез максимально нагретую зону (капля электродного металла, дуговой промежуток, «головная» часть сварочной ванны) и только после этого попадают в хвостовую часть сварочной ванны, где могут участвовать в кристаллизации МШ. Однако вопросам термодинамической стойкости наноразмерных частиц различного состава удалено мало внимания, лишь в последних работах Г.Н. Соколова и И.В. Зорина указывается возможность химического взаимодействия наноразмерных частиц в реакционной зоне сварочной ванны с другими элементами, присутствующими в ней.

Тем не менее, авторы, работающие в этом направлении, отмечают модифицирующее воздействие введённых тугоплавких наноразмерных частиц. Также замечено, что некоторые модификаторы влияют на морфологию и фазовый состав металла. В работах, посвященных сварке низколегированных низкоуглеродистых сталей с применением наноразмерных частиц, отмечается увеличение ударной вязкости МШ.

Среди сварочных материалов наибольший интерес представляют порошковые проволоки (ПП), содержащие композиционные гранулы с наноразмерными тугоплавкими частицами. В главе показана актуальность, поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе на основе термодинамического расчета рассмотрена возможность протекания химических реакций взаимодействия веществ тугоплавких частиц, при их нагреве до температур характерных для реакционной зоны сварочной ванны, а также возможность образования различных соединений с элементами сварочной ванны.

В качестве тугоплавких модификаторов были рассмотрены такие соединения как карбид вольфрама (WC), нитрид титана (TiN) и оксид алюминия (Al_2O_3) с температурой плавления 3060 К, 3220 К, 2323 К соответственно. Эти соединения получили наибольшее распространение среди исследователей в области модификации литого металла и металла сварного шва. Кристаллические решетки WC, TiN и Al_2O_3 имеют параметры, близкие к параметрам кристаллической решетки стали, хотя при этом тип решетки WC и Al_2O_3 отличается (гексагональная и ромбоэдрическая соответственно).

Термодинамический расчет возможности взаимодействия веществ тугоплавких соединений с элементами сварочной ванны (Si, Mn, Fe, O, C) проводился при помощи программного комплекса моделирования фазовых и химических равновесий «Терра». Расчет фазово-химического состава при нагреве соединений в условиях нейтральной среды (100% Ar) показал, что температура начала диссоциации тугоплавких соединений составляет 2800 К, 2100 К и 2450 К соответственно для WC, TiN, и Al_2O_3 . При этом происходит выделение газообразных

углерода, азота и кислорода. Расчет, проведенный в присутствии элементов, характерных для сварочной ванны показал, что такие элементы как кремний и марганец не оказывают воздействия на стойкость WC. Соединение начинает диссоциировать при температуре 3150 К, однако проявляет склонность к окислению растворенным кислородом. При увеличении количества кислорода выше 0,5 масс.% WC интенсивно окисляется уже при температуре 2100 К. В результате окисления WC наиболее вероятно образование окисла вольфрама (WO_3) и угарного газа (CO), также освободившийся углерод может приводить к образованию тугоплавкого карбида кремния (SiC). Негативному влиянию кислорода препятствует увеличение количества раскислителей, таких как кремний. Температура взаимодействия зависит от количества кислорода и кремния и варьируется в диапазоне от 2100 К до 3150 К.

TiN также проявляет склонность к взаимодействию с растворенным кислородом. При этом образуется диоксид титана (TiO_2) и газообразный азот (N), а также возможно образование оксида азота (NO_2). Температура начала взаимодействия TiN составляет 2050 К при превышении 0,02 масс.% растворенного кислорода. Определено, что диссоциация соединения возможна при температуре выше 1900 К, с образованием тугоплавких соединений силицида титана ($TiSi$) и нитрида кремния (Si_3N_4).

Al_2O_3 начинает диссоциировать при нагреве до температуры 2200 К. Дальнейший нагрев соединения приводит к образованию низших оксидов (Al_2O) и свободного кислорода, что является причиной формирования шлаковой фазы (SiO_2 и MnO). При наличии активных раскислителей также возможно образование тугоплавкого соединения никелида алюминия Ni_3Al .

Таким образом, на основе термодинамического расчета показано, что выбранные тугоплавкие соединения проявляют стабильность при нагреве совместно с элементами сварочной ванны до температур характерных для хвостовой части сварочной ванны. При этом WC и TiN проявляют чувствительность к наличию кислорода в металле сварочной ванны. Значительный перегрев частиц способен привести к формированию газовой, шлаковой и тугоплавкой фазы.

Третья глава содержит данные о материалах, оборудовании и методах проведения исследований по сварке с дополнительной горячей присадкой (ДГП) под флюсом при использовании порошковых проволок (ПП) с содержанием наноразмерных тугоплавких модификаторов.

В качестве основных сварочных материалов использовалась комбинация флюс-проводника для однопроходной сварки изделий из низкоуглеродистых низколегированных сталей, обеспечивающие состав наплавленного металла (C=0,08%, Si=0,9%, Mn=1,7%).

Наноразмерные частицы вводили в шихту порошковых проволок в составе композиционных гранул, которые представляют собой макроразмерные частицы никеля средний размер которых составляет не менее 50 мкм, обработанные совместно с наноразмерными частицами WC, TiN и Al₂O₃ в высокогенергетической планетарной мельнице. Композиционные гранулы были изготовлены в ИМЕТ им. А.А. Байкова.

Полученные гранулы использовались для изготовления ПП, содержащих 2,5масс. % композиционных гранул в шихте. Шихта представляет собой: феррокремний и ферро-марганец, а также частицы чистого железа их комбинация подобрана таким образом, чтобы после сварки обеспечивать состав наплавленного металла типа Г2С. Состав гранул представляет собой 70масс.% никеля и 30масс.% наноразмерных модификаторов. Коэффициент заполнения порошковой проволоки диаметром 2мм составил 24 масс.%, таким образом, суммарное массовое содержание наноразмерных модификаторов составило 0,18% от массы проволоки. Для оценки влияния модификаторов кроме ПП, содержащих композиционные гранулы применяли ПП того же состава с содержанием чистого никеля (ПНЭ-1 по ГОСТ 9722) в количестве 2,5масс.% и проволоку сплошного сечения типа Св-08Г2С. Состав опробованных проволок представлен в Таблица 1.

Таблица 1.

Проволоки, использованные при проведении исследований

Тип проволоки	Тип наполнителя проволоки	Содержание никеля масс.%	Содержание модификатора масс.%
ПП	Ni пнэ	0,6	нет
ПП	Ni+Al ₂ O ₃	0,42	0,18
ПП	Ni+WC	0,42	0,18
ПП	Ni+TiN	0,42	0,18
Сп	Нет	нет	нет

ПП – порошковая проволока
Сп – проволока сплошного сечения

Схемы введения модификаторов, содержащихся в шихте ПП, и подбор режимов, производили при сварке пластин из низкоуглеродистой стали (СтЗсп по ГОСТ 380) за один проход с остающейся стальной подкладкой (С5 ГОСТ 8713). При этом ток основной дуги составлял 650-750А, напряжение 32-34В, а скорость сварки 45м/мин.

Для экспериментального подтверждения данных моделирования, а также для оценки влияния различных наноразмерных частиц на ударную вязкость металла шва, были рассмотрены две схемы подачи ПП в сварочную ванну:

1- введение проволоки в хвостовую часть сварочной ванны (Рис.1,а)

2- введение проволоки при ее контакте со сварочной дугой (Рис.1,б)

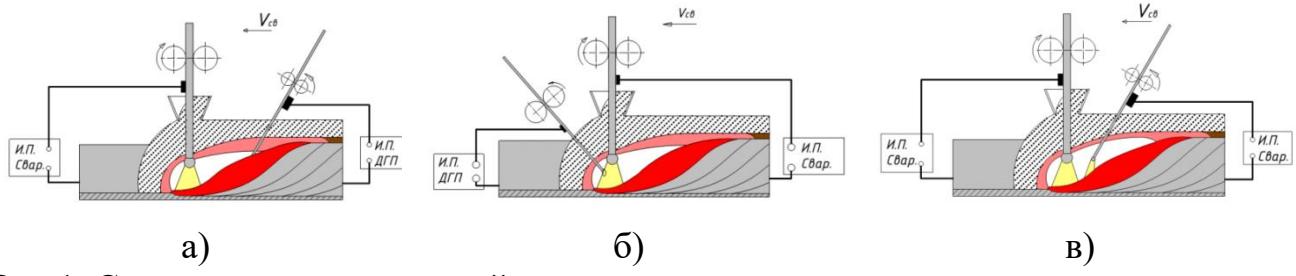


Рис.1. Схемы ввода порошковой проволоки

При реализации схемы 1 наноразмерные частицы претерпевают минимальный нагрев, и сразу попадают в хвостовую часть сварочной ванны, где могут оказывать влияние на кристаллизацию МШ. При схеме 2 наноразмерные частицы попадают в высокотемпературную зону дугового промежутка, тем самым имитируя схемы, широко использованные в различных работах. Для реализации обоих схем потребовался подогрев ПП, для стабилизации подачи присадки в сварочную ванну. Однако не удалось обеспечить идентичность параметров шва (площадь поперечного сечения шва, равенство режимов основной дуги), поэтому от второй схемы отказались в пользу более гибкого варианта:

3- введение проволоки при горении дуги на ее торце (Рис.1,в)

Таким образом, экспериментальные исследования проводили по двум схемам: 1 и 3, при этом соблюдались следующие требования:

- одинаковый объем сварочной ванны.
- одинаковая доля участия присадочной проволоки.

При реализации схемы 1 необходимо настроить дополнительные параметры режима, к которым относятся: скорость подачи ДГП, значение тока, подогрева ДГП, угол ввода ДГП (α) в сварочную ванну и расстояние от основной дуги до места ввода ДГП в сварочную ванну. Для определения дополнительных параметров режима потребовались предварительные исследования. Расстояния между проволоками определяли, как расстояние между ними, устанавливаемое перед сваркой при их касании подкладной пластины (Рис.2.).

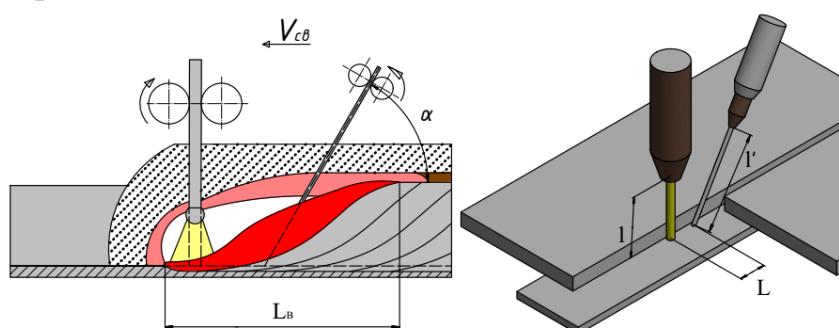


Рис.2. Схема сварки с ДГП, где L – расстояние между проволоками устанавливаемое перед сваркой, L_b – длина сварочной ванны, $\alpha = 60^\circ$ – угол

ввода ДГП, $V_{\text{св}}$ – скорость сварки, l – вылет основной проволоки, l' – вылет проволоки ДГП.

Предварительные исследования показали, что максимальная скорость усвоения присадки сварочной ванной для выбранных режимов сварки достигается на расстоянии (L) 10-12 мм от основной проволоки.

Кроме того, с точки зрения формирования сварного шва, доля участия присадочной проволоки в наплавленном металле не должна превышать 50%. В противном случае наблюдаются несплавления по кромкам и образование острого угла перехода наплавленного металла к основному металлу, что приводит к появлению шлаковых включений.

Опробованные режимы сварки, обеспечивающие качественное формирование сварного шва, представлены в Таблица 2.

Таблица 2.

Режимы сварки под флюсом с дополнительной горячей присадкой

Серия	Серия «А»		Серия «Б»	
Проволока	Осн.	ДГП	Осн.	ДГП
Сила тока I , А	750	200	650	300
Род тока	DC+	AC	DC+	AC
Напряжение U , В	34	-	32	-
Скорость подачи $V_{\text{п}}$, м/ч	-	5,4	-	11,2
Диаметр проволоки d , мм	4	2	4	2
Вылет l (l'), мм	35	50	35	50
Скорость сварки $V_{\text{св}}$, м/ч	45			
Доля участия в МШ, %	23	16	24	41
Поперечное сечение шва S , мм^2	130-140		130-140	

Схема двухдуговой сварки под слоем флюса обеспечивает прохождение модификатора из расплавленной присадочной ПП в сварочную ванну через дуговой промежуток, при горении дуги на ее торце. В этом случае дополнительными параметрами режима являются: скорость подачи ПП, значение тока второй дуги, напряжение на второй дуге, угол наклона ПП и расстояние от основной дуги до места ввода ПП в сварочную ванну. Параметры режима сварки для первой дуги оставили без изменений по сравнению со схемой 1, в то время как дополнительные параметры режима, установленные в ходе предварительных экспериментов, составили: сила переменного тока $I=550\text{A}$, напряжение $U=30\text{V}$, при этом скорость сварки и скорость подачи порошковой проволоки, а также угол ввода и расстояние между дугами, не изменили по сравнению со схемой 1. Таким образом соблюдалось постоянство объема сварочной ванны и количества введенного в нее модификатора.

Так для проведения исследований были использованы комбинации сварочных материалов и способы сварки, представленные в Таблица 3.

Образцы после сварки были подвергнуты испытаниям на ударный изгиб МШ по Шарпи при температуре испытаний -20°C (тип X по ГОСТ 6996). Результаты механических испытаний были проанализированы с применением методов статистического анализа в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 8.736 с определением среднего значения и доверительного интервала, обладающего 95.4% вероятностью ($\pm 2S$) и коэффициента вариации значения ударной вязкости (V). Далее изломы образцов были исследованы при помощи электронного микроскопа, с измерением химического состава. Доля хрупкой и вязкой составляющих излома оценивали согласно методикам, описанным в ГОСТ Р ИСО 148-1 и РД 50-672. Также были подготовлены шлифы, для исследования влияния наноразмерных частиц на структуру МШ. Для определения характера структуры МШ и ОШЗ использовались методики, описанные в ГОСТ 5639, а также определяли ширину первичных кристаллов металла шва.

Таблица 3.
Матрица образцов, выполненных для проведения исследований

Схема сварки	Тип ДГП	Состав ДГП	Доля участия присадки в МШ	γNi , масс. %	γHM , масс. %
Базовый	нет	Нет	0	0	0
ДГП	Сп	Св-08Г2С	16%	0	0
	ПП	Ni		0,097	0
	ПП	Ni+WC		0,068	0,03
	ПП	Ni+TiN		0,246	0
	ПП	Ni+Al ₂ O ₃	41%	0,172	0,07
	Сп	Св-08Г2С		0	0
	ПП	Ni		0,246	0
	ПП	Ni+WC		0,172	0,07
	ПП	Ni+TiN		0,172	0,07
2-х дуговая	ПП	Ni+Al ₂ O ₃	41%	0,172	0,07

В главе представлена компоновка оборудования портального типа для автоматизированной двухдуговой сварки под флюсом, модернизированного для проведения исследований по сварке с ДГП. В частности, подобран механизм подачи присадочной проволоки и сконструировано направляющее устройство, подобран источник питания трансформаторного типа с фазовым регулированием и пониженным напряжением холостого хода, разработан алгоритм и сконструирована система управления механизмом подачи присадочной проволоки.

Четвертая глава содержит результаты экспериментальных исследований образцов, полученных при сварке под флюсом с ДГП и двухдуговой сварке под

флюсом с использованием разработанных ПП, содержащих наноразмерные тугоплавкие частицы.

Анализ структуры сварных соединений показал, что применение ДГП приводит к измельчению зерна околошовной зоны на 36-42% независимо от типа применяемой проволоки. Структура МШ представляет собой смесь феррита и перлита, а также видны следы бейнита. Применение в качестве ДГП проволок, в составе которых отсутствуют наноразмерные частицы, приводит к снижению ширины первичных кристаллов МШ в полтора раза.

Влияние наноразмерных модификаторов на фазовый состав структуры МШ не выявлено, но при этом наблюдается уменьшение ширины первичных кристаллов МШ на 40-50%, а также снижается разброс этих значений на 50-85%.

Применение проволоки сплошного сечения марки Св08Г2С в качестве ДГП приводит к ожидаемому росту количества кремния и марганца в МШ (Рис.5.), что негативно оказывается на ударной вязкости, несмотря на измельчение структуры МШ (Рис. 3., Рис. 4.). При доле ДГП 41% от массы шва суммарное количество кремния и марганца увеличивается на 36%, что приводит к уменьшению ударной вязкости в среднем на 40% (Рис. 3.).

Применение в качестве ДГП порошковой проволоки, содержащей никель, не приводит к росту содержания кремния, а наоборот, наблюдается его уменьшение, по сравнению со сваркой без ДГП (Рис. 5.). Такое явление может быть связано с попаданием в сварочную ванну дополнительного кислорода из ПП, что приводит к интенсивному протеканию реакций раскисления, в которых, в первую очередь, участвует кремний. Наличие кислорода в ПП обусловлено применением порошкообразной шихты в сердечнике проволоки. Кроме того, с ПП в ванну попадает незначительное количество (менее 0,246 масс.%) никеля. Все эти факторы в сочетании измельчением структуры МШ не дают снизиться ударной вязкости МШ, а наблюдаются тенденции к ее увеличению (ударная вязкость увеличивается в среднем на 12 - 16%).

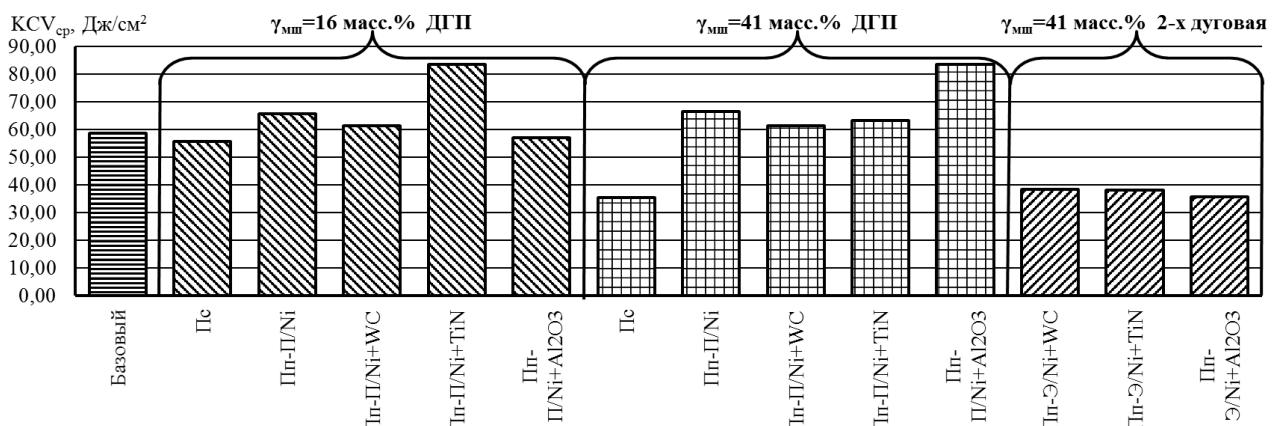


Рис. 3. Среднее значение ударной вязкости МШ

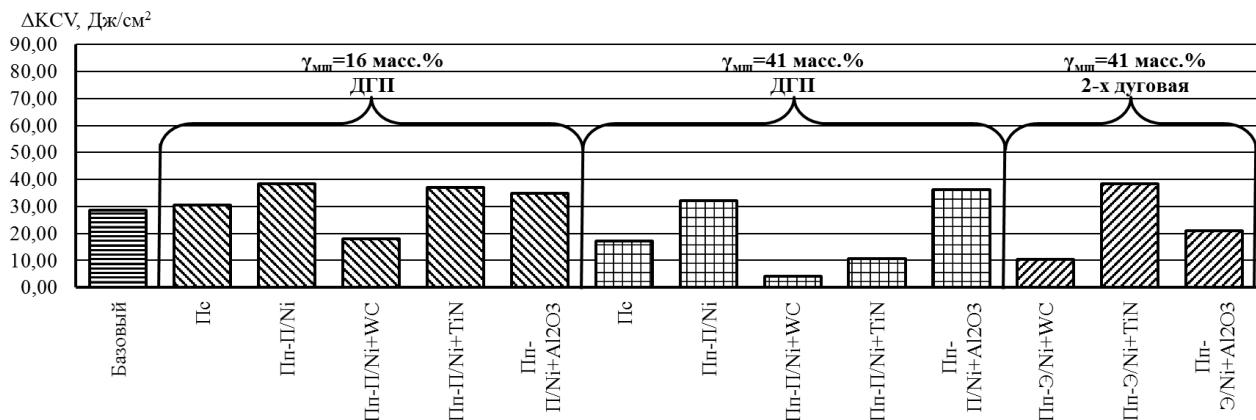


Рис. 4. Разброс значений ударной вязкости МШ

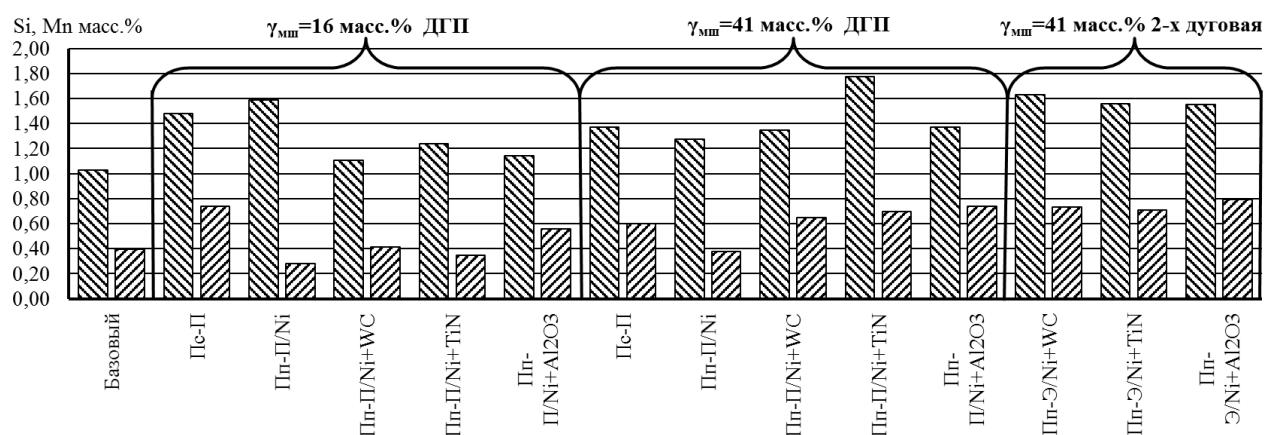


Рис. 5. Содержание Si (▨) и Mn (▨) в МШ

Применение в качестве ДГП порошковой проволоки, содержащей КГ с наноразмерными частицами, приводит к увеличению суммарного количества кремния и марганца, а также к уменьшению соотношения марганца к кремнию (по сравнению с базовым). Наибольшее влияние на содержание кремния и марганца оказывают частицы TiN, которые диссоциируют в расплаве сварочной ванны под воздействием высокой температуры, а освободившийся титан связывает кислород, что согласуется с результатами моделирования. Подтверждением этой гипотезы может служить не только рост количества кремния, с увеличением количества вводимых частиц, но и появление пор в МШ со средним диаметром 8 мкм. Причиной образования пор является образование азота при диссоциации нитрида титана (Рис.6,б). Все эти факторы приводят к незначительному росту ударной вязкости при малом количестве частиц и к резкому снижению при увеличении их количества. Так, при доле участия ДГП в МШ 16%, наблюдается рост средних значений ударной вязкости на 42% (по сравнению с базовым) и на 28% (по сравнению с МШ, дополнительно модифицированным никелем), а также наблюдается незначительное увеличение разброса ударной вязкости на 30% (по сравнению с базовым). Дальнейшее увеличение доли участия ДГП в МШ до 41% приводит к уменьшению среднего значения ударной вязкости на 5% и снижению

разброса на 66% (по сравнению с МШ, дополнительно модифицированным никелем).

Применение ПП, содержащей частицы WC, в сварочную ванну приводит к росту средних значений ударной вязкости МШ на 5% (по сравнению с базовым вариантом) и уменьшению разброса значений ударной вязкости на 36% (при доле участия ДГП в МШ 16%) и на 85% (при доле участия ДГП в МШ 41%). Таким образом, применение частиц WC за счет измельчения структуры металла шва, а также стабилизации значений ширины первичных кристаллов приводит к повышению стабильности значений ударной вязкости МШ.

При введении ПП, содержащей частицы Al_2O_3 , наблюдается некоторое (не более 3% от базового) уменьшение значений ударной вязкости МШ, при доле участия ДГП в МШ 16%, а при увеличении доли участия до 41% наблюдается значительный рост средних значений ударной вязкости на 42%. Однако, следует отметить, что увеличение количества вводимых частиц привело к росту разброса значений ударной вязкости, что связано с появлением пор средним диаметром 17 мкм в МШ (Рис.6,а). Такие результаты, полученные с применением наноразмерных частиц Al_2O_3 , могут свидетельствовать о модифицирующем эффекте наноразмерных частиц, но формирование пор снижает эффективность использования таких частиц.

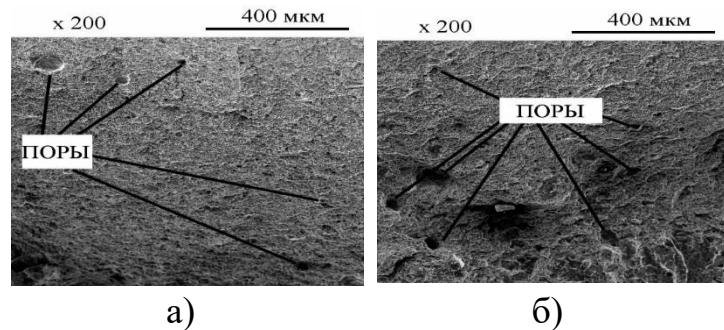
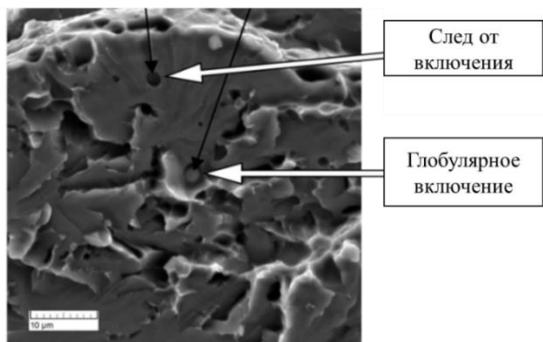


Рис. 6. Фрактограммы изломов МШ с введением КГ Ni+Al₂O₃ (а) и Ni+TiN (б)

Применение ПП в качестве электродной проволоки при реализации двухдуговой сварки под флюсом приводит к росту количества кремния и марганца в МШ в связи с переходом этих элементов из шихты ПП. При этом наличие наноразмерных частиц в составе шихты ПП не приводит к изменению количества кремния и марганца в МШ. Кроме того, при фрактографическом анализе изломов были обнаружены сферические (глобулярные) включения, в состав которых входят элементы, характерные для наноразмерных частиц, которые скапливаются в плоскости разрушения (Рис.7.). Все эти факторы приводят к существенному снижению ударной вязкости и значительному увеличению разброса ее значений (Рис. 3., Рис. 4.).



	Содержание, масс.%	
	След от включения	Включение
O	12,53	27,74
Si	6,67	10,99
Ti	0,33	0,81
Ni	0,25	0,00

Рис.7. Включение и след от включения на фрактограмме и результаты химического анализа образца с содержанием TiN.

Основные выводы по результатам работы

1. Показана перспективность применения порошковых проволок для транспортировки наноразмерных частиц и введения их в хвостовую часть сварочной ванны при автоматической сварке под флюсом.

2. Установлено предельное количество порошковой проволоки, подаваемой в хвостовую часть сварочной ванны, связанные с обеспечением качественного формирования сварного шва. Доля участия присадочной проволоки в наплавленном металле не должна превышать 50%.

3. Показано, что применение наноразмерных частиц карбида вольфрама, нитрида титана и оксида алюминия в составе электродной порошковой проволоки при сварке под флюсом является нецелесообразным, т.к. существенный перегрев наноразмерных частиц приводит к их полной диссоциации или окислению, в связи с чем происходит снижение ударной вязкости металла шва.

4. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено, что наноразмерные частицы нитрида титана и оксида алюминия, при введении их через порошковую проволоку в хвостовую часть сварочной ванны, склонны к частичной или полной диссоциации с образованием газовой фазы, что является причиной появления пор. Размер пор зависит от количества и вида наноразмерных частиц. Средний диаметр пор при введении в сварочную ванну 0,03 масс.% и 0,07 масс.% частиц нитрида титана составляет от 0,008 мм до 0,012мм соответственно. Средний диаметр пор при введении в сварочную ванну 0,03 масс.% и 0,07 масс.% частиц оксида алюминия составляет от 0,008 мм до 0,017мм соответственно.

5. Порообразование приводит к увеличению разброса ударной вязкости на 32 % и 25% при введении 0,03 масс.% наноразмерных частиц нитрида титана и оксида алюминия соответственно, в опробованном количестве.

6. При введении в хвостовую часть сварочной ванны наноразмерных частиц нитрида титана и оксида алюминия, несмотря на протекание процессов диссоциации, наблюдается эффект модифицирования, приводящий к снижению ширины первичных кристаллов в 2 раза. Эффект модифицирования обеспечивается частичным сохранением наноразмерных частиц, а также воздействием химических элементов, выделившихся в процессе диссоциации (Ti и Al).

7. Снижение ширины первичных кристаллов в металле шва при введении в хвостовую часть сварочной ванны наноразмерных частиц оксида алюминия

приводит к увеличению среднего значения ударной вязкости на 4% и на 69%, при введении частиц в количестве 0,03 масс.% и 0,07 масс.% соответственно, а при введении нитрида титана приводит к увеличению среднего значения ударной вязкости на 50% и на 14%, при введении частиц в количестве 0,03 масс.% и 0,07 масс.% соответственно;

8. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено, что наноразмерные частицы карбида вольфрама сохраняют свою стабильность при введении их в хвостовую часть сварочной ванны и проявляют модифицирующее воздействие, что приводит к росту средних значений ударной вязкости металла шва и снижает разброс этих значений.

9. Введение 0,03масс.% и 0,07масс.% карбида вольфрама в расплав хвостовой части сварочной ванны совместно с порошковой проволокой приводит к снижению ширины первичных кристаллов в 2 раза и снижению разброса этого значения на 30 - 50%.

10. Введение наноразмерных частиц карбида вольфрама в хвостовую часть сварочной ванны приводит к незначительному (не более 10%) росту средних значений ударной вязкости металла шва, а также к снижению разброса этих значений на 40% и 86% при введении 0,03масс.% и 0,07масс.% соответственно;

11. Предложен состав присадочной порошковой проволоки, в которой наноразмерные частицы карбида вольфрама введены в составе композиционных гранул в шихту порошковой проволоки.

Основные публикации по теме диссертации

1. Модификация наплавленного металла наноразмерными частицами карбида вольфрама с целью повышения эксплуатационных свойств сварных соединений / А.А. Линник [и др.] // Инженерный вестник. 2013. № 4. С. 9. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)
2. Линник А.А., Панкратов А.С., Коберник Н.В. Влияние наноразмерных порошков карбида вольфрама на структуру и свойства металла шва // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 6. С. 66-71. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)
3. Современные представления о модификации наплавленного металла и металла шва наноразмерными частицами (Обзор) / А.А. Линник [и др.] // Сварка и диагностика. 2015. № 5. С. 13-18. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)
4. Модификация металла шва с помощью дополнительной горячей присадки, содержащей наноразмерные тугоплавкие частицы / А.А. Линник, Н.В. Коберник // В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов Восьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. 2015. С. 224-225. (0,1 п.л. / 0,09 п.л.)
5. Formation of the Structure of the Weld Metal upon the Introduction of Nanoparticles into the Weld Pool / A.A. Linnik et all. // Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2016, No. 13, P. 1253 – 1256. DOI: 10.1134/S0036029516130206 (0,19 п.л./0,03 п.л.).
6. Особенности формирования структуры металла шва при введении наноразмерных частиц в расплав сварочной ванны / А.А. Линник [и др.]// Технология металлов. 2016. №1. С. 11-15 (0,25 п.л./0,04 п.л.).