

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

Институт машиностроения, материалов и транспорта

Высшая школа физики и технологий материалов

А.А. Васильев, гр. 3342202/90301

**Цифровое моделирование и технология сварки конструкций в условиях
Арктики и Крайнего Севера**

Работа курсовых, дипломных и научных работ, посвященных Арктике и Антарктике

Направление 14. Техника и инновационные технологии для освоения полярных регионов

АННОТАЦИЯ РАБОТЫ

«Цифровое моделирование и технология сварки конструкций в условиях Арктики и Крайнего Севера»

Автор: **Васильев Александр Александрович**

Направление: 14. Техника и инновационные технологии для освоения полярных регионов.

В работе разработана методика цифрового моделирования газодинамических характеристик защитной газовой струи, приводящих к снижению эффективности газовой защиты, с применением программы ANSYS. Установлено, что цифровое моделирование газодинамических характеристик истечения защитного газа на границе сварочной дуги и аэродинамических параметров рабочей поверхности сопла сварочной горелки играет важную роль при разработке технологии сварки конструкций в условиях Арктики и Крайнего Севера.

В работе определены этапы решения проблемы свариваемости, обеспечения необходимого уровня ударной вязкости при низких температурах, снижения чувствительности к холодным трещинам хладостойких сталей с прочностью более 600 МПа.

Установлено, что основным способом сварки сталей с высокой прочностью является дуговая сварка в среде защитных газов, которая обеспечивает низкий уровень диффузионного водорода, однако, возмущающие факторы, в частности, ветер деформирует сварочную дугу и слой защитного газа, поэтому азот и кислород воздуха активно насыщает сварочную ванну, снижает пластичность шва и способствует появлению холодных трещин. Модернизирован универсальный стенд для моделирования процесса сварки при различных возмущающих факторах. Установлена связь газовой защиты при сварке с постоянно изменяющимися возмущающими факторами, такими как ветровая нагрузка, положение горелки, геометрия поверхности сопла и наконечника горелки. Получены оригинальные результаты при цифровом моделировании истечения защитной газовой струи в зависимости от конструкции сопла и мундштука сварочной

горелки. Обобщены результаты по газовой защите хладостойких сталей при сварке конструкций, работающих в условиях Арктики и Крайнего Севера, и предложено использование полученных результатов при разработке технологии сварки и комплекта специализированного оборудования с адаптивной системой управления.

_____ Васильев А.А.

(подпись)

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 5 |
| 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР | 6 |
| 1.1. Условия эксплуатации в Арктике | 6 |
| 1.2 Научная новизна работы | 10 |
| 1.3 Практическая ценность результатов | 11 |
| 2. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ | 12 |
| 2.1. Свариваемость высокопрочных сталей | 12 |
| 2.2. Технология сварки высокопрочных сталей | 14 |
| 2.3. Модернизация универсального стенда для моделирования сварки в условиях ветра..... | 15 |
| 2.4. Цифровое моделирование параметров струи защитного газа при сварке в условиях ветра..... | 22 |
| 2.5. Исследование влияния формы электрода (мундштука) на качество осуществляемой газовой защиты | 42 |
| 3. ВЫВОДЫ..... | 52 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 54 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 55 |

ВВЕДЕНИЕ

В связи с интенсивным освоением Арктики и районов Крайнего Севера, возникает необходимость изготовления большого количества конструкций, что требует использования новых хладостойких материалов и новых технологических процессов получения неразъемных соединений.

Важнейшей проблемой свариваемости сталей с прочностью более 600 МПа, которые широко применяются при изготовлении ответственных крупногабаритных конструкций, работающих в условиях Арктики и районов Крайнего Севера, является обеспечение необходимого уровня ударной вязкости при низких температурах, предупреждение хрупкого разрушения сварных соединений, связанного со структурными превращениями, а также с охрупчивающим действием растворенного в металле водорода [1, 2].

Основным способом сварки высокопрочных сталей является дуговая сварка в среде защитных газов, которая обеспечивает низкий уровень диффузионного водорода [6, 9]. Однако на открытых монтажных площадках ветер деформирует сварочную дугу и слой защитного газа, поэтому азот и кислород воздуха активно насыщает сварочную ванну, снижает пластичность шва и способствует появлению холодных трещин [5, 17].

Улучшение конфигурации деталей, расхода защитного газа и параметров режима сварки могут уменьшить деформацию и турбулентность защитной газовой струи [8].

С другой стороны, важную роль для разработки технологии сварки имеет цифровое моделирование газодинамических характеристик истечения защитного газа на границе сварочной дуги и аэродинамических параметров рабочей поверхности сопла сварочной горелки [16].

В связи с этим, цифровое моделирование и разработка технологии сварки конструкций, работающих в условиях Арктики и Крайнего Севера, является весьма актуальной проблемой.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Условия эксплуатации в Арктике и условиях Крайнего Севера

Экстремальные низкие температуры

Расчетная температура эксплуатации – одна из качественных характеристик любого материала. Материалы (особенно стали) подвержены хрупкому разрушению при низких температурах. Стали имеют температуру перехода, при которой их свойства пластичности изменяются на хрупкость. Следовательно, их расчетная температура обычно ниже на 20 °С минимально ожидаемой рабочей температуры или температуры окружающей среды. В арктическом регионе минимальная температура окружающей среды опускается значительно ниже – 40 °С, поэтому необходимо учитывать минимальную расчетную температуру до – 60 °С. В результате возникает потребность в металлах особого качества или стали более высокого качества и других материалов, которые могут выдерживать эту чрезвычайно низкую температуру, не выходя из строя в условиях эксплуатации.

Ледяная строжка и проблема снежного обледенения

«Ледовые» условия в арктическом регионе значительно различаются между территориальными районами, внутри регионов и в зависимости от расстояния до воды. Лед также меняется в течение сезонов, замерзания осенью, становясь толще зимой, тая весной и создавая открытую воду летом. В течении месяца, когда лед растает, потоки ветра и воды заставляют его двигаться и образовать ледяные гряды, которые могут быть во много раз толще, чем лед, удерживаемый на суши.

Ледовые проблемы в значительной степени определяют критерии проектирования и эксплуатации Арктики. Морской лед представляет собой основные проблемы, являясь единственным наиболее важным фактором окружающей среды, влияющим на деятельность в Арктике. Кроме того, дополнительные проблемы создают другими льдами (такими как ледяные

острова и структурные обледенения) для платформ, кораблей и вертолетов. Характеристики морского льда, хребтов под давлением и движение льда являются главной проблемой при проектировании арктических сооружений.

Нарушение потоков ветра

Арктика наделена очень сильным ветром, что связано с большим градиентом давления воздуха. Хотя этот ветровой ресурс может быть преобразован в источник энергии, он оказывает огромное негативное влияние на объекты по разведке нефти и газа.

Удаленность и низкая плотность населения

Арктический регион является малонаселенным регионом, поэтому будет очень сложно обслуживать ветряные турбины. Вот почему правильные технологии сварки должны быть выбраны для борьбы с этими суровыми условиями.

Свойства материала для арктического применения

Арктика является агрессивной средой эксплуатации с температурой ниже -40°C . Как правило, металлы, преимущественно сталь, используется для строительства морских платформ и большинства сооружений, используемых в Арктике. Однако, металлы подвержены хрупкому разрушению при очень низких температурах, как в этом случае в арктических условиях. Следовательно, существуют определенные свойства, которыми должны обладать материалы, используемые в этой среде. Одним из основных свойств является высокая ударная вязкость при очень низкой температуре, другие включают температуру перехода, механические свойства, такие как ударная вязкость, предел прочности и т.д.

Исходя из вышеупомянутой необходимости заданных свойств материала в арктических условиях, типичными для использования материалами являются сталь и титан. Примерами используемых марок стали являются высокопрочные конструкционные стали: F500W, F650W и т.д. Хотя все еще продолжаются исследования, чтобы получить более надежные материалы, которые могут обеспечить лучшие свойства прочности.

Сварка в Арктике

Сварка в Арктике стала неотъемлемой частью проекта развития, направленного на изучение и освоение богатых энергетических ресурсов Арктики. Из-за проблем, связанных со сваркой, необходимо применять передовые технологии, чтобы обеспечить хорошую сварку, которая может удовлетворить и выдержать условия эксплуатации. Передовые технологии, включают сварку следующих типов: лазерная, гибридная лазерно-дуговая, сварка тандемным инертным или активным газом из металла (MIG, MAG) и многопроволочная дуговая сварка под флюсом (SAW).

Сталь, используемая в арктических условиях.

Основным требованием к стали, рассчитанной на работу при низких температурах, является гарантированная пластичность вязкость разрушения при рабочих температурах. Материал при низких температурах не должен иметь склонности к хрупкому разрушению, то есть диапазон рабочих температур должен быть выше порогового значения хрупкого разрушения стали. Как правило, чем больше разницы между рабочей температурой и порогом холодного разрыва, тем выше запас вязкости материала.

В большинстве случаев в качестве криогенных материалов используется аустенитные стали Cr-Ni, Cr-Mn, Cr-Ni-Mn, а также ферритные стали, легированные никелем. Аустенитные хромоникелевые стали довольно дороги из-за высоко содержания дефицитного никеля (8 - 20%)

Хром-никель-марганцевые стали, содержащие азот, также можно рассматривать как высокопрочные стали, поскольку они имеют значительно более высокие значения предела текучести, чем аустенитные никель-хромовые стали.

Основным способом сварки конструкций в подобных условиях является сварка покрытым электродом. Но качество получаемых сварных конструкций при воздействии ветра в процессе сварки покрытым электродом оставляет желать лучшего.

Ранние исследования показали, что для устранения насыщения сварного шва газами атмосферного воздуха следует применять дуговую сварку в среде защитных газов. Сейчас ее объем в мировом объеме сварочного производства составляет более 45 %. В результате применения защитных газов и локальной защиты места соединения достигается высокое качество сварных соединений при дуговой сварке. Однако, для сварки в условиях ветра, оборудование для дуговой сварки нуждается в серьезной доработке.

Существенным недостатком дуговой сварки в среде защитных газов является нарушение защиты сварочной ванны при наличии поперечных воздушных потоков. Для обеспечения высокого качества сварных соединений необходима защита расплавленного металла от контакта с окружающей атмосферой. Поскольку эта защита осуществляется потоком защитного газа, то ее надежность может определяться характеристиками истекающего из сопла газового потока и устойчивостью потока к действию возмущающих факторов, к которым относятся: естественное перемещение масс воздуха, тепломассоперенос в сварочной дуге, влияние геометрии электродов и др. [13].

Влияние условий на технологический процесс дуговой сварки в среде защитных газов изложено в трудах Г.А. Николаева, В.Л. Руссо, В.В. Ардентова, Н.Т. Мельниченко, Г.А. Федоренко, И.В. Ивановой [3, 14]. Ранее было установлено, что одним из основных условий получения бездефектного шва высокого качества является надежная защита зоны сварки.

Вышеизложенное позволило сформулировать цель настоящей работы: повышение качества сварных соединений и эффективности газовой защиты при дуговой сварке конструкций, работающих в условиях низких температур, путем применения цифрового моделирования истечения струи защитного газа из сопла сварочной горелки в программной среде ANSYS Fluent с использованием метода конечных элементов.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Установить проблемы и способы управления свойствами сварных соединений при сварке плавлением в защитных газах низколегированных конструкционных сталей с прочностью более 600 МПа.
2. Установить металлургические и технологические факторы, которые при которых возможно проведение сварки конструкций в условиях Арктики и Крайнего Севера.
3. Построить цифровую модель газодинамических характеристик истечения защитного газа на границе сварочной дуги и аэродинамических параметров рабочей поверхности сопла сварочной горелки.

В работе применялись экспериментальное моделирование и теоретические методы исследования: создание и исследование математической модели сварочного процесса в условиях воздействия сносящих воздушных потоков, исследование влияния геометрии не только поверхности сопла, но и поверхности мундштука, исследование концентрации и скорости истечения защитного газа под воздействием различных возмущающих факторов.

1.2. Научная новизна работы

1. На основе математического моделирования в среде ANSYS обнаружена возможность управления эффективностью газовой защиты в условиях ветра за счет исключения циркуляционной зоны в пределах ядра струи путем улучшения обтекаемости наконечника, причем на характеристики течения оказывать влияние будут не только внутренняя поверхность сопла и поверхность наконечника, но и их относительное расположение.
2. На основе математического моделирования в среде ANSYS обнаружена возможность управления эффективностью газовой защиты в условиях ветра за счет изменения технологических факторов, в частности угла наклона сварочной горелки.

1.3. Практическая ценность результатов

1. Модернизирован универсальный стенд с многорежимной аэродинамической трубой и компьютерным управлением для моделирования процесса сварки при различных возмущающих факторах.
2. Разработана методика цифрового моделирования газодинамических характеристик защитной газовой струи, приводящих к повышению эффективности газовой защиты с применением ANSYS.
3. Установлена связь газовой защиты при сварке с постоянно изменяющимися возмущающими факторами, такими как ветровая нагрузка, положение горелки, геометрия поверхности сопла и наконечника горелки.

2. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ

2.1. Свариваемость высокопрочных сталей

Спрос на применение сварных конструкций из высокопрочных легированных сталей постоянно увеличивается не только в машиностроении, но и в добывающих отраслях.

Среднеуглеродистые легированные стали обладают высоким комплексом эксплуатационных свойств и используются для производства ответственных сварных конструкций [2, 3]. Они обеспечивают высокую прочность конструкции при одновременном снижении ее металлоемкости. Однако под воздействием термического цикла сварки в зоне термического влияния (ЗТВ) сварных соединений формируются закалочные структуры, характеризующиеся большими значениями твердости при низких значениях вязкости. Поэтому на ЗТВ приходится наибольшая доля, образующихся в процессе сварки, холодных трещин [4].

Стали с пределом прочности свыше 1500 МПа называются высокопрочными. Такой предел достигается подбором химического состава и наиболее подходящей термической обработкой. Данный уровень прочности может образовываться в среднеуглеродистых легированных сталях (40ХН2МА, 30ХГСН2А) путем использования закалки с низким отпуском (при 200...250оС). Легирование таких сталей W, Mo, V затрудняет разупрочняющие процессы, что снижает порог хладноломкости и повышает сопротивление хрупкому разрушению. Сварка высокопрочных сталей отличается использованием некоторых дополнительных технологических приемов (сварка каскадом, горкой, секциями, предварительный подогрев, применение мягкой прослойки и других).

Изотермическая закалка среднеуглеродистых легированных сталей придает им немного меньшую прочность, но большую вязкость и пластичность. Поэтому они более надежны в эксплуатации, чем

низкоотпущенные и закаленные. Низкоотпущенные и закаленные среднеуглеродистые стали с высоким уровнем прочности обладают повышенной восприимчивостью к концентраторам напряжения, склонностью к хрупкому разрушению. Из-за этого их рекомендуют использовать для работы, связанной с плавным нагружением.

К высокопрочным сталям можно отнести так называемые рессорные (пружинные) стали. Они содержат 0,5...0,75% С и дополнительно легируются другими элементами. Термообработка легированных рессорных сталей (закалка 850...880 °С, отпуск 380...550 °С) обеспечивает получение высокой прочности и текучести. Может применяться изотермическая закалка. Сварка рессорной стали выполняется с обязательной предварительной термообработкой, с подогревом в процессе сварочных работ и дальнейшей термической обработкой.

Мартенситно-старяющие стали (04X11N9M2Д2ТЮ, 03Н18К9М5Т) также относятся к высокопрочным сталям. Они превосходят среднеуглеродистые легированные стали по конструкционной прочности и технологичности. Для таких сталей характерны высокое сопротивление хрупкому разрушению, низкий порог хладоломкости и малая чувствительность к надрезам при прочности около 2000 МПа. Мартенситно-старяющие стали являются безуглеродистыми сплавами железа с никелем и дополнительно легированы молибденом, кобальтом, алюминием, хромом, титаном и другими элементами. Эти стали имеют высокую конструкционную прочность в диапазоне температур от криогенных до 500 °С и применяются в изготовлении стволов артиллерийского и стрелкового оружия, корпусов ракетных двигателей, зубчатых колес, шпинделей и так далее.

Прежде всего высокопрочные стали применяют в изделиях, для которых важно уменьшение массы при сохранении высокой прочности. Это могут быть высокопрочные болты и крепежные изделия, некоторые виды тросов и прядей, высокоскоростные роторы, валы и многие другие детали машин и механизмов.

Высокопрочные стали используют в космической, ракетной, авиационной технике, а также в ряде отраслей приборостроения.

Недостатки:

Основной трудностью, которая возникает при сварке данного вида сталей - это высокая вероятность образования холодных трещин при сварке в металле сварного шва и в зоне термического влияния.

Кроме этого, высок риск образования закалочных структур, которые заметно снижают стойкость металлоконструкции к хрупкому разрушению. Ещё одна трудность заключается в том, что требуемое качество сварки и требуемые рабочие параметры должны быть обеспечены сразу же после сварки, без выполнения последующей термической обработки.

Для того чтобы уменьшить риск возникновения холодных трещин при сваривании высокопрочных сталей, лучшим вариантом будет использование электродов, которые содержат как можно меньше водорода в своём составе. Кроме того, необходимо придерживаться определённых рекомендаций при подготовке металла к сварке и строго соблюдать технику выполнения швов.

2.2. Технология сварки высокопрочных сталей

Подготовка металла к сварке

Перед началом сварки, сварные кромки и зачищают до металлического блеска. Зачистке также подлежат близлежащие к ним участки на расстоянии 20мм в каждую сторону от стыка. На свариваемых поверхностях не должно быть грязи, воды, масляных плёнок, ржавчины и других загрязнений.

Для фиксации свариваемых деталей в нужном положении выполняют технологические прихватки. Длина технологических прихваток составляет 50-100 мм, и выполняются они электродами типа УОНИ-13/45А или АПН-2. Рекомендуемое расстояние между прихватками составляет 400-500 мм. При этом не допускается выполнение прихваток в тех местах, где сварные швы

пересекаются друг с другом. Перед началом сварки необходимо зачистить прихватки до металлического блеска. При обнаружении дефекта на прихватке, её необходимо удалить.

Техника сварки высокопрочных сталей

Сварку высокопрочных сталей начинают и заканчивают на технологических планках, которые приваривают к изделию. Кроме этого, при сварке необходимо создавать плавные переходы от сварных швов к основному металлу [7].

При двусторонней сварке стыковых швов, первый валик лучше наплавлять с противоположной стороны от прихваток. После наплавления каждого слоя, наплавленный металл и околошовную зону тщательно зачищают перед тем, как наплавить последующий слой. Если электрическая дуга оборвалась, то образовавшийся кратер зачищают и только после этого возбуждают дугу заново и продолжают сварку.

В процессе сварки не допускается попадание в зону сварки воды и недопустимо быстрое охлаждение сварного изделия по окончании сварки. Сварочные работы необходимо планировать таким образом, чтобы сварка выбранного участка была произведена в течение одной рабочей смены.

2.3. Модернизация универсального стенда для моделирования сварки в условиях ветра

Для исследования эффективности газовой защиты при сварке в защитных газах на ветру в лабораторных условиях, прежде всего необходимо разработать установку, которая имитирует реальные ветровые условия, т.е. создает сносящий поток с периодическими усилениями по случайному закону. Для этого необходимо иметь аэродинамическую трубу, которая обеспечивает как режим постоянного значения скорости ветра, так и режим случайного порыва ветра.

Существующие в настоящее время аэродинамические трубы являются

однорежимными, т.е. они создают ветер постоянной скорости, который можно регулировать во времени. Необходимо было обеспечить многорежимность аэродинамической трубы и создать универсальный стенд для моделирования сварки в условиях ветра.

Эта задача решается за счёт создания новой схемы управления и увеличения регулирующих элементов на существующей однорежимной аэродинамической трубе. С учетом достоинств и недостатков стендов, используемых ранее, была создана многорежимная труба и разработана специальная экспериментальная установка для исследования газовой защиты сварочной ванны при дуговой сварке в защитных газах в сносящих воздушных потоках.

Для разработки аэродинамической трубы определили диапазон необходимых скоростей ветра и элементы конструкции (Рис. 1). Для выбора скоростей ветра определили критические предельные значения. Известно, что у струй, помещенных в сносящий воздушный поток, происходит деформация профиля скорости, которая при скорости ветра 20 м/с снижает длину ядра до 1 D, поэтому при больших скоростях ветра защита может быть не обеспечена. Поэтому предельную скорость истечения на данном конфузоре установили в пределах 25 м/с.

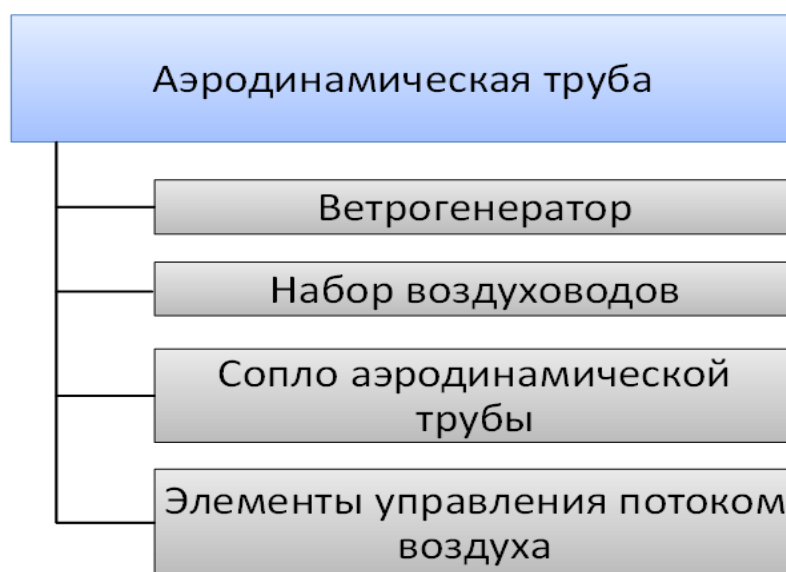


Рис. 1. Элементы конструкции аэродинамической трубы

Для конфузора аэродинамической трубы выбрали алюминиевую заготовку с диаметром $D = 260$ мм. Для создания скорости потока 25–30 м/с вентилятор обеспечивал производительность от 1,8 до 4,5 м³/ч, а диаметр входного отверстия сопла определили по максимально возможному диаметру заготовки с величиной $D = 238$ мм.

Коэффициент поджатия потоков в конфузоре $n = F_{\text{вх}}/F_{\text{вых}} = (\pi D_{\text{вх}}^2/4)/(\pi D_{\text{вых}}^2/4) = D_{\text{вх}}^2/D_{\text{вых}}^2$ составил 3,35. Выбранный коэффициент точно вписывается в теорию современных конфузоров с условием хорошего выравнивания потоков.

Кроме конфузора в трубу установили металлическую сетку, которая выравнивала профиль скорости и гасила турбулентность. Это связано с тем, что по современным представлениям, турбулентный поток движущейся жидкости состоит из молекул и атомов, между которыми хаотически перемещаются моли – отдельные сгустки или вихри вещества, имеющие разные размеры и скорость. Более крупные моли, проходя через сетку, делятся на более мелкие, т. к. через каждую ячейку могут пройти моли, поперечные размеры которых не превышают трех размеров ячеек. Попадая в прямой канал за сеткой, моли вырождаются тем скорее, чем меньше их размеры. Таким образом, с уменьшением размеров ячеек сетки снижается степень турбулентности за сеткой. Оставшаяся неравномерность потока сглаживается за счет конфузора. Так как внутренние стенки конфузора корректируют поверхностные линии ламинарного течения потока, то к форме конфузора предъявляются высокие требования по шероховатости, плавности и чистоте поверхности [12].

Образующая поверхности конфузора строится по плавной параболической кривой, таким образом, чтобы конец и начало этой кривой асимптотически стремились к положению прямой линии параллельно оси сопла. Движение потока по плавно сужающемуся каналу снижает неоднородность и турбулентность в потоке.

Для изменения и регулирования скорости потока устанавливали дроссельную заслонку для ограничения площади поперечного сечения канала и поступления воздуха в аэродинамическую трубу.

Для нарушения герметичности поверхности трубы устанавливали шиберную задвижку на боковой поверхности трубы, которая способствовала выходу воздуха в окружающую среду.

Оба эти элемента регулировали магнитными заслонками от пульта программного управления. Введение дополнительного регулирования решило проблему как медленного изменения скорости нарастания порыва за счёт регулирования дросселя, так и быстрого изменения нарастания скорости за счёт шиберной задвижки. Регулирование этими величинами создало необходимый для экспериментов режим движения скорости потока воздуха, т.е. решило проблему имитации реальной ветровой нагрузки.

Таким образом, разработали и изготовили аэродинамическую трубу, которая состоит из вентилятора, трубопровода и конфузорного сопла, а также узлов регулирования для создания динамического режима работы трубы при наложении на общее движение скорости ветра резких усилений – «порывов» (Рис. 2).

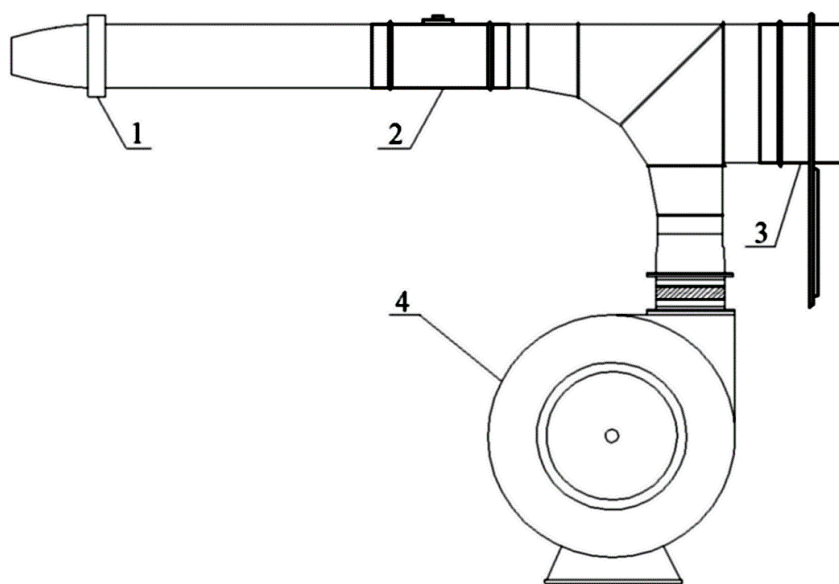


Рис. 2. Аэродинамическая труба: 1 – конфузорное сопло, 2 – дроссельная заслонка, 3 – шиберная задвижка, 4 – корпус вентилятора; 2 и 3 – узлы, создающие возможность реализации второго режима

Разработка системы управления позволила регулировать скорость потока воздуха, длительность и усиления ветра в ручном и автоматическом режиме, а также создать универсальный стенд для моделирования сварочных процессов как в режиме постоянной скорости ветра, так и в режиме с усилениями ветра. Стенд состоит из многорежимной аэродинамической трубы с элементами управления и установленной на штативе экспериментальной сварочной горелки, которая комплектуется цилиндрическим соплом промышленной горелки или конфузурным соплом, обеспечивающим газовую защиту сварочной ванны ядром струи в широком диапазоне чисел Рейнольдса (Re). Горелка может закрепляться неподвижно или автоматически двигаться с заданной скоростью.

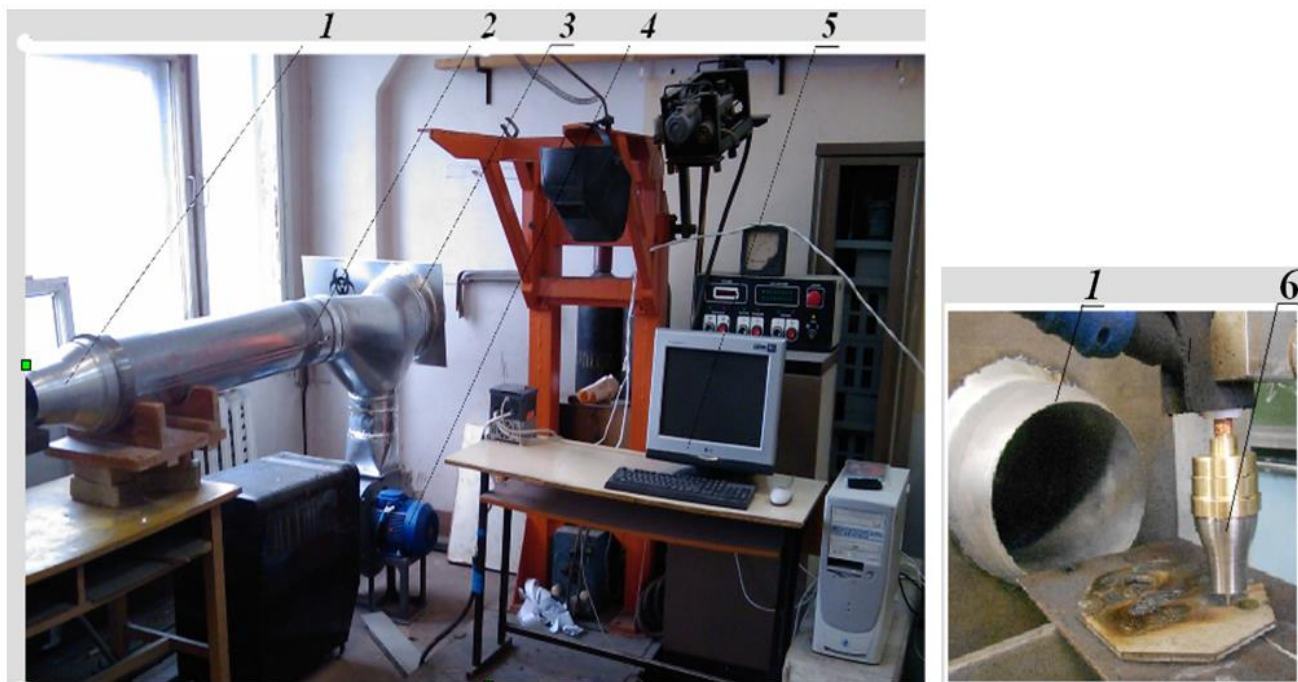


Рис. 3. Общий вид универсального стенда: 1 – конфузурное сопло; 2 – дроссельная заслонка; 3 – шиберная задвижка; 4 – корпус вентилятора; 5 – компьютерное управление; 6 – горелка

Для ведения сварки при различных углах наклона горелки использовали домкраты, приподнимающие рабочий стол с образцом на заданный угол, затем плоскость стола фиксировалась с помощью специальных подкладок (Рис. 4).



Рис. 4. Выполнение наплавки при различных углах наклона горелки

При проведении лабораторных исследований были использованы горелки с конфузорными соплами с установленным перед входным отверстием пакетом сеток различных диаметров (Рис. 5).

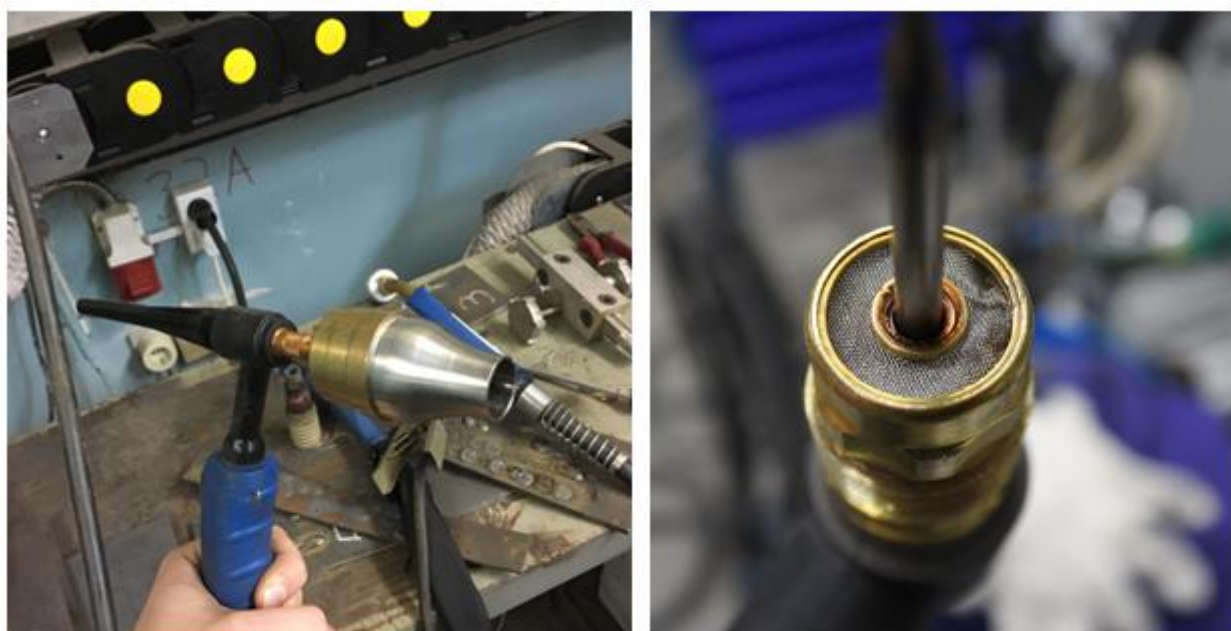


Рис. 5. Использование специального сопла при проведении исследований

Скорость потоков при проведении исследований измеряли с помощью термоанемометра Dwyer Series 471 непосредственно в зоне, в которой

производили сварку и определяли, как среднеарифметическое из 10 кратковременных замеров. Он позволял измерять скорости потока в пределах 0–75 м/с с точностью до 0,1 м/с, т.е. при низких скоростях струи и газа величина погрешности достигала менее 1 % величины измеряемого результата. Термоанемометр способен фиксировать только величину скорости без направления, поэтому по результатам замеров возможно построение не линий тока, а изотархов (линий, соединяющих точки с одинаковым значением скорости движения потоков воздуха) (Рис. 6).



Рис. 6. Измерение скорости ветра термоанемометром

Измерение температуры газовой струи измеряли с помощью пирометра «Fluke» (Рис. 7).



Рис. 7. Измерение тепловых полей пирометром «Fluke»

В результате модернизировали универсальный стенд и разработали методику, которые обеспечивают необходимую точность экспериментов при

изучении ветроустойчивости струйной газовой защиты, в целях разработки специального оборудования и технологии сварки на открытых площадках.

Авторами [1-3] исследован и разработан способ сварки с газовой защитой сварочной ванны, осуществляемой специализированной сварочной горелкой с конфузорным соплом и сеткой, устанавливаемой во входном сечении сопла.

Такая конструкция сопла имеет улучшенные аэродинамические характеристики, что способствует наиболее эффективному использованию защитного газа и снижению его расхода [4, 5].

2.4. Цифровое моделирование параметров струи защитного газа при сварке в условиях ветра

В настоящее время важным условием совершенствования сварочного производства является не только развитие теоретических основ сварки с использованием новейших достижений в различных областях фундаментальных и прикладных наук, но и создание высокоэффективных методов и средств моделирования и имитации сварочных процессов [15, 18].

Применение математических методов и математического моделирования сварочных процессов позволяет исследовать процессы, происходящие в сложных технологических системах, и не только получить описание их основных закономерностей, но и эффективно управлять ими. Математическое моделирование позволяет оптимизировать условия протекания процесса образования сварного соединения, предотвратить появление недопустимых дефектов сварных швов, соединений, конструкций и одновременно повысить производительность сварочных операций [20].

В связи с тем, что при сварке на ветру газовая защита сварочной ванны обеспечивается ядром струи, содержащим исходную концентрацию защитного газа, которое деформируется и сокращается в условиях ветра, конструкция сварочной горелки должна обеспечивать жесткость защитной струи при оптимальном расходе защитного газа.

Одним из направлений создания эффективной газовой защиты в условиях ветра является создание принципов ее организации путем совершенствования конструкций сварочных горелок [11].

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что сохранение ядра защитной струи при высоких скоростях ее истечения в условиях сносящих потоков может обеспечиваться только горелками с конфузурной проточной частью (Рис. 8, б). Сварочные горелки с так называемой цилиндрической проточной частью не могут обеспечить сохранение жесткости струи при высоких скоростях истечения газа (Рис. 8, а).

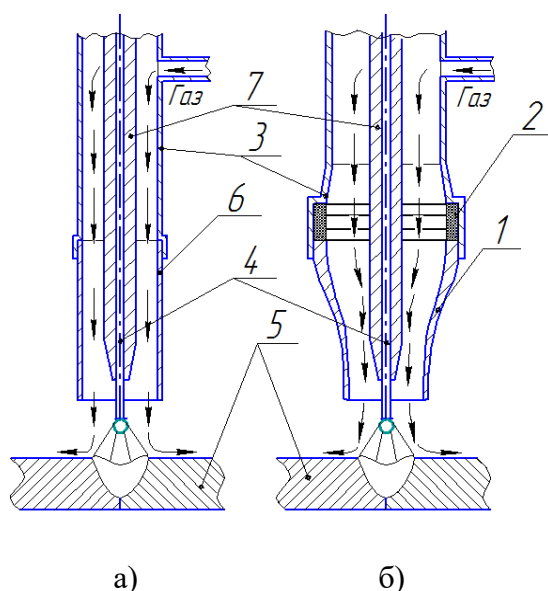


Рис. 8. Схема истечения защитного газа из сварочного сопла:
 а – цилиндрическое сопло; б – конфузурное сопло;
 1 – конфузурное сопло; 2 – пакет сеток; 3 – корпус; 4 – электродная проволока; 5 – изделие; 6 – цилиндрическое сопло; 7 – мундштук

По результатам расчетов установлено, что при использовании конфузурного сопла по сравнению с цилиндрическим соплом скорость истечения газа при одинаковом его расходе возрастает примерно в 2,6 раза.

Проведение экспериментов осуществляли на созданном лабораторном стенде, состоящим из сварочной горелки, двухрежимной аэродинамической трубы с системой управления, создающей различные скорости воздушного потока [10].

Проведение эксперимента требует наличия громоздких установок, дорогостоящего оборудования и временных затрат. Кроме того, сложность физических явлений, протекающих при высокой температуре и малых размерах сварочной ванны, затрудняет процесс исследования в условиях сносящих воздушных потоков.

Для преодоления возникающих затруднений широко используется компьютерное моделирование сварочных процессов. Компьютерные модели базируются на известных математических зависимостях и позволяют наглядно представить протекающие при сварке процессы и полученные при этом результаты, они значительно сокращают трудоемкость и длительность определения оптимального решения, а также увеличивают точность полученных результатов в сравнении с вычисленными вручную.

На основе численных методов построена расчетная часть большинства современных CAE систем, представленных на рынке в большом количестве и широко используемых для решения задач гидродинамики и теплообмена, таких как ANSYS CFX и Fluent, Solid Works Flow Simulation, Flow Vision, FLOW-3D и другие. Однако программные продукты имеют практическую ценность только в том случае, если используют модели и зависимости, адекватно описывающие процесс и обеспечивающие хорошую сходимость результатов.

С помощью программной среды ANSYS Fluent, предназначенной для расчета задач газо- и гидродинамики, построили модель процесса истечения защитного газа из сопла сварочной горелки и провели оценку картины формирования и поведения струи с удалением от среза сопла при сварке в защитном газе [3].

На начальном этапе исследования для поставленной задачи ищется стационарное решение двумерной осесимметричной модели без учета бокового ветра. Рассматриваемые скорости истечения газа позволяют решать задачу в существенно дозвуковом приближении, т. е. газ считается несжимаемым. Движение и теплообмен в жидкости и газе в программном

комплексе ANSYS Fluent моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса, описывающих законы сохранения массы, импульса и энергии этих сред. Поскольку используемые в математической модели системы дифференциальных уравнений не имеют аналитического решения, они приводятся к дискретному виду и решаются на некоторой расчетной сетке методом конечных объемов.

В качестве расчетной области рассматривали сопло сварочной горелки после пакета сеток и прилежащую область длиной 1 м от выходного сечения сопла. Размеры области выбраны таким образом, чтобы вместить основные возмущения потока.

На Рис. 9 приведен вид расчетной области и сетка из 54500 ячеек для цилиндрического и конфузорного сопел (с отражением по оси симметрии).

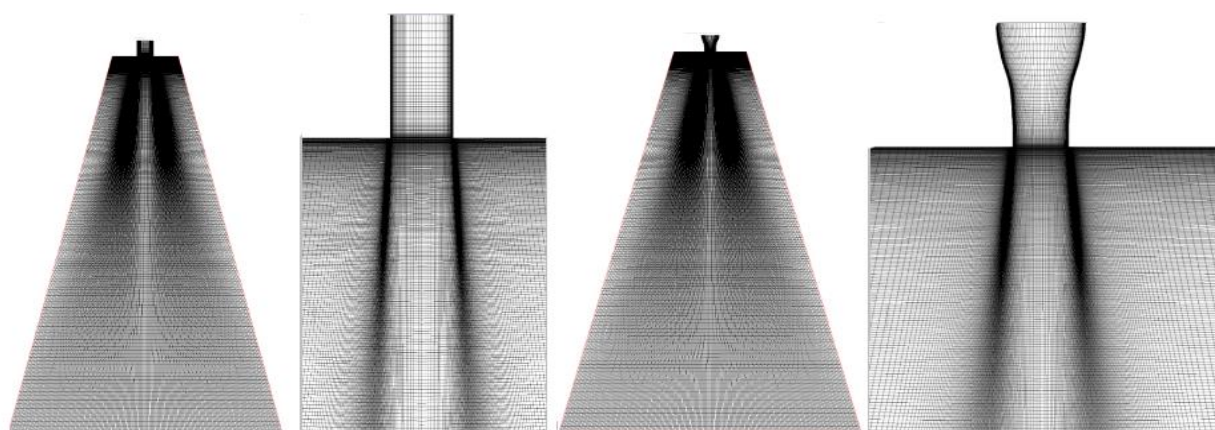


Рис. 9. Вид расчетной области и расчетных сеток для цилиндрического (слева) и конфузорного (справа) сопла

На входе в область задавали равномерный профиль постоянной скорости истечения газа, на стенках сопла скорость газа принимали равной нулю, на границах внешней области задавали условие свободного протекания газа, давление на внешних границах расчетной области принимали равным атмосферному.

Предполагали, что расчетная область заполнена защитным газом, в данном случае аргоном. Для обоих сопел рассматривали несколько величин

скорости газа на входе: 0,5; 1,0; 2,5 и 5,0 м/с, что соответствует примерным объемным расходам защитного газа 6, 12, 30 и 60 л/мин.

В расчетной области численно решали систему уравнений Навье-Стокса (уравнения движения вязкой жидкости), осредненных по Рейнольдсу (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS), состоящую из уравнения неразрывности, которое демонстрирует закон сохранения массы, и уравнения переноса, описывающее перенос сохраняющейся скалярной величины в пространстве. Систему принимали замкнутой с помощью модели турбулентности k- ω SST [19].

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = \frac{-\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j),$$

где u – поле скоростей (u^- – скорость, осредненная по времени, м/с,

u' – пульсационная составляющая, м/с);

p – давление, Па;

μ – молекулярная вязкость, Па*с.

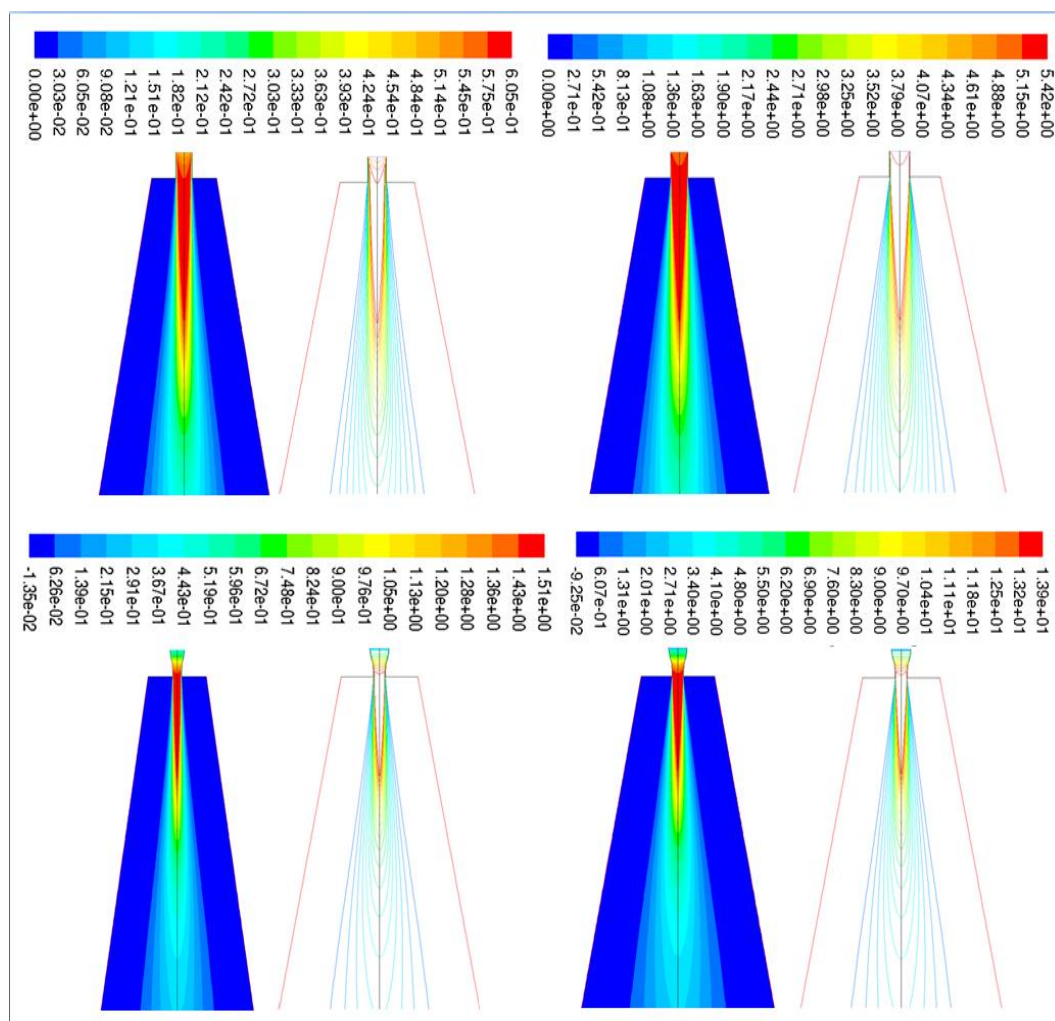


Рис. 10. Продольное осесимметричное поле скоростей истечения струи на выходе из цилиндрического (вверху) и конфузорного сопла (внизу); скорость потока на входе 0,5 м/с (слева), 5 м/с (справа)

Моделирование подтвердило увеличение скорости истечения струи из конфузорного сопла, ее динамического напора, что обнаруживает способность конфузорного сопла обеспечивать жесткость и ветроустойчивость струи (Рис. 10).

Для оценки достоверности расчетных данных, полученных в среде ANSYS, провели экспериментальные исследования скорости струи на срезе сопла и динамического напора струи при различных расходах газа с помощью цифрового термоанемометра Dwyer Series 471.

Результаты первого этапа компьютерного моделирования предлагались для свободных струй, развитие которых не ограничено твердой поверхностью. Однако для защитных струй необходимо изучение поведения зоны газовой

защиты при взаимодействии струи со сносящим потоком в процессе удара о защищаемую поверхность. Эти вопросы связаны с распределением поля скоростей и поля концентраций защитного газа в указанных условиях, которые довольно сложно оценить на практике [10].

В программной среде ANSYS Fluent моделировали установившийся процесс дуговой сварки в среде углекислого газа. В модели учитывали влияние ветра, электрода и плоскости, имитирующей свариваемую поверхность. Расчетная область указывалась в виде круга, в центральной части которого располагается геометрическая модель конфузорного сопла с подаваемой в зону сварки электродной проволокой и поверхность в качестве свариваемого изделия.

При решении трехмерной задачи предполагали, что расчетная область заполнена углекислым газом, в качестве окружающей атмосферы принимался воздух. Для конфузорного сопла с выходным диаметром сопла 20 мм и диаметром электрода 1,2 мм рассматривали несколько величин расхода газа: 10, 20, 40 и 60 л/мин. Скорость ветра изменяли от 2 до 10 м/с. Расстояние от среза сопла до свариваемой поверхности принимали 0,5–3,0 диаметров сопла. Эффективность газовой защиты оценивали по распределению концентрации газа над защищаемой поверхностью. В областях с высоким градиентом физических параметров было дополнительно проведено уплотнение начальной сетки. Сетка уплотнялась внутри и на выходе из сопла, на свариваемой поверхности (Рис. 11).

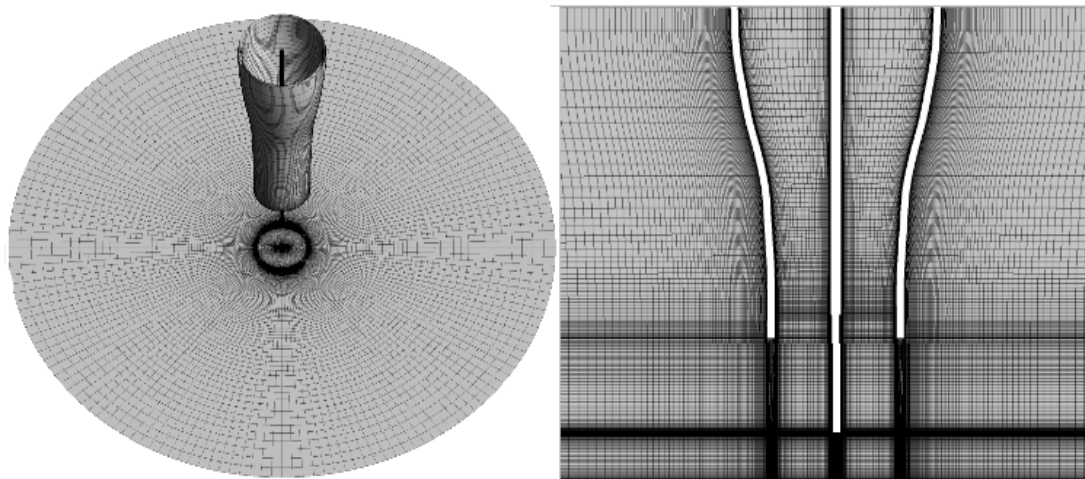


Рис. 11. Вид расчетной области для конфузорного сопла

В процессе построения одной серии виртуальных моделей поддерживали постоянное соотношение расстояния от среза сопла до свариваемой поверхности и выходного диаметра сопла H/D_0 , скорости сносящего воздушного потока V_v и постепенно уменьшали расход защитного газа Q_g . Затем изменяли один параметр и строили другие серии компьютерных моделей. Визуально наблюдали по мере снижения расхода защитного газа за изменениями конфигурации зоны газовой защиты на поверхности.

По результатам была получена общая картина распределения скоростей потока и определены границы ядра струи и области распределения концентрации защитного газа при различных скоростях ветра.

Поле скоростей сносящего потока и газовой защитной струи характеризуют динамическую картину деформации струи при ударе о свариваемую поверхность (Рис. 12).

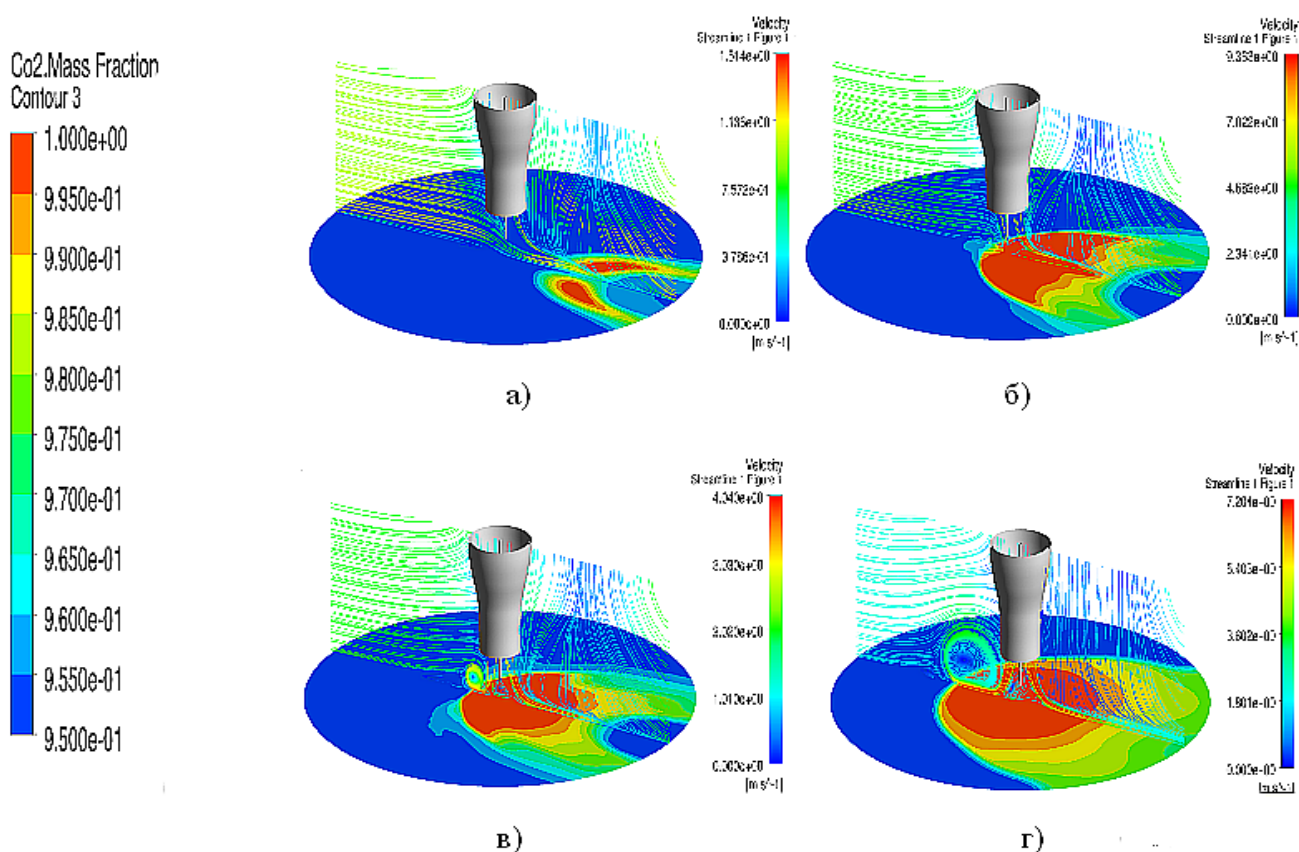


Рис. 12. Цифровая трехмерная модель деформации газовых потоков при сварке в условиях ветра

Эффективность газовой защиты определяет качество и механические характеристики сварных соединений, поэтому определение оптимального расхода и скорости истечения защитного газа имеет первостепенное значение.

С увеличением величины H/D_0 и увеличением скорости ветра газовая защита ухудшается и требуется увеличение расхода защитного газа. При определенных соотношениях скорости струи и ветра V_c/V_v защита полностью пропадает (Рис. 12, а). При увеличении V_c/V_v на пятне газовой защиты образуется выступ, который, вероятно, обусловлен появлением на боковой поверхности струи появившихся вихрей.

Это обусловлено тем, что сносящий поток, двигаясь навстречу защитной струе, затормаживается и, отрываясь от поверхности, образует вихрь перед струей (Рис. 12, б, в), который с ростом V_c/V_v увеличивается и удаляется от оси струи, линии поля скоростей распределяются более равномерно и постепенно

смещаются вверх по потоку, уменьшая первоначальную деформацию струи (Рис. 12, г).

Результаты моделирования также показали, что при воздействии ветра происходит деформация защитной струи и смещение области распределения максимальной концентрации защитного газа по направлению движения ветра (Рис. 13).

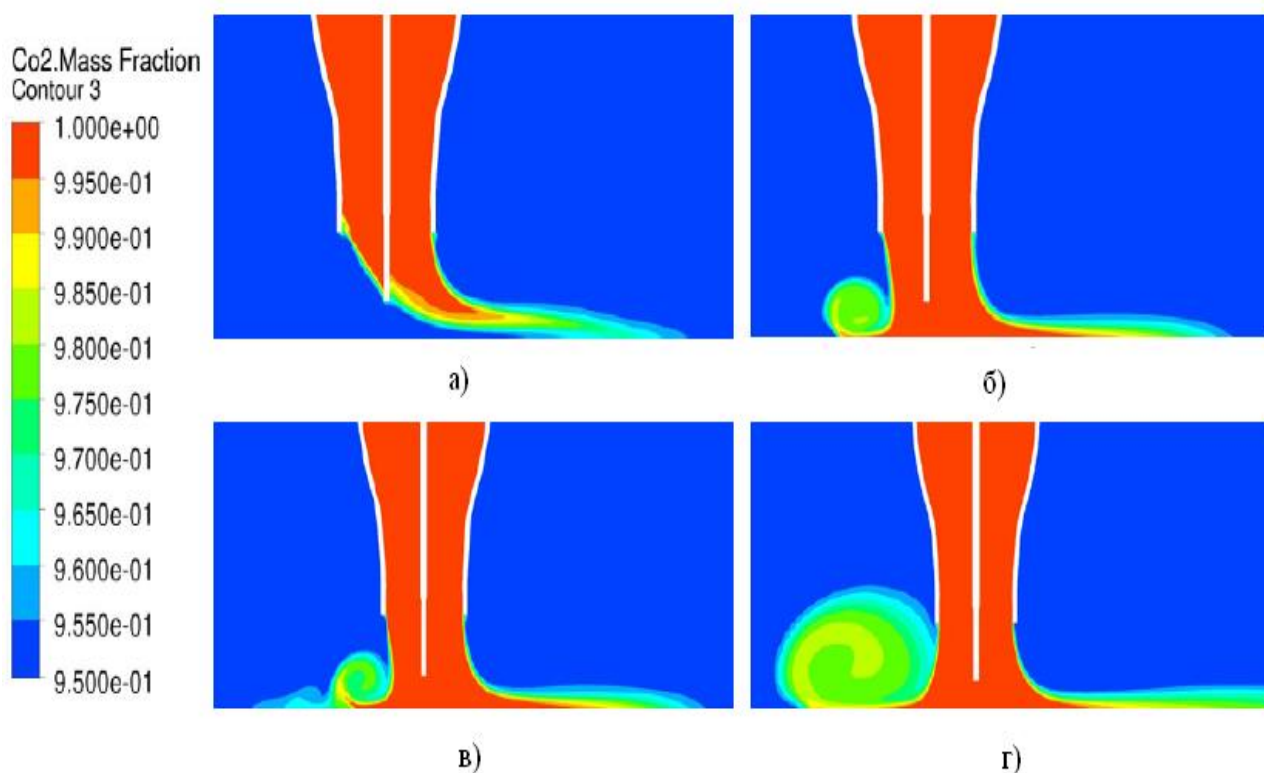


Рис. 13. Деформация защитной струи при ударе о твердую поверхность при скорости ветра 5 м/с: а – $V_c/V_B = 1,0$; б – $V_c/V_B = 1,5$; в – $V_c/V_B = 2,0$; г – $V_c/V_B = 2,5$; $H/D_0 = 1$

Таким образом, по мере приближения к значению $V_c/V_B = 3$ ядро струи постепенно приобретает симметричную форму, возрастает градиент поля концентрации с наветренной стороны и уменьшается с подветренной, то есть строение струи приближается по форме к струе, вытекающей в неподвижную среду. Изменения пятна газовой защиты практически не происходит, что позволяет при сварке обеспечить симметричность и однородность структуры и свойств металла шва и околошовной зоны.

Резюмируя приведенное выше, можно отметить, что при разработке технологических процессов сварки в защитных газах на ветру, совершенно нецелесообразны большие расстояния от среза сопла до свариваемой поверхности. В то же время, при $H/D_0 \leq 1$, можно успешно решать вопросы газовой защиты при $V_c/V_B \leq 2$.

Результаты моделирования также показали, что при $H/D_0 \geq 2$ для обеспечения эффективной газовой защиты скорость струи должна более, чем в 3 раза превышать скорость ветра, что существенно ограничивает и технические и экономические показатели технологического процесса. Поэтому действительно рабочими расстояниями от среза сопла до свариваемой поверхности должны быть диапазоны изменения $0,5 < H/D_0 \leq 1$.

Анализ векторных полей внешнего и внутреннего потока позволяет выявить при обтекании конструктивных элементов, расположенных в сопле горелки, отсутствие (Рис. 14, а) или наличие циркуляционных зон (вихрей) (Рис. 14, б, в, г).

Тороидальный вихрь возникает в центре удара струи из-за наличия в центре электрода или мундштука. Вихрь соприкасается с защищаемой поверхностью, электродом и ядром струи. На размеры вихря существенно влияет скорость истечения струи. При возрастании скорости струи высота вихря уменьшается. В связи с тем, что формирование циркуляционной зоны в ядре струи может быть причиной нарушения газовой защиты при сварке, при проектировании сварочных горелок необходимо это учитывать и поверхности наконечника следует придать форму, улучшающую ее обтекаемость [12].

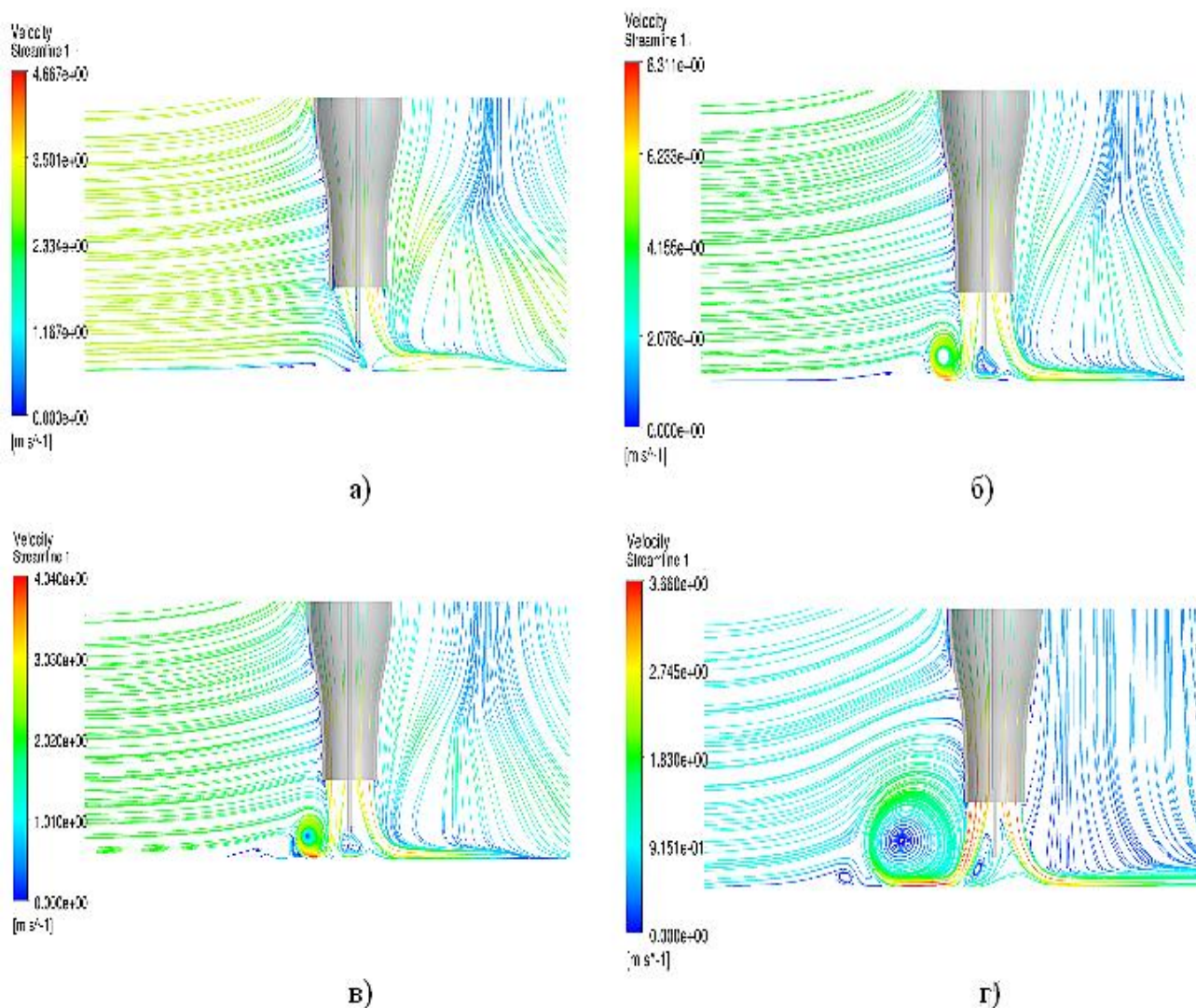


Рис. 14. Распределение поля скоростей и поля концентраций при ударе струи о твердую поверхность при скорости ветра 5 м/с: а – $V_c/V_B = 1,0$; б – $V_c/V_B = 1,5$; в – $V_c/V_B = 2,0$; г – $V_c/V_B = 2,5$; $H/D_0 = 1$

Полученная картина практически полностью совпадает с данными экспериментальных исследований, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Ранее проведенные эксперименты указывают на то, что на формирование зоны газовой защиты влияют режимные параметры сварочного процесса. Возможность применения высоких сварочных режимов ограничивается нарушением зоны газовой защиты. И причина этого нарушения кроется в функционировании тороидального вихря.

С увеличением сварочного тока дуги и размеров сварочной ванны вихрь начинает интенсивно увеличиваться в объеме, активно воздействуя на газовый

поток ядра, что приводит к потере устойчивости струи и подосу воздуха в зону сварочной ванны.

Ядро защитной струи, набегающее при горении дуги нормально на плоскую металлическую поверхность, в процесс удара растекается по ней в виде пятна круглой формы. Результаты показали, что с уменьшением скорости истечения защитной струи при постоянной скорости ветра с наветренной стороны максимальная газовая защита постепенно перемещается по поверхности, удаляясь от оси струи, пятно изменяет свою форму, что свидетельствует о проникновении воздуха в защищаемую зону. Этот участок, характеризующий врыв на защищаемую поверхность воздуха, уменьшается с увеличением скорости истечения струи.

Помимо качественной оценки газовой защиты определили количественный показатель эффективности газовой защиты в зависимости от отношения V_c/V_B (Рис. 15).

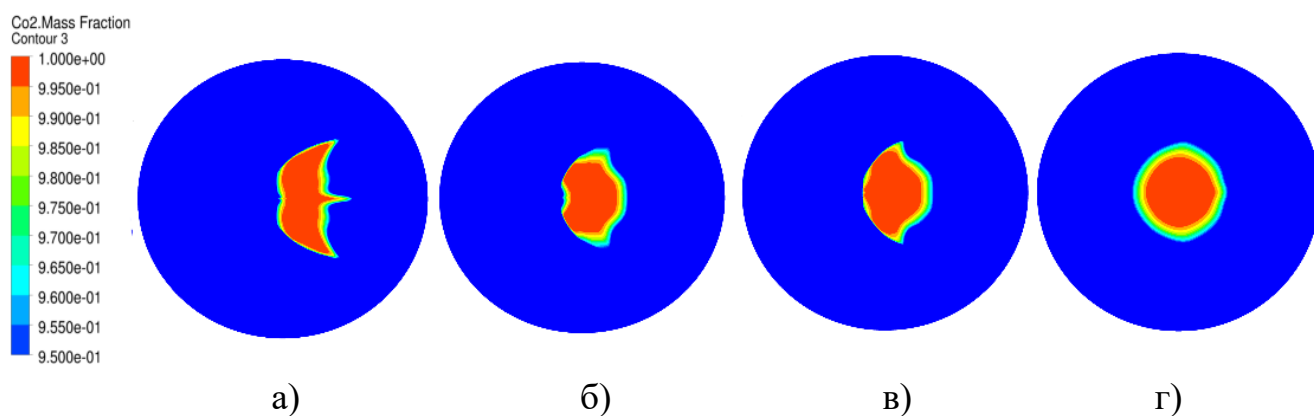


Рис. 15. Поле распределения концентрации защитного газа: $V_c/V_B = 1,0$ (а); $V_c/V_B = 1,5$ (б); $V_c/V_B = 2,0$ (в); $V_c/V_B = 2,5$ (г); $H/D_0 = 1$

В качестве критерия эффективности газовой защиты предложена формула, характеризующая отношение площади с максимальной концентрацией защитного газа S_{\max} , к общей площади зоны газовой защиты S , выраженный в %: $\mathcal{E}_{ГЗ} = (S_{\max}/S)100\%$.

Таким образом, на основе математического моделирования влияния ветра на процесс истечения защитной газовой струи в программе ANSYS, с высокой степенью достоверности создали модель истечения газовой струи, установили картину изменения эффективной газовой защиты при использовании конфузорного сопла, в зависимости от расхода защитного газа, диаметра сопла, начальной скорости газовой струи на входе в сопло, скорости ветра и расстояния до свариваемой поверхности.

На Рис. 16 представлены результаты, полученные при $H/D_0 = 1$.

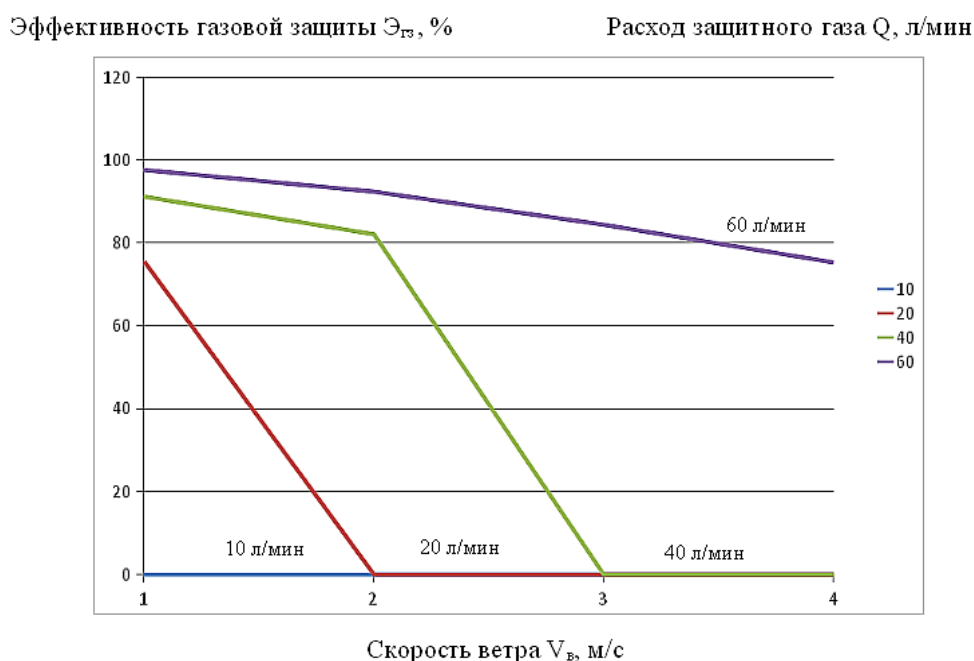


Рис. 16. Зависимость эффективности газовой защиты от расхода газа, скорости ветра и расстояния от среза сопла до свариваемой поверхности

Результаты моделирования показали, что изменение качества газовой защиты и распределение концентрации защитного газа в зоне сварки в большей мере зависит от расстояния от среза сопла до свариваемой поверхности и от соотношения скорости струи, определяемой расходом защитного газа, к скорости ветра (Рис. 17).

Из Рис. 17 очевидно, что с увеличением скорости ветра газовая защита ухудшается и требуется увеличение расхода защитного газа.

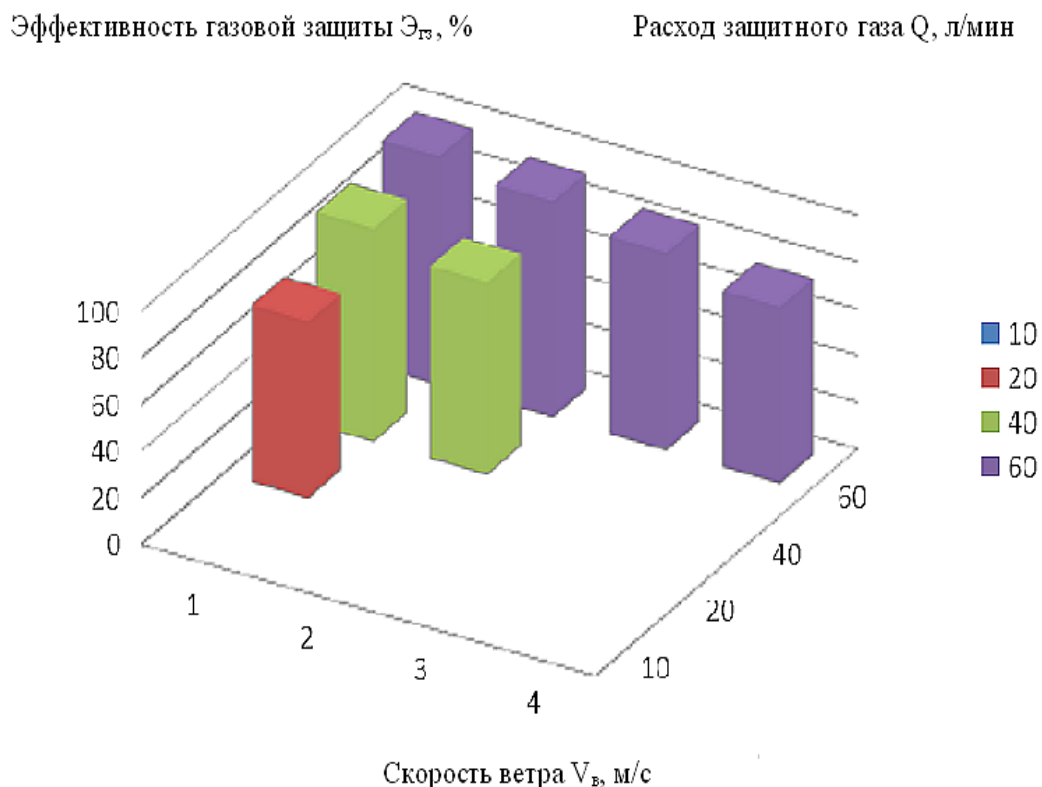


Рис. 17. Влияние основных технологических факторов на эффективность газовой защиты в условиях изменяющейся скорости ветра

Таким образом, в результате моделирования установили, что применение конфузорного сопла при сварке на ветру обеспечивает жесткость защитной струи и максимальную эффективность газовой защиты при расстоянии от среза до свариваемой поверхности, равном 0,5 диаметра сопла и при скорости струи, в 1,8 раза превышающую скорость ветра, что практически полностью подтверждает экспериментальные данные, полученные ранее.

Также с помощью моделирования установили характер снижения эффективности газовой защиты при изменении угла наклона сварочной горелки (Рис. 18). При решении математической задачи рассматривали несколько вариантов углов наклона горелки: 10, 15, 30, 40, 60, 65, 70, 80°. Угол наклона горелки измерялся между нормалью к свариваемой поверхности и осью симметрии головки. Визуально наблюдали за смещением области распределения максимальной концентрации защитного газа. Математические данные подтвердили результаты о том, что деформация зоны газовой защиты

начинается с угла в 15° . Затем очертания зоны газовой защиты начинают превращаться из круглых в эллипсообразные, и при углах наклона 70° и более эффективность газовой защиты нарушается полностью.

Моделирование продольного поля скоростей потока при наклоне сопла под углом $15-60^\circ$ сопла показало, что при начальной скорости истечения газа 6 м/с деформация симметрии защитного газового пятна происходит при наклонах более 45° . При скорости истечения газа 18 м/с происходит деформация симметрии защитного пятна аргона на поверхности. При угле наклона 45° обеспечивается наиболее равномерное течение защитного газа, что снижает вероятность попадания воздуха в зону локальной защиты, рис. 18, 19.

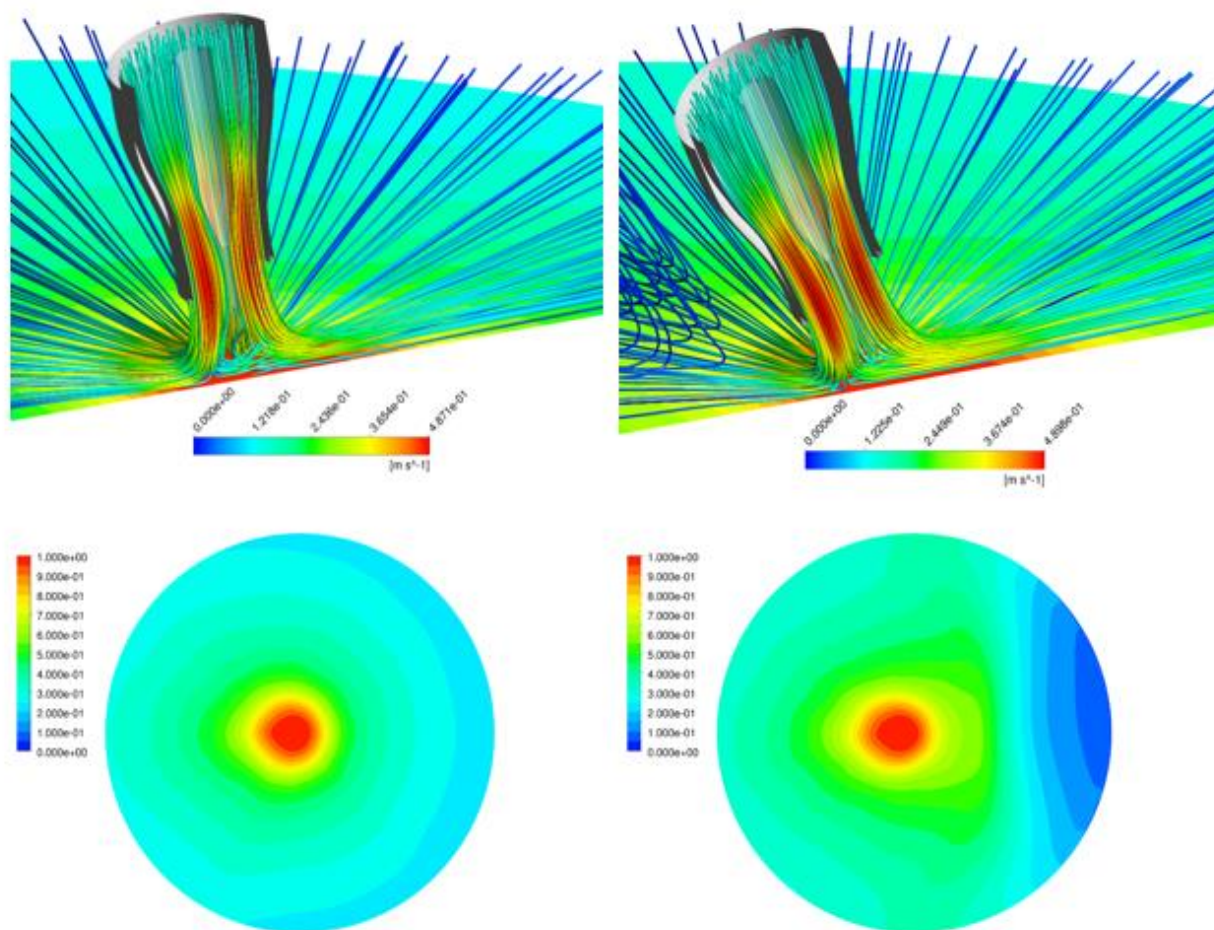


Рис. 18. Продольное поле скоростей истечения аргона и поперечное распределение концентрации защитного газа при углах наклона 15° (а); 30° (б). $V_c = 6 \text{ м/с}$

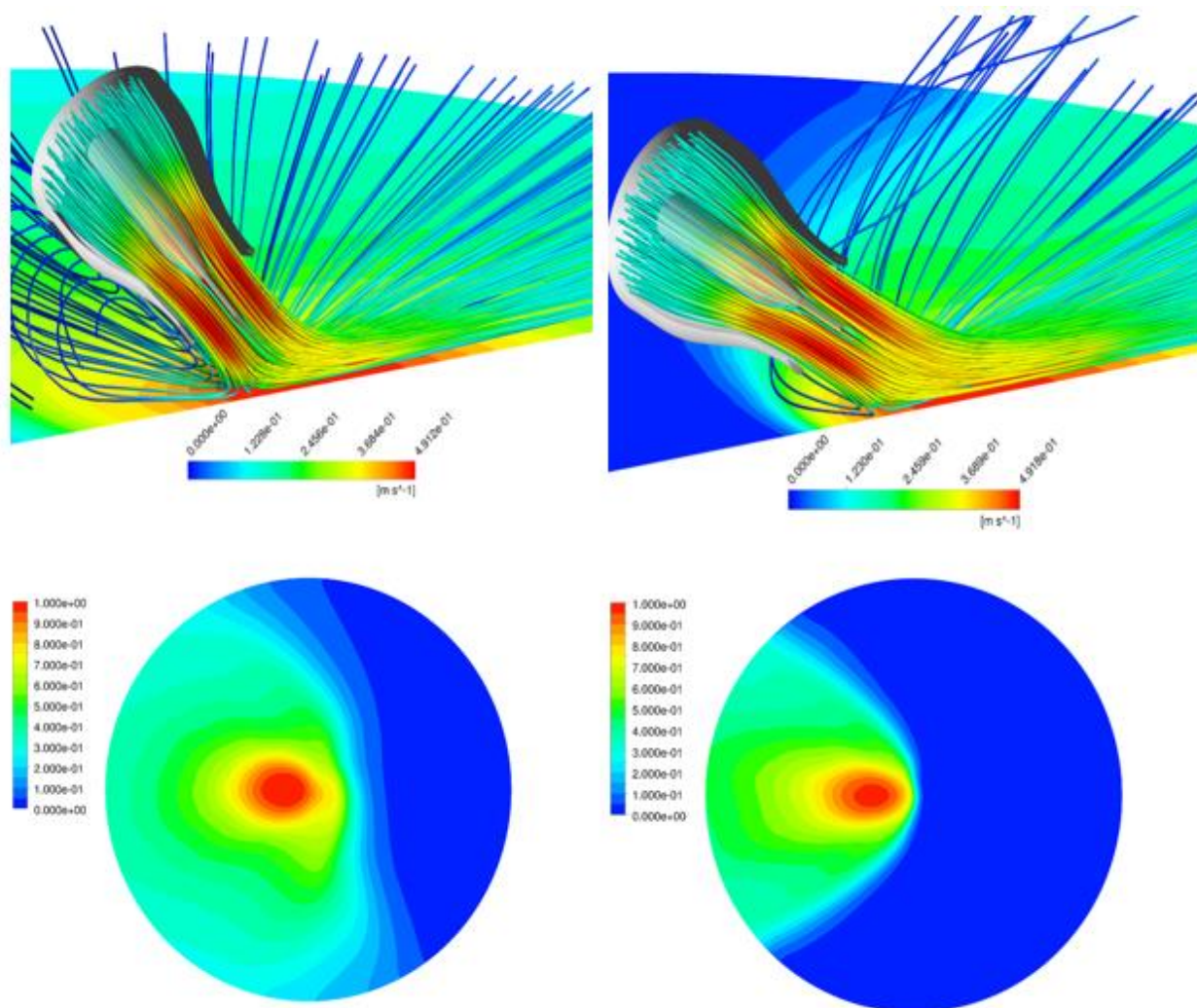


Рис. 19. Продольное поле скоростей истечения аргона и поперечное распределение концентрации защитного газа при углах наклона 45° (а); 60° (б). $V_c = 6$ м/с

Максимальная концентрация защитного газа, скорость истечения защитного газа, а значит и жесткость струи, обеспечивается при данной конструкции конфузорного сопла и расходах газа более 12 л/мин при углах наклона $30-60^{\circ}$, рис. 20, 21.

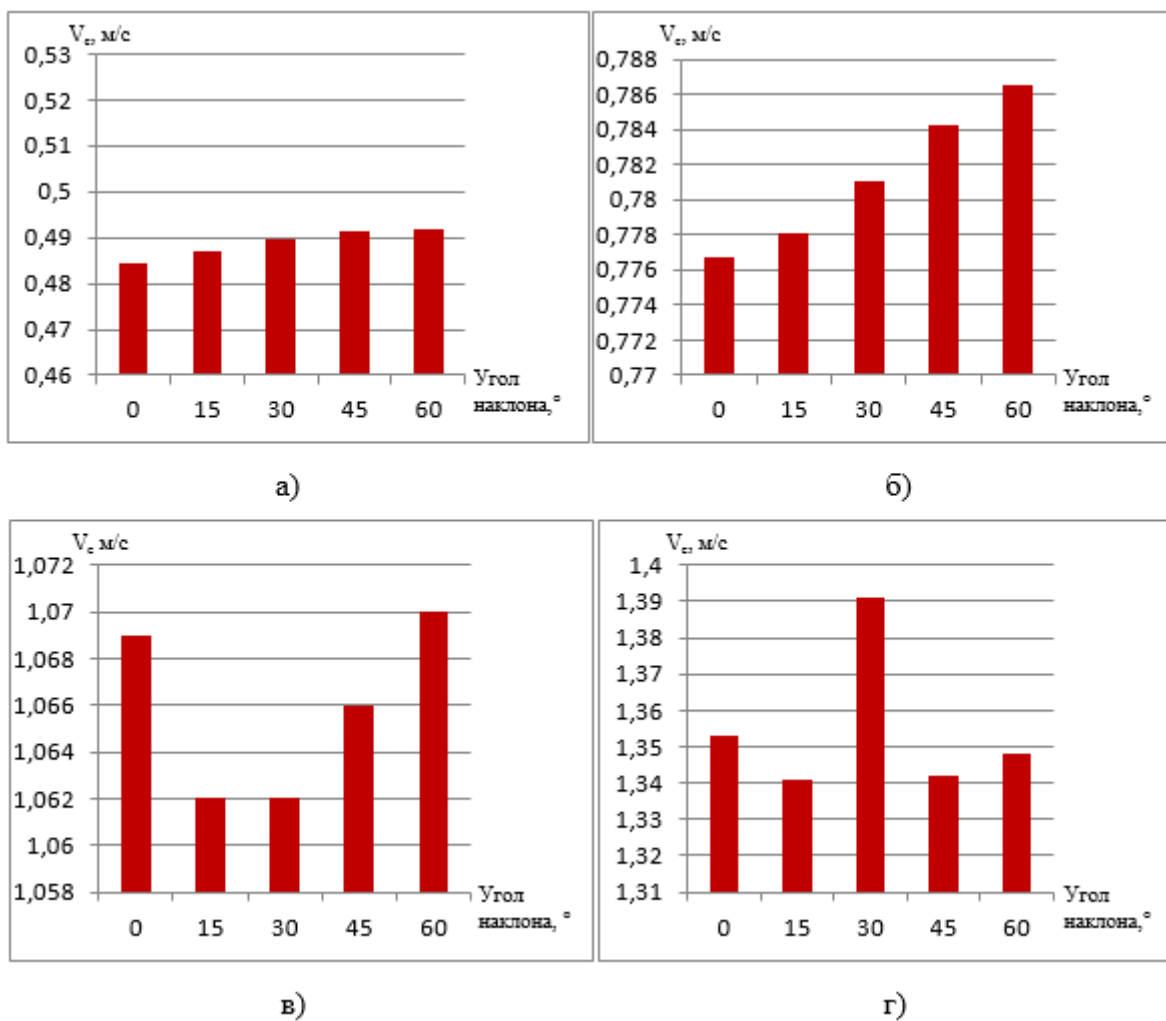


Рис. 20. Диаграммы скоростей истечения защитного газа при различных углах наклона (0° ; 15° ; 30° ; 45° и 60°), при расходе защитного газа: 6 л/мин (а); 12 л/мин (б); 20 л/мин (в); 30 л/мин (г)

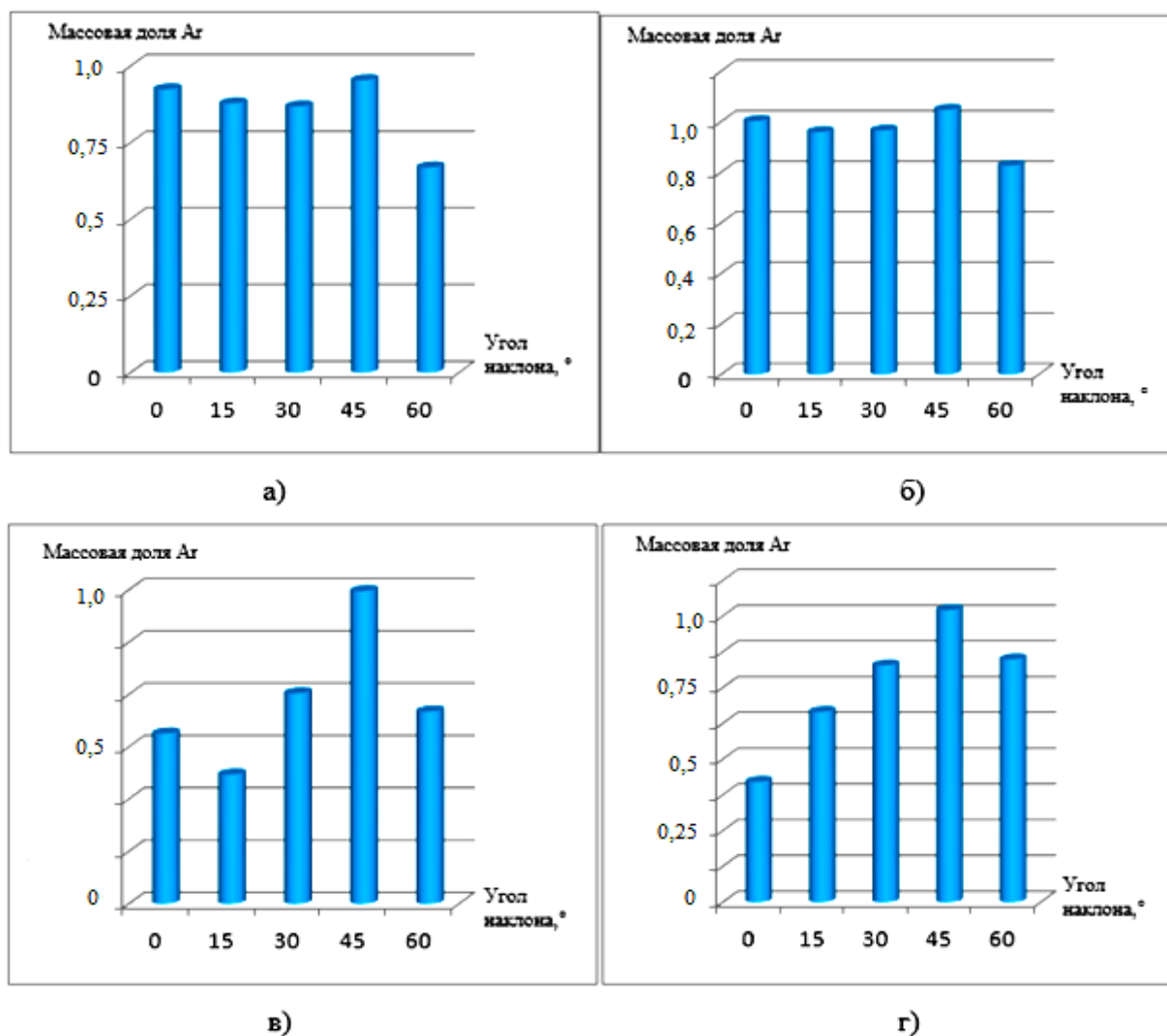


Рис. 21. Диаграммы изменения концентрации защитного газа при различных углах наклона (0° ; 15° ; 30° ; 45° и 60°), при расходе защитного газа: 6 л/мин (а); 12 л/мин (б); 20 л/мин (в); 30 л/мин (г)

Влияние угла наклона на эффективность газовой защиты изучали методом пробы на пятно по наличию цветов побежалости на отпечатке оплавленного пятна на поверхности нержавеющей стали 08X18H9T, рис. 22.

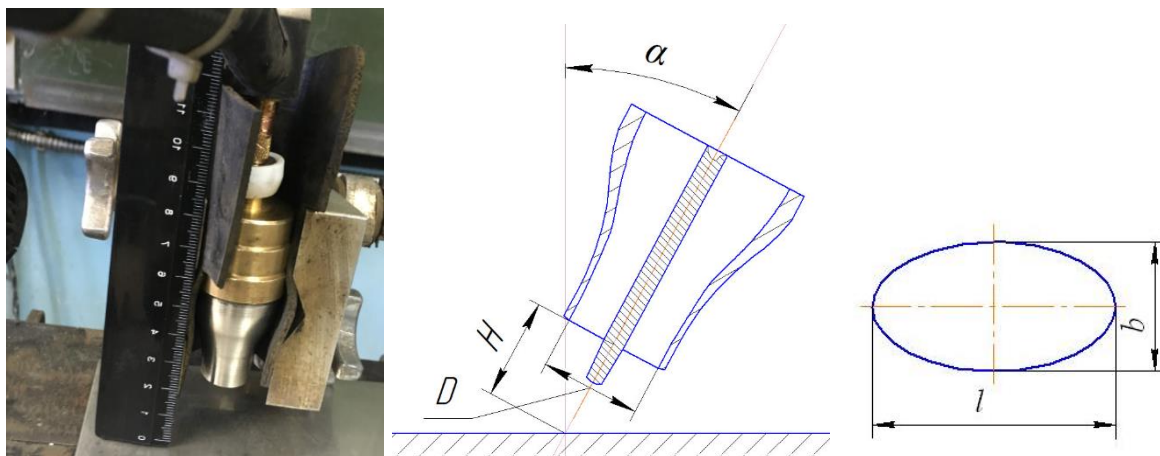


Рис. 22. Наклонное расположение конфузорного сопла: H – расстояние между срезом отверстия сопла и защищаемой поверхностью, D – внутренний диаметр среза сопла; α – угол наклона горелки (а); схема пятна газовой защиты при изменении угла наклона горелки: l – длина зоны газовой защиты; b – ширина зоны газовой защиты (б)

При проведении экспериментов рассматривали несколько вариантов углов наклона горелки: от 0 до 70° , рис. 23. Конфузорные сопла выбирали диаметром 16, 18, 20 и 22 мм при расходах газа от 6 до 60 л/мин.

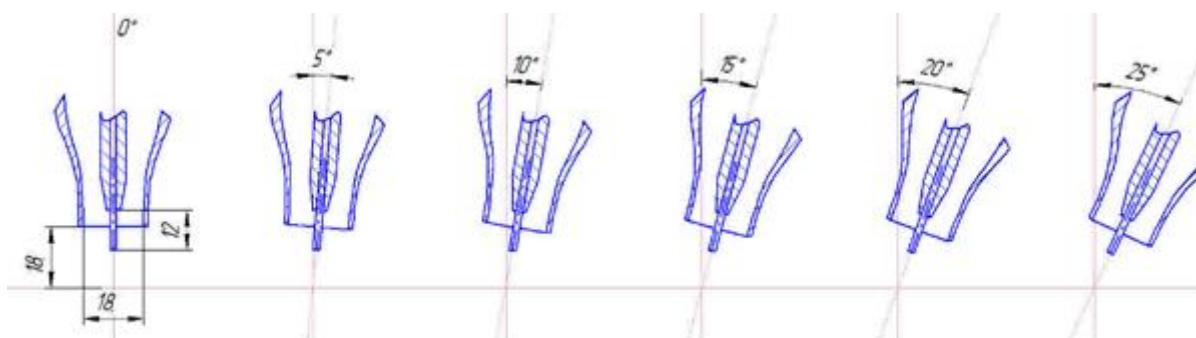


Рис. 23. Схема изменения угла наклона горелки

При угле наклона более 25° начинается деформация зоны газовой защиты. Со стороны тупого угла очертания зоны газовой защиты начинают превращаться из круглых в эллипсообразные. Со стороны острого угла наклона очертания стремятся стать треугольными. Особенно четко это проявляется при углах наклона 55° и 65° . При углах 70° и более эффективность газовой защиты нарушается. Деформация зоны газовой защиты приводит к тому, что ширина зоны остается неизменной, а длина увеличивается, рис. 24.

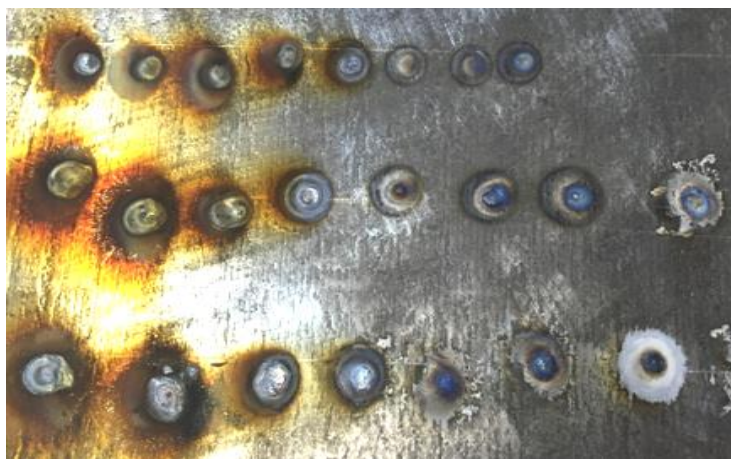


Рис. 24. Определение зоны газовой защиты в зависимости от угла наклона горелки пробой на «пятно»

Результаты исследования подтвердили, что оптимальным углом, при котором сохраняется газовая защита, является угол 45° . При большом угле наклона горелки углом назад и повышенных скоростях истечения защитного газа наблюдается подсос воздуха в зону сварки и нарушение защиты.

2.5. Исследование влияния формы электрода (мундштука) на качество осуществляемой газовой защиты

Картина движения защитной струи при ударе об экран отличается от аналогичной картины удара начального участка затопленной струи тем, что по оси первой располагается металлический цилиндр (неплавящийся электрод или мундштук для плавящегося электрода), который усложняет картину развивающихся процессов. Роль электрода (мундштука) многогранна. Во-первых, как твердое тело, находящееся в центре струи, электрод стабилизирует все движение струи, делая его более устойчивым. Во-вторых, электрод влияет на размеры защитной струи. И в – третьих, с наличием электрода связано развитие процессов, с одной стороны способствующих увеличению эффективности газовой защиты, а с другой – ее уменьшению. Находясь в центре защитной струи, электрод располагается над критической точкой. На его поверхности образуется ламинарный пограничный слой, движущийся к критической точке струи. Это порождает возникновение над

сварочной ванной тороидального вихря, который может способствовать улучшению или ухудшению эффективности газовой защиты.

Следующим этапом совершенствования сварочной горелки стал вопрос формы мундштука [4]. Так как он находится непосредственно в зоне протекания струи защитного газа, он напрямую влияет на турбулентность потока, и, как следствие, на однородность профиля скоростей в потоке струи на выходе из сопла. Этот вывод следует из того, что характер течения защитного газа определяется формой проточной части горелки, то есть геометрией поверхности сопла и поверхности наконечника мундштука. Следовательно, от формы наконечника мундштука зависит и качество осуществляемой газовой защиты.

А, как нам известно, конструкция сварочной горелки должна обеспечивать по возможности однородный профиль скоростей на выходе из сопла и максимально снижать степень турбулентности потока. Во избежание нарушения защиты при сварке, поверхности наконечника следует придать форму, улучшающую её обтекаемость, что позволит исключить образование циркуляционной зоны в пределах ядра струи

Поэтому, для сравнения, было взято два мундштука различной формы: мундштук с коническим наконечником и мундштук со скругленным наконечником.

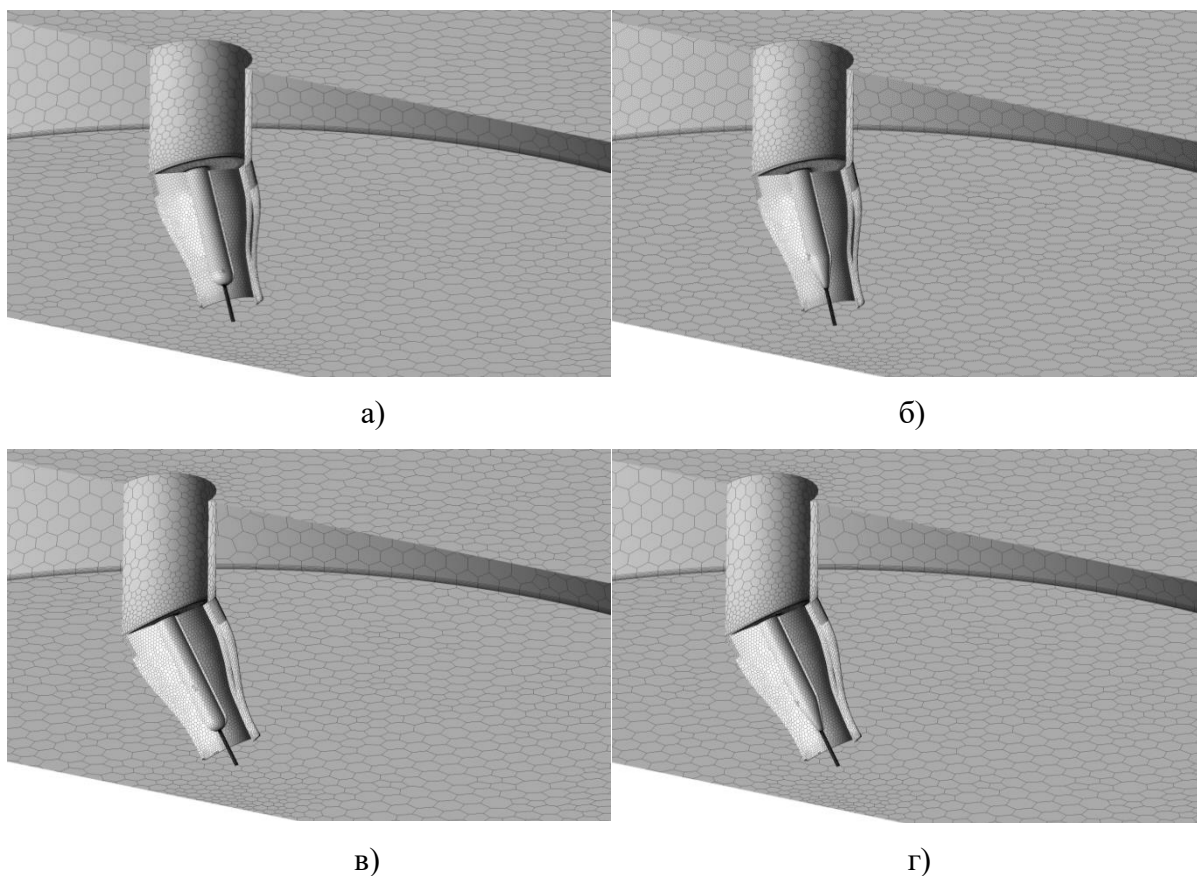
Для получения данных для анализа использовалась ранее созданная математическая модель конфузорного сопла, созданная в программном комплексе ANSYS Fluent.

Движение и теплообмен в жидкости и газе в программном комплексе ANSYS Fluent моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса, описывающих законы сохранения массы, импульса и энергии этих сред. Поскольку используемые в математической модели системы дифференциальных уравнений не имеют аналитического решения, они приводятся к дискретному виду и решаются на некоторой расчетной сетке методом конечных объемов.

В качестве расчетной области рассматривается сопло сварочной горелки после пакета сеток и прилежащая область у выходного сечения сопла. На рисунке 20 приведен вид расчетных сеток для конического и круглого наконечника. Все сетки полиэдральные. Размер сетки, в среднем, для обоих случаев составляет 360000 ячеек. Размеры области: высота 0,1 м; радиус 0,2 м.

На входе в область задается равномерный профиль постоянной скорости течения газа, на стенках сопла задается условие прилипания, на границах внешней области задается условие свободного протекания газа и нулевое противодавление.

Предполагается, что расчетная область заполнена защитным газом, в данном случае аргоном. Для обоих случаев рассматриваются несколько величин расхода защитного газа 6, 12, 20 и 30 л/мин. Также рассматривали разные углы наклона сопла: 0° ; 15° ; 30° ; 45° и 60° (Рис. 25).



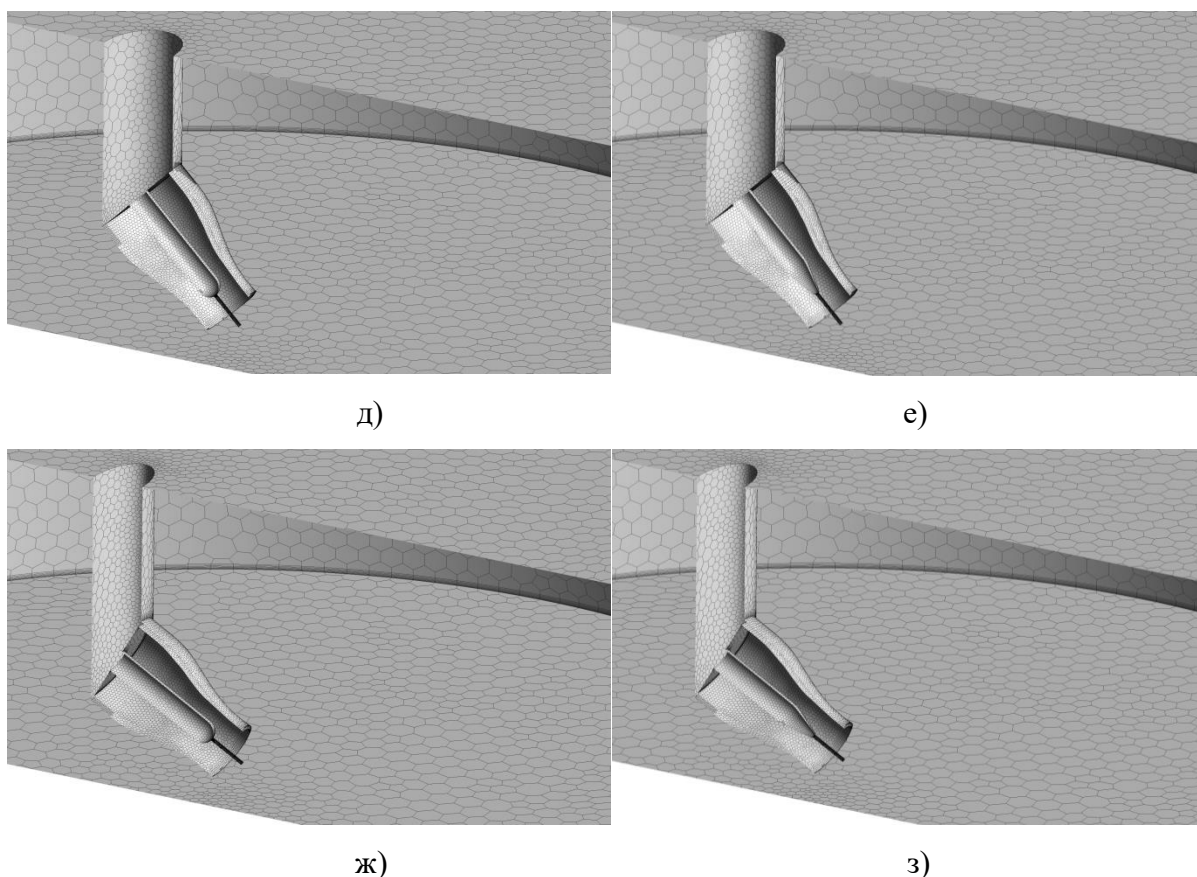


Рис. 25. Вид расчетных сеток для конфузорного сопла с круглым наконечником мундштука (а, в, д, ж) и с коническим наконечником мундштука (б, г, е, з), при наклоне 15° (а, б); 30° (в, г); 45° (д, е) и 60° (ж, з)

При выполнении конечно-элементного анализа приняты следующие допущения: рабочая жидкость является ньютоновской, то есть чистой, не содержащей посторонних примесей и включений; рабочая жидкость не испытывает фазовых переходов, то есть находится в одном агрегатном состоянии; краевая задача постоянна.

Для адаптации математической модели к конкретной физической задаче в области пространства задали условия задачи. Первое граничное условие – это условие непроницаемости. Поток защитного газа принимали как турбулентный, адиабатный, несжимаемый.

Граничные условия: температура окружающей среды 20 °С.

Давление на внешних границах расчетной области принималось равным атмосферному. В качестве текучей среды назначили аргон, в качестве окружающей атмосферы – воздух. На входе в сопло задавался равномерный

профиль скорости, соответствующий рабочему расходу, на стенках сопла задавалось условие прилипания.

Как видно из рисунков 25 и 26 сами пятна концентрации на первый взгляд почти не отличаются, также, как и зоны покрытия защитным газом поверхности самой зоны сварки, а также вокруг неё. Красная зона – зона максимальной концентрации газа. Но если взглянуть на конкретные численные значения концентрации аргона в зоне сварки, при наклоне горелки под разными углами, с использованием наконечников различной формы, то станет очевидно существенное влияние формы наконечника на концентрацию защитного газа в зоне сварки (Рис. 26).

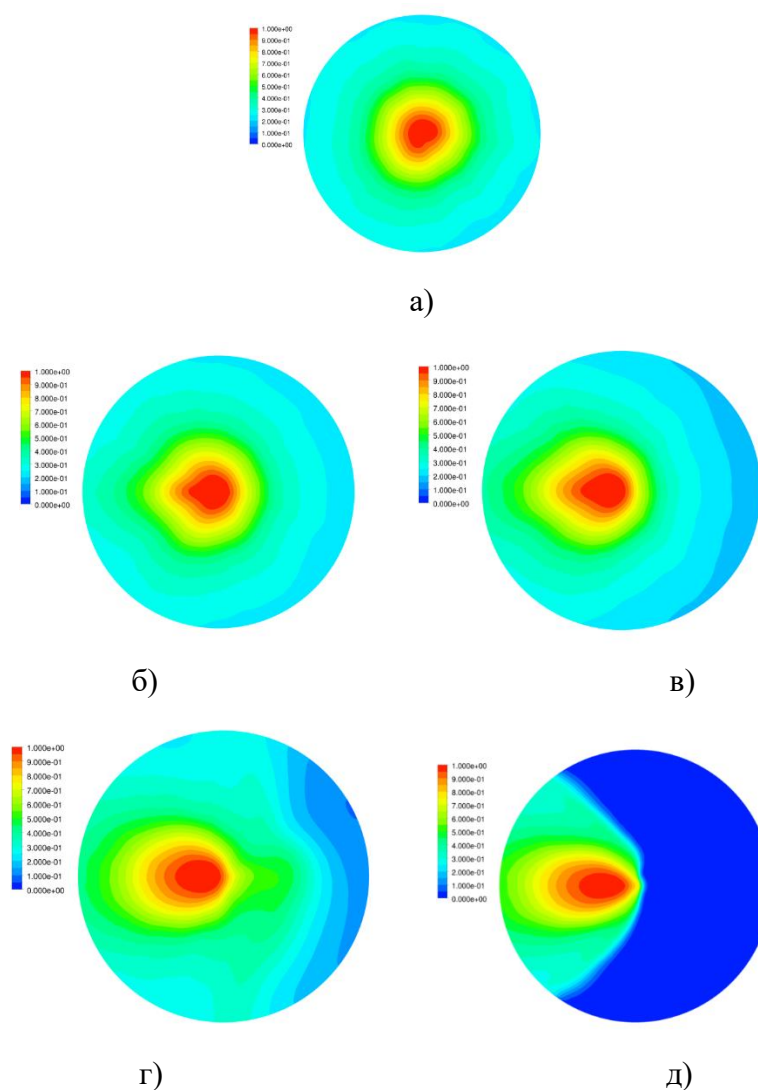


Рис. 26. Концентрация защитного газа в зоне сварки с использованием конического наконечника, при расходе газа 30 л/мин и угле наклона горелки: 0° (а); 15° (б); 30° (в); 45° (г); 60° (д)

Диаграммы наглядно показывают, как влияет форма наконечника на концентрацию защитного газа в зоне сварки. И если при невысоких расходах защитного газа (до 12 л/мин) форма наконечника не сильно меняет показатели концентрации, то при высоких расходах (более 12 л/мин) форма наконечника оказывает значительное влияние на конечную концентрацию защитного газа в зоне сварки. И из этого всего можно сделать вывод, что форма наконечника действительно оказывает значительное влияние на концентрацию защитного газа в зоне сварки и, как следствие, на качество получаемых сварных соединений.

При сварке с использованием конфузорного сопла со скругленным наконечником мундштука, концентрация защитного газа значительно выше, нежели с использованием конфузорного сопла с коническим наконечником мундштука.

В таком случае, дальнейший вывод напрашивается сам собой: Использование конфузорного сопла со скругленным наконечником мундштука позволяет повысить концентрацию защитного газа в зоне сварки, а значит повысить эффективность газовой защиты и, как следствие, повысить качество получаемых сварных соединений. Оптимальным углом для сварки, обеспечивающим наивысшую концентрацию защитного газа в зоне сварки, является 45° .

Также о качестве осуществляемой газовой защиты в зоне сварки, в зависимости от использования конфузорного сопла с мундштуком с коническим или скругленным наконечником, можно судить по максимальной скорости истечения защитного газа на выходе из сопла.

Как известно, скорость истечения защитного газа напрямую влияет на жесткость и устойчивость струи при воздействии сносящих воздушных потоков, а значит по этим показателям мы также можем оценивать более высокую или низкую эффективность использования мундштука с коническим или со скругленным наконечником в конструкции горелки.

Для моделирования использовалась всё та же математическая модель конфузорного сопла, что и ранее. Эксперименты проводились под теми же углами наклона и с теми же расходами защитного газа, что и в предыдущем эксперименте (Рис. 27).

По конкретным значениям, видимым на шкале скорости видно, что с использованием скругленного наконечника скорость истечения защитного газа на выходе из сопла выше, чем при использовании конического наконечника (Рис. 28).

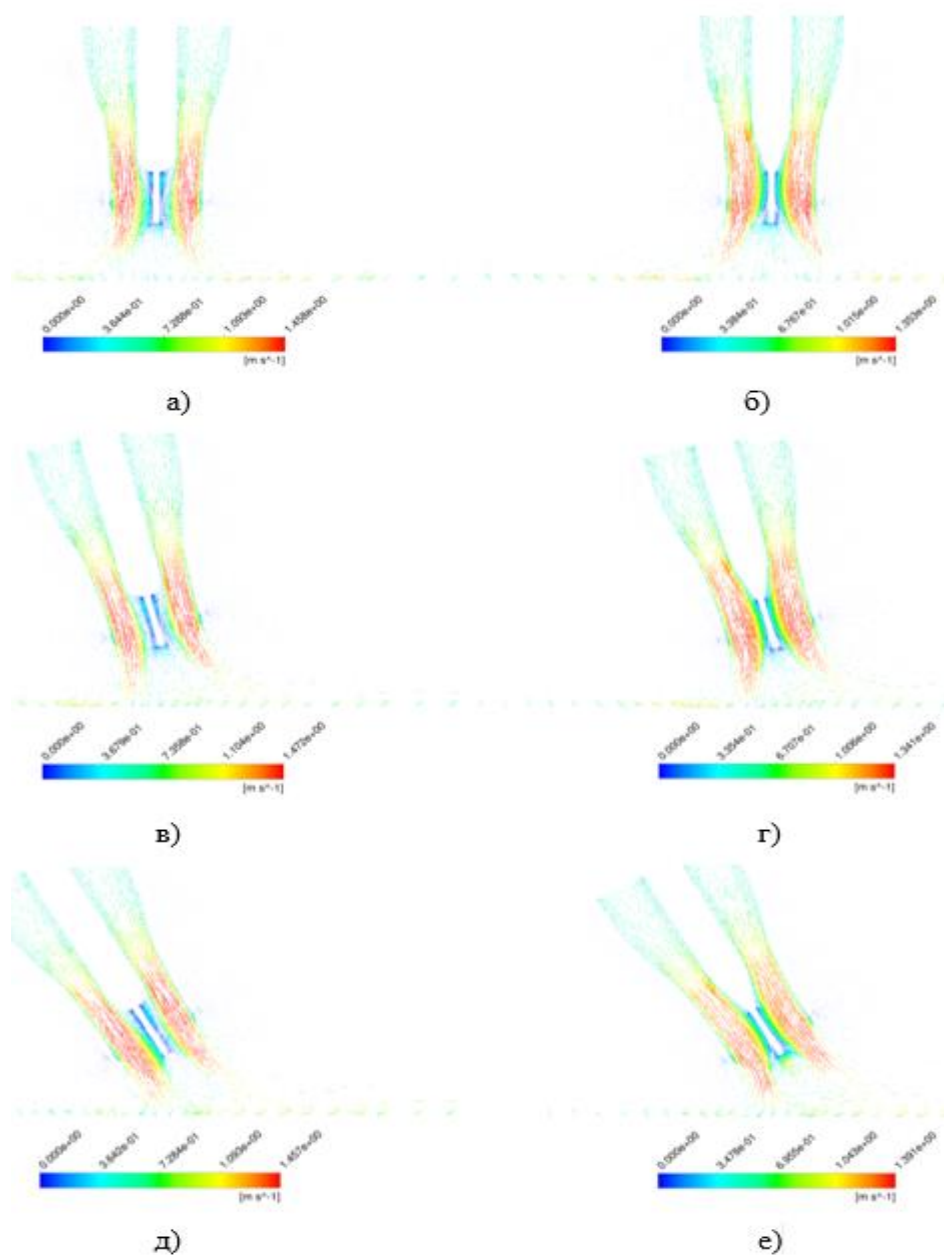


Рис. 27. Векторная диаграмма поля скоростей в продольном сечении сопла с расходом газа 30 л/мин: под углом наклона 0° (а, б); 15° (в, г) и 30° (д, е) с использованием скругленного наконечника (а, в, д) и конического наконечника (б, г, е)

Как следствие, можем говорить о более уместном использовании скругленного наконечника для повышения жесткости струи, и её сопротивляемости воздействию сносящих воздушных потоков. Также можно сделать вывод о том, что конкретное влияние на повышение жесткости струи оказывает не только внутренняя геометрия поверхности сопла, но и геометрия формы наконечника мундштука.

Оптимальным углом наклона, для получения наивысшей скорости истечения защитного газа, можно было бы назвать наклон в 0° , но под таким углом сварка не ведется, да и на практике сварщику было бы весьма сложно удерживать горелку в идеально ровном положении длительное время, да ещё и не в ущерб качеству накладываемого шва. Поэтому оптимальным углом наклона можно считать наклон в 15° , т.к. именно при нём наблюдается наивысшая (после наклона в 0°) скорость истечения защитного газа, а значит имеется наивысшая жесткость струи. Наименьшая же скорость истечения газа всегда наблюдается при наклоне горелки более 45° , в данном случае на графиках это можно видеть при наклоне в 60° .

Результаты моделирования позволяют с разных сторон подойти к исследованию влияния тех или иных возмущающих факторов на качество осуществляемой газовой защиты. Так, например, по линиям тока в зоне протекания защитного газа, можно судить о скорости истечения защитного газа, а также о завихрениях, возникающих при использовании мундштука с коническим или скругленным наконечником.

Из рисунка 28 четко видно, что при одинаковом расходе защитного газа, а также при одинаковом угле наклона, в столбе потока на выходе из конфузорного сопла со скругленным наконечником, скорость истечения газа выше, а завихрения практически отсутствуют. В то же время, при рассмотрении конфузорного сопла с коническим наконечником видно, что скорость истечения снизилась, по сравнению с первым случаем, а в столбе потока истекающего газа присутствуют завихрения, снижающие ламинарность

потока и жесткость струи, и, как следствие, её устойчивость против сносящих воздушных потоков и эффективность газовой защиты сварочной ванны.

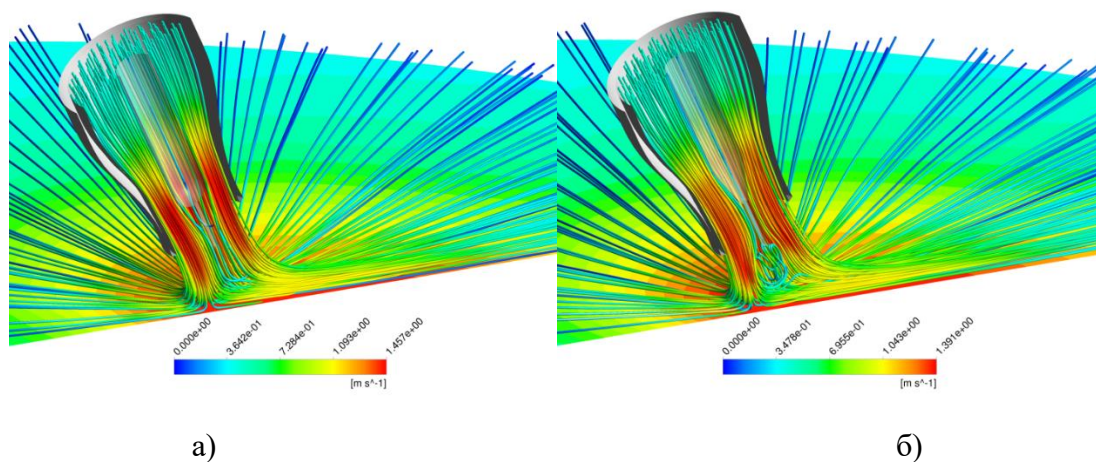


Рис. 28. Расчетная область с линиями тока конфузорного сопла с круглым наконечником (слева) и с коническим наконечником (справа), при наклоне 30° и расходе 30 л/мин

При использовании круглого мундштука, вместо конического мы можем повысить качество получаемых сварных соединений в условиях воздействия сносящих воздушных потоков. Такой результат достигается за счет практически полного отсутствия завихрений в столбе потока защитного газа на выходе из сопла.

Таким образом, проанализировав результаты моделирования можно сделать вывод о том, что приемлемым наклоном горелки, для получения значений концентрации защитного газа, а также скорости его истечения на выходе из сопла, для создания наиболее эффективной защиты аргоном зоны сварки, для получения качественных сварных соединений, является промежуток наклона от 15° до 45° . Именно он позволяет получать максимально эффективные, для защиты сварочной ванны, численные значения важнейших показателей работы защитного газа в процессе сварки.

Также, использование мундштука со скругленным наконечником позволяет существенно сократить завихрения, образующиеся в зоне сварки.

Данные результаты экспериментов позволяют четко увидеть и проследить влияние формы наконечника, а также угла наклона горелки и расхода

защитного газа на эффективность защиты сварочной ванны от атмосферного влияния.

Идеальным вариантом будет при разработке проточной части сварочной горелки, помимо использования конфузорного сопла, выполненного по рассчитанной параболической кривой, рассчитать образующую, по которой необходимо выполнить наконечник мундштука. Необходимо также обращать внимание на зазор между наконечником и сварочной проволокой.

Выводы по обеспечению газодинамической устойчивости струи защитного газа.

- Выполнять технологические требования – соблюдение параметров режима сварки.

- Обеспечить газодинамическую устойчивость струи:

- увеличение скорости истечения газа,
- улучшение структуры струи защитного газа: совершенствование проточной части горелки, применение сеток во входном отверстии сопла, обеспечение определенного поджатия потока, обеспечение чистоты поверхности сопла.
- поддержание постоянного расстояния от торца сопла до поверхности.
- поддержание определенного угла наклона от нормали к поверхности.

3. ВЫВОДЫ

1. Цифровое моделирование в программе ANSYS позволило установить распределение концентрации защитного газа в зависимости от скорости и направления ветра, расхода газа, расстояния от сопла до свариваемой поверхности. Установили, что эффективность газовой защиты зависит от множества параметров: скорости ветра, режимов сварки, конструкции горелки и формы сопла, техники сварки.

2. На основе анализа технических решений и расчетно-экспериментальных данных, модернизирован универсальный стенд с многорежимной аэродинамической трубой и автоматической системой управления стендом, который позволил моделировать процесс сварки в условиях ветра при различных скоростях истечения газа из сопла горелки и скоростях ветра с резкими усилениями.

3. Расчетно-экспериментальным методом установлено, что в условиях влияния ветра протяженность ядра защитной газовой струи и эффективность газовой защиты определяется скоростью и режимом истечения струи, формой и размерами сопел. Подтверждено, что эффективность газовой защиты и стабильность сварочной дуги повышается при увеличении скорости истечения защитной струи из конфузорного сопла сварочной горелки.

4. На основе расчетно-экспериментальных данных определены оптимальные параметры режима сварки в условиях ветра в зависимости от соотношения скоростей газовой струи и ветра, а также от расстояния между соплом и свариваемой поверхностью, установлена между ними количественная связь.

5. На основе цифрового моделирования процесса истечения защитной газовой струи в программе ANSYS и экспериментального моделирования на испытательном стенде, с высокой степенью достоверности создана модель истечения газовой струи, установлено распределение продольного и

поперечного поля скоростей истечения струи в зависимости от формы сопла, расхода защитного газа, начальной скорости газовой струи на входе в сопло и расстояния до свариваемой поверхности.

6. На основе цифрового моделирования в среде ANSYS обнаружена и экспериментально подтверждена возможность управления эффективностью газовой защиты в условиях ветра за счет стабилизации и увеличения размеров ядра защитной газовой струи при высоких скоростях истечения из конфузорного сопла сварочной горелки.

7. На основе цифрового моделирования в среде ANSYS установлено, что наиболее эффективная газовая защита осуществлялась при расстоянии от среза сопла до свариваемой поверхности, равном 0,5 диаметра сопла и при скорости струи, в 1,8 раза превышающую скорость ветра.

8. На основе цифрового моделирования в среде ANSYS установлено, что при истечении защитного газа из конфузорного сопла с использованием мундштуков с наконечниками различной формы, наилучшие результаты эффективности газовой защиты были достигнуты с применением скругленного наконечника. Также был определен оптимальный угол наклона горелки от 15° до 45° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровое моделирование газодинамики защитной струи открывает большие возможности для исследования особенностей газовой защиты при различных технологических условиях сварки и создания технологии дуговой сварки конструкций, работающих в условия Арктики и Крайнего Севера.

Разработки, выполненные в рамках данного направления, могут стать универсальным ключом к эффективному решению фундаментальной задачи повышения эксплуатационных показателей конструкций из высокопрочных сталей, в условиях низких климатических температур и экстремальных условиях, которое может определить процесс развития энергетики в регионах Арктики и Крайнего Севера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горынин И.В., Хлусова Е.И. Наноструктурированные стали для освоения месторождений шельфа Северного Ледовитого океана // Вестник РАН, 2010, № 12. С. 1069-1075.
2. Горынин И.В., Малышевский В.А., Рыбин В.В., Хлусова Е.И. Хладостойкие стали для технических средств освоения арктического шельфа // Вопросы материаловедения, 2009, № 3. С. 108-125.
3. Иванова И.В. Сварка в защитных газах на ветру – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 201 с.
4. Лебедев В.А., Орыщенко А.С., Шарапов М.Г. Полуавтоматы для дуговой сварки и смежных технологий. 2013 г. – 587 с.
5. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
6. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. М.: Машиностроение. 1981. 247 с.
7. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. – Москва: Изд-во МГТУ, 2014. – 488 с.
8. Новожилов Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в газах. М.: Машиностроение, 1979. 231 с.
9. Орыщенко А.С., Хлусова Е.И., Шарапов М.Г. Принципы легирования, структура, свойства и свариваемость конструкционных низколегированных сталей для судостроения и морской техники. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2016. 116 с.
10. Паршин С.Г., Иванова И.В. Исследование сварочной дуги в защитных газах в условиях воздействия воздушных потоков // Сварка и диагностика, 2016, № 2. С. 46-48.
11. Паршин С.Г., Иванова И.В., Петухов Е.П. Компьютерная трехмерная модель истечения защитного газа из сварочной горелки с конфузорным соплом // Сварка и диагностика. 2017. № 1. С. 27–30.

12. Патент РФ № 2633197. Горелка для дуговой сварки в среде защитных газов / И.В. Иванова, С.Г. Паршин. Заяв. 22.04.16 г. // Б.И. 2017. № 29.
13. Потапьевский А.Г., Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. 208 с.
14. Федоренко Г.А. Теория газовой защиты при дуговой сварке в защитных газах. М.: Интермет Инжиниринг, 2012. 223 с.
15. Dreher M., Füssel U., Schnick M., Hertel M. Numerical simulation of the shielding gas flow with GMA welding and options of validation by diagnostics. TU Dresden, 2009, pp. 1-8.
16. Campbell S.W., Galloway A.M., Ramsey G.M. McPherson, N.A. A computational fluid dynamic analysis of the effect of weld nozzle geometry changes on shielding gas coverage during gas metal arc welding. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135 (5), pp. 1-32.
17. Lippold J. Welding metallurgy and weldability. Wiley, 2014. 424 p.
18. Siewert E., Wilgelm G., Hässler M. et al. Visualization of gas flows in welding arcs by the schlieren measuring technique. Welding Journal, 2014, 93 (1), pp. 1s-5s.
19. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. 3rd edition, DCW Industries, Inc., La Canada CA, 2006. 522 p.
20. Wei G.D., Qi X. and Yang L. Modeling of an argon cascaded arc plasma by ANSYS FLUENT. Physics of plasmas, 2014, 21, 033507, pp. 1-7;