Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина»

На правах рукописи

БУЗОРИНА Дарья Сергеевна

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ШВА И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Шалимов Михаил Петрович,
доктор технических наук

Екатеринбург – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение…… 5

Глава 1 Особенности многопроходной сварки. Тепловая эффективность процесса сварки…… 9

1.1 Технологические особенности и характерные дефекты при многопроходной сварке…… 9

1.1.1 Физическая модель процесса сварки плавящимся электродом в разделку…… 15

1.1.2 Анализ влияния параметров режима сварки на геометрические размеры сварного шва…… 17

1.1.3 Методики определения параметров режима сварки и управления тепловложением…… 21

1.2 Тепловая эффективность процесса сварки…… 27

1.3 Цель работы и задачи исследований…… 37

Глава 2 Влияние параметров режима сварки в защитных газах на формирование шва в соединениях со скосом кромок…… 38

2.1 Общие уравнения зависимости теплового КПД процесса сварки и площади сечения валика…… 40

2.2 Исследование влияния угла скоса кромок, положения электрода, скорости сварки на площадь сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки…….. 41

2.2.1 Планирование и проведение эксперимента……..…….. 41

2.2.2 Обработка результатов экспериментов…….. ……. 48

2.3 Экспериментальное определение зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от сварочного тока……. 52

2.4 Экспериментальное определение зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от вылета электрода…… 53

2.5 Экспериментальное определение зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от состава защитного газа.. 55

2.6 Граничные условия параметров режима сварки для получения каче-

ственного формирования шва…… 58
2.6.1 Экспериментальное определение диапазона рабочих напряжений и тока……. 59
2.6.2 Определение рабочего напряжения при заданном коэффициенте площадей…… 61
2.6.3 Граничные условия скорости сварки…… 64
Выводы по главе 2…… 65
Глава 3 Разработка рекомендаций по расчету параметров режима дуговой сварки в газах……..…… 67
3.1 Экспериментальная проверка адекватности полученных уравнений... 67
3.2 Оценка сходимости результатов…… 70
3.3 Методика расчета параметров режима сварки пристеночного валика.. 72
3.4 Определение областей значений параметров режима сварки при заданном коэффициенте площадей……..... 81
3.5 Управление сварочным током при сварке с поперечными колебаниями……. 86
Выводы по главе 3…… 91
Глава 4 Практическая реализация результатов работы…… 92
4.1 Описание изделия. Требования к качеству…… 92
4.2 Расчет параметров режима сварки…… 95
4.3 Результаты внедрения роботизированной установки для сварки муфт. 101
Вывод по главе 4…… 102
Заключение…… 103
Список литературы ……..…… 104
Приложение А – Результаты исследований влияния технологических параметров…… 115
Приложение Б – Результаты проверочного эксперимента……..... 126
Приложение В – Чертеж опорной муфты……..……. 133
Приложение Г – Допустимые дефекты при сварке опорных муфт (выписка из ГОСТ 23118-99)……...……. 134

Приложение Д – Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы……. 139

Введение

Многопроходная дуговая сварка плавящимся электродом благодаря своей универсальности и относительной простоте механизации и автоматизации процесса является одним из широко применяемых способов сварки при производстве сварных конструкций, в том числе из проката толщиной более 10 мм. Несмотря на широкую распространенность способа, при реализации технологии многопроходной сварки плавящимся электродом зачастую сталкиваются с проблемой обеспечения требуемого качества сварных соединений, а именно с возникновением дефектов. Для получения сварных швов с требуемыми механическими свойствами, благоприятной структурой и минимальными остаточными напряжениями тепловложение в свариваемый металл не должно превышать допускаемого. Но при недостаточном тепловложении в процессе многопроходной сварки толстолистового проката вследствие повышенного теплоотвода в основной металл возрастает вероятность образования несплавлений между валиком и кромками разделки, а также между соседними валиками. Известно, что качество формирования сварного соединения зависит как от геометрических характеристик разделки, положения электрода в разделке, техники сварки, так и от параметров режима процесса. Получение заданной глубины проплавления при удовлетворительном формировании сварного шва возможно за счет варьирования в допустимых пределах параметров режима сварки (ток, напряжение, скорость сварки), определяющих тепловложение. Одной из главных задач технологического процесса сварки является проплавление свариваемого металла для обеспечения надежного соединения свариваемых частей изделия.

Для разработки технологии многопроходной сварки необходимо наличие методик, позволяющих рассчитывать параметры режима, обеспечивающие заданную глубину проплавления при минимально необходимом тепловложении в изделие. Известные методики определения режима ограничены рамками отдельных типов сварных соединений из низкоуглеродистых сталей, часто применимы толь-

ко для однопроходных швов, не в полной мере отражают ряд особенностей многопроходной сварки, таких как угол разделки, положение электрода в ней, вид прохода (корневой, горячий, заполняющий, облицовочный) и т.д. Кроме того, во многих существующих методиках в расчетах рекомендуется использовать значение эффективного КПД ($\eta_и$), величина которого зависит от многих технологических параметров, известные диапазоны значений эффективного КПД для каждого вида сварки достаточно широкие. В настоящей работе для оценки эффективности процесса сварки применяется полный тепловой КПД процесса сварки, характеризующий долю тепловой мощности дуги, идущую на расплавление металла сварного шва. В связи с вышесказанным, критерием качественного формирования сварного шва может быть принята максимальная эффективность процесса сварки при условии получения требуемой площади сечения сварного валика и заданного коэффициента площадей, характеризующего соотношение площадей проплавленного и наплавленного металлов.

В связи с вышесказанным диссертационная работа посвящена актуальной теме изучения условий формирования шва и особенностей распределения теплоты при многопроходной сварке, а также разработке методики расчета режима сварки, учитывающей влияние геометрических и технологических параметров на формирование качественного сварного соединения.

Исходя из этого, целью работы является разработка методики расчета режимов дуговой сварки в защитных газах на основе теоретических и экспериментальных исследований условий формирования шва и распределения тепла при многопроходной сварке для гарантированного получения требуемого качества сварных соединений.

Для достижения поставленной цели:

– исследовано влияние угла разделки, положения электрода в разделке, скорости сварки, состава защитного газа и вылета электрода на геометрические размеры сварного шва;

– определен полный тепловой КПД процесса сварки в смеси защитных газов;

– получены аналитические зависимости геометрических размеров сварного шва и теплового КПД процесса от параметров режима сварки, от формы сечения разделки, от вылета электрода и от состава смеси защитных газов;

– разработана методика расчета режимов дуговой сварки в защитных газах при условии получения сварного валика с заданной величиной проплавления;

– выполнена экспериментальная проверка разработанной методики.

Научная новизна работы:

– показано, что одним из основных факторов, для которого впервые установлена количественная зависимость и который оказывает существенное влияние на качественное формирование сварного шва, является определенное сочетание геометрии разделки и параметров режима сварки;

– определены зависимости полного теплового КПД процесса сварки и площади сечения валика от технологических параметров для обеспечения формирования сварного шва в соответствии с требованиями нормативной документации;

– установлена зависимость электрических параметров режима сварки от угла разделки, скорости сварки, положения электрода в разделке при механизированной сварке в защитных газах, в том числе при наложении пристеночного валика;

– установлена зависимость между величиной сварочного тока и глубиной проплавления при сварке с поперечными колебаниями электрода применительно к многопроходной сварке низкоуглеродистых сталей плавящимся электродом в защитных газах.

Практическая значимость работы:

– на основании полученных автором зависимостей разработана методика расчета режимов многопроходной дуговой сварки в защитных газах для получения сварных соединений с заданным коэффициентом площадей, разработан алгоритм и программа расчета режима сварки;

– на основе экспериментальных данных сформулированы граничные условия технологических параметров сварки для получения качественного формирования сварного соединения с заданным коэффициентом площадей;

– установлена зависимость и получено уравнение управления сварочным током в процессе сварки с поперечными колебаниями электрода для обеспечения заданного проплавления. Реализована программа управления сварочным током при сварке с поперечными колебаниями для обеспечения заданного проплавления.

Основное положения, выносимые на защиту:

– функциональные зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от технологических параметров;

– методика расчета режимов многопроходной сварки в защитных газах для получения сварных соединений с заданным коэффициентом площадей;

– уравнение изменения сварочного тока в зависимости от положения при сварке с поперечными колебаниями электрода для обеспечения заданного проплавления.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях «Сварка и диагностика» в рамках XII Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2012 г.), «Сварка и диагностика» в рамках XIII Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2013 г.), научно-технической конференции, посвященной 125-летию изобретения Н.Г.Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом (г. Пермь, 2013 г.), Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее (г. Киев, 2013 г.).

Основное содержание работы отражено в 13 публикациях, в том числе 5 работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКИ. ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ

1.1 Технологические особенности и характерные дефекты при многопроходной сварке

Под многопроходной (многослойной) сваркой или наплавкой обычно подразумеваются такие технологические схемы, при использовании которых в зоне стыка между соединяемыми деталями выполняется более одного прохода электрической сварочной дуги. При таком подходе к способам многопроходной сварки относятся также заполнение разделки кромок между соединяемыми деталями большой толщины (рисунок 1.1, а, б), наложение галтельных швов (рисунок 1.1, в), наплавка на поверхность перекрывающихся валиков (рисунок 1.1, г) и другие технологические схемы различных способов дуговой сварки и наплавки [1].

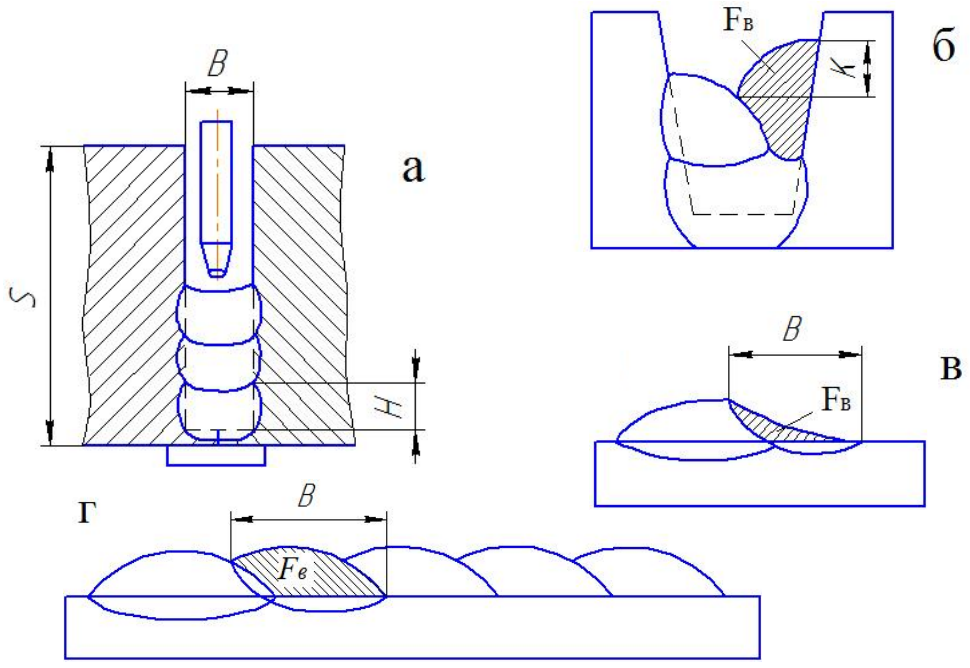


Рисунок 1.1 – Типичные технологические схемы многопроходной сварки (наплавки) [1]

Для повышения производительности сварки (за счет сокращения времени

на переналадку) сварку многослойных швов вне зависимости от толщины металла, как правило, выполняют на одних и тех же режимах. Это особенно важно при автоматической и механизированной сварках [2]. Количество проходов при заполнении разделки кромок зависит от толщины металла (сечения разделки) и применяемого способа сварки (площади накладываемых в разделку валиков) [1-3].

Одним из вариантов повышения производительности процесса многопроходной сварки является увеличение коэффициента наплавки электродного металла за счет большей скорости подачи электрода. Для этого можно повышать величину сварочного тока (форсирование режимов сварки), увеличивать вылет электрода [1, 4], применять предварительный подогрев электрода с помощью дополнительного источника питания [1] или уменьшать диаметр электрода (увеличивать плотность тока).

Однако излишнее количество нагретого и расплавленного металла увеличивает зону структурных превращений в металле, повышает степень деформации изделия. Следовательно, для получения сварных швов с требуемыми механическими свойствами, благоприятной структурой, незначительными сварочными деформациями и требуемой формой швов, для снижения вероятности появления горячих и холодных трещин величина погонной энергии должна быть минимальной. В условиях ограничения погонной энергии ($q_{п} \leq q_{п}^{доп}$)[1] при многопроходной сварке из-за повышенного теплоотвода в основной металл возникают проблемы обеспечения качества формирования шва. Наиболее типичными дефектами являются несплавления между отдельными валиками и со стенками разделки, вызванные либо неблагоприятной формой предыдущего валика, либо наличием подрезов кромок основного металла (рисунок 1.2) [1, 6].

[1] Верхний предел допустимой величины погонной энергии устанавливают исходя из того, чтобы получить требуемые показатели механических свойств металла сварного соединения [5] (если требования к механическим свойствам предусмотрен нормативными документами)

Рисунок 1.2 - Различные типы несплавлений в сварном шве [6]

К факторам, затрудняющим надежное оплавление кромок сварочной дугой, относятся [1, 6]:

– наличие на поверхности свариваемых кромок оксидов и других загрязнений, препятствующих непосредственному контакту жидкого металла сварочной ванны с основным металлом;

– малый угол разделки кромок, препятствующий обработке дугой всех участков поверхности (кромок);

– недостаточная сила сварочного тока, излишне высокая скорость сварки; смещение дуги на одну из кромок, при котором другая кромка остается неоплавленной и металл сварочной ванны только натекает на нее;

– чрезмерное увеличение наплавленного за один проход металла, так как при большом объеме сварочной ванны возрастает вероятность появления наплывов у валика и подплавлений кромок разделки.

На сегодняшний день проведено достаточно большое количество исследований, посвященных изучению причин возникновения несплавлений и методам предотвращения их появления [7 – 22].

Ю.Н. Руденко, А.К. Царюк [8] основной причиной образования подрезов и несплавлений считают «недостаточное или слишком большое расстояние от конца электродной проволоки до стенок разделки» и предлагают оптимальным считать это расстояние 5 – 6 мм. В то же время авторы [9] полагают, что несплавления на кромках возникают в том случае, если дуга не проплавляет кромки или имеет место неточное позиционирование оси электрода в разделке.

В работе Березовского Б.М. [1] приведен вариант моделирования раскладки

валиков в разделке при сравнительно благоприятном формировании первого слоя, состоящего из трех валиков. Одним из критериев качества формирования валиков в разделке может служить угол пересечения контуров соседних валиков. Чем ближе значение этого угла к 180°, тем выше гладкость контура валиков в разделке и тем меньше вероятность образования несплавлений в многопроходном сварном шве при сварке толстолистового металла.

При многослойной сварке под флюсом деталей большой толщины качество шва определяется наличием шлаковых включений. Проведенный в работе [7] анализ заводских данных показал, что основной причиной, обусловливающей образование шлаковых включений, является механическое заклинивание шлаковой корки в дефектах поверхности шва (в подрезах и несплавлениях) преимущественно при наложении пристеночных валиков.

Авторы [7] приводят результаты исследования влияния параметров режима сварки на форму пристеночного валика. Эксперименты проводились на образцах, имитирующих форму кромок, применяемую для сварки в разделку. Сварку производили путем наложения у кромки одиночных валиков. Параметром, характеризующим механическое заклинивание шлаковой корки, является угол перехода поверхности пристеночного валика к кромке. Основные параметры режима, определяющие его значение: напряжение дуги, расстояние между концом электрода и кромкой и скорость сварки. Наиболее значимое влияние оказывают первые два параметра.

Расчет формы поверхности слоя валиков выполняют последовательно от первого (пристеночного) валика, который должен иметь менисковую форму, обеспечивающую благоприятное формирование накладываемого на него валика [7] (рисунок 1.3). При менисковой форме валика угол α_1 должен находиться в пределах 130…175°; появление подреза на кромках характеризуется условием α_1>175°, а несплавление с кромкой происходит при α_1<80°.

Предлагаемый в работах [10, 11] подход к оптимизации раскладки валиков в разделке заключается в том, чтобы слой из нескольких наплавленных валиков имел минимальную разность по высоте (Z_{max}-Z_{min}→0); в этом случае обеспечива-

ется равномерное распределение металла по сечению наплавляемого слоя и формирование поверхности многослойного шва без дефектов.

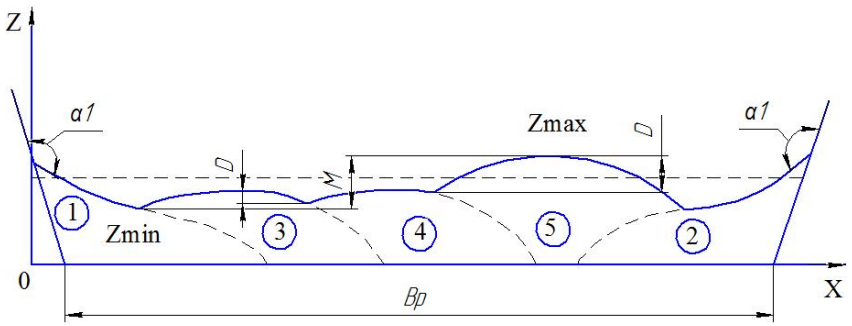


Рисунок 1.3 - Схема оптимизации раскладки валиков в разделке [7]

Проведенный в работе В.А. Стихина анализ [12] показал, что одной из основных причин возникновения несплавлений между валиками и между валиком и кромкой разделки, которые при сварке под флюсом будут заполнены затвердевшим шлаком, является неблагоприятная форма поверхности второго валика (особенно в месте перехода к кромкам основного металла), а также выпуклая форма поверхности 3-го валика (рисунок 1.4).

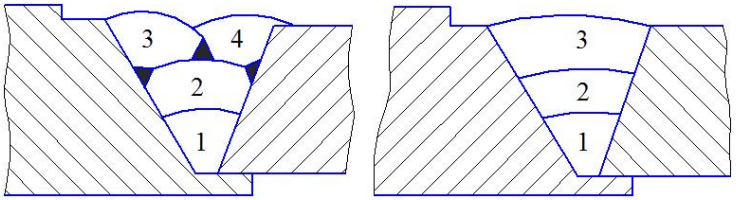


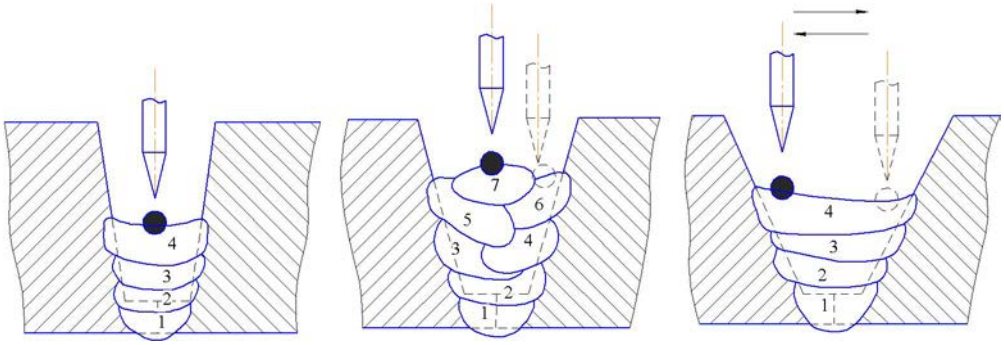
Рисунок 1.4 – Расположение шлаковых включений в многопроходном сварном шве (а) и схема раскладки валиков при использовании поперечных колебаний электрода (б) [12]

Для исключения дефектов такого типа необходимо стремиться к получению валиков с ровной поверхностью и плавным переходом к основному металлу; при этом вместо валиков 3 и 4 по базовой технологии более целесообразно завершать заполнение разделки последним более широким третьим валиком. Для увеличения ширины валиков был применен способ сварки с поперечными колебаниями

электрода, имеющий целый ряд технологических преимуществ [13 – 15, 23].

При сварке без колебаний электрода проплавление максимально на оси шва, а на периферийных участках, составляющих до 40 % ширины валика, оно незначительно. Такая форма проплавления в условиях формирования валика в разделке вызывает повышенную склонность к несплавлениям с нижележащими валиками. При сварке с колебаниями электрода зона проплавления имеет повышенную глубину провара на краях валика, что уменьшает вероятность образования несплавлений [1].

В работе С.И. Полоскова [16] также отмечается, что наплавка с поперечными колебаниями дуги обеспечивает более стабильное качество формирования швов по сравнению с заполнением разделки последовательной раскладкой валиков «в угол» и «в разделку» (рисунок 1.5). Заполнение разделки узкими (ниточными) швами существенно понижает жидкотекучесть металла ванны и снижает неравномерность высоты наплавленного слоя в разделке, однако наплавка без колебаний дуги требует более точного ведения дуги по стыку с минимальными отклонениями. В противном случае могут появиться несплавления металла ванны с кромками разделки из-за ухудшения формирования наплавляемого слоя.



а) б) в)

Рисунок 1.5 – Схема заполнения разделки с наслоением валиков без колебаний дуги (а), последовательной их раскладкой (б) и наслоением с колебаниями дуги (в) [16]

Таким образом, одной из главных задач технологического процесса сварки является проплавление свариваемого металла для обеспечения надежного соеди-

нения свариваемых частей изделия. Выше были рассмотрены способы исключения несплавлений за счет позиционирования электрода, оптимизации формирования и раскладки валиков. Однако, согласно работам [17, 24 – 32] качество формирования сварного соединения зависит как от геометрических характеристик разделки, техники сварки, так и от параметров режима сварки. Получение заданной глубины проплавления при качественном формировании сварного шва возможно за счет варьирования параметров режима сварки в допустимых пределах.

Для более полного представления о формировании сварного соединения и факторах, влияющих на этот процесс, рассмотрим физическую модель процесса сварки плавящимся электродом в разделку.

1.1.1 Физическая модель процесса сварки плавящимся электродом в разделку

В электрической дуге традиционно выделяют столб дуги, катодную и анодную приэлектродные области [33].

Вследствие большой разницы температур столба дуги и электродов вся теплота, выделяемая в приэлектродных областях, расходуется на нагрев соответствующих электродов, то есть электродной проволоки и свариваемых кромок. Теплота, выделяемая в столбе дуги, рассеивается в окружающем пространстве (конвекцией, теплопроводностью, излучением) [34]. Часть излучения столба дуги нагревает свариваемые кромки. Теплота, нагревающая электродную проволоку, почти полностью переносится каплями электродного металла в сварочную ванну, так как потери с брызгами невелики.

При сварке по зазору дуга с двух сторон ограничена в радиальном направлении стенками разделки (рисунок 1.6). Большая часть излучения дуги поглощается стенками разделки, что обусловливает высокий КПД дуги. Потери энергии, обусловленные разбрызгиванием электродного металла, практически отсутству-

ют. Распределение теплового потока, создаваемого дугой, в значительной мере определяется не только свойствами плазмы и током дуги, но и формой разделки кромок и поверхности сварочной ванны.

Форма разделки в зоне горения дуги определяется не только геометрией самой разделки, но и в значительной мере формой поверхности сварочной ванны, то есть процессами плавления электродной проволоки и свариваемых кромок. Поэтому дугу нельзя рассматривать изолированно от полной модели формирования сварочной ванны и условий плавления электродной проволоки.

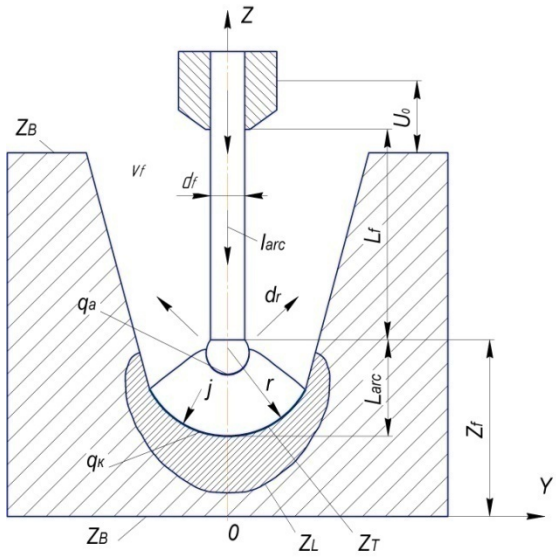


Рисунок 1.6 – Геометрические характеристики зоны формирования сварочной ванны в поперечном сечении стыка [24]

Строение зоны формирования сварочной ванны описывается координатами поверхностей раздела характерных сред: z_B – между газовой средой, наружной и внутренней поверхностью твердого металла сварного соединения; z_L – между жидким металлом сварочной ванны и твердым основным металлом; z_T – между дугой и поверхностью жидкого металла сварочной ванны; а также координатой точки плавления электродной проволоки z_f относительно поверхности z_Bв донной части разделки кромок. Одновременно координата точки плавления электродной проволоки характеризует длину дуги L_{arc} и вылет L_f электродной проволоки из токоподводящего мундштука.

Координаты поверхностей сварочной ванны определяются равновесием

между давлениями, оказываемыми на эту поверхность столбом дуги p_{arc}, силами поверхностного натяжения p_σ, гравитационного p_g и внутреннего p_n давления расплава [34].

Известно [17, 24 – 32], что глубина проплавления основного металла в значительной мере зависит от скорости сварки при прочих равных условиях, которая в свою очередь отвечает за величину жидкой прослойки под дугой. Толщина прослойки и особенно скорость движения металла в ней существенно зависят от параметров режима сварки.

1.1.2 Анализ влияния параметров режима сварки на геометрические размеры сварного шва

Сварочный ток. С повышением сварочного тока связано увеличение количества расплавляемого основного и присадочного металла вследствие возрастания мощности дуги [35]. Следствием этого является увеличение глубины проплавления, высоты выпуклости и ширины шва (при неизменных других параметрах режима сварки). При этом преобладает увеличение проплавляющей способности благодаря возрастанию давления дуги на сварочную ванну [2, 35 – 38]. Расплавленный металл вытесняется в хвостовую часть сварочной ванны. Уменьшение жидкой прослойки под дугой улучшает теплообмен между пятном дуги и основным металлом. Коэффициент формы усиления при увеличении сварочного тока уменьшается. В результате образуется резкий переход от основного металла к наплавленному, что снижает работоспособность сварного соединения, особенно при ударных и знакопеременных нагрузках; ухудшается поверхность шва, шлаковая корка плохо отделяется. Поэтому при переходе на большие значения сварочного тока следует увеличивать и напряжение на дуге [36, 39 – 41].

Напряжение на дуге. С повышением напряжения на дуге (при неизменных других параметрах) увеличивается ее длина и подвижность. Это приводит к уве-

личению ширины шва и уменьшению высоты выпуклости шва. Увеличение подвижности пятна дуги, расположенного на изделии, обуславливает повышение площади нагрева. Это приводит к уменьшению количества тепла, идущего на плавление основного металла и, следовательно, уменьшению глубины проплавления [2, 36, 38, 39, 42, 43].

Скорость сварки. С увеличением скорости сварки уменьшается погонная энергия, поэтому уменьшается ширина шва. Количество наплавляемого металла с увеличением скорости сварки на единицу длины шва уменьшается. Это приводит к уменьшению высоты выпуклости шва. Однако с увеличением скорости сварки столб дуги начинает отклоняться в сторону, противоположную направлению сварки. Отклоняясь, столб дуги вытесняет часть жидкого металла в хвостовую часть ванны. Уменьшение толщины жидкой прослойки под дугой и обусловливает увеличение глубины проплавления при повышении скорости сварки до некоторой скорости. При дальнейшем повышении скорости в связи с уменьшением погонной энергии глубина проплавления уменьшается [36, 39, 44].

Диаметр электродной проволоки. С увеличением диаметра электрода (при постоянных других параметрах) усиливается блуждание активного пятна по торцу электрода и, следовательно, активного пятна, расположенного на изделии. Ввод тепла дуги через большую поверхность увеличивает теплоотвод в основной металл, что приводит к увеличению ширины шва и уменьшению глубины проплавления [36, 39, 45].

Угол наклона электрода. При наклоне электрода «углом назад» столб дуги отклоняется в сторону противоположную направлению сварки. Давлением дуги часть металла оттесняется в хвостовую часть ванны, и глубина проплавления увеличивается. При наклоне электрода «углом вперед» часть столба дуги располагается над поверхностью основного металла и прогревает свариваемые кромки. Давлением столба дуги жидкий металл вытесняется в переднюю часть ванны. Толщина жидкой прослойки под дугой увеличивается, уменьшаются глубина проплавления и высота выпуклости, а ширина шва увеличивается. Сварка «углом назад» и «углом вперед» являются одним из технологических приемов, позволя-

ющих получать заданную форму сварного шва [2, 36, 39, 46].

Форма разделки, величина зазора. Установлено [2, 36, 39], что форма разделки, величина зазора определяют прежде всего долю участия основного металла в металле шва. Чем больше зазор или угол разделки кромок, тем меньше доля участия основного металла в шве. Увеличение угла разделки или зазора приводит к уменьшению высоты выпуклости и увеличению глубины проплавления.

Род тока, полярность. При сварке постоянным током в катодном пятне плавящегося электрода выделяется больше тепла, чем в анодном. Поэтому при прямой полярности тока (катод на электроде, анод на изделии) меньше расплавляется основного металла, чем при обратной полярности. Это обусловливает уменьшение ширины шва и глубины проплавления при сварке постоянным током прямой полярности по сравнению со сваркой на обратной полярности [2, 36, 39, 40].

Состав защитного газа. Род активного газа оказывает значительное влияние на технологические характеристики сварного соединения и форму проплавления. При сварке в углекислом газе и смеси (Ar + более 25 % CO_2)на всех режимах, а также в смесях (Ar+ O_2 и Ar + менее 15 % CO_2)с силой тока меньше критической (критическая сила тока – минимальная сила тока, при которой наступает струйный перенос металла) форма провара такая же как при сварке под флюсом. При сварке в смесях (Ar + O_2 и Ar+ менее 15 % CO_2)с силой тока выше критической появляется узкое глубокое проплавление по центру шва. С увеличением силы тока и уменьшением диаметра электрода глубина узкого проплавления увеличивается [47].

В целом для сварки в смесях с большим содержанием аргона характерно резкое снижение разбрызгивания, улучшение формирования и внешнего вида шва. Поверхность шва гладкая, без крупных чешуек шлака [6, 48].

При постоянном напряжении с ростом доли CO_2 в смеси (Ar + CO_2) до 50 % дуга укорачивается, шов становится уже, глубина проплавления и высота выпуклости увеличиваются, растет площадь проплавления. Для получения швов требуемой формы и обеспечения устойчивого горения дуги определенной силе тока и составу смеси должно соответствовать определенное напряжение дуги [6, 48]. С

ростом силы тока и количества углекислого газа в смеси напряжение увеличивается. При увеличении количества CO_2 в смеси на каждые 10 % напряжение дуги должно быть увеличено на 0,5 В. При этом ширина швов остается примерно постоянной, а глубина проплавления несколько увеличивается [6].

Вылет электрода при сварке проволоками $d_э$ = 0,5-1,4 мм влияет на стабильность процесса сварки [47]. Допустимый вылет электрода зависит от диаметра, удельного электрического сопротивления электрода и силы сварочного тока. При малых вылетах затрудняется видимость зоны сварки и возможно подплавление токоподвода, а при больших - нарушение стабильности процесса. Увеличение вылета приводит к увеличению активного сопротивления в сварочной цепи, предварительному разогреву электродной проволоки и повышает долю наплавленного металла в шве, следовательно, повышает коэффициент расплавления электрода и уменьшает глубину провара.

По данным работы [49] при увеличении вылета электрода ширина шва и глубина проплавления уменьшаются (при прочих равных условиях), а выпуклость шва увеличивается (рисунок 1.7). Данные закономерности усиливаются с повышением тока сварки.

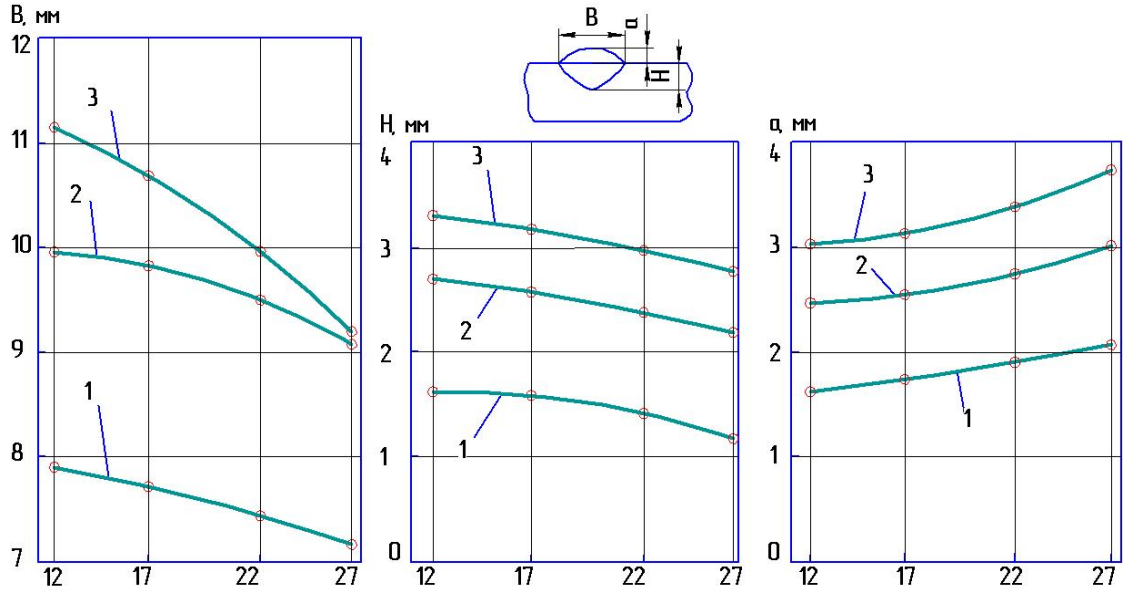


Рисунок 1.7 - Зависимости ширины шва *B* (а), глубины проплавления H (б), выпуклости шва a (в) от изменений вылета электрода L_w при различных значениях сварочного тока: 1 – 100 А, 2 – 190 А, 3 – 250 А. [49]

Механизм влияния вылета электрода на глубину проплавления заключается в том, что при повышенной величине вылета возрастает количество наплавленного металла, в результате чего увеличивается гидростатический напор хвостовой части сварочной ванны и усиливается подтекание жидкого металла под дугу; возникает эффект экранирования нерасплавленного основного металла прослойкой жидкого металла, что приводит к уменьшению глубины проплавления свариваемого металла [1].

Стабильный процесс сварки с хорошими технологическими свойствами можно получить только при оптимальном соотношении трех параметров:

-силы сварочного тока,

-диаметра электрода,

-напряжения на дуге [50].

При проектировании технологии сварки режим сварки может назначаться в соответствии с нормативной документацией или специальной литературой, а также может определяться экспериментальным или расчетным методами.

Для получения швов заданной формы и обеспечения стабильного горения дуги силе тока и составу смеси соответствует определенное напряжение дуги [51 – 53].

1.1.3 Методики определения параметров режима сварки и управления тепловложением

В настоящее время при решении задач, связанных с управлением тепловложением при сварке, применяют два основных подхода – пространственное и параметрическое управления тепловложением [54].

Пространственное управление тепловложением заключается в целенаправленном изменении положения пятна нагрева сварочной дуги на поверхности свариваемых элементов при неизменной величине мощности сварочной дуги. Управ-

ление положением сварочной дуги осуществляется двумя способами: воздействием на дугу магнитным полем; механическим перемещением сварочной горелки по заданной траектории [55]. Эти способы эффективны при наплавке на плоскую поверхность или сварке соединений без разделки кромок, но весьма ограниченно могут быть применены для сварки соединений с разделкой кромок [56].

Параметрическое управление тепловложением заключается в целенаправленном циклическом изменении мощности сварочной дуги во времени по заранее заданному закону [56]. Наиболее известным и востребованным способом реализации принципа параметрического управления тепловложением при сварке является импульсно-дуговая сварка.

Расширить технологические возможности дуговых способов сварки позволяет совмещение этих принципов управления тепловложением в новый принцип – пространственно-параметрическое управление тепловложением. Этот принцип заключается в целенаправленном изменении пространственного положения пятна нагрева сварочной дуги на поверхности свариваемых элементов при одновременном синхронном изменении мощности сварочной дуги.

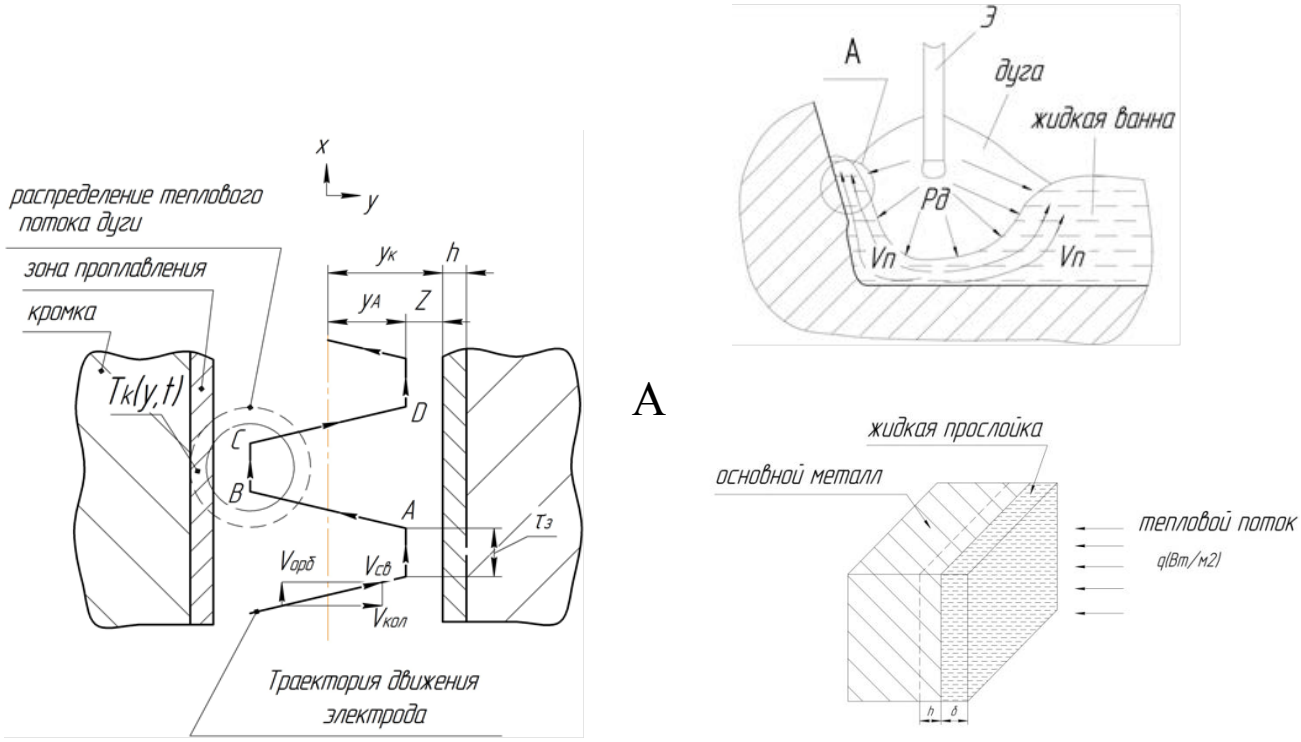
В настоящее время в МГТУ им. Н.Э. Баумана на основе вышеприведенного принципа пространственно-параметрического управления тепловложением научным коллективом под управлением профессора Э.А. Гладкова ведутся исследования основных закономерностей формирования шва при сварке в различных пространственных положениях (при орбитальной сварке неповоротных стыков магистральных трубопроводов). Для объяснения причин возникновения дефектов (в первую очередь несплавлений пристеночного валика с кромками изделия), возможности управления сварочной ванной, формой и размерами сварного шва, а также удержания жидкого металла сварочной ванны в пространственных положениях, отличных от нижнего, создана модель движения жидкого металла в сварочной ванне [57, 58].

Модель процесса сварки с поперечными колебаниями электрода включает:

- поперечную наплавку со скоростью равной скорости колебаний электрода (участки AB и CD на рисунке 1.8 а);

- сварку углового соединения со скоростью $V_{орб}$, мм/с, в течение времени задержки на кромке $\tau_з$, с (участок *BC* на рисунке 1.8) – в этот момент накладывается импульс тока.

В момент сварки, когда электрод находится у кромки разделки во время наложения импульса, жидкий металл сварочной ванны вытесняется из-под дуги в ее хвостовую часть, на кромки разделки. Пятно нагрева с увеличением амплитуды тока расширяется, захватывая стенку разделки, тем самым, улучшая сплавление металла шва с основным металлом. Во время паузы осуществляется возвратное движение жидкого металла сварочной ванны, образуется вогнутый мениск, что является благоприятным фактором при наложении последующих слоев.



а) б)

Рисунок 1.8 – Модель процесса сварки с поперечными колебаниями электрода: а) схема движения электрода вдоль оси стыка с поперечными колебаниями: $V_{кол}$ - скорость колебаний электрода, мм/с; $V_{св}$ - скорость сварки, мм/с; $y_к$ - текущее значение расстояния от оси стыка до кромки, мм; y_A - амплитуда колебаний электрода, мм; *Z* - расстояние от электрода до кромки стыка, мм; *h* – проплавление кромки, мм; Амплитуда колебаний электрода определяется из следующего расчёта: $y_A = y_к - Z$; б) схема движения жидкого металла в сварочной ванне при нарастании импульса: $V_п$ - движение потока; $P_д$-давление дуги

На рисунке 1.8 б схематично изображено движение жидкого металла сварочной ванны при нарастании импульса и принятая расчётная схема передачи теплоты от дуги к нерасплавленной кромке через жидкую прослойку.

На основании приведенной модели движения жидкого металла сварочной ванны у кромок авторы [57] предполагают появление жидкой прослойки между дугой и кромкой разделки. Величина этой прослойки может служить критерием для обеспечения сплавления валика сварного шва с основным металлом и, следовательно, для формирования бездефектного шва.

Чрезмерное близкое позиционирование электрода и, следовательно, уменьшение толщины прослойки может привести к подрезам кромки, а также при таком «жестком» вводе тепла в твердую фазу зерно металла участка перегрева будет значительно укрупняться, что может привести к снижению механических свойств металла участка перегрева и сварного соединения в целом.

Такая постановка задачи очень интересна в теоретическом аспекте, так как она основывается на идеализированном представлении схемы процесса сварки с поперечными колебаниями, но с точки зрения практической реализации в производстве ведёт к применению сложных механических систем позиционирования электрода в разделке и контроля его положения в режиме реального времени, сложных электронных систем и алгоритмов управления, систем визуального контроля, сканирующих лазерных датчиков формы разделки и т.д. [57 – 59]. Представленные дополнительные сложности при конструировании и применении таких установок не являются препятствием для их применения, однако, такой подход, скорее всего, останется целесообразным при производстве дорогих и уникальных изделий.

Для широкого применения в промышленности необходимо наличие аналитических выражений для определения режимов многопроходной сварки, которые могут быть применены при использовании широко распространенного стандартного сварочного и механического оборудования.

Существенный вклад в разработку методик и зависимостей для расчета параметров режима сварки внесли В.П. Демянцевич, В.Е. Кривошея, А.М. Попков,

И.Ф. Коринец, С.В. Дубовецкий, Г.И. Сергацкий, О.Г. Касаткин, В.А. Судник, С.И. Коробейников и А.С. Бабкин, Г.А. Бельчук и Н.Я. Титов и многие другие. Алгоритмы прямых и обратных задач включают экспериментально-статистичекие зависимости между геометрией сварного шва и параметрами режима.

В.П. Демянцевичем предложена методика расчета основных параметров режима сварки из условий получения заданных геометрических размеров шва, свойств сварного соединения и максимальной производительности [36, 60]. Данная методика применима для расчета режимов и геометрии швов низкоуглеродистых и низколегированных сталей с толщиной свариваемых элементов при стыковом соединении от 8 мм, а при тавровом соединений при сварке «в лодочку» от 6 мм [35]. Преимуществами этой методики является простота и последовательность расчетов, наличие уравнений для проверки геометрических размеров шва при выбранных по методике параметрах режима сварки, а также возможность ее использования для расчета режима как при наплавке, так и при сварке встык без разделки и с разделкой кромок. К недостаткам следует отнести большое количество эмпирических коэффициентов и показателей, значения которых не всегда известны для конкретных параметров и условий сварки и в зависимости от них могут существенно изменяться, что затрудняет расчеты или снижает их точность.

В работе А.М. Попкова [61] предложена инженерная методика расчета параметров режима дуговой сварки толстых листов в стык двусторонними швами. Методика основана на принципе суперпозиции. Расчет заключается в определении погонной энергии сварки, обеспечивающей заданную глубину проплавления. Используя полученные уравнения, в зависимости от способа сварки, могут быть определены ток и напряжение. Недостатком в этой работе является то, что при определении параметров режима используется показатель эффективного КПД нагрева изделия дугой, зависящей как от способа сварки, так и от других технологических параметров, который даже для одного способа сварки может изменяться в достаточно широких пределах.

Ряд работ посвящен вопросам по определению режимов сварки и их оптимизации [62 – 64].

С.В. Дубовецким, Г.И. Сергацким, О.Г. Касаткиным [62] предлагаются модели для определения и выбора оптимального режима сварки в зависимости от исходных технологических условий. В качестве основных регулируемых параметров приняты: напряжение на дуге $U_д$ (В), диаметр электрода $d_э$ (мм), скорость подачи проволоки $V_{п.пр}$(м/ч), скорость сварки $V_{св}$ (м/ч), вылет электрода $l_в$=10 $d_э$. После обработки экспериментальных данных авторами получена регрессионная модель в виде полиномов второй степени, описывающая зависимости между показателями качества (геометрические размеры, потери на разбрызгивание) и параметрами режима. Учитывая, что при сварке низкоуглеродистой стали качество соединений практически полностью определяется формированием шва, критерием оптимальности принята максимальная производительность процесса (скорость сварки) при условии обеспечения требуемых геометрических размеров шва при сравнительно небольших потерях металла на разбрызгивание и угар. Полученные уравнения позволяют решать задачу выбора оптимальных параметров режима сварки, обеспечивающего рациональное сочетание комплекса технологических показателей только для однопроходной сварки в CO_2 низкоуглеродистой стали.

В работе В.А. Судника [63] предлагаются модели, позволяющие определять параметры режима сварки для бездефектного формирования сварного соединения при дуговой сварке. Модели представлены в виде систем дифференциальных уравнений с частными производными, например, трехмерная численная модель МАГ-сварки описывается системой уравнений энергии, массы и движения. На основании полученной модели авторами проводится вычислительный эксперимент, статистическая обработка результатов которого позволяет получать параметры режима сварки в допустимой области изменения параметров сварки. Недостатком методики является сложность вычислений и значительное время для проведения вычислительного эксперимента и определения параметров.

В работах С.И. Коробейникова и А.С. Бабкина [65] предложена методика расчета параметров режима сварки низколегированных сталей и их оптимизация. В качестве параметра оптимизации в данной работе принят структурный состав металла ЗТВ. Преимуществом методики является возможность определять пара-

метры режима сварки швов не только с требуемыми размерами сварного шва, но и с необходимыми механическими свойствами и структурным составом. Сложность процесса и большое количество взаимосвязанных факторов приводит к выводу систем дифференциальных уравнений, а вследствие этого трудности расчетов. Также необходимо отметить, что при изменении начальных данных процесса (например, параметров разделки) требуется корректировка исходной математической модели процесса сварки. Все это делает трудноприменимой данную методику в инженерных расчетах и САПР.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что известные методики определения режима ограничены рамками отдельных типов сварных соединений из низкоуглеродистых сталей, часто применимы только для однопроходных соединений, не учитывают влияние зазора в стыке и вылет электрода на формирование швов [66]. Поэтому в большинстве случаев разработчики технологии многопроходной сварки толстолистового металла вынуждены ограничиваться лишь заданием схемы раскладки валиков в разделке и заданием диапазона изменения основных параметров режима сварки (тока, напряжения на дуге и т.п.) для нескольких валиков в конкретном слое [1]. Таким образом, к настоящему времени не разработана методика расчета режимов многопроходной сварки, учитывающая ее технологические параметры, оказывающие влияние на формирование сварного соединения.

1.2 Тепловая эффективность процесса сварки

При сварке плавящимся электродом тепловая энергия дуги идет как на проплавление кромок свариваемого изделия, так и на расплавление электродной проволоки. Плавящийся электрод является одновременно носителем энергии и присадочным металлом [67 – 69].

Одной из основных характеристик теплового воздействия на материал (из-

делие) сварочных источников теплоты с технологической точки зрения является эффективная тепловая мощность источника, то есть мощность, передаваемая нагреваемому телу [70].

Н.Н. Рыкалиным в работе [71] введено понятие эффективной тепловой мощности $q_и$ процесса нагрева изделия сварочной дугой – это количество тепла, введенное за единицу времени в металл изделия

$$q_и = \eta_и U_д I_{св}, \text{ Вт}, \quad (1.1)$$

где $I_{св}$ – сварочный ток, А; $U_д$ – напряжение на дуге, В; $\eta_и$ – эффективный КПД нагрева изделия дугой.

Эффективный КПД процесса нагрева изделия дугой выражает отношение эффективной тепловой мощности, то есть тепла, введенного источником за единицу времени в металл изделия, к полной тепловой мощности сварочной дуги и характеризует эффективность процессов выделения тепла и теплообмена в дуговом промежутке. [34, 2, 72 – 80]. Величина эффективного КПД процесса нагрева изделия дугой обычно определяется экспериментальным путем.

Г.И. Лесков в работе [33] определяет КПД сварочной дуги с плавящимся электродом как отношение суммы мощностей Σp, вводимых дугой в электроды из различных ее областей (анодной, катодной и столба дуги) $\Sigma p = p_а + p_к + p_{ст}$, к полной электрической мощности дуги $P_д = I_д U_д$:

$$\eta = \frac{\Sigma p}{P_д}. \quad (1.2)$$

Эффективность ввода теплоты в изделие сварочной дугой определяется видом и режимом сварки [81] и зависит в основном от технологических условий сварки (таблица 1.1).

Более высокие значения $\eta_и$ при сварке плавящимся электродом объясняются тем, что часть тепла, расплавляющего электрод, переходит вместе с каплями присадочного металла в ванну на изделии и способствует нагреву основного металла.

При сварке плавящимся электродом $\eta_и$ мало изменяется с родом, полярностью и величиной сварочного тока, но понижается при возрастании плотности тока в электродах [72].

Таблица 1.1 – Значения эффективного КПД нагрева изделия при сварке и наплавке [81]

Процесс	$\eta_и$	Источник
Электрическая дуговая сварка и наплавка:		
- графитовым электродом	0,50 – 0,60	[45]
- покрытым электродом на постоянном токе	0,75 – 0,85	[45]
- покрытым электродом на переменном токе	0,65 – 0,75	[45]
- в углекислом газе	0,72 – 0,92	[59]
- в аргоне вольфрамовым электродом	0,65 – 0,75	[45]
- в аргоне плавящимся электродом	0,70 – 0,80	[45]
- порошковой проволокой (открытая дуга)	0,80 – 0,90	[82]
- под флюсом	0,80 – 0,95	[48]
- лентой под флюсом	0,88 – 0,93	[60]
- лентой открытой дугой и в газе	0,68 – 0,75	[60]

Влияние сварочного тока на эффективный КПД ($\eta_и$) двояко [70]. С одной стороны, с увеличением сварочного тока следует ожидать повышения теплопередачи вследствие углубления дуги в основной металл, а с другой – увеличения поверхности столба дуги и потерь на излучение, а также потерь на разбрызгивание. В зависимости от того, какой из этих факторов преобладает, $\eta_и$ может возрастать или уменьшаться.

Проведенные в работе [83] исследования эффективной тепловой мощности дуги при сварке в углекислом газе показали:

- с увеличением силы тока значение $\eta_и$ возрастает на 7 – 16 % в связи с уменьшением потерь на разбрызгивание, погружением дуги в металл и, как следствие, снижением доли потерь тепла на излучение дуги и с брызгами расплавленного металла;

- при одной и той же силе тока с повышением напряжения до некоторого значения $\eta_и$ увеличивается, при дальнейшем росте напряжения происходит уменьшение $\eta_и$. Первоначальное увеличение $\eta_и$ с повышением напряжения наблюдается в основном при протекании процесса с короткими замыканиями. При повышении напряжения длительность периодов горения дуги и энергия всего

процесса возрастают. При дальнейшем повышении напряжения дуга значительно удлиняется и уменьшается глубина ее погружения в свариваемый металл, что вызывает увеличение потерь тепла на излучение. Одновременно с повышением напряжения потери расплавляемого дугой электродного металла на разбрызгивание становятся больше, что уменьшает количество тепла, переносимого в шов каплями электродного металла.

- при уменьшении диаметра электродной проволоки с 2 до 1,4 мм эффективный КПД возрастает на 4 – 12 %, что по всей вероятности, связано с уменьшением размеров дуги, большей концентрацией энергии, а также большим погружением дуги в свариваемый металл, что сокращает потери на излучение;

- с увеличением скорости сварки от 15 до 70 м/час $\eta_и$ изменяется с 72 до 82% из-за более интенсивного отводом теплоты дуги в свариваемую деталь ввиду того, что с увеличением скорости сварки дуга перемещается по более холодному металлу.

С увеличением угла раскрытия кромок от 30 до 180° $\eta_и$ уменьшается с 88 до 81 % (сварка в CO_2 проволокой Ø 1,4 мм, полярность обратная, $v_{св}$=13,2 м/час), что вызвано, по-видимому, главным образом повышением потерь на излучение [84].

Коэффициент $\eta_и$ уменьшается с увеличением длины дуги и растет с увеличением скорости сварки и углублением дуги в сварочную ванну. Повышение $\eta_и$ при углублении дуги в сварочную ванну связано с улучшением теплообмена между дугой и изделием, а также с уменьшением потерь теплоты с разбрызгивающимся электродным материалом [2]. Например, при наплавке валика открытой дугой в разделку шва значения $\eta_и$ на 5-10 % выше, чем при наплавке на плоскость.

Д.К. Безбах в работе [85] приводит результаты исследований эффективной мощности дуги при сварке под флюсом, в углекислом газе, порошковой проволокой и ручной дуговой электродами УОНИ-13/45 угловых и стыковых швов в различных пространственных положениях со свободным и принудительным формированием на пластинах различной толщины. В исследованных способах самый

низкий КПД нагрева изделия при сварке с принудительным формированием – 65%. При сварке плавящимся электродом открытой дугой $\eta_и$ примерно одинаков для всех способов сварки и составляет 80 – 85 %. При сварке под флюсом значение $\eta_и$ достигает 93 %. При возрастании мощности дуги $\eta_и$ уменьшается [85].

С уменьшением толщины свариваемых пластин $\eta_и$ уменьшается.

При сварке вертикальных швов $\eta_и$ на 3 – 4 % выше, чем при сварке в нижнем положении. При сварке таврового соединения $\eta_и$ на 5 – 10 % выше, чем при наплавке валика на пластину, и на 2 – 3 % выше, чем при сварке стыковых соединений со скосом кромок [85].

При сварке в защитных газах к указанным выше факторам прибавляется трудно учитываемое влияние расхода газа и потери теплоты в сварочной горелке, зависящие от ее конструкции и интенсивности охлаждения. Этим факторам часто не придают должного значения, что приводит к большим расхождениям данных у разных исследователей [70].

Также нужно учитывать коэффициент теплоотдачи газа, от которого зависит конвективный теплообмен газового потока с металлом и до некоторой степени распределение энергии между электродом и изделием, а также стабильность процесса (степень разбрызгивания) [86].

Таким образом, значение эффективного КПД $\eta_и$ зависит от многих технологических параметров сварки. Рекомендуемые при расчетах диапазоны значений по данным различных авторов для одного и того же способа сварки достаточно широкие (например, для сварки в углекислом газе разброс значений составляет порядка 22 %) (таблица 1.1). В работе [87] рекомендуется для случаев сварки на повышенных токах (500 А и более) выбирать значение эффективного КПД, близкое к верхнему пределу, а при сварке на повышенном напряжении (40 В и более) – к нижнему.

Реальное значение коэффициента $\eta_и$ определяет точность всех дальнейших расчетов (тепловых, прогнозирование структуры шва и ОШЗ, деформаций и т.д.) [88]. Следовательно, более точная оценка эффективности использования тепловой энергии дуги при сварке является актуальной на сегодняшний день.

Кроме того, известно, что при образовании соединения процесс сварки должен протекать таким образом, чтобы нагревать и расплавлять минимально необходимое количество металла. На прогрев проплавляемой зоны до температуры плавления и на перевод ее в жидкое состояние расходуется только часть эффективной тепловой мощности. Остальное тепло затрачивается на перегрев ванны расплавленного металла и на подогрев окружающей массы основного металла [72]. Излишнее количество нагретого и расплавленного металла не только вызывает бесполезный расход энергии и времени, но и увеличивает зону структурных превращений в металле, повышает степень деформации изделия при сварке и приводит к другим нежелательным последствиям [67]. Но эти затраты тепла практически неизбежны при сварке вследствие сосредоточенного характера источника тепла и значительной теплопроводности основного металла [72].

Для оценки эффективности использования тепловой энергии дуги на образование сварного соединения применяют различные показатели эффективности (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Показатели эффективности использования тепловой энергии дуги на образование сварного соединения

Название	Символ	Формула. Определение	Источник
1	2	3	4
Эффективный КПД процесса нагрева изделия дугой	$\eta_и(\eta_{эф})$	$h_и = \frac{q_и}{U_д Ч_{св}}$ Отношение количества тепла, введенного дугой в металл, к полной электрической мощности дуги	[70, 72, 81]
Эффективный КПД процесса нагрева электрода дугой	$\eta_э$	$h_э = \frac{q_э}{U_д Ч_{св}}$ Отношение количества тепла, введенного дугой в металл электрода, к полной электрической мощности дуги	[70, 72, 81]

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4
Полный тепловой КПД процесса проплавления основного металла	$\eta_{пр}$	$h_{пр} = \frac{v_{св} \cdot F_{пр} \cdot \gamma_м \cdot H_{пл}}{U_д \cdot I_{св}}$ Отношение условного теплосодержания проплавленного за единицу времени основного металла к полной электрической (тепловой) мощности сварочной дуги (полная эффективность процесса проплавления металла дугой)	[67, 70, 72]
Термический КПД процесса проплавления основного металла	η_t	$h_t = \frac{v_{св} \cdot F_{пр} \cdot \gamma_м \cdot H_{пл}}{q_и} = \frac{h_{пр}}{h_и}$ Отношение условного теплосодержания проплавленного за единицу времени основного металла к эффективной тепловой мощности дуги	[70, 72, 81]
Полный тепловой КПД процесса наплавки	$\eta_н$	$h_н = \frac{v_{св} \cdot F_н \cdot \gamma_м \cdot H_{пл}}{U_д \cdot I_{св}}$ Отношение условного теплосодержания наплавляемого за единицу времени металла к полной тепловой мощности дуги	[67]
Полный тепловой КПД процесса сварки	$\eta_с$	$h_с = \frac{v_{св} \cdot F_ш \cdot \gamma_м \cdot H_{пл}}{U_д \cdot I_{св}} = \frac{v_{св} \cdot (F_{пр} + F_н) \cdot \gamma_м \cdot H_{пл}}{U_д \cdot I_{св}} = h_н + h_{пр}$ Отношение условного теплосодержания расплавляемого за единицу времени металла шва к полной тепловой мощности дуги	[67]

Примечание:

$v_{св}$ – скорость сварки, м/с.

n– число проходов;

$F_н$ – площадь поперечного сечения наплавленного металла в шве, м^2;

$\gamma_м$ – удельная плотность металла, кг/м^3, для низкоуглеродистой стали 7810 кг/м^3;

$H_{пл}$ – энтальпия при температуре плавления с учетом скрытой теплоты плавления, Дж/кг, для низколегированной стали принимают $H_{пл}$=1340 Дж/г [81] (в настоящей работе приняли, что значение $H_{пл}$ для основного и присадочного металлов близки по величине);

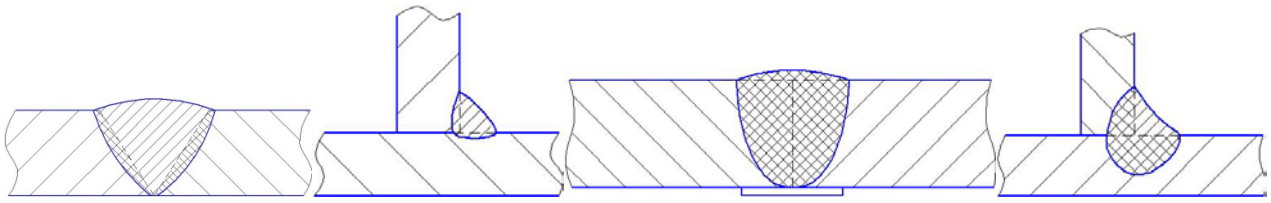
$Q=IU$ – тепловая мощность сварочного источника нагрева, Дж/с.

А.А. Ерохин показал, что из всего многообразия применяемых на практике сварных швов можно выделить, следующие крайние типы [70] (рисунок 1.9):

– швы, образуемые преимущественно наплавленным металлом, у которых коэффициент площадей, равный отношению площади проплавления к площади наплавки, $F_{пр}/F_{н}$, близок к нулю (стыковое соединение с заданными разделкой кромок или зазором и долей участия основного металла (рисунок 1.9, а); угловые швы с малым проплавлением основного металла (с заданным проплавлением) (рисунок 1.9, б));

– швы, образуемые главным образом за счет проплавления основного металла, у которых коэффициент площадей $F_{пр}/F_{н}$ весьма велик (стыковые швы без разделки кромок (рисунок 1.9, в);

– угловые швы с увеличенным проваром относятся к промежуточным типам, так как в их образовании участвует и присадочный и основной металлы в различных соотношениях (рисунок 1.9, г)).



а б в г

Рисунок 1.9–Различные типы сечений зон наплавки и проплавления:
а, б–швы, образуемые преимущественно наплавленным металлом; в–швы, образуемые главным образом основным металлом; г–шов промежуточного типа [70]

Из рассмотренных критериев оценки тепловой эффективности наиболее универсальным является полный тепловой КПД процесса сварки $\eta_{с}$, выражающий отношение условного теплосодержания расплавляемого за единицу времени металла шва к тепловой мощности сварочного источника нагрева

$$h_{с}=\frac{v_{св}\,F_{ш}\,\gamma_{м}\,H_{пл}}{Q}=h_{н}+h_{пр}. \qquad (1.3)$$

Критерий $\eta_{с}$ равен сумме тепловых КПД процессов наплавки $\eta_{н}$ и проплавления $\eta_{пр}$ и характеризует долю тепловой мощности дуги, идущую на разогрев ме-

талла шва с площадью поперечного сечения $F_ш$ до температуры плавления [67, 89, 90].

Однако, с точки зрения оценки эффективности процесса сварки с помощью критерия $\eta_с$, излишние затраты теплоты на проплавление избыточного количества основного металла считаются полезными [67]. Поэтому для обеспечения минимального необходимого проплавления коэффициент площадей ($k=F_{пр}/F_н$) должен находиться в интервале, ограниченном требуемой долей участия основного металла (задается исходя из требований конструкторской документации).

Известно, что доля участия основного металла при используемых режимах сварки (наплавки) плавящимся электродом составляет 15 – 80 % [2].

Долю участия основного металла в металле шва $\gamma_о$ при всех методах сварки плавлением определяют по следующей формуле:

$$\gamma_о = 1 - \gamma_{эл}, \tag{1.4}$$

а долю участия электродного металла определяют по формуле:

$$\gamma_{эл} = \frac{F_н}{F_ш} = \frac{F_н}{F_{пр} + F_н}. \tag{1.5}$$

Выразим коэффициент площадей через коэффициент доли участия основного металла:

$$k = \frac{F_{пр}}{F_н} = \frac{\gamma_о}{1 - \gamma_о}. \tag{1.6}$$

Основываясь на приведенных данных [3] о доли участия основного металла можно сделать вывод о том, что при сварке плавящимся электродом при используемых режимах коэффициент площадей может изменяться в диапазоне от 0,18 до 4.

Таким образом, рассмотренные литературные данные показывают, что при многопроходной сварке плавящимся электродом наиболее типичными дефектами являются несплавления между отдельными валиками и со стенками разделки, вызванные неблагоприятной формой предыдущего валика или наличием подрезов кромок основного металла. Согласно многим исследованиям, снизить вероятность появления несплавлений можно за счет точного позиционирования электрода, оп-

тимизации формирования и раскладки валиков. Однако, также известно, что качество формирования сварного соединения зависит как от геометрических характеристик разделки, техники сварки, так и от параметров режима сварки. Получение заданной глубины проплавления при качественном формировании шва возможно за счет варьирования параметров режима сварки в допустимых пределах. Известные на сегодняшний день методики определения режима сварки ограничены рамками отдельных типов сварных соединений и марок сталей, часто применимы только для однопроходных соединений, не учитывают технологических особенностей многопроходной сварки. Кроме этого, для управления формированием сварного шва за счет изменения параметров режима сварки необходима оценка эффективности процесса сварки. Среди существующих критериев для оценки эффективности использования тепловой энергии дуги на образование сварного соединения определенной площади сечения шва наиболее универсальным является полный тепловой КПД процесса сварки, характеризующий долю тепловой мощности дуги, идущую на расплавление металла сварного шва.

Следовательно, изучение условий распределения теплоты при сварке и более точная оценка тепловой эффективности дуги, а также получение на их основе уравнений для расчета параметров режима сварки для обеспечения качества сварных соединений, учитывающих влияние геометрических и технологических факторов на формирование сварного соединения, является актуальной задачей.

1.3 Цель работы и задачи исследований

Целью данной работы является разработка методики расчета режимов дуговой сварки в защитных газах на основе теоретических и экспериментальных исследований условий формирования шва и распределения теплоты для гарантированного получения качественных сварных соединений из листового металлопроката толщиной от 10 до 50 мм из углеродистой низколегированной стали.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследование влияние угла разделки, положения электрода в разделке, скорости сварки, состава защитного газа и вылета электрода на геометрические размеры сварного шва.

2. Определение полного теплового КПД процесса сварки в смеси защитных газов.

3. Получение аналитических зависимостей геометрических размеров сварного шва и теплового КПД процесса от параметров режима сварки, от формы сечения разделки, от вылета электрода и от состава смеси защитных газов.

4. Разработка методики расчета режимов дуговой сварки в защитных газах при условии получения сварного шва в соответствии с требованиями нормативной документации.

5. Экспериментальное подтверждение разработанной методики.

ГЛАВА 2 ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ НА ФОРМИРОВАНИЕ ШВА В СОЕДИНЕНИЯХ СО СКОСОМ КРОМОК

Эффективное управление процессом проплавления свариваемого металла в условиях дуговой сварки возможно лишь при знании основных закономерностей этого процесса, а также качественного и количественного влияния параметров режима сварки на размеры и форму зоны проплавления. В основу большинства математических моделей, создаваемых для целей управления сварочными процессами, заложены статистически выявляемые зависимости между энергетическими параметрами режима сварки (сварочный ток, напряжение на дуге, скорость сварки и т.д.), с одной стороны, и параметрами, характеризующими качество сварного соединения с другой стороны.

Реальные процессы, если их рассматривать всесторонне, весьма сложны, а сопровождающие их явления – очень разнообразны. Поэтому при построении математической модели процесса или объекта обычно ограничиваются схематичным (упрощенным) его представлением в виде «черного ящика», суть которого состоит в изучении зависимости отклика системы y на изменение входных измеряемых и управляемых параметров x (x_1, x_2, …, x_n) при действии случайных факторов («шума») w (w_1, w_2, …, w_k). [91, 92].

В настоящей работе выходными параметрами заданы площадь сечения валика (как один из параметров, определяющих геометрию шва и качество сварного соединения) и полный тепловой КПД процесса сварки (характеризует эффективность использования сварочной дуги на образование соединения). На основе анализа литературных данных о причинах образования подрезов и несплавлений (п. 1.1) в качестве входных переменных (факторов), оказывающих влияние на формирование сварочного валика, выбраны угол скоса кромок (α), положение электрода – расстояние от оси электродной проволоки до стенок разделки (x), скорость сварки ($v_{св}$), а также состав защитного газа (% CO_2 в смеси Ar+CO_2) и вылет

электрода ($l_э$) (рисунок 2.1).

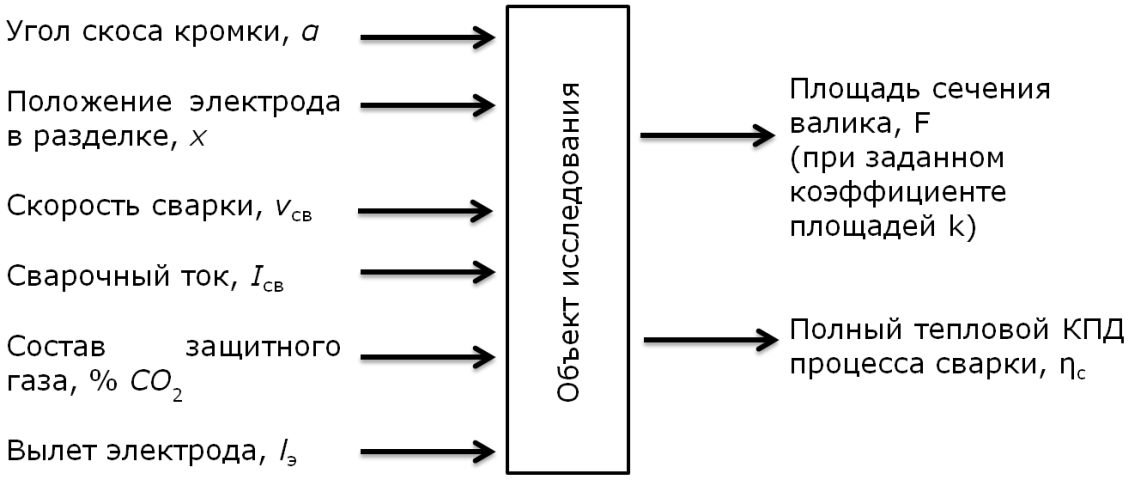


Рисунок 2.1– Модель исследования

При исследовании влияния технологических параметров на характеристики сварного соединения приняты следующие допущения:

1. состав защитного газа и вылет электродной проволоки оказывают независимое от режима сварки ($I_{св}$, $U_д$, $v_{св}$), положения электрода в разделке x, угла скоса кромок, α, влияние на исследуемые параметры (площадь сечения валика, полный тепловой КПД процесса сварки);

2. состав защитного газа и вылет электродной проволоки не имеют взаимного влияния на исследуемые параметры;

3. рассматривается сварка только в нижнем положении;

4. возмущения (искривление проволоки на вылете, погрешность сборки, колебания параметров режима сварки и др.) не рассматривались.

2.1 Общие уравнения зависимости теплового КПД процесса сварки и площади сечения валика

На основании анализа влияния технологических параметров на формирование сварного шва (раздел 1.1.2) и физической модели процесса сварки плавящимся электродом в разделку (раздел 1.1.1) зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от скорости сварки, угла разделки и положения электрода в разделке $F_v(a, x, v_{св})$, $h_v(a, x, v_{св})$ могут быть с достаточной точностью аппроксимированы уравнением регрессии следующего вида [93]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i,j=1}^{k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i,j,u=1}^{k} b_{iju} x_i x_j x_u, \qquad (2.1)$$

где y –функция отклика,

b_0 – экспериментально определяемый свободный член уравнения;

b_i, b_{ij}, b_{iju} – экспериментально определяемые коэффициенты при соответствующих переменных,

x_i, x_j, x_u – переменные факторы.

Уравнения учитывают влияние каждого исследуемого фактора по отдельности, а также их совместное влияние, следовательно, отражают совместное взаимное влияние параметров режима сварки и величины жидкой прослойки под дугой. Однако, для обеспечения адекватности данных уравнений при изменении условий сварки, учитывая принятые допущения 1, 2, необходимо ввести поправочные коэффициенты от сварочного тока, состава защитного газа и вылета электрода. Коэффициенты могут быть экспериментально определены и записаны в виде функций одного аргумента [93]:

$$q_I^F(I_{св}),\ q_{\%}^F(\%CO_2),\ q_l^F(l_э) = \sum x_i^n + b_0. \qquad (2.2)$$

Учитывая вышесказанное, уравнения для определения площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки можно представить в следующем виде:

$$F = F_v(a, x, v_{св}) \cdot q_I^F(I_{св}) \cdot q_{\%}^F(\%\, CO_2) \cdot q_l^F(l_э), \quad (2.3)$$

$$h_c = h_v(a, x, v_{св}) \cdot q_I^h(I_{св}) \cdot q_{\%}^h(\%\, CO_2) \cdot q_l^h(l_э), \quad (2.4)$$

где $F_v(\alpha, x, v_{св})$, $\eta_v(\alpha, x, v_{св})$ – функции зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД соответственно от угла скоса кромок, α, положения электрода в разделке, x, скорости сварки $v_{св}$;

$q_I^F(I_{св})$; $q_{\%}^F(\%\, CO_2)$; $q_l^F(l_э)$ – функции зависимости площади сечения валика от сварочного тока, $I_{св}$, состава защитного газа (процентного содержания углекислого газа, % CO_2, в смеси $Ar+CO_2$) и вылета электрода, $l_э$ соответственно;

$q_I^h(I_{св})$; $q_{\%}^h(\%\, CO_2)$; $q_l^h(l_э)$ – функции зависимости полного теплового КПД процесса сварки от сварочного тока, $I_{св}$, состава защитного газа (процентного содержания углекислого газа, % CO_2, в смеси $Ar+CO_2$) и вылета электрода, $l_э$ соответственно.

2.2 Исследование влияния угла скоса кромок, положения электрода, скорости сварки на площадь сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки

2.2.1 Планирование и проведение эксперимента

Для оценки всех коэффициентов полинома (2.3) необходимо, чтобы в плане эксперимента каждый фактор принимал не менее трех значений [93]. В связи с этим для определения коэффициентов уравнения был проведен полный факторный эксперимент типа 3^k с трехуровневой вариацией факторов (таблица 2.1) по аналогии с полнофакторным экспериментом типа 2^k [94]. Следовательно, количество опытов равно 27, комбинации факторов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Факторы и значения

	Факторы	Уровни варьирования		
		Нижний (минимальный) (-1)	Основной (номинальный) (1)	Верхний (максимальный) (+1)
x_1	Угол скоса кромок, α, град	15	25	35
x_2	Расстояние от нулевого положения электрода* до оси электрода, х, мм	0	1,5/2/3,5**	3/4/7**
x_3	Скорость сварки, м/ч	18	24	30

* - см. рисунок 2.2

** - указано для угла скоса кромок 15º / 25 º/ 35 º

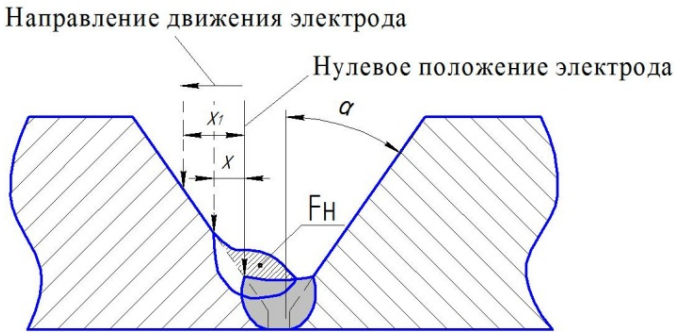


Рисунок 2.2 - Нулевое положение электрода

Таблица 2.2– Комбинации факторов

№	Условное обозначение		
	x_1 (α)	x_2 (x)	x_3 ($v_{св}$)
1	**2**	**3**	**4**
1	-1	-1	-1
2	-1	1	-1
3	-1	1	-1
4	-1	-1	1
5	-1	1	1
6	-1	1	1
7	-1	-1	1
8	-1	1	1

1	2	3	4
9	-1	1	1
10	1	-1	-1
11	1	1	-1
12	1	1	-1
13	1	-1	1
14	1	1	1
15	1	1	1
16	1	-1	1
17	1	1	1
18	1	1	1
19	1	-1	-1
20	1	1	-1
21	1	1	-1
22	1	-1	1
23	1	1	1
24	1	1	1
25	1	-1	1
26	1	1	1
27	1	1	1

Режимы сварки, $I_{св}$, $U_{д}$, $v_{св}$, (таблица 2.3) подбирали таким образом, чтобы обеспечить удовлетворительное формирование шва, опираясь на рекомендуемые режимы автоматической и механизированной сварки в смеси защитных газов сварочной проволокой сплошного сечения стыковых и угловых швов в нижнем положении (таблица 2.4) [47, 95]. Угол скоса кромок изменяли от 15 до 35 градусов. Данный диапазон охватывает большее количество разделок, применяемых при производстве сварных конструкций из проката толщиной от 10 до 50 мм с односторонней разделкой.

Таблица 2.3 – Фиксированные параметры

Диаметр сварочной проволоки, $d_э$, мм	1,2
Сварочный ток, $I_{св}$, А	217
Напряжение дуги, $U_д$, В	21,4
Скорость подачи проволоки, $v_{пп}$, м/мин	6,3
Вылет электрода, $l_э$, мм	20
Угол наклона горелки относительно оси шва, град	0
Расход газа (18 % CO_2+82 % Ar), л/мин	18

Таблица 2.4 – Режимы автоматической и механизированной сварки в смеси защитных газов сварочной проволокой сплошного сечения стыковых и угловых швов в нижнем положении [95]

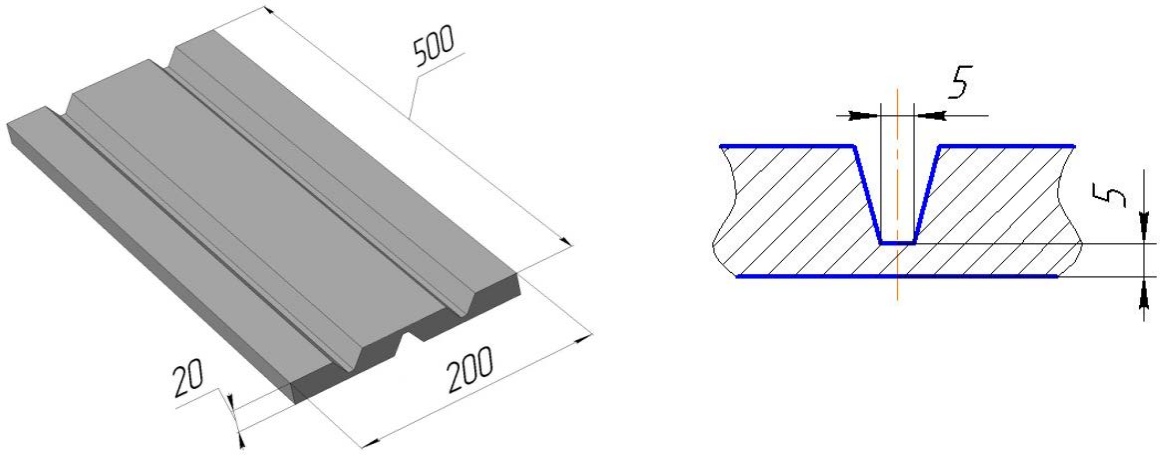
Тип сварного соединения [96]	Толщина металла S или катет шва k, мм	Диаметр сварочной проволоки, мм	Число проходов	Параметры режима		
				Сила сварочного тока $I_{св}$, А	Напряжение дуги $U_д$, В	Скорость сварки $V_{св}$, м/ч
Стыковые соединения С17, С16, С25	S=10…25	1,2	1-й проход последующие	200…220 220…260	18…20 22…24	18…22 18…22
Примечания 1 Расход смеси защитных газов для стыковых соединений 20…24 л/мин, для угловых швов- 18…22 л/мин. 2 Вылет электрода должен быть 8…15 и 15…25 для диаметров сварочной проволоки соответственно 1,2-1,4 и 1,6-2 мм.						

Диаметр электрода может быть выбран в зависимости от толщины металла (или катета шва) (таблица 2.4) с учетом допускаемой плотности тока (таблица 2.5).

При проведении экспериментов использовали образцы из стали 09Г2С. Образец представляет собой пластину размерами 200х500х20 мм. На пластине выполнены канавки, имитирующие сварное соединение с разделкой кромок с выполненным корневым проходом (рисунок 2.3).

Таблица 2.5 – Допускаемая плотность тока и рекомендуемые диапазоны сварочных токов при сварке проволоками Св-08Г2С (обратная полярность) [97]

Состав газа	Диаметр электрода, мм	Допускаемая плотность тока, А/мм^2	Сварочный ток, А			
			С короткими замыканиями	С крупнокапельным переносом	С мелкокапельным переносом	Струйный
$Ar+CO_2$ 8 – 18 %	1,0	25 – 318	-	30 – 180	20 – 150	180 – 250
	1,2	26 – 265	-	40 – 210	30 – 200	210 – 300
	1,4	26 – 227	-	50 – 230	40 – 220	230 – 350
	1,6	25 – 198	-	60 – 250	50 – 250	280 – 400
	2,0	16 – 152	-	70 – 280	50 – 280	280 – 480
$Ar+CO_2$ 20 – 25 %	1,0	25 – 444	40 – 110	100 – 200	20 – 180	200 – 350
	1,2	26 – 326	50 – 170	110 – 220	30 – 230	220 – 370
	1,4	26 – 272	70 – 200	120 – 240	40 – 250	240 – 420
	1,6	25 – 238		150 – 280	50 – 280	280 – 480
	2,0	19 – 174		180 – 300	60 – 300	300 – 550



а) б)

Рисунок 2.3 – Образец для проведения экспериментов:
а) внешний вид образца; б) поперечное сечение канавки

Для сварки применялась проволока сварочная Св-08Г2С диаметром 1,2 мм по ГОСТ 2246-70 [98], смесь защитных газов - К18 по ТУ 2114-004-00204760-99 (аргон 82 %, углекислый газ 18 %).

Для проведения экспериментов была скомпонована установка (рисунок 2.4). В состав установки входят:

- стол с токоподводом;
- механизм перемещения горелки Noboruder NB-5H;
- сварочный аппарат S5 Pulse (LORCH).

Рисунок 2.4 – Общий вид экспериментальной установки

Порядок проведения эксперимента:

1. На режиме сварки, приведенном в таблице 2.3, одинаковом для всех опытов, выполнялась сварка образцов.

Скорость сварки, положение электрода и угол скоса кромок изменяли согласно таблице 2.2. При выполнении опыта фиксировали время сварки, длину валика, фактические значения сварочного тока и напряжения (Приложение 1, таблица 1). Значения сварочного тока и напряжения фиксировали с помощью встроенных в аппарат средств измерений.

2. Изготовили макрошлифы сваренных образцов (внешний вид образца после сварки и примеры макрошлифов приведены на рисунке 2.5), измерением с помощью программы «Компас-3DV12» определили площадь сечения валика (Приложение 1, таблица 1) [99]. При анализе качества формирования сварного шва ограничивались оценкой сплавления, не учитывая форму шва.

3. По результатам измерений, рассчитали полный тепловой КПД процесса сварки по формуле (1.1) (Приложение 1, таблица 1) и построили графики зависимости площади сечения валиков и полного теплового КПД от угла скоса кромок, положения электрода и скорости сварки.

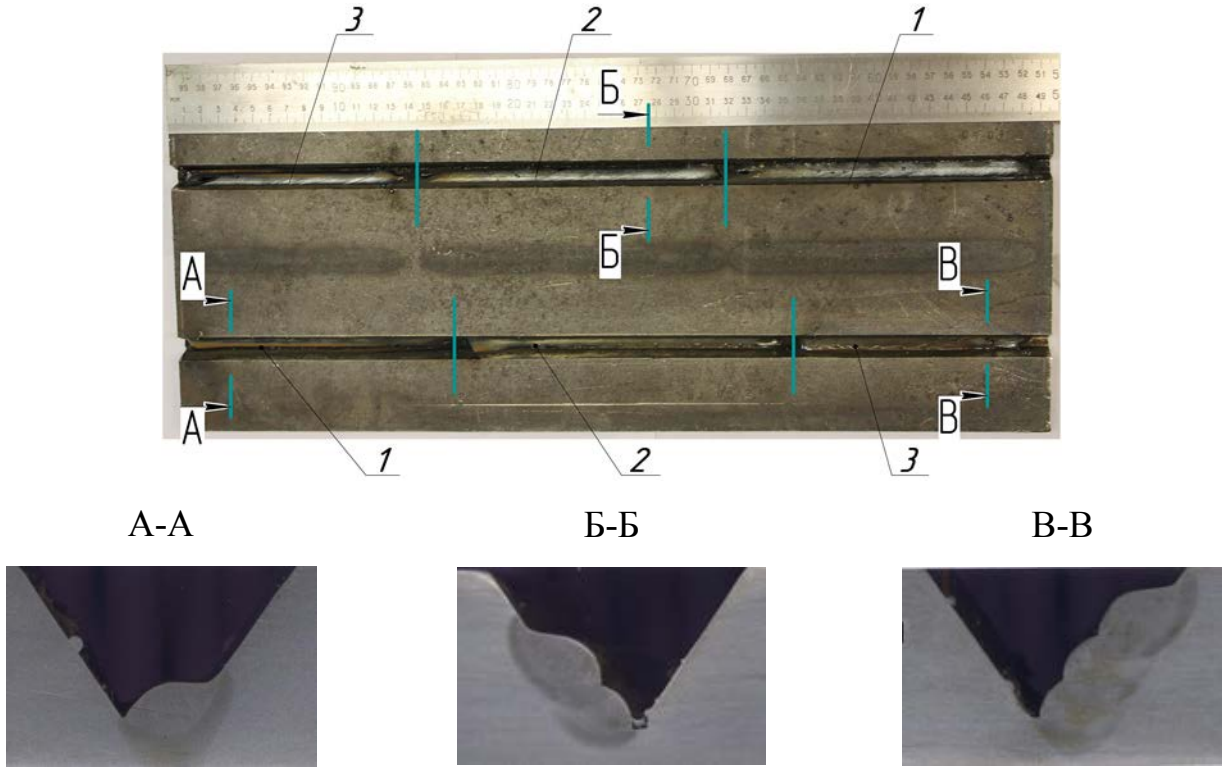


Рисунок 2.5 – Внешний вид образцов после сварки: 1 – участок с одним выполненным валиком, 2 – участок с двумя выполненными валиками; 3 – участок с тремя валиками

По заданным параметрам режима сварки рассчитали площадь наплавленного металла (Приложение 1, таблица 1) по формуле [35]:

$$F_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot V_{\text{пп}}}{4 \cdot V_{\text{св}}}. \quad (2.5)$$

где d- диаметр электрода, мм;

$V_{\text{пп}}$ – скорость подачи проволоки, м/ч;

$V_{\text{св}}$ – скорость сварки, м/ч.

При определении площади наплавленного металла разбрызгивание не учитывается, так как при использовании смеси 80 % *Ar*+20 % CO_2 имеет место струйный перенос практически без разбрызгивания металла и обеспечивается чашеобразный профиль проплавления основного металла, подобный наблюдаемому при сварке в углекислом газе [6, 100].

По данным таблицы 1 Приложения 1 отклонение расчетной величины пло-

щади наплавленного металла от экспериментальной находится в пределах 5 %. Разброс значений может быть обусловлен несколькими причинами:

- погрешностью измерений (~5 %);

- разбрызгиванием металла вследствие изменения характера переноса (порядка 1-3 % [101]).

Таким образом, учитывая условия проведения эксперимента, точность приборов и методов измерений, можно принять, что пренебрежение величиной разбрызгивания при дальнейших рассуждениях является справедливым. В связи с этим при дальнейших расчетах будет использоваться расчетное значение площади наплавленного металла.

2.2.2 Обработка результатов экспериментов

По результатам экспериментов были получены зависимости площади сечения валика и теплового КПД от угла скоса кромок, положения электрода в разделке, скорости сварки. Графики зависимостей приведены на рисунках 2.6 – 2.7.

С увеличением скорости сварки площадь сечения валика уменьшается. Это связано с тем, что при заданном режиме сварки (I, $U = const$) при увеличении скорости сварки уменьшается погонная энергия, следовательно, уменьшается удельное количество наплавленного металла, уменьшается глубина проплавления и, соответственно, площадь сечения валика.

Если рассматривать площадь сечения валика S как функцию скорости сварки и угла скоса кромок в виде $S=f(v_{св}, \alpha)=k \cdot f(v_{св}, \alpha)$, то по графикам видно, что угол наклона (коэффициент k) слабо зависит от положения электрода в разделке.

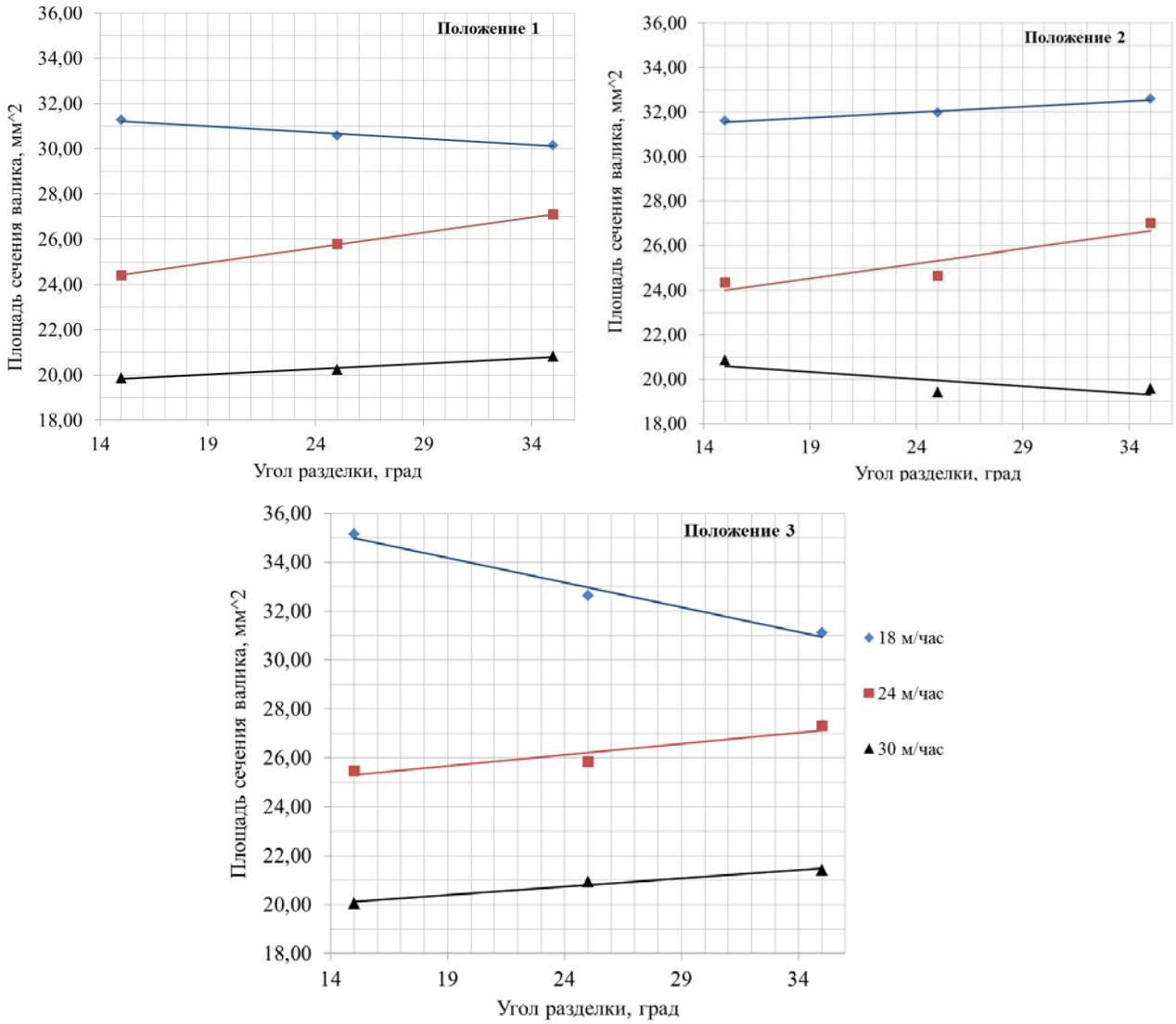


Рисунок 2.6 – Зависимости площади сечения валика от угла скоса кромок при разной скорости сварки

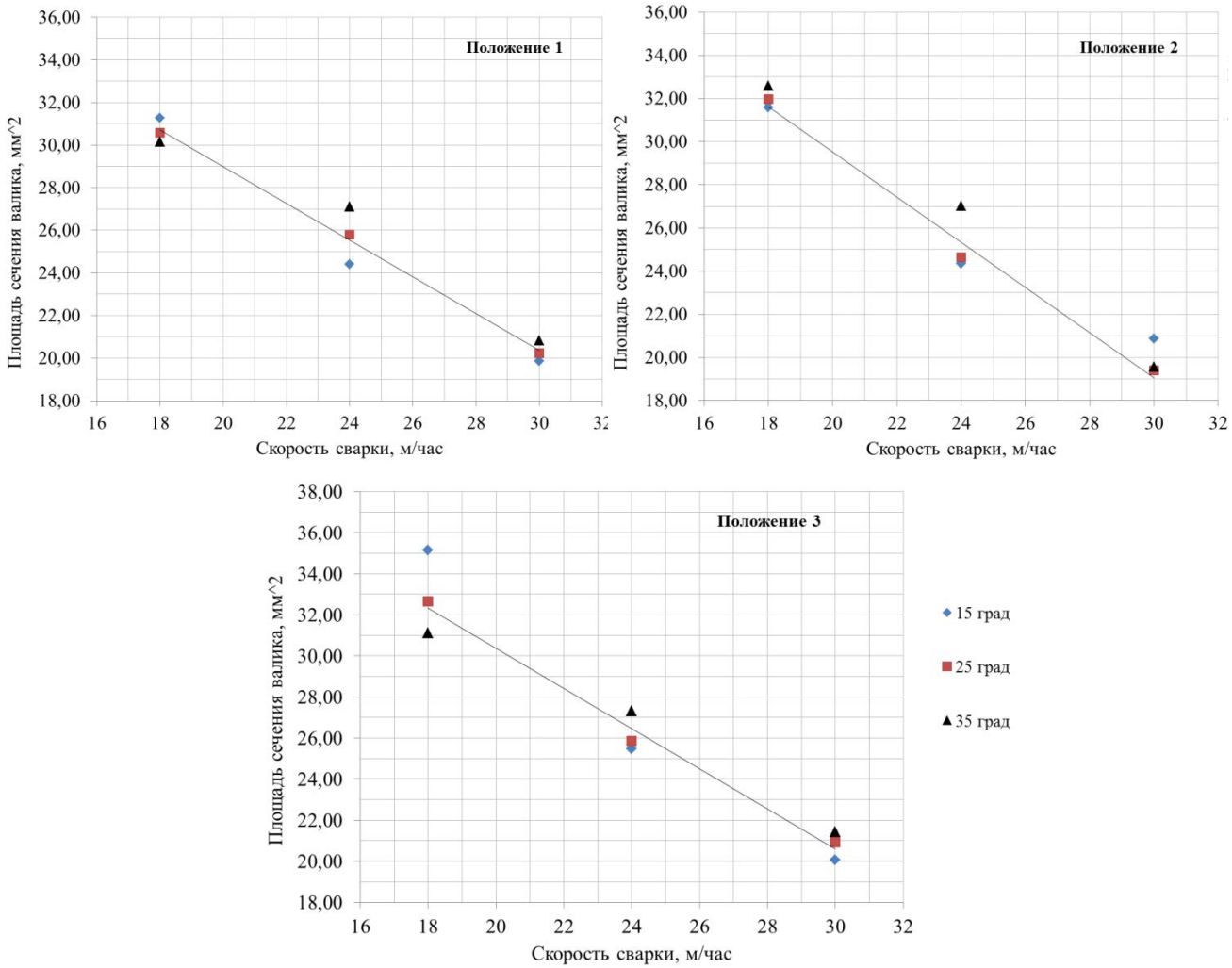


Рисунок 2.7 – Зависимости площади сечения валика от скорости сварки при разных углах скоса кромок

Анализ экспериментальных данных (Приложение 1, таблица 1) позволяет говорить о сложности процессов происходящих при формировании валика, и подтверждает данные о взаимном влиянии величины жидкой прослойки расплавленного металла под дугой и положения дуги относительно сварочной ванны [24, 102 – 104], а, следовательно, о взаимном влиянии геометрии разделки и параметров режима сварки, характеризующем положение электрода (дуги) относительно прослойки расплавленного металла.

Учитывая сложный характер влияния положения электрода на площадь сечения валика, а именно наличие минимальных и максимальных значений, при построении общих уравнений необходимо учитывать взаимное влияние величины жидкой прослойки и положения электрода относительно сварочной ванны. Кроме

того уравнения должны учитывать и саму величину жидкой прослойки.

После обработки результатов экспериментов (Приложение 1, таблица 1) с помощью прикладных компьютерных программ были получены следующие регрессионные уравнения*:

$$F=47,498 - 0,031\cdot x_1 + 4,205\cdot x_2 - 0,956\cdot x_3 - 0,113\cdot x_1\cdot x_2 + 0,003\cdot x_1\cdot x_3 - 0,143\cdot x_2\cdot x_3 + 0,004\cdot x_1\cdot x_2\cdot x_3 \quad (2.6)$$

$$\eta_c = 0,1253 - 0,0055\cdot x_1 + 0,018\cdot x_2 + 0,0239\cdot x_3 + 0,00006\cdot x_1^2 + 0,0006\cdot x_2^2 - 0,0005\cdot x_3^2 - 0,0005\cdot x_1\cdot x_2 + 0,00012\cdot x_1\cdot x_3 - 0,00013\cdot x_2\cdot x_3 \quad (2.7)$$

где F – площадь сечения валика, мм^2,

η_c – полный тепловой КПД процесса сварки,

x_1 – угол скоса кромок, град,

x_2 – положение электрода в разделке, мм,

x_3 – скорость сварки, м/час.

Оценка сходимости показала удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных значений площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки. Проверка адекватности полученных уравнений по F-критерию Фишера дала положительные результаты. Статистическая проверка значимости коэффициентов полученных уравнений показала, что при доверительной вероятности 0,90 на площадь сечения валика и на тепловой КПД процесса сварки наибольшее влияние оказывает положение электрода в разделке и скорость сварки*. Уравнения могут быть записаны в следующем виде:

$$F=47,498 +4,205\cdot x_2-0,956\cdot x_3, \quad (2.8)$$

$$\eta_c=0,1253+0,018\cdot x_2+0,0239\cdot x_3. \quad (2.9)$$

Однако следует отметить, что уравнения (2.8), (2.9) справедливы для конкретного режима сварки (таблица 2.3). Для определения влияния исследуемых факторов при изменении условий сварки следует использовать начальные уравнения (2.6), (2.7).

* Для заданных значений диаметра электрода, сварочного тока, напряжения, расхода газа

2.3 Экспериментальное определение зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от сварочного тока

Для определения функциональной зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от сварочного тока $\theta_F(I_{св})$, $\theta_\eta(I_{св})$ проведен ряд экспериментов. Порядок и условия проведения эксперимента аналогичны описанным в разделе 2.2.1. В качестве источника питания применялся ВДУ-506 с механизмом подачи ПДГО-528 М. Параметры режима сварки приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Фиксированные параметры режима сварки

Угол скоса кромок, град	15
Диаметр сварочной проволоки, $d_э$, мм	1,2
Сварочный ток, $I_{св}$, А	230
Напряжение дуги, $U_д$, В	22
Скорость подачи проволоки, $v_{пп}$, м/мин	9,2
Скорость сварки, $v_{св}$, м/ч	20
Расход газа (18%CO_2+82%Ar), л/мин	18

Фактические режимы сварки, экспериментальные и расчетные данные при определении зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от сварочного тока приведены в таблице 2 Приложения 1.

Коэффициенты $\theta_F(I_{св})$ и $\theta_\eta(I_{св})$ определялись как функции соответствующих поправочных коэффициентов от величины сварочного тока (Приложение 1, таблица 2).

После обработки результатов экспериментов, представленных в Приложении 1, таблицы 1, 2, получены зависимости площади сечения валика и теплового КПД от сварочного тока, $I_{св}$:

$$q_F(I_{св})=0{,}0134 \cdot I_{св} - 1{,}559, \quad (2.10)$$

$$q_\eta(I_{св})=0{,}0047 \cdot I_{св} + 0{,}084. \quad (2.11)$$

2.4 Экспериментальное определение влияния вылета электрода на площадь сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки

Порядок и условия проведения эксперимента аналогичны описанным в разделе 2.2.1. Для проведения экспериментов использовались источник питания ВДУ-506 с механизмом подачи проволоки ПДГО-528 М и механизм перемещения горелки *NB-5H*.

Параметры режима сварки при проведении экспериментов приведены в таблице 2.7.

Вылет электрода изменяли от 10 до 30 мм с шагом 5 мм.

Для проверки допущения о том, что вылет электрода оказывает независимое от режима сварки ($I_{св}$, $U_д$, $v_{св}$) влияние на параметры сварного шва, эксперимент повторили, изменяя режим сварки.

Коэффициенты $\theta_l{}^F(l_э)$ и $\theta_l{}^\eta(l_э)$ определялись как функции соответствующих поправочных коэффициентов от величины вылета электрода (Приложение 1, таблица 3). На рисунках 2.8, 2.9 приведены зависимости коэффициентов $\theta_l{}^F(l_э)$ и $\theta_l{}^\eta(l_э)$ от вылета электрода.

Таблица 2.7 – Фиксированные параметры режима сварки

Угол скоса кромок, α, град	25
Диаметр сварочной проволоки, $d_э$, мм	1,2
Сварочный ток, $I_{св}$, А	220
Напряжение дуги, $U_д$, В	22
Скорость подачи проволоки, $v_{пп}$, м/мин	6,3
Скорость сварки, $v_{св}$, м/ч	20
Расход газа (18 % CO_2+82 % Ar), л/мин	18

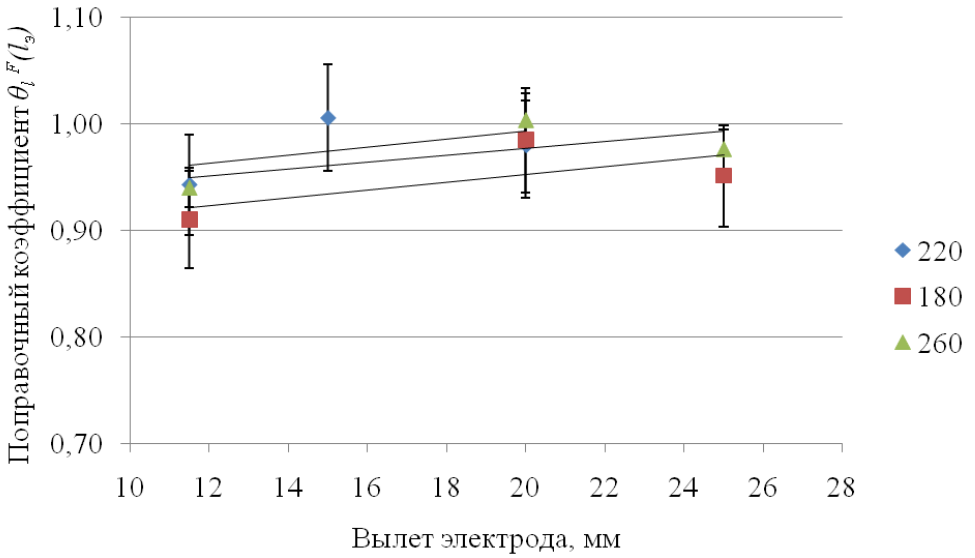


Рисунок 2.8–Зависимость поправочного коэффициента $\theta_l{}^F(l_э)$ от вылета электрода

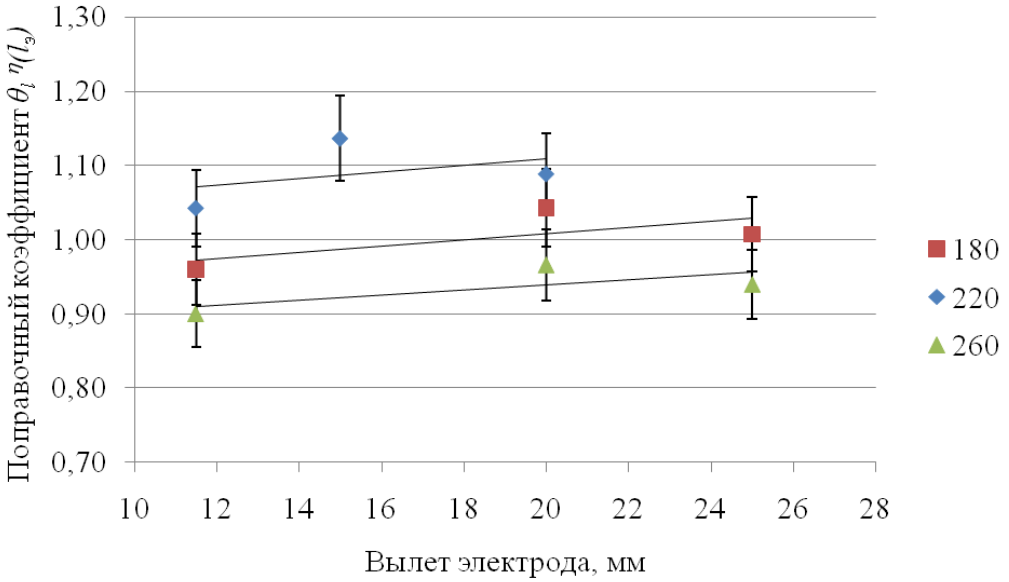


Рисунок 2.9 –Зависимость поправочного коэффициента $\theta_l{}^\eta(l_э)$ от вылета электрода

Графики, приведенные на рисунках 2.12, 2.13 показывают, что при рассмотренных значениях величины сварочного тока характер изменения поправочного коэффициента для площади сечения валика и теплового КПД от вылета электрода идентичный. Следовательно, при определении площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки можно принять допущение 1 об отсутствии взаимного влияния вылета электрода и сварочного тока. После обработки результатов экспериментов, представленных в таблице 3 Приложения 1, коэффициенты $\theta_l^F(l_э)$ и $\theta_l{}^\eta(l_э)$ получены в виде функций от вылета электрода, $l_э$:

$$q_l^F(l_э)=0,004Ч_э + 0,89; \quad (2.12)$$

$$q_l^h(l_э)=0,002Ч_э + 0,95. \quad (2.13)$$

2.5 Экспериментальное определение зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от состава защитного газа

Порядок и условия проведения эксперимента аналогичны описанным в разделе 2.2.1. Для проведения экспериментов использовались источник питания ВДУ-506 с механизмом подачи проволоки ПДГО-528 М и механизм перемещения горелки NB-5H.

Параметры режима сварки при проведении экспериментов приведены в таблице 2.8.

Содержание углекислого газа в смеси защитных газов изменяли в соответствии с таблицей 2.9.

Параметры режима сварки и результаты экспериментов приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.8 – Фиксированные параметры

Угол скоса кромок,α, град	25_{-5}
Диаметр сварочной проволоки, $d_э$, мм	1,2
Сварочный ток, $I_{св}$, А	260
Напряжение дуги, $U_д$, В	28
Скорость подачи проволоки, $v_{пп}$, м/ч	632,4
Скорость сварки, $v_{св}$, м/ч	20
Вылет электрода, $l_э$, мм	20

Таблица 2.9–Состав защитного газа

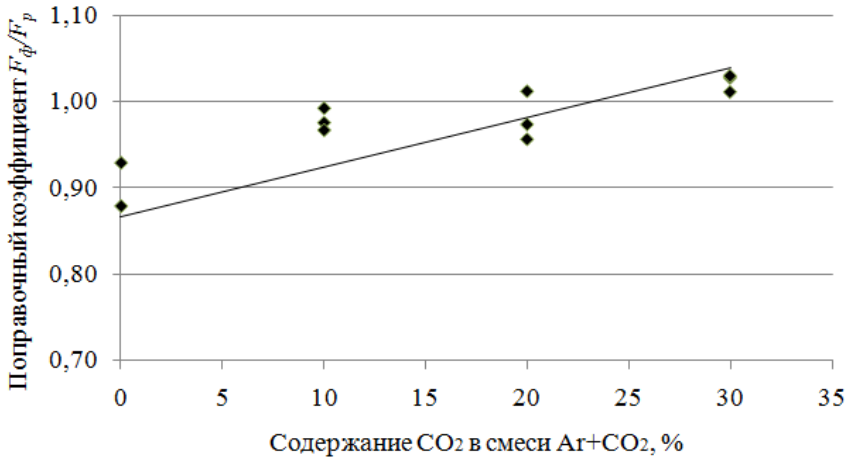
Факторы	Значение			
Состав защитного газа, %	100 % *Ar*	90 % *Ar*+ 10 % CO_2	80 % *Ar*+ 20 % CO_2	70 % *Ar*+ 30 % CO_2

Таблица 2.10–Экспериментальные и расчетные данные при определении зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от состава защитного газа

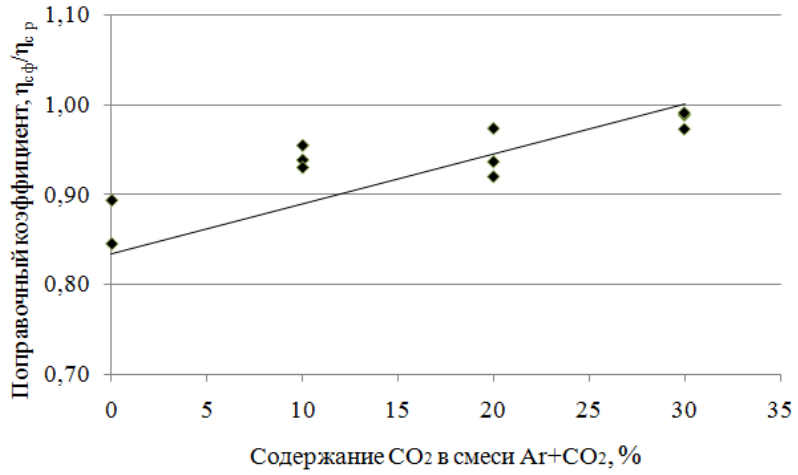
№ образца		Содержание CO_2 в смеси, %	Сварочный ток, А (во время сварки)	Напряжение, В (во время сварки)	Площадь сечения валика, F, мм^2			Полный тепловой КПД процесса сварки, η_c		
					Экспериментальные значения ($F_ф$)	Расчетные значения (F_p) (по уравнению (2.6, 2.10, 2.12))	Поправочный коэффициент($F_ф/F_p$)	Экспериментальные значения ($\eta_{c\,ф}$)	Расчетные значения ($\eta_{c\,p}$) (по уравнению (2.7, 2.11, 2.13))	Поправочный коэффициент ($\eta_{c\,ф}/\eta_{c\,p}$)
1		**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
2 01	1	0	242	28	45,8	49,30	0,93	0,383	0,444	0,86
	2	0	242	28	33,95	49,30	0,69	0,284	0,444	0,64
	3	0	242	28	43,32	49,30	0,88	0,362	0,444	0,82
2 02	1	10	242	28	48,1	49,30	0,98	0,402	0,444	0,91
	2	10	242	28	47,67	49,30	0,97	0,399	0,444	0,90
	3	10	242	28	48,93	49,30	0,99	0,409	0,444	0,92

Продолжение таблицы 2.10

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
2 03	1	20	242	28	47,15	49,30	0,96	0,394	0,444	0,89
	2	20	242	28	49,9	49,30	1,01	0,417	0,444	0,94
	3	20	242	28	48	49,30	0,97	0,401	0,444	0,90
2 04	1	30	242	28	50,67	49,30	1,03	0,424	0,444	0,95
	2	30	242	28	49,86	49,30	1,01	0,417	0,444	0,94
	3	30	242	28	50,79	49,30	1,03	0,425	0,444	0,96



а)



б)

Рисунок 2.10 – Влияние процентного содержания CO_2 в смеси защитных газов на: а) площадь сечения валика; б) полный тепловой КПД процесса сварки

Полученные экспериментальные данные показывают, что при увеличении доли CO_2 в смеси защитных газов (от 0 до 30%) площадь сечения валика увеличивается. При одинаковом режиме сварки ($I_{св}$=*const*, $v_{св}$=*const*), обеспечивающем одинаковом количестве наплавленного металла, увеличение площади сечения валика объясняется увеличением площади проплавления, что согласуется и известными литературными данными (раздел1.1.2).

После обработки результатов экспериментов, представленных в таблице 2.10,таблицах 1-3 Приложения 1 получены зависимости площади сечения валика и теплового КПД от процентного содержания CO_2:

$$q_{\%}^{F}(\%_{CO_2}) = 0{,}003 \cdot \%\ CO_2 + 0{,}92 \qquad (2.14)$$

$$q_{\%}^{h}(\%_{CO_2}) = 0{,}006 \cdot \%\ CO_2 + 0{,}83 \qquad (2.15)$$

Тогда общие уравнения зависимости теплового КПД процесса сварки и площади сечения валика примут вид:

$$\begin{aligned} F = F_v(a, x, v_{св}) \cdot q_F(I_{св}) = {} & (47{,}50 - 0{,}031 \cdot a + 4{,}205 \cdot x - 0{,}956 \cdot v_{св} - 0{,}113 \cdot a \cdot x + \\ & + 0{,}003 \cdot a \cdot v_{св} - 0{,}143 \cdot x \cdot v_{св} + 0{,}004 \cdot a \cdot x \cdot v_{св}) \cdot (0{,}013 \cdot I_{св} - 1{,}56) \cdot \\ & \cdot (0{,}004 \cdot I_э + 0{,}89) \cdot (0{,}003 \cdot \%\ CO_2 + 0{,}92) \end{aligned} \qquad (2.16)$$

$$\begin{aligned} h_c = h_v(a, x, v_{св}) \times q_h(I_{св}) = {} & (0{,}125 - 0{,}006 \cdot a + 0{,}018 \cdot x + 0{,}024 \cdot v_{св} + 0{,}00006 \cdot a^2 + \\ & + 0{,}0006 \cdot x^2 - 0{,}0005 \cdot v_{св}^{\ 2} - 0{,}0005 \cdot a \cdot x + 0{,}00012 \cdot a \cdot v_{св} - 0{,}00013 \cdot x \cdot v_{св}) \cdot \\ & \cdot (0{,}005 \cdot I_{св} + 0{,}08) \cdot (0{,}002 \cdot I_э + 0{,}95) \cdot (0{,}006 \cdot \%\ CO_2 + 0{,}83) \end{aligned} \qquad (2.17)$$

2.6 Граничные условия параметров режима сварки для получения качественного формирования шва

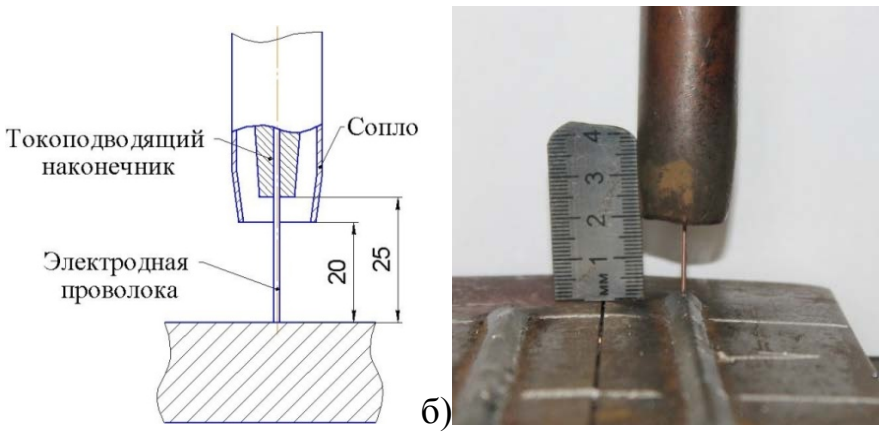
Граничные условия – это значения параметров на границах рассматриваемых диапазонов, которые позволяют задавать интервалы изменения параметров режима сварки при условии сохранения стабильного процесса сварки и каче-

ственного формирования сварного шва.

2.6.1 Экспериментальное определение диапазона рабочих напряжений и тока

Для определения диапазона рабочих напряжений в конкретных условиях (защитный газ – 82 % *Ar* + 18 % CO_2, диаметр электрода 1,2 мм, вылет электрода 25 мм) проведен ряд экспериментов. Диапазоны рабочих напряжений определяли для источника питания типа ВДУ-506 с механизмом подачи ПДГО-528 М и для сварочного аппарата инверторного типа S8.

При проведении экспериментов использовали образцы из стали 09Г2С (300х120х20 мм). Для сварки применялась проволока сварочная Св-08Г2С диаметром 1,2 мм по ГОСТ 2246-70, смесь защитных газов - К18 по ТУ 2114-004-00204760-99 (82 % *Ar* + 18 % CO_2), расход - 18 л/мин. Расстояние между соплом и изделием – 20 мм (рисунок 2.11).



а) б)

Рисунок 2.11 - Схема эксперимента: а) схема с размерами; б) фотография

Диапазон рабочих напряжений и тока приведен на рисунке 2.12.

В ходе эксперимента изменяли сварочный ток от 50 до 400 А с шагом 50 А. При каждом значении сварочного тока изменяли напряжение от минимального (при котором обеспечивается надежное зажигание дуги) до максимального (при

котором процесс сварки остается устойчивым). Устойчивым считали процесс, при котором обеспечивается удовлетворительное формирование сварного шва (валик ровный, мелкочашуйчатый, без подрезов и прожогов) [105].

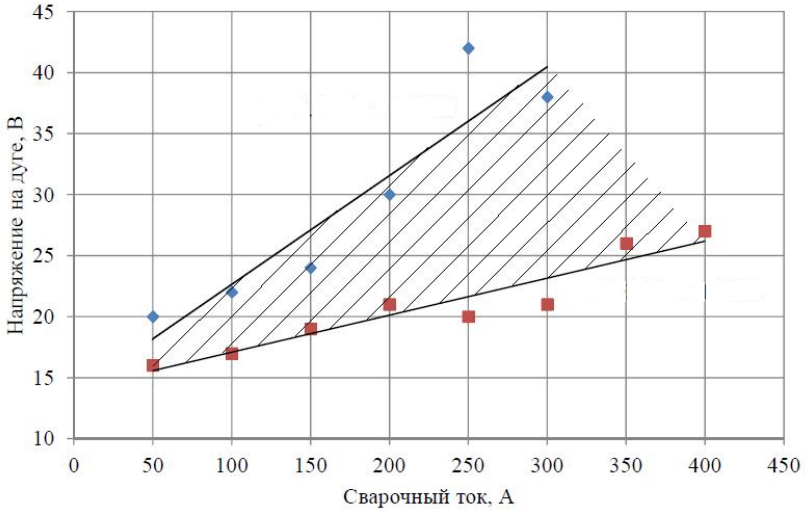


Рисунок 2.12 – Диапазон рабочих напряжений и тока для ВДУ-506

Аналогичный эксперимент для определение диапазона рабочих напряжений и тока проведен для источника питания инверторного типа S8. Полученный диапазон рабочих напряжений и тока приведен на рисунке 2.13.

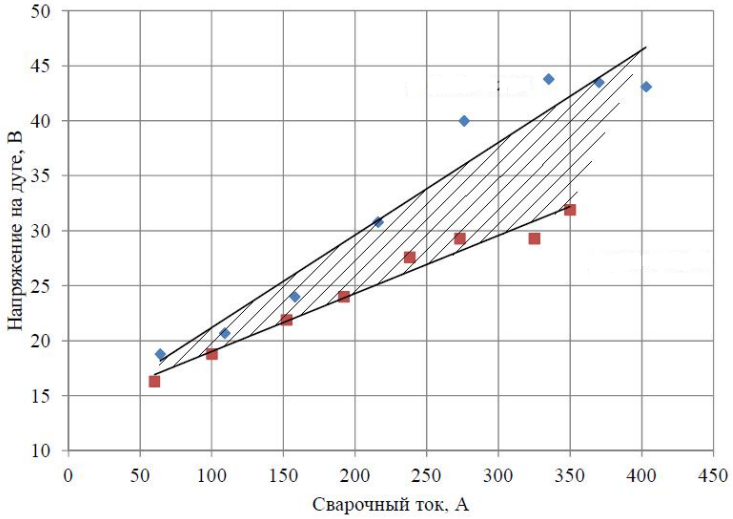


Рисунок 2.13 – Диапазон рабочих напряжений для сварочного аппарата S8

В результате обработки экспериментальных данных методом линейной аппроксимации были получены следующие выражения для определения границ диапазона рабочих напряжений для источника ВДУ-506:

- верхняя граница: $U_д^в$=0,09·$I_{св}$+13,73, В;

- нижняя граница: $U_д^в$=0,03·$I_{св}$+14,07, В.

для источника S8:

- верхняя граница: $U_д^в$=0,08·$I_{св}$+12,78, В;

- нижняя граница: $U_д^в$=0,05·$I_{св}$+13,78, В.

По рисункам 2.16, 2.17 видно, что при использовании инверторного источника питания диапазон рабочих напряжений имеет более узкую область. Это может быть объяснено тем, что инверторные источники питания имеют собственную программу управления сварочными процессами, которая накладывает свои ограничения на параметры режима сварки и корректирует их в процессе сварки. В связи с этим дальнейшие исследования будут проводиться на источнике питания ВДУ-506.

2.6.2 Определение рабочего напряжения при заданном коэффициенте площадей

Под рабочим понимается напряжение, при котором обеспечивается устойчивый процесс сварки, небольшое разбрызгивание (1–3 %), удовлетворительное формирование шва.

Полный тепловой КПД процесса сварки может быть определен по формуле (1.1):

$$\eta_с = \frac{v_{св} \cdot F \cdot \gamma_м \cdot H_{пл}}{Q} = \frac{v_{св} \cdot F \cdot \gamma_м \cdot H_{пл}}{I_{св} \cdot U_д}, \qquad (1.1)$$

где F – площадь сечения валика, мм^2.

Также полный тепловой КПД процесса сварки можно определить по экспериментально полученному регрессионному уравнению (2.17).

При условии заданного коэффициента площадей kполучим:

$$F=(F_{осн.м}+F_н)=(1+k)\cdot F_н \qquad (2.18)$$

Определим площадь расплавляемой присадочной проволоки. Условно валик будем рассматривать как цилиндр с площадью поперечного сечения $F_{\text{сеч пп}}$ и длиной l.

Объем наплавленного металла определяется по формуле:

$$V_{\text{н}} = F_{\text{сеч.пп}} \cdot v_{\text{пп}} \cdot t_{\text{св}}, \text{ м}^3, \tag{2.19}$$

где $V_{\text{п}}$ – объем наплавленного металла, м^3,

$F_{\text{сеч.пп}}$ – площадь сечения сварочной проволоки, мм^2,

$v_{\text{пп}}$ – скорость подачи проволоки, м/мин,

$t_{\text{св}}$ – время сварки, мин.

$$F_{\text{н}} = \frac{F_{\text{сеч.пп}} \cdot v_{\text{пп}} \cdot t_{\text{св}}}{l} = \frac{F_{\text{сеч.пп}} \cdot v_{\text{пп}} \cdot t_{\text{св}}}{v_{\text{св}} \cdot t_{\text{св}}} = \frac{p \cdot d^2}{4} \cdot \frac{v_{\text{пп}}}{v_{\text{св}}}, \text{ мм}^2, \tag{2.20}$$

где $l = v_{\text{св}} \cdot t_{\text{св}}$ – длина валика.

Подставив полученное выражение в формулу (2.18), получим

$$F = (1+k) \cdot \frac{p \cdot d^2}{4} \cdot \frac{v_{\text{пп}}}{v_{\text{св}}}, \tag{2.21}$$

При подстановке (2.21) в (1.1) получим

$$h_{\text{с}} = \frac{v_{\text{св}} \cdot g_{\text{м}} \cdot H_{\text{пл}}}{I \cdot U} \cdot \frac{(1+k) \cdot p \cdot d^2}{4} \cdot \frac{v_{\text{пп}}}{v_{\text{св}}} \Rightarrow h_{\text{с}} = \frac{\gamma_{\text{м}} \cdot H_{\text{пл}}}{I \cdot U} \cdot \frac{(1+k) \cdot \pi \cdot d^2}{4} \cdot v_{\text{пп}} \tag{2.22}$$

где $v_{\text{пп}}$ – скорость подачи проволоки, м/с.

Для уменьшения громоздкости приведения дальнейших вычислений введем коэффициент

$$B_{\text{эф}} = \gamma_{\text{м}} \cdot H_{\text{пл}} \cdot \frac{(1+k)}{4} \cdot \pi \cdot d^2. \tag{2.23}$$

Приравняв (2.13) и (2.20), получим

$$f(a, v_{\text{св}}) \cdot h_{\eta}(I_{\text{св}}) = \frac{B_{\text{эф}}}{I \cdot U} \cdot v_{\text{пп}} \Rightarrow v_{\text{пп}} = \frac{f(\alpha, v_{\text{св}}) \cdot h_{\eta}(I_{\text{св}}) \cdot I \cdot U}{B_{\text{эф}}} \tag{2.24}$$

$$h_{\text{с}} = B_{\text{эф}} \cdot \frac{v_{\text{пп}}}{I \cdot U} = f(a, v_{\text{св}}). \tag{2.25}$$

Известно, что отношение сварочного тока и скорости подачи проволоки по-

стоянно ($I/v_{пп} = const$) [35], следовательно, при заданном токе, скорость подачи проволоки может быть определена по зависимости:

$$v_{пп} = f(I) = a \cdot I + b . \quad (2.26)$$

Для определения коэффициентов a и b в выражении (2.24) при сварке в смеси защитных газов проволокой диаметром 1,2 мм проведен ряд экспериментов. Эксперименты проводились с применением источника питания инверторного типа S8, защитный газ – 82 % Ar + 18% CO_2, расстояние от сопла до изделия – 20 мм. По результатам проведенных экспериментов построена зависимость скорости подачи проволоки от сварочного тока (рисунок 2.14) и получено аналитическое выражение этой зависимости:

$$v_{пп} = 0{,}078 \cdot I_{св} - 8{,}32 , \text{ м/мин.} \quad (2.27)$$

Преобразовав уравнение (2.25), получим

$$\frac{h_c}{B_{эф}} \cdot \frac{I}{v_{пп}} = \frac{1}{U_{эф}} \Rightarrow U_{эф} = \frac{B_{эф} \cdot v_{пп}}{h_c \cdot I} \quad (2.28)$$

$$U_{раб} \approx U_{эф} \quad (2.29)$$

Для стабильности получения заданных величин k и η_c в процессе сварки необходимо поддерживать равенство (2.29) путем контроля напряжения.

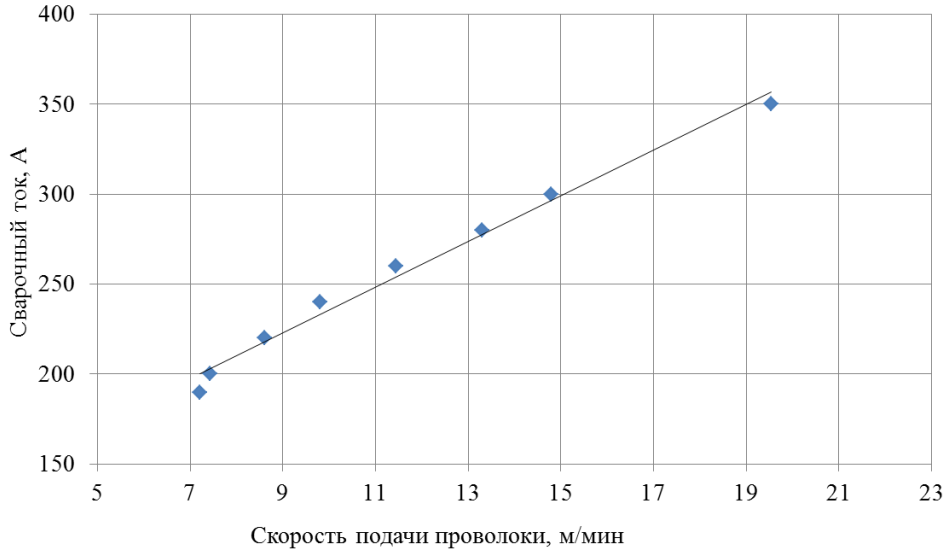


Рисунок 2.14 – Зависимость сварочного тока от скорости подачи сварочной проволоки

2.6.3 Граничные условия скорости сварки

При разработке технологического процесса для получения сварной конструкции с минимальными остаточными деформациями возникает необходимость ограничения величины погонной энергии, которая определяет тепловое воздействие на свариваемый металл, следовательно, величину сварочных деформаций, а также механические свойства металла шва (предписывается нормативной документацией).

Погонной энергией называется отношение эффективной мощности дуги к скорости сварки [6]:

$$q_{\text{п}} = \frac{q}{v_{\text{св}}} = \frac{0,24 \cdot I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{и}}}{v_{\text{св}}}, \text{Дж/м}, \qquad (2.30)$$

где $U_{\text{д}}$ – напряжение дуги;

$\eta_{\text{и}}$ – эффективный КПД дуги.

При заданном режиме сварки ($I_{\text{св}}$, $U_{\text{д}}$) ограничение погонной энергии возможно за счет ограничения минимальной скорости сварки. Должно выполнять следующее соотношение: $v_{\text{св}}^{\text{факт.}} \geq v_{\text{св}}^{\text{задан.}}$, (2.31)

где $v_{\text{св}}^{\text{факт}}$ – фактическая скорость сварки; $v_{\text{св}}^{\text{задан}}$ – заданная скорость сварки, определяется по формуле:

$$v_{\text{св}} = \frac{a_{\text{н}} \cdot I_{\text{св}}}{3600 \cdot \gamma \cdot F_{\text{н}}}, \qquad (2.32)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент наплавки г/А·ч; γ – плотность наплавленного металла, г/см^3; $F_{\text{н}}$ – площадь поперечного сечения наплавленного металла за данный проход, см^2.

Вернемся к уравнению (2.20), согласно которому скорость сварки оказывает влияние на площадь наплавленного металла. Согласно уравнению (2.27) при заданном сварочном токе $I_{\text{св}}$ и фиксированном диаметре электрода фактически задается скорость подачи проволоки. Следовательно, уравнение (2.20)может быть записано в следующем виде:

$$F_н = v_{пп} \cdot \frac{p \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{v_{св}} \Rightarrow F_н = k \cdot \frac{1}{v_{св}}$$

Очевидно, что функция $F_н = f(v_{св})$ не имеет экстремумов, при увеличении скорости сварки площадь наплавленного металла уменьшается.

При проектировании технологии и определении режимов сварки для уменьшения времени сварки необходимо по возможности уменьшать количество проходов, увеличивая площадь наплавленного металла $F_н$, следовательно (исходя из соотношения (2.20)), уменьшать скорость сварки, ограничиваясь другими условиями. $v_{св} \to v_{св\ min}$ - критерий оптимальности по данному параметру.

В общем виде граничные условия параметров сварки для получения качественного формирования шва могут быть записаны в следующем виде:

- $I_{св}, U_д$ – области оптимальных параметров, рисунок 2.27
- $U_{св} \to U_{эф}$
- $q_{пог} \le q_{пог}^{доп}$ (ограничение погонной энергии, если требования по ограничению предусмотрены нормативной документацией)
- $v_{св}^{факт.} \ge v_{св}^{задан.}$ (верхняя граница скорости сварки, исходя из ограничения погонной энергии)
- $v_{св} \to v_{св\ min}$ (нижняя граница скорости сварки, исходя из условия уменьшения количества проходов, следовательно уменьшения времени сварки)

Выводы по главе 2

1. В результате исследований влияния угла скоса кромок, положения электрода в разделке и скорости сварки установлено, что при перемещении электрода по ширине разделки эти зависимости имеют сложный характер: при одних условиях ($v_{св}$, α) при перемещении электрода к кромке значения площади сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки возрастают, а при других – убывают, что обусловлено взаимным влиянием геометрии разделки и параметров ре-

жима сварки, характеризующих положение электрода (дуги) относительно прослойки расплавленного металла.

2. На основании анализа влияния параметров режима сварки на геометрические размеры сварного шва и физического описания процесса сварки плавящимся электродом в разделку сформулированы и записаны в общем виде уравнения для определения площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки.

3. Получены аналитические зависимости геометрических размеров сварного шва и полного теплового КПД процесса сварки от угла скоса кромок, положения электрода в разделке, скорости сварки, сварочного тока, а также от вылета электрода и от состава защитного газа (процентного содержания углекислого газа в смеси Ar+ 0–30 % CO_2).

4. На основе экспериментальных данных сформулированы граничные условия технологических параметров сварки для получения качественного формирования сварного соединения с заданным коэффициентом площадей.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ДУГОВОЙ СВАРКИ В ГАЗАХ

При проектировании сварной конструкции показатели качества обычно указываются на чертежах в виде прямых указаний отсутствия внешних и внутренних дефектов, а также формы и размеров поперечного сечения шва. Показатели качества являются исходными данными для проектирования технологии сварки и налагают жесткие требования при выборе способа сварки, сварочных материалов и параметров режима сварки [95, 96].

Полученные в настоящей работе зависимости показателей, характеризующих качество сварного соединения от параметров режима сварки, позволяют решить обратную задачу по определению технологических показателей сварки [64, 106, 107]. Задаваясь коэффициентом площадей и площадью наплавленного металла, можно рассчитать параметры режима сварки, при которых обеспечивается получение качественных сварных соединений.

3.1 Экспериментальная проверка адекватности полученных уравнений

Для проверки адекватности полученных регрессионных уравнений были проведены дополнительные эксперименты. По заданным параметрам режима сварки (таблицы 3.1, 3.2) выполнили расчет предполагаемого коэффициента площадей и определили его экспериментально.

Таблица 3.1 – Факторы и значения

Факторы	Значения		
Скорость сварки, м/ч	20	25	30
Напряжение на дуге, $U_д$, В	24	26	28

Таблица 3.2 – Фиксированные параметры

Угол скоса кромок, α, град	35
Диаметр сварочной проволоки, d, мм	1,2
Сварочный ток, $I_{св}$, А	270
Скорость подачи проволоки, м/мин	12 м/мин = 0,2 м/с
Вылет электрода, мм	20
Угол наклона горелки относительно оси шва, град	0
Расход газа (18 % CO_2+82 % Ar), л/мин	18

Расчетным способом коэффициент площадей, k, может быть выражен из формулы (2.22):

$$k = \frac{B_{эф} \cdot \eta}{\gamma_м \cdot H_{пл} \cdot \rho \cdot d^2} - 1. \qquad (2.22)$$

Коэффициент $B_{эф}$ рассчитывается из формулы (2.23):

$$B_{эф} = \frac{h_с \cdot I_{св} \cdot U_д}{v_{пп}}. \qquad (2.24)$$

Значение полного теплового КПД процесса сварки вычислим по полученному регрессионному уравнению (2.17).

$$h_c = h_v(a, x, v_{св}) \cdot h(I_{св}) = (0{,}125 - 0{,}006 \cdot a + 0{,}018 \cdot x + 0{,}024 \cdot v_{св} + \\ + 0{,}00006 \cdot a^2 + 0{,}0006 \cdot x^2 - 0{,}0005 \cdot v_{св}^2 - 0{,}0005 \cdot a \cdot x + 0{,}00012 \cdot a \cdot v_{св} - \\ - 0{,}00013 \cdot x \cdot v_{св}) \cdot (0{,}005 \cdot I_{св} + 0{,}08) \cdot (0{,}02 \cdot l_э - 0{,}95) \cdot (0{,}006 \cdot \%\, CO_2 + 0{,}83) \qquad (2.17)$$

Для экспериментального определения коэффициента площадей на заданном режиме (таблица 3.1) была выполнена сварка образцов.

Внешний вид экспериментальной установки приведен на рисунке 3.1. В состав установки входят:

стол с токоподводом;

механизм перемещения горелки Noboruder NB-5H;

источник питания ВДУ-506 с механизмом подачи проволоки ПДГО-528 М.

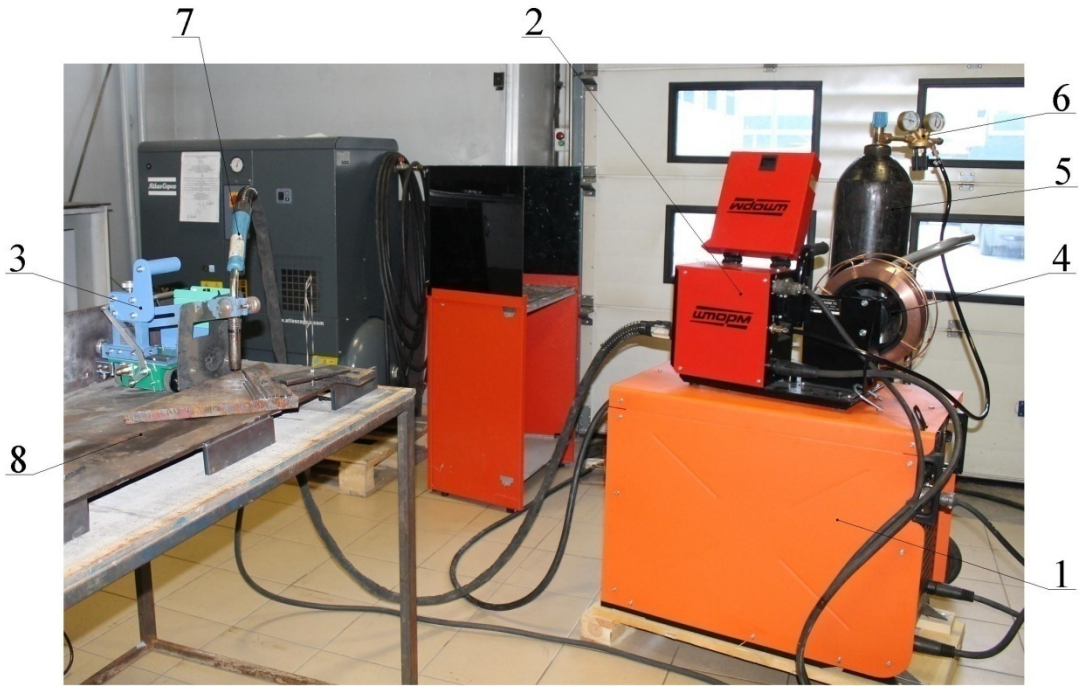


Рисунок 3.1 – Внешний вид экспериментальной установки:
1 – источник питания ВДУ-506; 2 – подающий механизм ПДГО-528 М; 3 – механизм перемещения горелки NB-5H; 4 – катушка со сварочной проволокой; 5 – баллон с газовой смесью ($Ar+CO_2$); 6 – редуктор газа Constant-2000; 7 – горелка сварочная, водоохлаждаемая; 8 – сборочное приспособление

На режиме, приведенном в таблице 3.2, выполнили сварку образцов (эксперименты аналогичны экспериментам, описанным в п. 2.1.1). Из полученных образцов были изготовлены макрошлифы, измерением которых определили площадь сечения валика. Рассчитали площадь наплавленного металла, площадь проплавления, коэффициент площадей (по формуле 1.2).

Экспериментальные и расчетные данные приведены в таблице 1 Приложения 2.

Представленные данные (Приложение 2, таблица 1) показывают, что максимальный разброс значений на рассматриваемом участке составляет ~25 %.

3.2 Оценка сходимости результатов

Для общей оценки сходимости результатов исследований, проведенных в настоящей работе, выполнено сравнение расчетных и экспериментальных значений площади сечения валика, полного теплового КПД процесса сварки и коэффициента площадей по данным всех проведенных экспериментов. Результаты сравнения приведены на рисунках 3.2, 3.3, 3.4. Прямая линия показывает полное совпадение расчетных и экспериментальных значений, каждая точка показывает соответствие значения, рассчитанного по уравнениям (2.16), (2.17) экспериментально полученным данным.

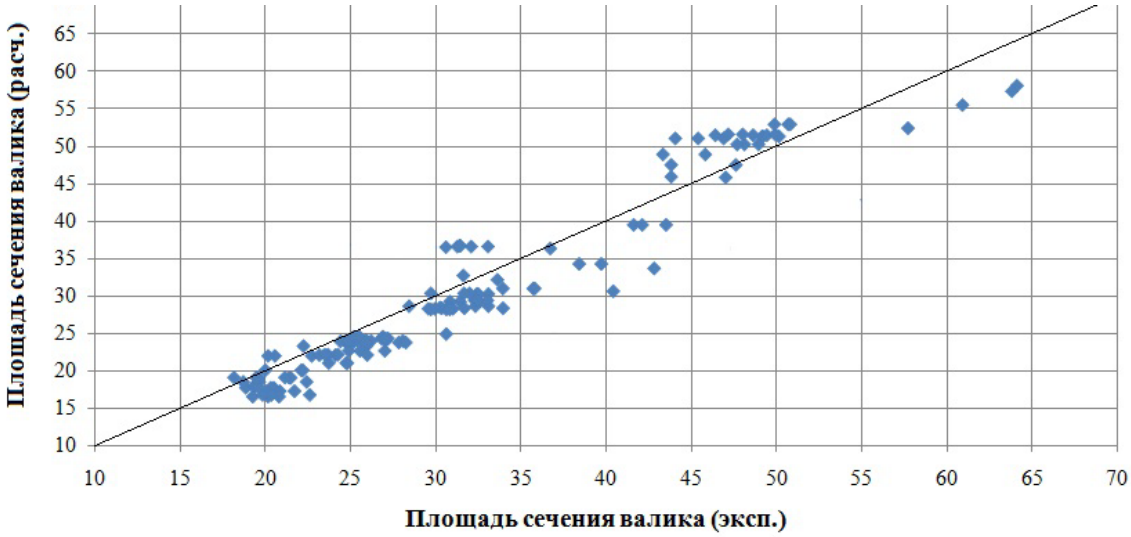


Рисунок 3.2 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений площади сечения валика

Рисунок 3.3 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений полного теплового КПД процесса сварки

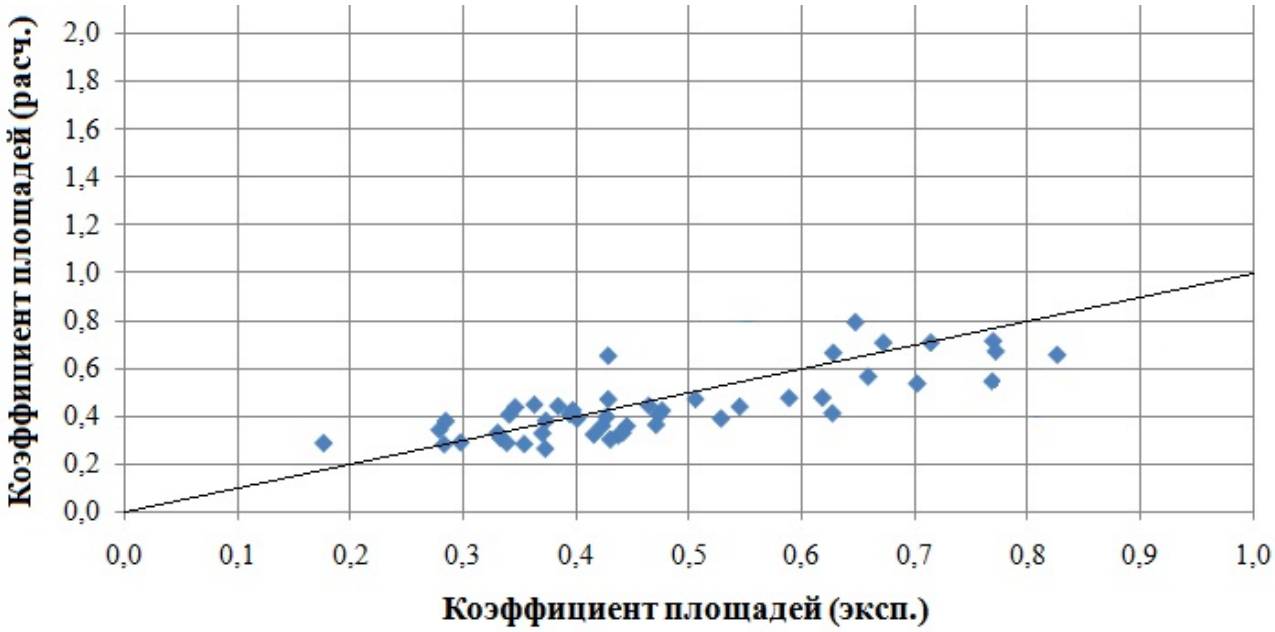


Рисунок 3.4 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента площадей

Рисунки 3.2 – 3.4 показывают совпадение расчетных и экспериментальных значений. По рисункам видно, что при использовании уравнения для определения площади сечения валика в 66 % случаев отклонение расчетного значения не превышает 10 % (в 78 % случаев - не превышает 15 %); при определении полного теплового КПД процесса сварки в 73 % случаев отклонение расчетного значения от экспериментального не превышает 15 %; при определении коэффициента площадей в 60 % случаев отклонение расчетного значения от экспериментального не превышает 20 %.

Предложенные регрессионные уравнения могут быть применены при разработке технологии многопроходной сварки в защитных газах низколегированных сталей.

3.3 Методика расчета параметров режима сварки пристеночного валика

Одним из вариантов заполнения разделки при многопроходной сварке является раскладка валиков в разделке с учетом условий их формирования. Данный подход основан на поддержании постоянных условий сварки и минимизации отклонений от этих условий. Каждый слой выполняется либо как корневой, либо как угловой. Необходимо, чтобы каждый слой в целом получался максимально плоским, насколько это возможно в конкретных условиях [1].

Режим сварки корневого прохода и геометрия разделки должны обеспечивать необходимую форму корневого валика и проплавление притупления без прожога. К настоящему времени разработано достаточное количество рекомендаций и алгоритмов расчета и оптимизации режима сварки корневого прохода [11, 36, 61, 62, 65,].

В настоящей работе основное внимание уделяется определению параметров режима сварки пристеночных валиков, поскольку именно при наложении пристеночных валиков чаще всего возникают несплавления.

Исходные данные: площадь наплавленного металла, $F_н$, мм^2; угол скоса кромки, α, град.; коэффициент площадей, k; положение электрода, x (рисунок 3.5), состав защитного газа, %CO_2; вылет электрода, $l_э$, мм.

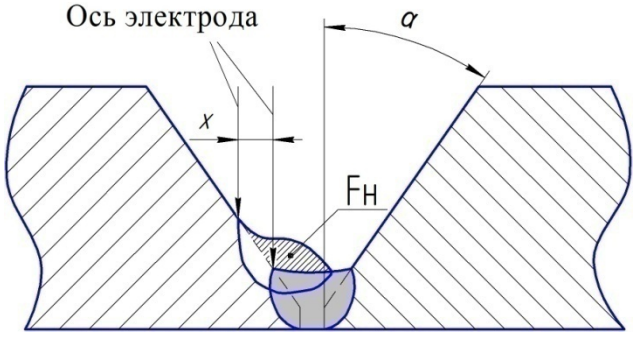


Рисунок 3.5 – Исходные геометрические размеры для расчета параметров режима сварки

Площадь наплавленного металла, $F_н$, может быть рассчитана по номинальным размерам конструктивных элементов подготовленных кромок свариваемых деталей и шва сварного соединения по ГОСТ 14771-76 [108].

Коэффициент площадей*k*при сварке плавящимся электродом при наиболее часто используемых режимах может изменяться от0,18 до 4,0. Задается *k* из условий обеспечения гарантированного проплавления свариваемых кромок (в соответствии с конструкторской и нормативной документацией).

Необходимо определить: диаметр электрода, $d_э$, мм; сварочный ток, $I_{св}$, А; скорость подачи проволоки, $v_{пп}$, м/мин; напряжение, $U_д$, В; скорость сварки $v_{св}$, м/ч.

Диаметр электрода выбирается в зависимости от типа соединения и толщины свариваемого металла (или катета шва) (таблица 2.4).

Из формулы (2.5) выразим скорость сварки:

$$v_{св} = \frac{p \cdot d^2}{4} \cdot \frac{v_{пп}}{F_н}. \qquad (3.1)$$

Скорость подачи проволоки согласно графику зависимости скорости подачи сварочной проволоки от сварочного тока может быть определена по формуле (2.27):

$$v_{пп}=0,078 \cdot I_{св} - 8,32, \text{ м/мин}. \qquad (2.27)$$

Тогда из формул (3.1) и (2.25) скорость сварки может быть выражена в следующем виде:

$$v_{св} = \frac{p \cdot d^2 (0,078 \cdot I_{св} - 8,32) \cdot 60}{4 \cdot F_н}, \text{ м/час}. \qquad (3.2)$$

Площадь сечения валика из формулы (1.2) можно записать в следующем виде:

$$F=(F_{пр}+F_н)=(1+k) \cdot F_н. \qquad (2.18)$$

Кроме того площадь сечения валика может быть определена по полученному регрессионному уравнению (2.16):

$$F = F_V(a, x, v_{св}) \cdot q_F(I_{св}) = (47{,}50 - 0{,}031 \cdot a + 4{,}205 \cdot x - 0{,}956 \cdot v_{св} - 0{,}113 \cdot a \cdot x + \\ + 0{,}003 \cdot a \cdot v_{св} - 0{,}143 \cdot x \cdot v_{св} + 0{,}004 \cdot a \cdot x \cdot v_{св}) \cdot (0{,}013 \cdot I_{св} - 1{,}56) \cdot \\ \cdot (0{,}004 \cdot \eta_э + 0{,}89) \cdot (0{,}003 \cdot \%\, CO_2 + 0{,}92) \qquad (2.16)$$

Подставив в формулу (2.16) формулы (3.3) и (2.25), получим:

$$(1+k) \cdot F_н = (47{,}498 - 0{,}031 \cdot a + 4{,}205 \cdot x - 0{,}956 \cdot \left(\frac{\rho \cdot d^2 \cdot (0{,}078 \cdot I_{св} - 8{,}32) \cdot 60}{4 \cdot F_н}\right) \\ - 0{,}113 \cdot a \cdot x + 0{,}003 \cdot a \cdot \left(\frac{\rho \cdot d^2 (0{,}078 \cdot I_{св} - 8{,}32) \cdot 60}{4 \cdot F_н}\right) \\ - 0{,}143 \cdot x \cdot \left(\frac{\rho \cdot d^2 (0{,}078 \cdot I_{св} - 8{,}32) \cdot 60}{4 \cdot F_н}\right) + 0{,}004 \cdot a \cdot x \cdot \left(\frac{\rho \cdot d^2 (0{,}078 \cdot I_{св} - 8{,}32) \cdot 60}{4 \cdot F_н}\right)) \cdot \\ \cdot (0{,}013 \cdot I_{св} - 1{,}56) \cdot (0{,}004 \cdot \eta_э + 0{,}89) \cdot (0{,}003 \cdot \% CO_2 + 0{,}92);$$

Таким образом, после преобразования вышеприведенного уравнения задача определения $I_{св}$ сводится к решению квадратного уравнения в виде:

$$a \cdot I_{св}^2 + b \cdot I_{св} + c = 0$$

$$I_{св} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}. \qquad (3.3)$$

В нашем случае, при заданных условиях, коэффициенты *a, b, c* принимают вид

$$a = -0{,}015 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{F_н}. \qquad (3.4)$$

$$b = 0{,}64 + 0{,}06 \cdot x + \frac{\pi \cdot d^2}{F_н} \cdot (3{,}34 + 0{,}35 \cdot x - 0{,}01 \cdot a). \qquad (3.5)$$

$$c = -74{,}05 + 0{,}05 \cdot a - 6{,}56 \cdot x - \\ - \frac{\pi \cdot d^2}{F_н} \cdot (185{,}97 - 0{,}6 \cdot a \cdot x - 0{,}58 \cdot a + 27{,}81 \cdot x) - \qquad (3.6) \\ - \frac{(1+k) \cdot F_н}{(0{,}004 \cdot \eta_э + 0{,}89) \cdot (0{,}003 \cdot \% CO_2 + 0{,}92)}$$

В заключение рассуждений приведем окончательные формулы для определения режима сварки при заданных исходных данных:

1. **Сварочный ток**:

$$I_{\text{св}} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},\ \text{А}. \qquad (3.7)$$

Коэффициенты a, b, c определяются по формулам:

$$a = -0{,}015\rho\frac{d^2}{F_{\text{н}}}.$$

$$b = 0{,}64 + 0{,}06\alpha + \frac{\pi d^2}{F_{\text{н}}}(3{,}34 + 0{,}35\alpha - 0{,}01\alpha).$$

$$c = -74{,}05 + 0{,}05\alpha - 6{,}56\alpha -$$
$$- \frac{\pi d^2}{F_{\text{н}}}(185{,}97 - 0{,}6\alpha\alpha - 0{,}58\alpha + 27{,}81\alpha) -$$
$$- \frac{(1+k)F_{\text{н}}}{(0{,}04I_{\text{э}} + 0{,}82)(0{,}003I\%CO_2 + 0{,}92)}$$

где d – диаметр электрода, мм;

α – угол скоса кромок, град;

$F_{\text{н}}$ – площадь наплавленного металла, мм^2;

k – коэффициент площадей (при сварке плавящимся электродом при используемых на практике режимах k=0,18 – 4,0).

2. **Скорость подачи проволоки**:

$$v_{\text{пп}} = 0{,}078I_{\text{св}} - 8{,}32,\ \text{м/мин}, \qquad (2.27)$$

где $I_{\text{св}}$ – сварочный ток, А.

3. **Скорость сварки**:

$$v_{\text{св}} = \frac{\rho d_{\text{э}}^2(0{,}078I_{\text{св}} - 8{,}32)60}{4F_{\text{н}}},\ \text{м/час}. \qquad (3.8)$$

где $d_{\text{э}}$ – диаметр электрода, мм;

$I_{\text{св}}$ – сварочный ток, А;

$F_{\text{н}}$ – площадь наплавленного металла, мм^2.

4. **Напряжение:**

$$U_{эф} = \frac{B_{эф} \cdot v_{пп}}{h_c \cdot I_{св}}, \text{ В}, \qquad (2.28)$$

Значение коэффициента $B_{эф}$ определяется по формуле:

$$B_{эф} = \gamma_м \cdot H_{пл} \cdot \frac{(1+k)}{4} \cdot \rho \cdot d^2. \qquad (2.23)$$

Значение теплового КПД процесса сварки по формуле (2.17):

$$h_c = (0{,}125 - 0{,}006 \cdot \alpha + 0{,}018 \cdot x + 0{,}024 \cdot v_{св} + 0{,}00006 \cdot \alpha^2 + \\ + 0{,}0006 \cdot x^2 - 0{,}0005 \cdot v_{св}^2 - 0{,}0005 \cdot \alpha \cdot x + 0{,}00012 \cdot \alpha \cdot v_{св} - 0{,}00013 \cdot x \cdot v_{св}) \cdot \\ \cdot (0{,}005 \cdot I_{св} + 0{,}08) \cdot (0{,}002 \cdot I_э + 0{,}95) \cdot (0{,}006 \cdot \%\, CO_2 + 0{,}83) \qquad (3.12)$$

где $\gamma_м$ – удельная плотность металла, кг/м^3;

$H_{пл}$ – энтальпия при температуре плавления с учетом скрытой теплоты плавления, Дж/кг;

k – коэффициент площадей;

$d_э$ – диаметр электрода, мм;

α – угол скоса кромки, град;

$v_{св}$ – скорость сварки, м/час;

$I_{св}$ – сварочный ток, А.

Полученные параметры режима сварки должны удовлетворять граничным условиям:

- $I_{св}, U_д$ – области оптимальных параметров, рисунок 2.28
- $U_д \to U_{эф}$
- $q_{пог} \le q_{пог}^{доп}$ (ограничение погонной энергии)
- $v_{св}^{факт.} \le v_{св}^{задан.}$ (верхняя граница скорости сварки, исходя из ограничения погонной энергии)
- $v_{св} \to min$ (нижняя граница скорости сварки, исходя из условия уменьшения количества проходов, следовательно уменьшения времени сварки)

Для оценки сходимости результатов построены график сходимости значений сварочного тока (рисунок 3.6), выполнено сравнение экспериментальных и

расчетных значений тока и напряжения (рисунки 3.7, 3.8). Таблица результатов вычислений приведена в Приложении 1.

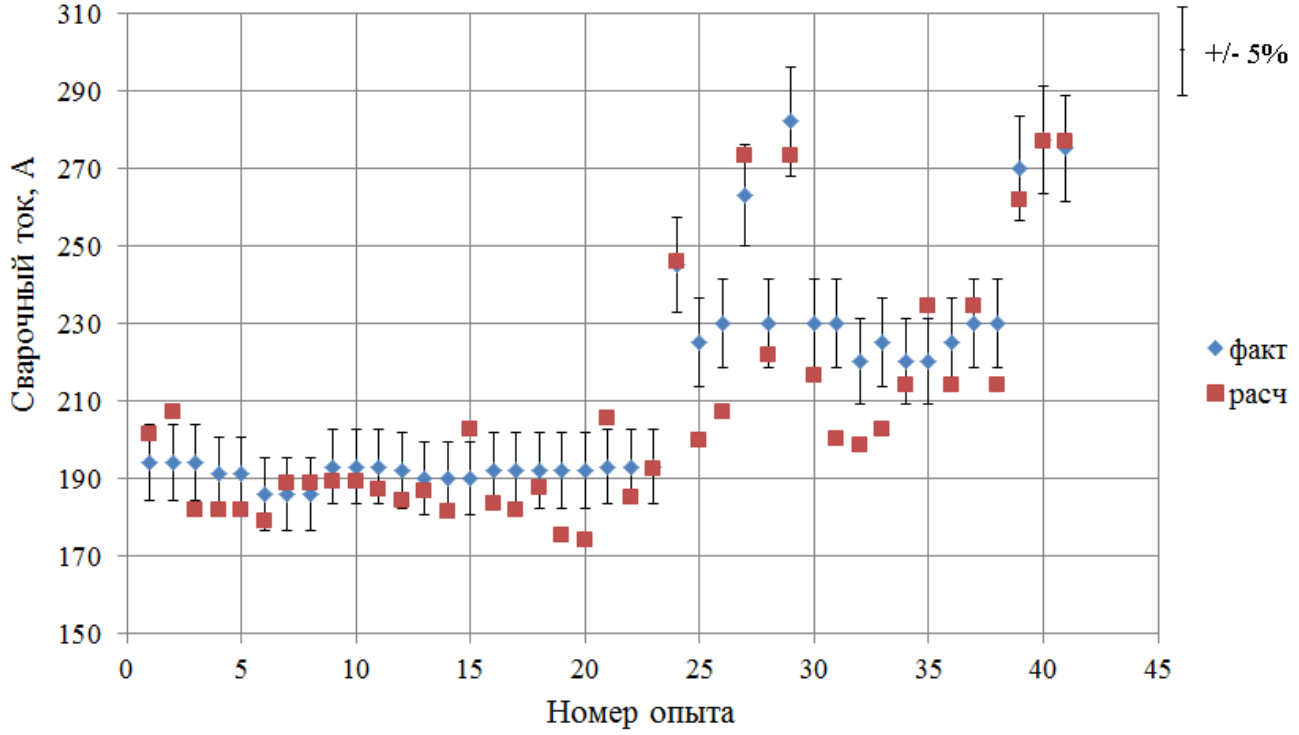


Рисунок 3.6 – График сходимости значений сварочного тока

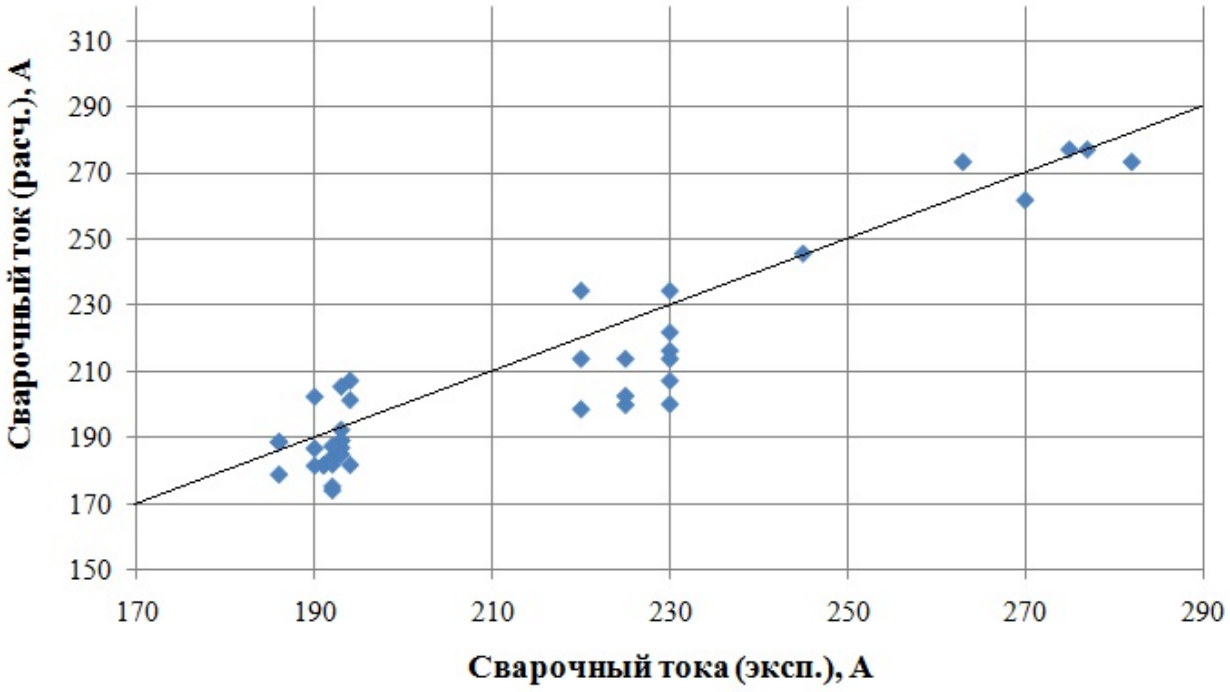


Рисунок 3.7 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений сварочного тока

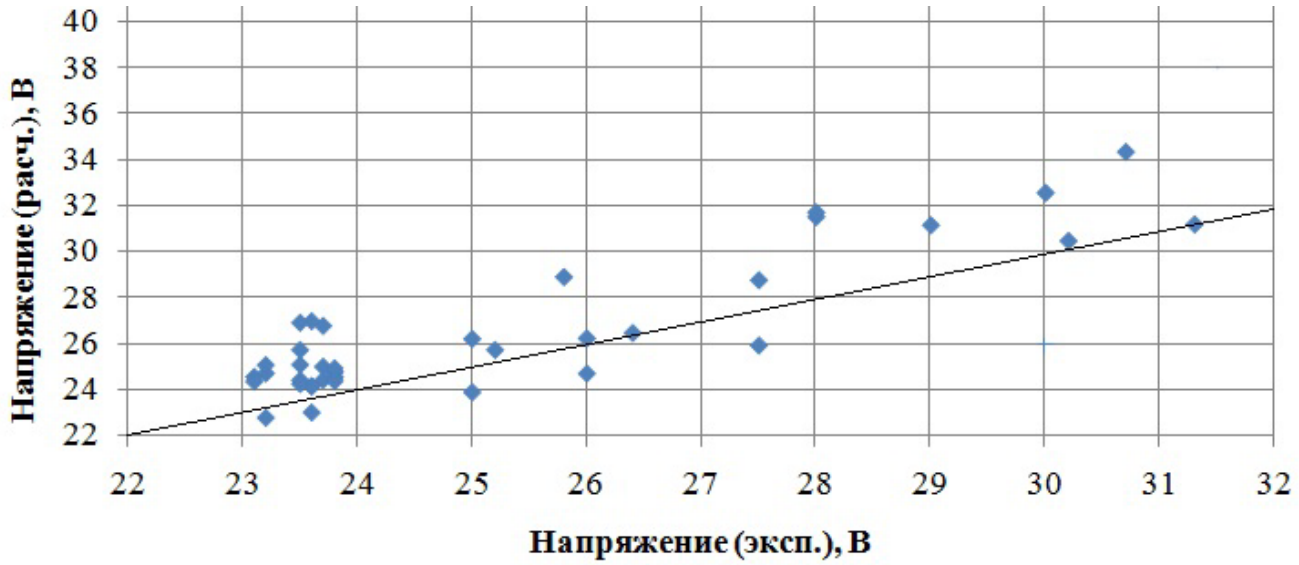


Рисунок 3.8 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжения

Из графиков (рисунки 3.6 – 3.8) видно, что разброс значений не превышает 10-12 %, следовательно, данные уравнения для определения параметров режима могут быть применены при разработке технологии многопроходной механизированной сварки в защитных газах.

На основании полученных зависимостей разработана блок-схема расчета параметров режима сварки пристеночного валика при многопроходной механизированной сварке в защитных газах представлена на рисунке 3.9, 3.10.

Предложенный алгоритм расчета параметров режима сварки реализован в виде программы, позволяющей при введении исходных данных получать значения параметров режима сварки. Интерфейс программы представлен на рисунке 3.11.

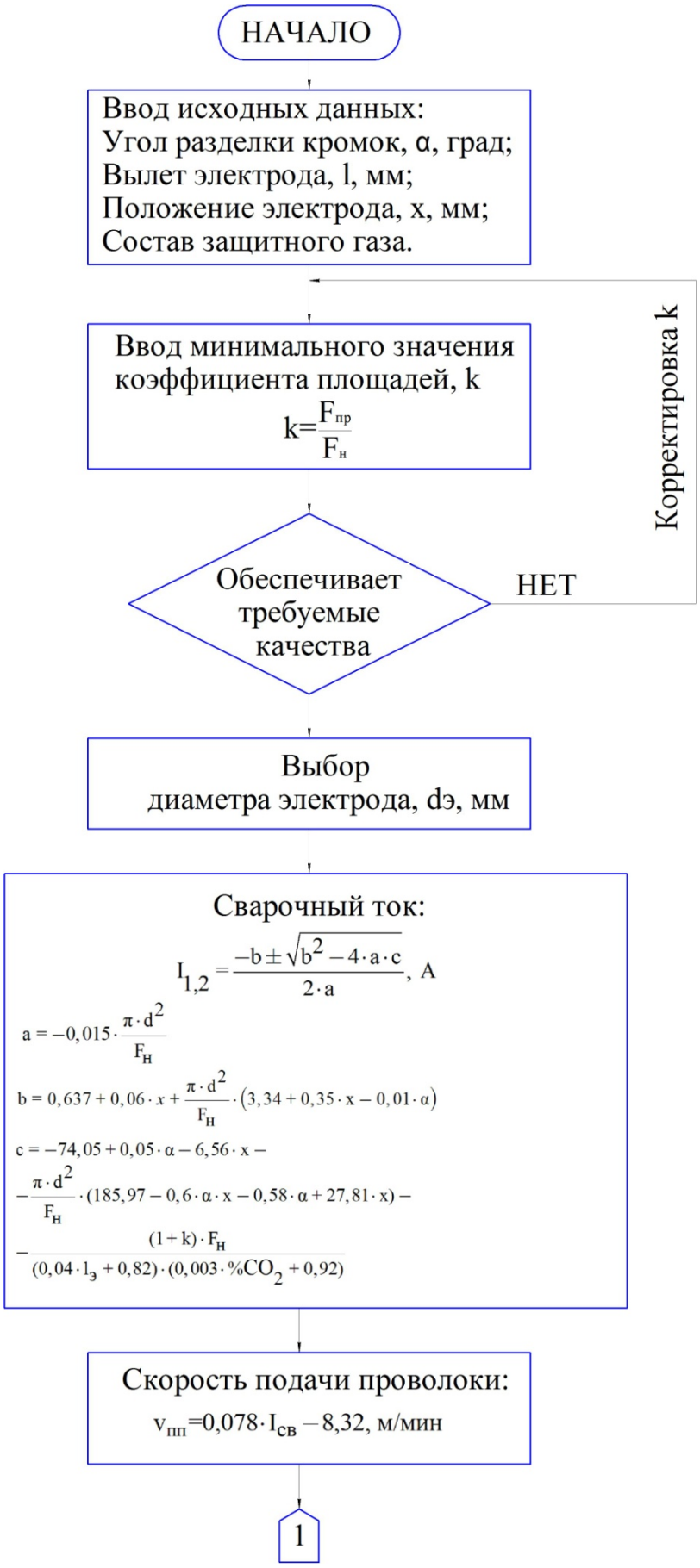


Рисунок 3.9 – Блок-схема расчета параметров режима сварки пристеночного валика при многопроходной механизированной сварке в защитных газах (начало)

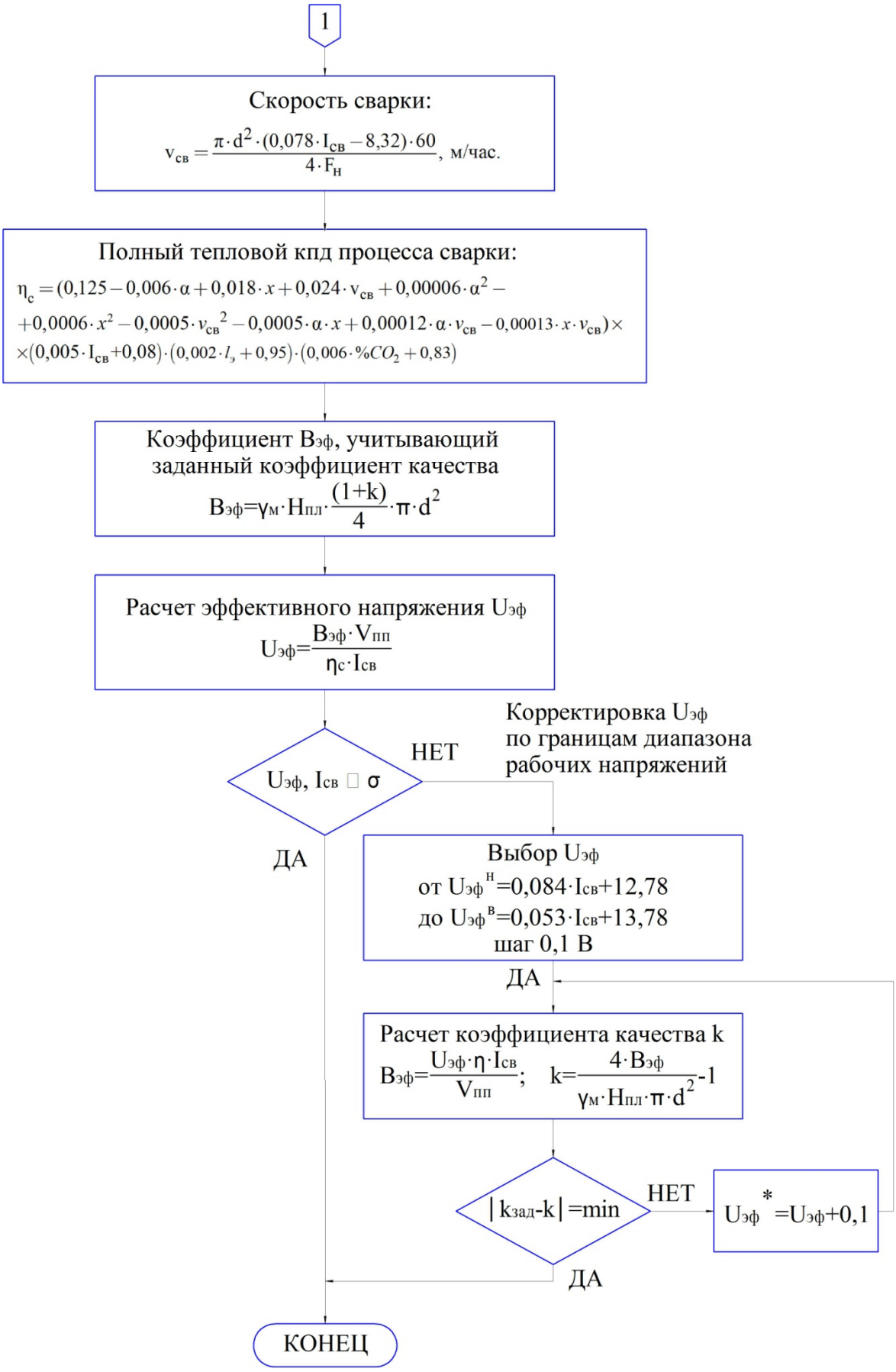
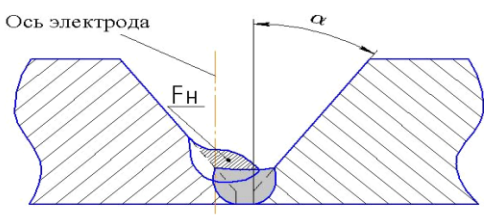


Рисунок 3.10 – Блок-схема расчета параметров режима сварки пристеночного валика при многопроходной механизированной сварке в защитных газах (окончание)

ЭСКИЗ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ	
	
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	
Угол разделки кромок, град	35
Площадь наплавленного металла, Fн, мм^2	17,53
Коэффициент площадей, k	0,54
Положение электрода, x, мм	0
Вылет электрода, мм	20
Содержание CO2 в смеси газов, %	18
Диаметр электрода*, Ø, мм	1,2

РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА				
Сварочный ток, А		197		
Значение подкоренного выражения		0,002		
Коэффициенты уравнения	a	-0,003		
	b	1,394		
	c	-142,070		
Скорость сварки, м/час		27,1		
Скорость подачи		7,0		
Напряжение, В		26,1		
Тепловой КПД		0,405		
Коэффициент Вэф		17787,66		

*- из рекомендуемых диапазонов сварочных токов и допускаемых плотностей тока

Рисунок 3.11 – Интерфейс программы расчета параметров режима сварки

3.4 Определение областей значений параметров режима сварки при заданном коэффициенте площадей

Для удобства назначения режима сварки при проектировании технологии сварки, с помощью программы расчета, предложенной в настоящей работе, построены таблицы значений параметров режима сварки, для получения сварных соединений с заданным коэффициентом площадей. Режим сварки выбирается исходя из угла скоса кромок разделки, требуемой площади сечения наплавленного металла, коэффициента площадей и диаметра электрода.

При сварке плавящимся электродом при используемых режимах коэффициент площадей k может изменяться в диапазоне от 0,18 до 4.

Максимальную и минимальную площадь наплавленного металла на основании проведенных экспериментальных работ при определенных режимах сварки и ограничении погонной энергии, принимаем равными соответственно 10 и 50 мм^2.

На рисунке 3.12 приведен пример областей значений параметров режима сварки для получения сварных соединений с заданным коэффициентом площадей,

построенных по результатам вычислений (диаметр электрода 1,2 мм, угол скоса кромок 25 °), приведены на рисунке 3.12.

Для примера определены значения параметров режимов сварки для углов скоса кромок 15, 25 и 35 °. Результаты вычислений приведены в таблицах 3.8, 3.9, 3.10. Приведенные режимы могут быть использованы при разработке технологии многопроходной сварки с углами скоса кромок от 15 до 35 ° и площадью наплавленного металла от 10 до 50 мм^2 (диаметр электрода 1,2 мм).

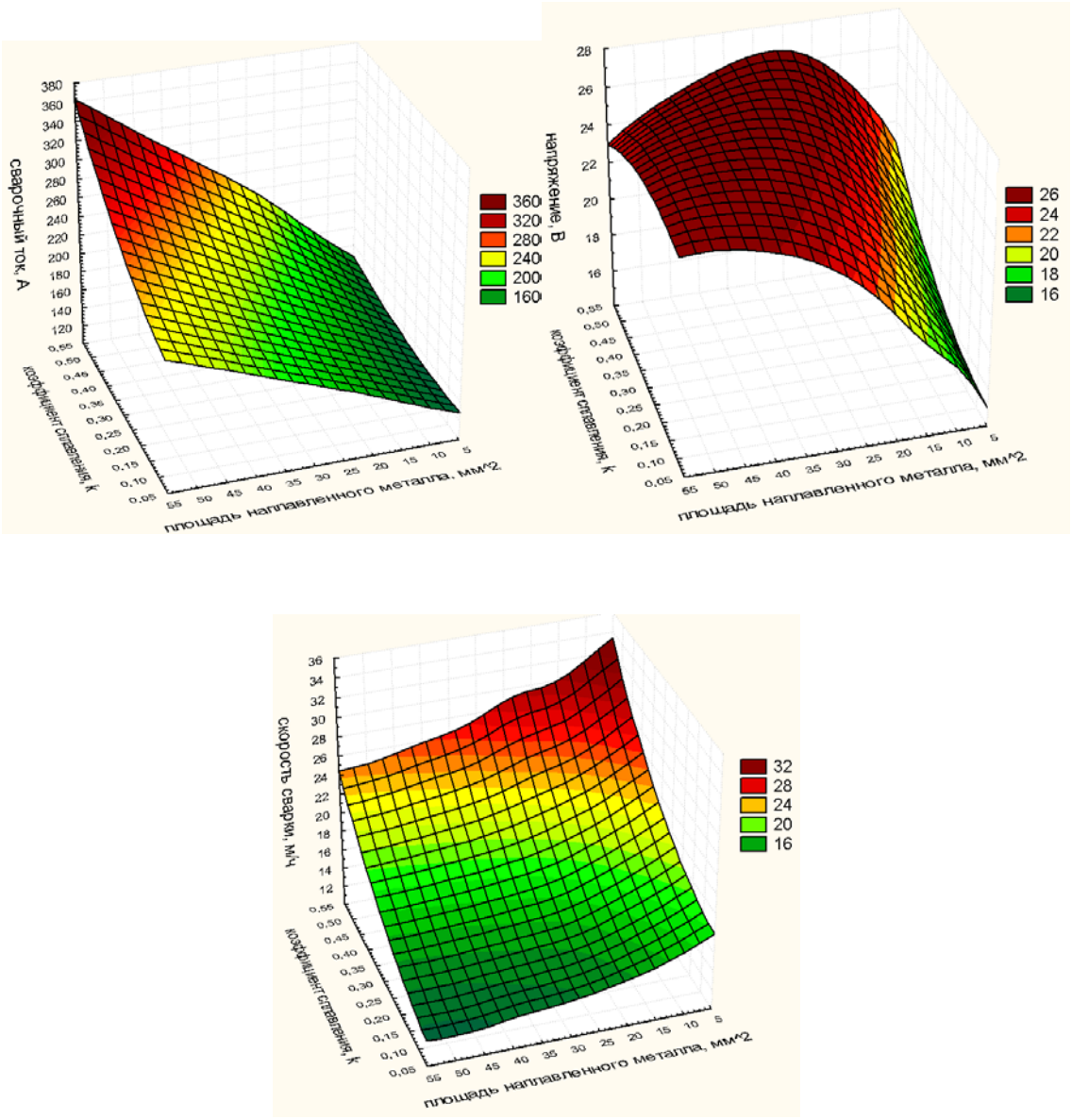


Рисунок 3.12 – Области значений параметров режима сварки (угол скоса кромки 25°)

Таблица 3.8 - Значения параметров режимов сварки (угол скоса кромки 15°)

Площадь наплавленного металла, мм^2	Параметры режима	Коэффициент площадей			
		0,1	0,2	0,3	0,4
10	$I_{св}$, А	142	146	153	-
	$V_{пп}$, м/мин	2,7	3,1	3,6	-
	$U_д$, В	15,0	16,7	18,9	-
	$V_{св}$, м/час	18	21	24	-
15	$I_{св}$, А	153	159	167	-
	$V_{пп}$, м/мин	3,6	4,1	4,7	-
	$U_д$, В	18,1	19,7	21,4	-
	$V_{св}$, м/час	16	18	21	-
20	$I_{св}$, А	165	172	182	197
	$V_{пп}$, м/мин	4,5	5,1	5,8	7,0
	$U_д$, В	20,3	21,7	23,2	24,7
	$V_{св}$, м/час	15	17	20	24
25	$I_{св}$, А	176	185	196	213
	$V_{пп}$, м/мин	5,4	6,1	7,0	8,2
	$U_д$, В	21,8	23,1	24,2	25,3
	$V_{св}$, м/час	15	17	19	22
30	$I_{св}$, А	188	198	211	229
	$V_{пп}$, м/мин	6,3	7,1	8,1	9,5
	$U_д$, В	22,9	24,0	24,8	23,5
	$V_{св}$, м/час	14	16	18	22
35	$I_{св}$, А	199	211	226	246
	$V_{пп}$, м/мин	7,2	8,1	9,3	10,8
	$U_д$, В	23,6	24,5	25,1	25,5
	$V_{св}$, м/час	14	16	18	21
40	$I_{св}$, А	210	224	241	263
	$V_{пп}$, м/мин	8,1	9,1	10,4	12,1
	$U_д$, В	24,0	24,7	25,2	25,3
	$V_{св}$, м/час	14	16	18	21
45	$I_{св}$, А	222	237	255	280
	$V_{пп}$, м/мин	8,9	10,1	11,5	13,4
	$U_д$, В	24,3	24,8	25,0	24,9
	$V_{св}$, м/час	14	15	17	20
50	$I_{св}$, А	233	250	270	296
	$V_{пп}$, м/мин	9,8	11,1	12,7	14,7
	$U_д$, В	24,4	24,7	24,8	24,5
	$V_{св}$, м/час	13	15	17	20

Таблица 3.9 – Значения параметров режимов сварки (угол скоса кромок 25°)

Площадь наплавленного металла, мм^2	Параметры режима	Коэффициент площадей			
		0,1	0,2	0,3	0,4
10	$I_{св}$, А	139	143	147	154
	$V_{пп}$, м/мин	2,5	2,8	3,1	3,7
	$U_д$, В	15,3	16,8	18,5	20,6
	$V_{св}$, м/час	17	19	21	25
15	$I_{св}$, А	151	157	163	172
	$V_{пп}$, м/мин	3,5	3,9	4,4	5,1
	$U_д$, В	18,8	20,3	21,8	23,5
	$V_{св}$, м/час	16	18	20	23
20	$I_{св}$, А	163	170	178	189
	$V_{пп}$, м/мин	4,4	4,9	5,6	6,4
	$U_д$, В	21,2	22,6	23,8	25,1
	$V_{св}$, м/час	15	17	19	22
25	$I_{св}$, А	175	183	193	206
	$V_{пп}$, м/мин	5,3	5,9	6,7	7,7
	$U_д$, В	22,9	24,1	25,1	25,9
	$V_{св}$, м/час	14	16	18	21
30	$I_{св}$, А	186	196	208	223
	$V_{пп}$, м/мин	6,2	7,0	7,9	9,0
	$U_д$, В	24,1	25,0	25,8	26,3
	$V_{св}$, м/час	14	16	18	20
35	$I_{св}$, А	198	209	223	240
	$V_{пп}$, м/мин	7,1	8,0	9,0	10,3
	$U_д$, В	24,9	25,6	26,1	26,4
	$V_{св}$, м/час	14	15	18	20
40	$I_{св}$, А	209	222	237	257
	$V_{пп}$, м/мин	8,0	9,0	10,2	11,7
	$U_д$, В	25,4	25,9	26,2	26,2
	$V_{св}$, м/час	14	15	17	20
45	$I_{св}$, А	221	235	252	273
	$V_{пп}$, м/мин	8,8	10,0	11,3	13,0
	$U_д$, В	25,7	26,0	26,1	25,9
	$V_{св}$, м/час	13	15	17	20
50	$I_{св}$, А	232	248	267	290
	$V_{пп}$, м/мин	9,7	11,0	12,4	14,3
	$U_д$, В	25,8	26,0	25,9	25,5
	$V_{св}$, м/час	13	15	17	19

Таблица 3.10 – Значения параметров режимов сварки (угол скоса кромок 35°)

Площадь наплавленного металла, мм^2	Параметры режима	Коэффициент площадей				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
10	$I_{св}$, А	137	140	144	149	155
	$V_{пп}$, м/мин	2,4	2,6	2,9	3,2	3,7
	$U_д$, В	15,2	16,6	18,1	19,6	21,6
	$V_{св}$, м/час	16	18	20	22	25
15	$I_{св}$, А	150	155	160	167	177
	$V_{пп}$, м/мин	3,3	3,7	4,2	4,7	5,5
	$U_д$, В	18,9	20,3	21,6	23,0	24,6
	$V_{св}$, м/час	15	17	19	21	25
20	$I_{св}$, А	162	168	176	185	198
	$V_{пп}$, м/мин	4,3	4,8	5,4	6,1	7,1
	$U_д$, В	21,5	22,7	23,8	24,9	25,9
	$V_{св}$, м/час	15	16	18	21	24
25	$I_{св}$, А	174	181	191	202	218
	$V_{пп}$, м/мин	5,2	5,8	6,5	7,4	8,6
	$U_д$, В	23,2	24,3	25,2	25,9	26,5
	$V_{св}$, м/час	14	16	18	20	23
30	$I_{св}$, А	185	195	205	219	237
	$V_{пп}$, м/мин	6,1	6,8	7,7	8,7	10,1
	$U_д$, В	24,5	25,3	25,9	26,4	26,6
	$V_{св}$, м/час	14	15	17	20	23
35	$I_{св}$, А	197	208	220	235	256
	$V_{пп}$, м/мин	7,0	7,8	8,8	10,0	11,6
	$U_д$, В	25,3	25,9	26,3	26,5	26,4
	$V_{св}$, м/час	14	15	17	19	23
40	$I_{св}$, А	208	220	235	252	275
	$V_{пп}$, м/мин	7,9	8,8	9,9	11,3	13,1
	$U_д$, В	25,8	26,2	26,4	26,4	26,0
	$V_{св}$, м/час	13	15	17	19	22
45	$I_{св}$, А	219	233	249	269	294
	$V_{пп}$, м/мин	8,7	9,8	11,1	12,6	14,6
	$U_д$, В	26,1	26,4	26,3	26,1	25,5
	$V_{св}$, м/час	13	15	17	19	22
50	$I_{св}$, А	231	246	264	285	313
	$V_{пп}$, м/мин	9,6	10,8	12,2	13,9	16,1
	$U_д$, В	26,3	26,3	26,1	25,7	24,9
	$V_{св}$, м/час	13	15	17	19	22

3.5 Управление сварочным током при сварке с поперечными колебаниями электрода

В случае многопроходной сварки с поперечными колебаниями для получения сварных соединений с заданным проплавлением, одинаковым по всей ширине разделки, необходимо изменять параметры режима сварки (сварочный ток) в зависимости от положения электрода в разделке. Для получения зависимостей изменения сварочного тока на основе сделанных выводов (раздел 3.3) и выведенных уравнений (3.6 – 3.9) был проведен вычислительный эксперимент [109, 110].

Цель эксперимента – определение величины изменения сварочного тока в зависимости от положения электрода в разделке при разных углах скоса кромок (таблица 3.6) при заданных коэффициенте площадей и площади наплавленного металла (таблица 3.7). Коэффициент площадей задаем для нулевого положения электрода и считаем, что он должен оставаться постоянным по всей ширине разделки.

Таблица 3.6 – Изменяемые параметры

Параметр	Значение			
Угол скоса кромки, град	15	20	25	35
Положение электрода, мм	0	1	2	3

Таблица 3.7 – Исходные данные

Диаметр электрода, мм	1,2
Напряжение на дуге, В	26
Площадь наплавленного металла, мм^2	35
Коэффициент площадей	0,30

С помощью программы расчета параметров режима сварки, приведенной в разделе 3.2, определили значения сварочного тока для указанных условий. Результаты вычислений приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Значение сварочного тока

Угол скоса кромки, град	Положение электрода в разделке, мм	Сварочный ток, А	Скорость подачи проволоки, м/мин
15	0	207±21	7,8±0,8
	1	224±22	9,1±0,9
	2	241±24	10,4±1,0
	3	257±26	11,7±1,2
20	0	207±21	7,8±0,8
	1	223±22	9,0±0,9
	2	238±24	10,2±1,0
	3	253±25	11,4±1,1
25	0	207±21	7,8±0,8
	1	221±22	8,9±0,9
	2	236±24	10,0±1,0
	3	250±25	11,1±1,1
35	0	207±21	7,8±0,8
	1	219±22	8,7±0,9
	2	231±23	9,7±1,0
	3	242±24	10,5±1,1

На основании анализа расчетных данных (таблица 3.8) можно сделать вывод, что при одинаковом положении электрода в разделке при увеличении угла скоса кромок значение сварочного тока изменяется в пределах погрешности ± 5 %, следовательно, угол скоса кромок не оказывает значительного влияния на величину сварочного тока. На основании полученных данных построен график зависимости величины сварочного тока от положения электрода в разделке (рисунок 3.13) при k=const.

Зависимости (рисунок 3.13) показывают, что при смещение электрода к кромке разделки (от нулевого положения электрода до крайней точки в разделке)

сварочный ток увеличивается в среднем на 20 % (при условии получения одинакового проплавления по всей ширине разделки (*k*=const)). Для обеспечения заданного проплавления по всей ширине разделки необходимо при движении электрода к кромке разделки сварочный ток необходимо увеличивать по определенной зависимости при неизменном напряжении на дуге.

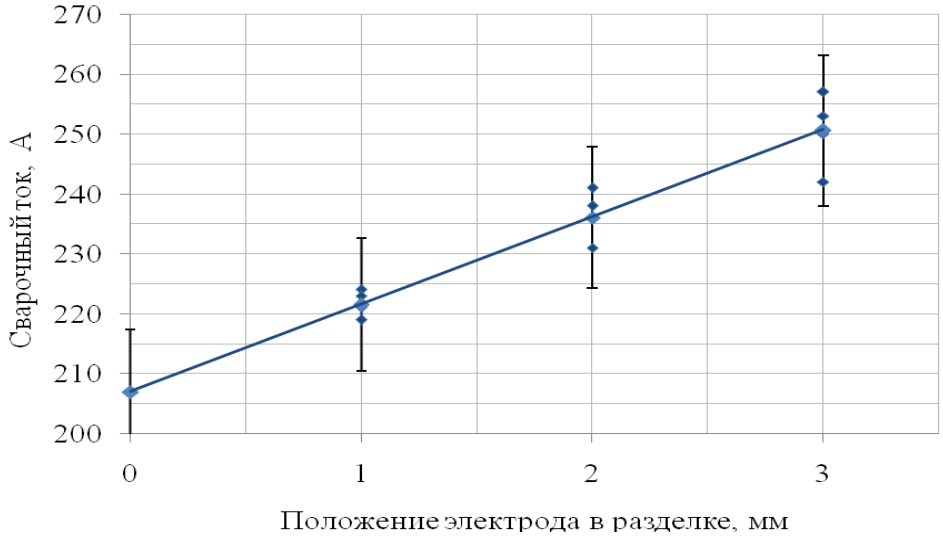


Рисунок 3.13 – Зависимость величины сварочного тока от положения электрода в разделке

Однако известно, что при смещении электрода к стенке разделки из-за отклонения дуги к стенке разделки [111, 112] и уменьшения длины дуги напряжение на дуге должно уменьшаться. Данное явление описывается в работах [113 – 116], где приводятся результаты экспериментального изучения особенностей дуги при механизированной сварке в защитных газах соединений с углами разделки 45 и 60 градусов и изменение сварочного тока в зависимости от положения электрода относительно кромки разделки. Для изучения характера изменения сварочного тока авторы выделяют четыре области в зависимости от положения электрода (рисунки 3.14, 3.15). В корневой части (область I) сварочный ток остается почти неизменным. Это связано с тем, что разделка не оказывает влияния на форму дуги (рисунок 3.15, I). По мере приближения к стенке разделки (область II) сварочный ток немного уменьшается, так как дуга начинает отклоняться к стенке, при этом длина дуги увеличивается и соответственно увеличивается напряжение. При

дальнейшем движении электрода от центра разделки к кромке дуга отклоняется к стенке разделки (рисунок 3.15, III), длина дуги значительно уменьшается, сварочный ток резко возрастает. Скачкообразный переход дуги от корня к стенке разделки характеризуется переломной точкой 1 на рисунке 3.14. Это хорошо согласуется с физическим представлением данного процесса. Далее поскольку сварочная дуга движется по стенке разделки к кромке (область IV), длина дуги уменьшается постепенно, соответственно, скорость нарастания тока уменьшается.

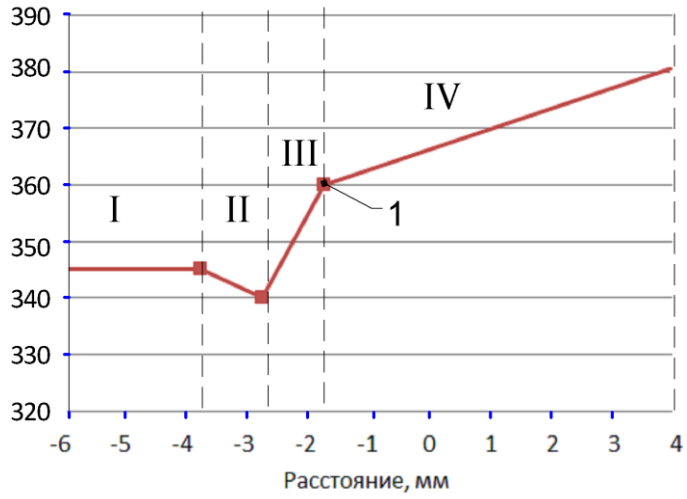


Рисунок 3.14 – Характер изменения сварочного тока в различных положениях электрода при угле скоса кромки 22 [113].

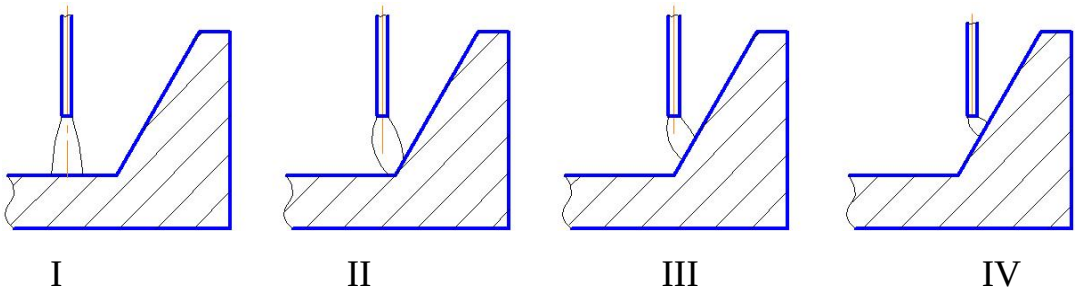


Рисунок 3.15 – Схема изменения дуги при разных положениях электрода [113]

Учитывая вышесказанное, при реализации предлагаемого в настоящей работе подхода по управлению сварочным током в зависимости от положения электрода в разделке для обеспечения постоянства напряжения необходимо использовать источники питания с системой стабилизации напряжения на дуге. При этом величина сварочного будет увеличиваться за счет повышения скорости подачи

сварочной проволоки. Неблагоприятное формирование сварного шва из-за увеличения количества наплавленного металла при сварке с поперечными колебаниями, то есть при многослойной сварке, может быть скорректировано в процессе отработки технологии за счет изменения частоты и амплитуды колебаний электрода.

Основываясь на полученных результатах вычислительного эксперимента, можно сделать вывод о том, что для получения одинакового проплавления по всей ширине разделки необходимо при приближении электрода к стенке разделки необходимо увеличивать сварочный ток (скорость подачи проволоки) по определенной зависимости при неизменных других параметрах.

Уравнение для определения сварочного тока в зависимости от положения электрода может быть представлено в виде:

$$I_{св} = I_0 + 14{,}5 \cdot x, \text{ А} \qquad (3.9)$$

На рисунке 3.16 изображена кривая изменения сварочного тока в зависимости от положения электрода в разделке для угла скоса кромки 35°.

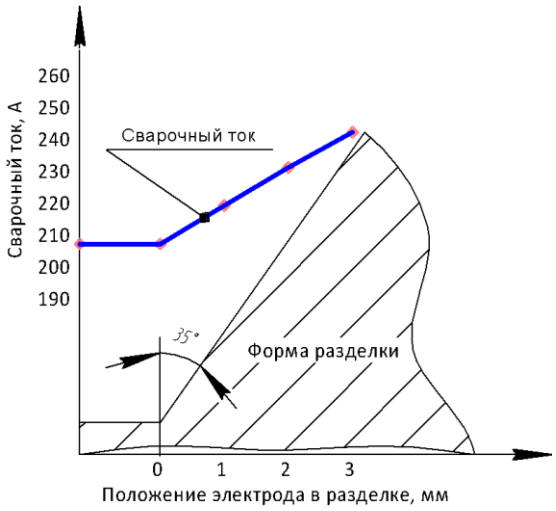


Рисунок 3.16 - Кривая изменения сварочного тока в зависимости от положения электрода в разделке при управлении сварочным током

Уравнение (3.9) может быть применено для плавного регулирования тока в зависимости от положения электрода при сварке с поперечными колебаниями при различных углах скоса кромки.

Выводы по главе 3

1. Опытная проверка полученных зависимостей показала удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных значений площади сечения валика и теплового КПД процесса сварки.

2. Разработана методика расчета параметров режима многопроходной механизированной сварки в защитных газах на основе определения полного теплового КПД процесса сварки, позволяющие при заданном коэффициенте площадей *k* рассчитать режимы сварки:

$$I_{\text{св}} = f(d_{\text{э}}, a, x, F_{\text{н}}, k, l_{\text{э}}, \%CO_2),$$

$$U_{\text{эф}} = f(h_{\text{с}}, v_{\text{пп}}, I_{\text{св}}, d_{\text{э}}, k),$$

$$v_{\text{пп}} = f(I_{\text{св}}),$$

$$v_{\text{св}} = f(d_{\text{э}}, I_{\text{св}}, F_{\text{н}}).$$

Уравнения обеспечивает достаточную для практических целей точность и могут применяться при разработке технологии многопроходной сварки плавящимся электродом в защитных газах углеродистых низколегированных сталей.

3. Разработана программа расчета режимов сварки пристеночного валика при многопроходной сварке плавящимся электродом в защитных газах.

4. На основании предложенных зависимостей и программы расчета определены области значений параметров режима сварки для получения сварных соединений с заданным коэффициентом площадей.

5. Установлено, что при сварке с поперечными колебаниями электрода для обеспечения заданного проплавления по всей ширине разделки необходимо увеличивать сварочный ток при движении электрода от центра к кромке разделки. Установлена зависимость и получено уравнение управления сварочным током в процессе сварки с поперечными колебаниями электрода для обеспечения заданного проплавления.

ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Основные положения работы и результаты проведенных исследований были реализованы в алгоритмах управления параметрами режима сварки в роботизированной установке при выполнении проектов в 2012-2013 гг. по роботизации сварки опорных муфт под основания опоры нефтегазовых труб на предприятии ЗАО «Курганстальмост» г. Курган.

4.1 Описание изделия. Требования к качеству

Муфта под основание нефтегазовых труб представляет собой сварную конструкцию из стали 09Г2С (ГОСТ 19281-89) [117] сложной формы (рисунок 4.1, Приложение 3).

Рисунок 4.1 – Муфта под основание нефтегазовых труб

В конструкции муфты имеются следующие виды сварных соединений (рисунок 4.2):

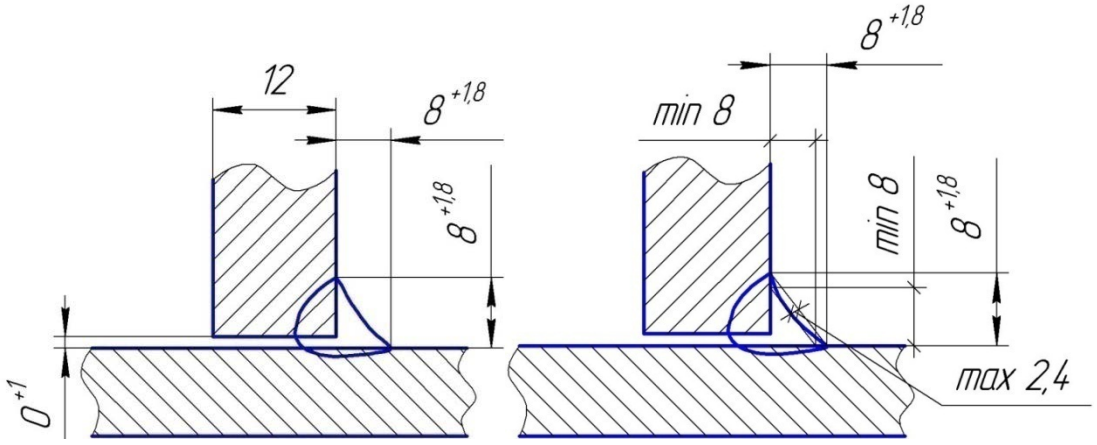
- стыковые с прямолинейными швами (Шов № 19);

- тавровые с кольцевыми швами (Шов № 1);

- тавровые с прямолинейными швами (Швы № 2, 3, 4).

Технология сварки должна обеспечивать выполнение сварных швов со следующими возможными отклонениями:

1. Шов № 1: приварка обечайки к фланцу (Приложение 3). Зазор под сварку – не более 1 мм. Отклонение величины катета +1,8 мм (рисунок 4.2 а). Допускаемая выпуклость или вогнутость шва до 2,4 мм, при этом вогнутость не должна приводить к уменьшению значения катета (рисунок 4.2 б).



а б

Рисунок 4.2 – Допускаемые отклонения размеров шва

2. Шов № 2: Т3-ИП-Δ8. Зазор под сварку – 0-1,5 мм. Отклонение величины катета +1,8 мм (рисунок 4.3). Допускаемая выпуклость или вогнутость шва до 2,4 мм, при этом вогнутость не должна приводить к уменьшению значения катета (рисунок 4.2 б).

3. Шов № 3: приварка ребер к обечайке – Т8 ИП (s=20 мм, УЗД – 100%). Предельные отклонения размеров сварного шва представлены на рисунке 4.4.

4. Шов № 4: приварка ребер к обечайке – Т8 ИП (s=16 мм). Предельные отклонения размеров сварного шва представлены на рисунке 4.5.

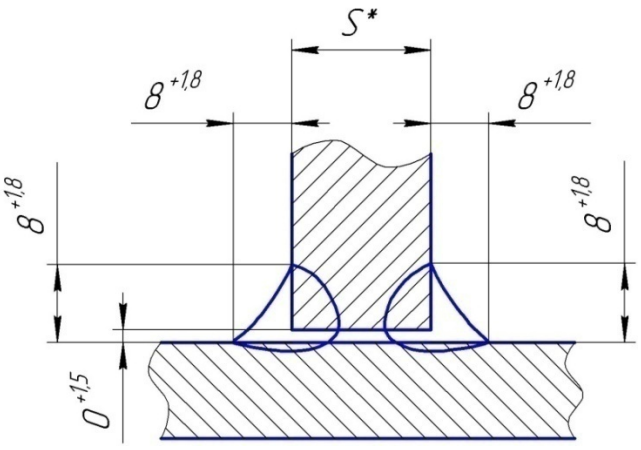


Рисунок 4.3 – Допускаемые отклонения размеров шва № 2

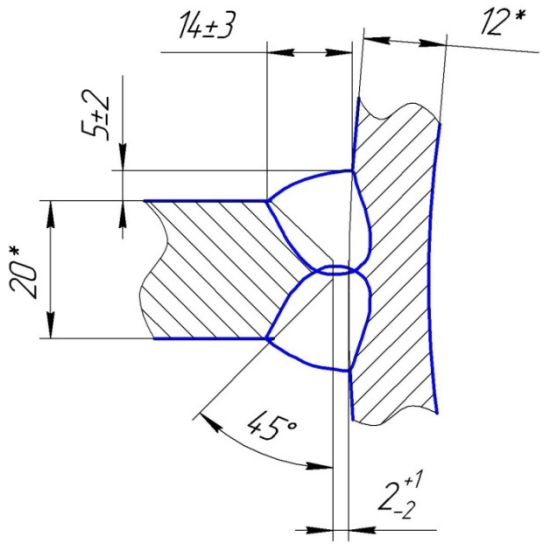


Рисунок 4.4 – Предельные отклонения размеров сварного шва № 3

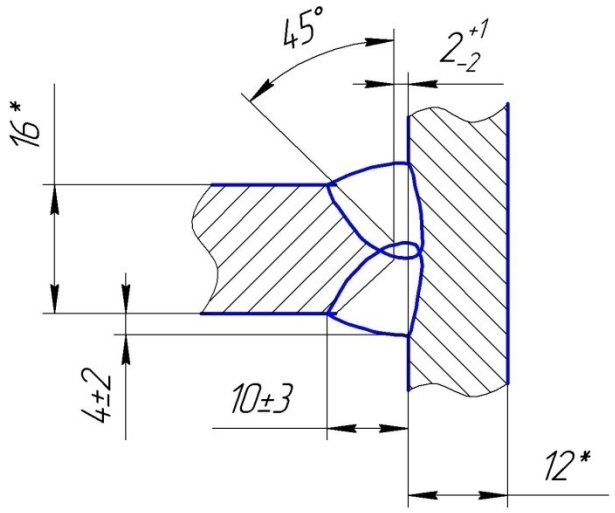


Рисунок 4.5 – Предельные отклонения размеров сварного шва № 4

Все сварные швы проверяются визуальным и измерительным контролем в объеме 100%. Норма оценки по ГОСТ 23118-99 [118]. При визуальном контроле сварные швы должны удовлетворять следующим требованиям:

а) иметь гладкую или равномерно чешуйчатую поверхность без резких переходов к основному металлу;

б) швы должны быть плотными по всей длине и не иметь прожогов, сужений, перерывов, наплывов, а также недопустимых по размерам подрезов, непроваров в корне шва, несплавлений по кромкам, шлаковых включений и пор;

в) металл шва и околошовной зоны не должен иметь трещин любой ориентации и длины;

г) кратеры швов в местах остановки сварки должны быть переварены, а в местах окончания – заварены.

Качество швов должно удовлетворять требованиям ГОСТ 23118-99 [118] (I категория, высокий уровень качества). Допустимые дефекты приведены в Приложении 4.

4.2 Расчет параметров режима сварки

До настоящего времени для производства опорных муфт применялась механизированная сварка плавящимся электродом в защитных газах. Сборка и сварка муфты производилась в сборочном кондукторе, позволяющем выполнять сварку всех швов в нижнем положении («в лодочку»). Режимы сварки назначали в соответствии с нормативной документацией [95, 119] в зависимости от толщины металла, параметров разделки кромок, с учетом требований по обеспечению необходимых механических свойств и геометрических размеров сварного шва.

Однако при реализации данной технологии возникало ряд проблем:

- сложность получения заданной геометрии сварного шва (порядка 90 % изделий после визуально-измерительного контроля требовали исправления);

- низкая производительность (длительное время на подготовку и установку изделия в положение для сварки, а также на исправление брака).

В связи с вышесказанным была поставлена задача получения сварных швов с требуемой геометрией, а также снижения количества дефектов. Решение поставленной задачи возможно путем определения параметров режима сварки, обеспечивающих формирование сварного шва с заданной площадью наплавленного металла при условии гарантированного проплавления, а также регулирования параметров режима в процессе сварки.

Рассмотрим порядок определения параметров режима сварки на примере сварного шва № 2. Расчетная схема сварного шва приведена на рисунке 4.6.

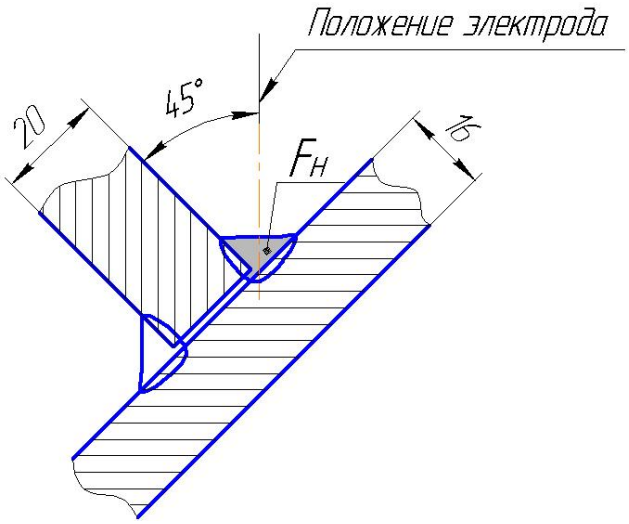


Рисунок 4.6 – Расчетная схема сварного шва №2

Тавровое соединение рассматривается как стыковое соединение с разделкой кромок. Согласно конструкторской документации (рисунок 4.6, Приложение 4) угол скоса кромки составляет 45°. Площадь наплавленного металла рассчитаем, исходя из номинальных размеров шва сварного соединения, по формуле [108]:

$$F_н = 0{,}5 \cdot К^2 + 1{,}05 \cdot К, \text{ мм}^2.$$

В данном случае получим $F_н$=32+8,4=40,4мм^2.

Коэффициент площадей задается из условия обеспечения гарантированного проплавления кромок – k=0,3 – 0,6. Принимаем k=0,4.

По предложенной методике рассчитаем параметры режима сварки, обеспе-

чивающие минимальную площадь наплавленного металла при заданном коэффициенте площадей.

1. Диаметр электрода выбираем в соответствии с таблицей 2.4 в зависимости от толщины металла. По таблице выбираем диаметр проволоки для толщины металла 10 мм: $d_э$=1,2 мм.

2. Сварочный ток определяем по формуле (3.7):

$$I_{св} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \text{ А}$$

При заданных исходных данных получим:

$$a = -0,015 \cdot \frac{\pi \cdot 1,2^2}{65} = -0,001$$

$$b = 0,64 + 0,06 \cdot 10 + \frac{\pi \cdot 1,2^2}{65} \cdot (3,34 + 0,35 \cdot 10 - 0,01 \cdot 22,5) = 0,85$$

$$c = -74,05 + 0,05 \cdot 22,5 - 6,56 \cdot 10 - \frac{\pi \cdot 1,2^2}{65} \cdot (185,97 - 0,6 \cdot 22,5 \cdot 10 - 0,58 \cdot 22,5 +$$

$$+27,81 \cdot 10) - \frac{(1 + 0,4) \cdot 65}{(0,004 \cdot 20 + 0,89) \cdot (0,003 \cdot 18 + 0,92)} = -169,49$$

Тогда $I_{св}$=240 А.

При расчетах следует учитывать, что на сварочный ток накладываются ограничения, обусловленные устойчивостью процесса сварки и формированием шва.В соответствии с таблицей 2.5 при диаметре электрода 1,2 мм сварочный ток 240 А будет обеспечивать струйный процесс переноса электродного металла.

3. Скорость подачи проволоки (формула(2.27)):

$v_{пп}$=0,078 · $I_{св}$ - 8,32= 10,3 м/мин ,

4. Скорость сварки (формула(3.8)):

$$v_{св} = \frac{\pi \cdot d^2 (0{,}078 \cdot I_{св} - 8{,}32) \cdot 60}{4 \cdot F_н} = \ 17{,}2 \ \text{м/час}$$

5. Напряжение(формула(2.28)):

$$U_{эф} = \frac{B_{эф} \cdot v_{пп}}{h_с \cdot I_{св}}, \text{ В},$$

При заданных исходных данных получим:

$B_{эф} = 15015{,}56$

$h_с = 0{,}429$

$U_{эф} = 27{,}2$ В

Рассчитанные параметры режима сварки удовлетворяют граничным условиям:

$I_{св}, U_д$ – области струйного переноса металла (таблица 2.5),

$I_{св}, U_д$ – диапазону рабочих напряжений и тока (рисунок 2.12),

$U_д \approx U_{эф}$

Результаты расчета параметров режима сварки для нулевого положения электрода с помощью программы представлены на рисунке 4.7.

С целью повышения производительности, уменьшения количества дефектов (исправляемых и неисправляемых), а также для обеспечения постоянства сварочных параметров для осуществления сварки была внедрена роботизированная установка, в алгоритм управления параметрами режима сварки которой были заложены результаты расчета параметров режима сварки по предложенной методике.

В состав роботизированной установки для сварки муфт под основания опоры нефтегазовых труб входит робот осевой *FANUC mod. Arc Mate* 100 *lc*/6*L*-30*A-B-PL*, интегрированный в единую систему с источником питания S8 ШТОРМ-*LORCH*, двумя позиционерами Positioner 2 *Axes* и станцией очистки горелки *ROBOBRS-CC* (рисунок 4.8).

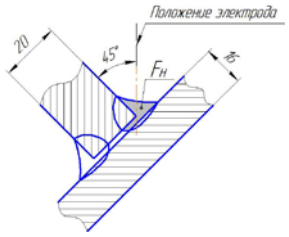
ЭСКИЗ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ			РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА				
							
			Сварочный ток, А		239		
			Значение подкоренного выражения		0,068		
			Коэффициенты уравнения	a	-0,001		
				b	0,943		
				c	-143,685		
			Скорость сварки, м/час		17,2		
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ							
Угол разделки кромок, град	45		**Скорость подачи**		10,3		
Площадь наплавленного металла, Fн, мм^2	40,40						
Коэффициент площадей, k	0,30		**Напряжение, В**		25,1		
Положение электрода, x, мм	0						
Вылет электрода, мм	20		Тепловой КПД		0,429		
Содержание CO2 в смеси газов, %	18		Коэффициент Вэф		15015,56		
Диаметр электрода, Ø, мм*	1,2		*- выбирается из рекомендуемых диапазонов сварочных токов и допускаемых плотностей тока				

Рисунок 4.7 – Результаты расчета параметров режима с помощью программы

Рисунок 4.8 – Внешний вид роботизированной установки для сварки муфт

Специальное программное обеспечение позволяет программировать различные виды поперечных колебаний (по синусоиде, треугольное, ромбовидное) для обеспечения оптимального формирования и требуемых размеров шва.

Особенностью алгоритма управления параметрами режима сварки является

то, что при сварке с поперечными колебаниями электрода при каждом сочетании параметров разделки, диаметре электрода и т.д. рекомендуется определенный режим сварки для получения одинакового проплавление по всей ширине разделки.

С помощью системы слежения определяется текущее положение электрода в разделке, и в зависимости от положения электрода регулируются параметры режима сварки в соответствии с полученным в настоящей работе уравнением управления сварочным током.

Значение сварочного тока рассчитывали для нулевого положения и для крайних положений электрода в разделке. Амплитуда и частота колебаний выбирались в процессе отработки технологии из условий получения требуемого катета шва: амплитуда колебаний – 2,5 мм, частота колебаний – 3 Гц . Режимы сварки приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Режимы сварки шва № 2

Параметр	Значение
Исходные данные	
Угол скоса кромок, град.	22,5
Площадь наплавленного металла $F_н$, мм^2	40,4
Коэффициент площадей, k	0,3
Положение электрода, x, мм	0
Вылет электрода, $l_э$, мм	20
Содержание CO_2 в смеси защитных газов, %	18
Расчетные параметры режима сварки	
Диаметр электрода, $d_э$, мм	1,2
Сварочный ток, $I_{0св}$, А	240
Скорость сварки, $v_{св}$, м/ч	17
Скорость подачи проволоки, $v_{пп}$, м/мин	10,3
Напряжение на дуге, $U_д$, В	27
Сварочный ток в крайнем положении, I_1	286

С помощью сварочного позиционера заготовку устанавливают перед роботом в удобное для сварки положение (в горизонтальное или «в лодочку»). Вращение позиционера и его наклон синхронизированы с перемещением руки робота, что позволяет поддерживать заданную скорость сварки и положение горелки относительно стыка. Наличие второго позиционера позволяет сократить время изго-

товления одного изделия. В то время как на одном позиционере робот выполняет сварку, на другом производится установка следующей муфты и закрепление ее в оснастке.

Данный комплекс оснащен системой обнаружения стыка, которая отслеживает положение изделия при сварке и корректирует перемещение руки робота при обнаружении отклонения положения стыка от заданного. Также комплекс оснащен системой слежения за стыком, которая во время сварки отслеживает и при необходимости корректирует положение горелки относительно стыка.

Станция очистки горелки позволяет производить в автоматическом режиме очистку горелки от брызг и выполнять обрезку конца проволоки перед сваркой.

4.3 Результаты внедрения роботизированной установки для сварки муфт

Выполненные с применением роботизированной установки сварные швы были проверены на соответствие требованиям конструкторской документации (п. 4.1) визуальным и измерительным контролем (рисунок 4.9), шов №3 – ультразвуковым контролем с помощью прибора «ПЕЛЕНГ» УДЗ-103.

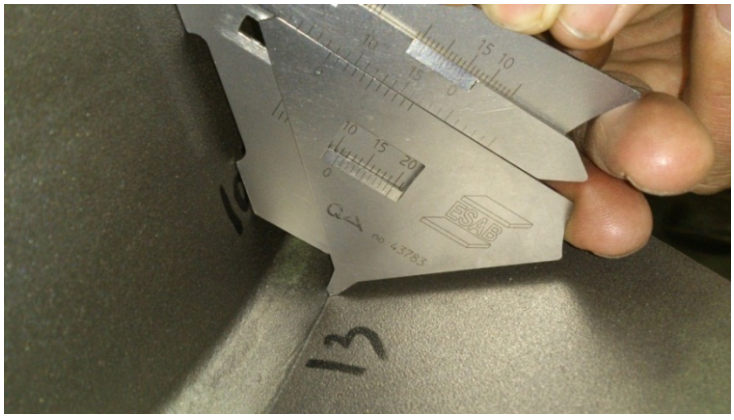


Рисунок 4.9 – Измерение величины катета

На рисунке 4.10 приведены фотографии сварных швов выполненных механизированной сваркой (а) и швов, выполненных на роботизированной установке (б).

а) б)

Рисунок 4.10 – Внешний вид сварного шва, выполненного: а – механизированной сваркой, б – на роботизированной установке

Применение предложенной в настоящей работе методики расчета параметров режимов сварки позволило получить требуемую геометрию сварных швов и значительное снижение дефектов. Согласно заключению ЦЗЛ, отдела главного сварщика, экономического отдела ЗАО «Курганстальмост» внедрение роботизированной установки для сварки муфт обеспечило повышение производительности в 2,1 раза по сравнению с механизированной сваркой, также позволило снизить количество внутренних дефектов выявляемых УЗК на 15%. Результаты внедрения отражены в Акте внедрения (Приложение 5).

Вывод по главе 4

Применение сварочных роботизированных комплексов и автоматизированных систем в сочетании с разработанной методикой определения параметров режима сварки, а также с возможностью управления сварочным током в процессе сварки в режиме реального времени позволяет добиться хороших экономических результатов. Зависимости и уравнения, полученные в данной работе, могут быть использованы как элементы программного обеспечения при создании адаптивных сварочных систем.

Заключение

В настоящей работе исследованы вопросы влияния технологических параметров механизированной многопроходной сварки плавящимся электродом в защитных газах на тепловую эффективность процесса, а также на формирование сварных соединений. Это позволило разработать методику расчета параметров режима многопроходной сварки с заданными площадью сечения валика и долями участия наплавленного и основного металла шва (коэффициент площадей k), а также получить уравнение для регулирования сварочного тока в зависимости от положения электрода при сварке с поперечными колебаниями при разных углах разделки для получения заданного проплавления по всей ширине разделки.

Полученные аналитические зависимости могут быть в дальнейшем использованы для создания автоматических и роботизированных установок для сварки, что является одной из актуальнейших задач современного сварочного производства, а именно, создание алгоритмов управления, назначение и корректировка параметров режима сварки и т.д.

Основой любого автоматизированного и роботизированного процесса являются не только исполнительные механизмы, но и математические модели и уравнения, решенная задача является актуальной и, безусловно, перспективной.

Однако необходимо указать, что в данной работе рассмотрена только следующая номенклатура сталей: углеродистые низколегированные стали, а также ограниченный диапазон режимов сварки. Основным же научным результатом в данной работе является то, что удалось создать и описать общие подходы для решения задачи по расчету параметров режима, обеспечивающих формирование сварных швов с заданными параметрами на основе определения полного теплового КПД процесса сварки. Достаточно высокая степень сходимости теоретических и экспериментальных значений подтверждает правильность выбранных научных подходов и полученных зависимостей, делают работу значимой, открывающей перспективы для дальнейших исследований в области определения параметров режима при многопроходной сварке в защитных газах.

Список литературы

1. Березовский, Б.М. Математические модели дуговой сварки: в 3 т. – Том 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов/ Б.М.Березовский. –Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2003.-601 с.

2. Патон, Б.Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Б.Е. Патон. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.

3. Рахматуллин, Т.А. Проблемы внедрения зауженных разделок при сварке корпусных конструкций специальной техники / Т.А. Рахматуллин, М.А. Шолохов, Д.С. Бузорина // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. - №4.– С. 64-66.

4. Дибец, А.Т. Автоматическая сварка под флюсом с увеличенным вылетом электрода / А.Т. Дибец, В.Г. Гордонный, Н.М. Ващенко // Автоматическая сварка.– 1976. – №10. – С. 68 – 69.

5. Мусияченко, В.Ф. Дуговая сварка высокопрочных легированных сталей / В.Ф. Мусияченко, Л.И. Миходуй. – М.: Машиностроение, 1987. — 80 с.

6. Лащенко, Г.И. Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом / Г.И. Лащенко. – Киев: Екотехнология, 2006. – 384 с.

7. Чернышов, Г.Г.. Влияние параметров режима на формирование пристеночного валика при сварке в глубокую разделку / Г.Г. Чернышов, В.В. Панков, И.С. Маркушевич // Сварочное производство. – 1984. – № 12. – С. 14-16.

8. Руденко, Ю.Н. Образование дефектов при механизированной сварке под флюсом в узкий зазор/ Ю.Н. Руденко, А.К. Царюк // Автоматическая сварка. – 1991. – №2. – С.46-49.

9. Коринец, И.Ф. Влияние зазора на размеры стыкового шва при дуговой сварке в смеси Ar+25% CO2 плавящимся электродом / И.Ф. Коринец, ЦзиЧженьЧун // Автоматическая сварка. – 2002. – №8. – С. 16-19.

10. Панков, В.В. Математическая модель оптимизации многослойной сварки под флюсом корпусного оборудования энергетических установок / В.В. Панков, Г.Г. Чернышов, Н.Е. Козлов //Сварочное производство.–1987.–№ 7.–С. 34-37.

11. Панков, В.В. Методика расчета оптимальных параметров режима при автоматизированной сварке под флюсом корпусного оборудования АЭС: автореф. дис. … канд. техн. наук/ Панков В.В. – М., 1985. – 20 с.

12. Стихин, В.А. Применение поперечных колебаний электрода при автоматической сварке под флюсом многопроходных швов / В.А. Стихин, Б.М. Березовский, Ю.А. Попков и др.// Вопросы сварочного производства: Труды Челябинского политехнического института. Челябинск: ЧПИ. – 1985. – С. 98 – 103.

13. Акулов, А.И. Особенности формирования шва при сварке в углекислом газе с поперечными колебаниями электрода / А.И. Акулов, В.В. Спицин, Г.Г. Чернышов // Сварочное производство. – 1965. – №11. – С. 32 – 34.

14. Мандельберг, С.Л. Многодуговая сварка на повышенной скорости с поперечными колебаниями электрода поперек шва / С.Л. Мандельберг // Автоматическая сварка. – 1965. – №2. – С. 8 – 13.

15. Штрикман, М.М. Особенности нагрева и проплавления кромок при автоматической сварке в щелевую разделку с поперечными колебаниями дуги / М.М. Штрикман, В.В. Гринин // Сварочное производство. – 1978.– №11. – С. 7-10.

16. Полосков, С.И. Особенности процесса заполнения разделки (наплавки) при автоматической орбитальной сварке неповоротных стыков труб / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко // Сварочное производство. – 2003. – №8. – С. 3-11.

17. Акулов, А.И. Формирование стыковых швов при сварке в углекислом газе при наличии гидродинамических возмущений/ А.И. Акулов, Б.Л. Боженко, Г.Г. Чернышов, В.В. Спицин// Сварочное производство. – 1980. – № 10. –С. 15-17.

18. Лебедев, В.А.. Управление проплавлением при механизированной сварке и наплавке / В.А. Лебедев// Сварочное производство. – 2011. – №1. – С. 3 – 11.

19. Руссо, В.Л. О процессе проплавления при сварке деталей больших толщин / В.Л. Руссо, Б.В. Кудояров, И.В. Суздалев //Сварочное производство.–1971. – №11. – С. 1-3.

20. Акулов, А.И. Система автоматического регулирования провара при дуговой сварке/ А.И. Акулов, В.К. Исаченко // Сварочное производство. – 1961. – №8. С. 23-25.

21. Березовский, Б.М. Математические модели дуговой сварки: в 3 т. – Том 1. Математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной ванны и формирования шва / Б.М. Березовский – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2002. – 585 с.

22. Гецкин, О.Б. Воспроизводимость качества сварных соединений при автоматической орбитальной сварке с управляемым каплепереносом электродного металла / О.Б. Гецкин, Б.Л. Гецкин, С.И. Полосков // Сварка и диагностика. – 2009. – №2. – С. 47 – 53.

23. Макара, А.М. Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений/ А.М. Макара, Б.Н. Кушниренко // Автоматическая сварка. – 1967. – №1. – С. 31-35.

24. Шолохов, М.А. Распределение тепловой мощности дуги при сварке плавящимся электродом по узкому зазору/ М.А. Шолохов, И.Э. Оськин, В.А. Ерофеев, С.И. Полосков // Сварка и диагностика. – 2012. –№4. – С.18 – 23.

25. Размышляев, А.Д.. Гидродинамические параметры пленки жидкого металла на передней стенке кратера ванны при дуговой сварке/ А.Д. Размышляев// Автоматическая сварка. –1982. – №1. – С. 20 – 25.

26. Суздалев, И.В. Влияние параметров режима сварки на форму и размеры кратера сварочной ванны и толщину жидкой прослойки под дугой/ И.В. Суздалев, Б.М. Березовский, В.К. Прохоров// Сварочное производство.–1988.–№8.–С. 35-36.

27. Размышляев, А.Д. Уточненное определение толщины жидкой прослойки под дугой/ А.Д. Размышляев// Автоматическая сварка. –1980. –№7. –С. 74-75.

28. Чернышов, Г.Г. О толщине жидкой прослойки под дугой/ Г.Г. Чернышов, А.М. Рыбачук // Технология и автоматизация процессов сварки и пайки: Тр.МВТУ им. Н.Э. Баумана. М.: Машиностроение. –1969. –Вып. 132. –С. 67-73.

29. Чернов, А.В. Определение жидкой прослойки под дугой/ А.В. Чернов, Э.А. Гладков, А.И. Акулов и др. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. –1978. –№9. –С. 131-135.

30. Шолохов, М.А. Совместное влияние серы и кислорода на характер проплавления сталей с пониженным содержанием вредных примесей/ М.А. Шолохов,

М.П. Шалимов // Сварка и диагностика. –2010. –№4. –С.10-14.

31. Гулаков, С.В. К вопросу построения модели сварочной ванны при дуговой сварке плавящимся электродом/ С.В. Гулаков, Б.И. Носовский // Автоматическая сварка. –2002. –№9. – С. 24-28.

32. Ковалев, И.М. Влияние движения металла в сварочной ванне на устойчивость дуги и формирование шва/ И.М. Ковалев, Е.М. Кричевский, В.Н. Львов // Сварочное производство. –1974. –№11. –С. 5-7.

33. Лесков, Г.И. Электрическая сварочная дуга./ Г.И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. –335 с.

34. Ленивкин, В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах/ В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.

35. Катаев, Р.Ф. Расчет основных параметров режима механизированной дуговой сварки плавящимся электродом: методические указания к курсовому и дипломному проектированию/ Р.Ф. Катаев.– Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009.–37 с.

36. Акулов, А.И. Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов вузов/ А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.

37. Хренов, К.К. Электрическая сварочная дуга. –М.: Машгиз, 1949. – 305 с.

38. Балябин, Р.В. Справочник сварщика. Под ред. В.В. Степанова/ Р.В. Балябин и др. – М.: Машиностроение, 1975. –442 с.

39. Шолохов, М.А.. Исследование и разработка технологии механизированной сварки в защитных газах сталей с пониженным содержанием вредных примесей: дис. … канд. техн. наук: 05.03.06/ Шолохов Михаил Александрович. – Екатеринбург, 2009. – 151 с.

40. Новожилов, Н.М. Сварка плавящимся электродом в углекислом газе/ Н.М. Новожилов, В.Н. Суслов. – М.: Машгиз, 1958. –195 с.

41. Сидоров, В.П. Влияние режимов сварки на проплавление при механизированной наплавке/ В.П. Сидоров, А.И. Ковтун, С.А. Хурин // Сварочное производство. –2011. – №4. –С. 3 – 6.

42. Сафонников, А.Н. Влияние режима сварки в углекислом газе на размеры шва/ А.Н. Сафонников// Автоматическая сварка. – 1960. – №5. – С. 62 – 68.

43. Степанов, В.В. Влияние параметров режима сварки на формирование шва при автоматической сварке в узкую разделку/ В.В. Степанов, В.М. Язовских// Сварочное производство. –1980. – №3. – С.36-37.

44. Добротина, З.А. Влияние тока и скорости сварки (при постоянной погонной энергии) на геометрию шва и свойства околошовной зоны/ З.А. Добротина, Е.А. Донченко // Сварочное производство. –1972. –№8. –С. 33-34.

45. Аснис, А.Е. Сварка в смеси активных газов / А.Е. Аснис, Л.М. Гутман, В.Р. Покладий, Я.М. Юзькив. – Киев: Наук. Думка, 1982. –216 с.

46. Акулов, А.И. Влияние режима и пространственного положения на размеры шва при сварке в CO_2/ А.И. Акулов, В.В. Спицин // Сварочное производство. – 1971. –№2. –С.27-29.

47. Потапьевский, А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом/ А.Г. Потапьевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 240 с.

48. Krahl, A. Auswirkung zunehmender Kohlendioxidgehalte in Argon-Kohlendioxid-SchutzgasgemischenbeimMetallschutzgasschweissen von Baustahlen/ A. Krahl // Schweissen und Schneiden. – 1971. – № 5. – S. 271 – 282.

49. Жерносеков, А.М. Влияние вылета электрода на параметры шва при импульсно-дуговой сварке сталей/ А.М. Жерносеков// Автоматическая сварка. – 2004. –№8. – С. 52 – 53.

50. Фролов, В.А. Технология сварки плавлением и термической резки металлов: учебное пособие / В.А. Фролов, В.Р. Петренко, А.В. Пешков, А.Б. Коломенский, В.А. Казаков; под ред. В.А. Фролова. –М.: Альфа-М: ИНФРА-М, 2011.– 448 с.

51. Фивейский, А.М. Сварочное оборудование «Шторм»: SpeedArc – высокая скорость и отличное качество MIG/MAG сварки/ А.М. Фивейский// Техсовет. – 2010. – №9.

52. Фивейский, А.М. Расчет эффективности применения инверторных источников питания. / А.М.Фивейский, М.А. Шолохов, Д.С. Бузорина // Сб. статей

научно-технической конференции в рамках 11 Международной специализированной выставки Сварка. Контроль и диагностика – Екатеринбург. – 2011. – С. 133 – 144.

53. Шолохов, М. А. Эффективность эксплуатации инверторных источников питания / М. А.Шолохов, А. М. Фивейский, Д. С. Бузорина, Е. В.Лунина // Сварка и диагностика. – 2012 - № 3. – С.53-56.

54. Ерохин, А.А. Регулирование величины проплавления при дуговой сварке неповоротных стыков/ А.А. Ерохин, Ю.С. Ющенко. // Сварочное производство. 1966. –№2. –С.7-9.

55. Смирнов, И.В. Управление тепловложением при дуговой сварке неплавящимся электродом / И.В. Смирнов, А.И. Захаренко //Сварочное производство. 2009. –№12. – С.32-36.

56. Смирнов, И.В. Пространственно-параметрическое управление тепловложением при дуговой сварке // Сварка и диагностика. –2013. – № 4. – С. 10-13.

57. Гладков, Э.А. Фильтрация помех в оптической следящей системе за стыком при дуговой сварке/ Э.А. Гладков, А.В. Данилов, Р.А. Перковский // Сварка и диагностика. –2010. –№1. –С. 44 – 47.

58. Алешин, Н.П. Новые цифровые технологии сварки ответственных изделий/ Н.П. Алешин, Э.А. Гладков // Сварка и диагностика. –2008. –№4. –С. 8 – 10.

59. Гладков, Э.А. Оптические системы контроля положения электрода в разделке стыка при MIG/MAG-сварке/ Э.А. Гладков, Р.А. Перковский, Д.С. Васькин, М.А. Шолохов // Сварка и диагностика. –2012. –№6. –С. 36 – 40.

60. Окерблом, Н.О.. Проектирование технологии изготовления сварных конструкций (расчетные методы)/ Н.О. Окерблом, В.П. Демянцевич, И.П. Байкова. – Ленинград: Судпромгиз, 1963. – 604 с.

61. Попков, А.М. Методика расчета параметров режима дуговой сварки толстых листов встык двусторонними швами/ А.М. Попков// Сварочное производство. –2007. –№5. –С. 3 - 4.

62. Дубовецкий, С.В.. Оптимизация режима сварки в CO_2 / С.В. Дубовецкий, Г.И. Сергацкий, О.Г. Касаткин // Автоматическая сварка. –1980. –№12. –С 30-34.

63. Судник, В.А. Численный анализ дефектов формы сварного шва при дуговой сварке/ В.А. Судник // Известия ТулГУ. Технические науки. –2008.–Вып.2.– С.177-185.

64. Судник, В.А. Обратная задача поиска параметров режима импульсной сварки для обеспечения заданных размеров углового шва/ В.А. Судник, О.И. Зайцев, А.С. Рыбаков// Известия ТулГУ. Технические науки. –2010. –Выпуск 4. Ч. – С. 211-223.

65. Коробейников, С.Н. Алгоритм расчета оптимальных параметров режима сварки низколегированных сталей/ С.Н. Коробейников, А.С. Бабкин // Сварочное производство. –2009. – №12. –С. 13 – 16.

66. Бабкин, А.С. Развитие методов автоматизированного проектирования технологии автоматической сварки плавящимся электродом в защитных газах деталей машин из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей: дис. …д-ра техн. наук: 05.02.10/ Бабкин Александр Сергеевич. – М., 2012. – 411 с.

67. Ивочкин, И.И. Сварка под флюсом с дополнительной присадкой/ И.И. Ивочкин, Б.Д. Малышев. – М.: Стройиздат, 1981. – 175 с.

68. Лащенко, Г.И. Энергетические характеристики процессов дуговой сварки плавящимся электродом // Автоматическая сварка. –1998. –№9. –С. 20-23.

69. Колякин, Н.Н. Тепловые характеристики дуги при различных способах сварки плавлением/ Н.Н. Колякин, Л.М. Яровинский // Автоматическая сварка. – 1970. –№12. –С.4– 6.

70. Ерохин, А.А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности/ А.А. Ерохин. –М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.

71. Рыкалин, Н.Н. Тепловые основы сварки. – М.: АН СССР, 1947.

72. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке/ Н.Н Рыкалин. – М.: Государственной научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951.

73. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т.1. Свариваемость материалов. Справ.изд./ Под ред. Э.Л. Макарова. -М.: Металлургия, 1991.- 528 с.

74. Ольшанский, Н.А. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. Т.1/ Под

ред. Н.А.Ольшанского. – М.: Машиностроение, 1978. –504 с.

75. Петров, Г.Л. Теория сварочных процессов (с основами физической химии)/ Г.Л. Петров, А.С. Тумарев. –М.: Высшая школа, 1977. –392 с.

76. Фролов В.В. Теория сварочных процессов: учебник для вузов по специальности «Оборудование и технология сварочного производства»/ Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. –559 с.

77. Походня, И.К. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов/ И.К. Походня, В.Н. Горненюк, С.С. Миличенко и др./ Под ред. И.К. Походни. – К.: Наукова думка, 1990. – 224 с.

78. Коновалов, А.В. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов/ А.В. Коновалов, А.С.Куркин, Э.Л. Макаров, В.М. Неровный, Б.Ф. Якушин. Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.

79. Березовский, Б. М.. Термический кпд процесса проплавления металла поверхностной сварочной дугой.// Автоматическая сварка. – 1979. –№10. – С. 18-21.

80. Гуревич, В.И. О тепловом балансе сварочной ванны/ В.И. Гуревич// Сварочное производство. – 2008. – №3. – С. 3 – 6.

81. Королев, Н.В. Расчеты тепловых процессов при сварке, наплавке и термической резке: учебное пособие/Н.В. Королев.–Екатеринбург: УГТУ, 1996.–156 с.

82. Рыков, А.М. Эффективный к.п.д. нагрева изделия дугой при наплавке порошковой лентой/ А.М. Рыков, И.Р. Пацкевич // Сварочное производство. – 1972. – №4. – С. 1-2.

83. Потапьевский, А.Г. Эффективная тепловая мощность дуги при сварке в углекислом газе/ А.Г. Потапьевский, Е.Е. Райский // Автоматическая сварка. – 1968. – №8. С. – 13-15.

84. Дмитрик, В.В. К эффективности использования тепла расплава ванны/ В.В. Дмитрик, В.В. Шевченко// Автоматическая сварка. – 2001. – №4. – С. 25 – 27.

85. Безбах, Д.К. Эффективная тепловая мощность дуги при некоторых способах сварки плавящимся электродом //Сварочное производство.–1967.–№3.– С.8–9.

86. Гуднев, Н.З. Влияние защитных газов на технологические характеристики сварочной дуги, качество и механические свойства металла шва/ Н.З. Гуднев, С.Н.

Гончаров, А.М. Степанюк// Сварочное производство. –1977. –№8. –С. 32-34.

87. Королев, Н.В. Тепловые и металлургические процессы при сварке: методические указания к курсовой работе по дисциплине «Теория сварочных процессов»/ Н.В. Королев, М.П. Шалимов.–Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005.– 30 с.

88. Шолохов, М.А. К вопросу определения эффективного кпд процесса нагрева при сварке / М.А. Шолохов, А.М.Фивейский, Д.С. Бузорина // Сб. статей научно-технической конференции в рамках 12 Международной специализированной выставки Сварка. Контроль и диагностика –Екатеринбург, 2012.–С. 175 – 181.

89. Багрянский, К.В. Теория сварочных процессов/ К.В. Багрянский, З.А. Добротина, К.К. Хренов.– Издательское объединение «Вища школа», 1976.–424 с.

90. Рыкалин, Н.Н. Эффективность процесса проплавления металла при сварке электрической дугой // Доклады АН СССР.–1948.–Т.13.№2. – С.131-134.

91. Гайдадин, А.Н. Использование метода композиционного планирования эксперимента для описания технологических процессов: методические указания/ А.Н. Гайдадин, С.А. Ефремова. – Волгоград: ВолгГТУ, 2008. – 16 с.

92. Плохов, И.В. Основы теории планирования эксперимента и ее приложения в электроприводе: учебное пособие. – Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2003. – 50 с.

93. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов/ А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. –184 с.

94. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

95. СТО-ГК «Трансстрой»-012-2007. Стандарт организации. Стальные конструкции мостов. Заводское изготовление. М., 2007. – 264 с.

96. ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: Стандартинформ, 2007. – 38 с.

97. Потапьевский, А.Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография/ А.Г. Потапьевский, Ю.Н. Са-

раев, Д.А. Чинахов. – Юргинский технологический институт. − Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. − 208 с.

98. ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1970. – 19 с.

99. Крампит, А.Г. Методика по определению геометрических размеров и площади сварного шва/ А.Г. Крампит, Н.Ю. Крампит // Сварочное производство. – 2012. –№10. – С. 40-42.

100. Лащенко, Г.И. Влияние состава защитного газа на разбрызгивание металла при сварке с повышенной скоростью/ Г.И. Лащенко, Г.П. Демьяненко // Автоматическая сварка. –1976. –№10. –С. 70.

101. Шейко, П.П. Уменьшение разбрызгивания металла при сварке плавящимся электродом в углекислом газе/ П.П. Шейко, А.М.Жерносеков, С.А. Шевчук // Автоматическая сварка. –2000. – №6. –С. 33-35.

102. Донченко, Е.А. Расчет площади сечения шва при автоматической сварке и наплавке/Е.А. Донченко//Сварочное производство. –2010.– №11.– С.17–21.

103. Размышляев, А.Д. Эффективность процесса проплавления основного металла при дуговой наплавке проволокой под флюсом/ А.Д. Размышляев, М.В. Миронова // Сварочное производство. –2011. –№ 7. –С. 3 – 8.

104. Гулаков, С.В. О передаче тепла от источника к фронту плавления через жидкий металл сварочной ванны/ С.В. Гулаков, Б.И. Носовский // Сварочное производство. –1982. –№6. –С. 5-6.

105. Милютин, В.С. Источники питания для сварки/ В.С. Милютин, М.П. Шалимов, С.М. Шанчуров. – М.: Айрис-пресс, 2007. –384 с.

106. Самарский, А.А. Численные методы решения обратных задач математической физики: Учебное пособие. Изд. 3-е./ А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич.– М.: Издательство ЛКИ, 2009. –480 с.

107. Анищенко, Л.М.. Математические основы проектирования высокотемпературных технологических процессов/ Л.М. Анищенко. –М.: Наука, 1986. –80 с.

108. Нормирование расхода сварочных материалов при сварке в углекислом газе и его смесях: справочное пособие. – Киев: Екотехнология, 2008. –67 с.

109. Яковлев, В. В. Вычислительный эксперимент при изучении сварочных процессов/ В.В. Яковлев, С.М. Шанчуров, И.В. Першин // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – №8. – С. 16 – 20.

110. Самарский, А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент/ А.А. Самарский// Вестн. АН СССР. – 1979. –№5. – С. 38 – 49.

111. Мечев, В.С. Блуждание дуги при сварке плавящимся электродом/ В.С.Мечев // Сварочное производство. –1984. –№ 4. – С. 5 – 7.

112. Шолохов, М.А. Компьютерный анализ устойчивости дуги при сварке плавящимся электродом по узкому зазору/ М.А. Шолохов, И.Э. Оськин, В.А. Ерофеев, С.И. Полосков // Сварка и диагностика. –2013. –№1. –С. 27-31.

113. Kim, R-H. Arc Characteristics in Pulse-GMA Welding with Acute Groove Angles/ R-H. Kim, G-D. Choi, C-H. Kim, D-W. Cho, S-J. Na. // WELDING JOURNAL. – 2012– Vol. 91. –P. 101-105.

114. Ahn, J. H. A study on the weavingless arc sensor system in GMA welding (1) – Implementation of weld seam tracking algorithm./ J. H. Ahn, J. W. Kim. // Journal of the Korean Welding and Joining Society. –1998. –16 (3) – P. 44-54.

115. Kim, J. W. A study on the analysis of weld pool convection and seam tracking by considering the arc length characteristics in GMA welding, KAIST, doctoral thesis/ J. W. Kim. –1991.

116. Kim, Y. J. A study of seam tracking by arc sensor using current area difference method/ Y. J. Kim, S. H. Rhee, K. W. Um. // Journal of the Korean Welding and Joining Society. –1998. –6 (3) – P. 44-54.

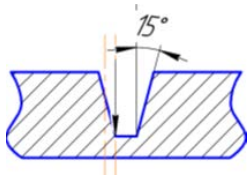
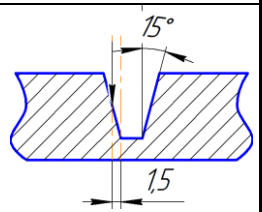
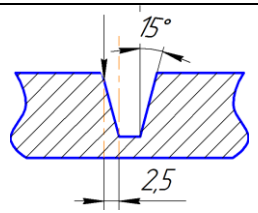
117. ГОСТ 19281-89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1989. – 25 с.

118. ГОСТ 23118-99. Конструкции стальные строительные. Общие технические условия.–М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 1999.– 42 с.

119. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции. – М.: ЦИТП

Госстроя СССР,1989. – 195 с.

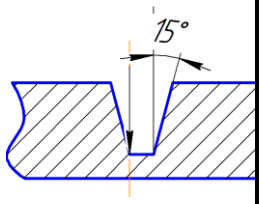
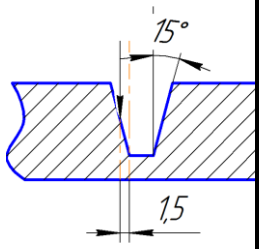
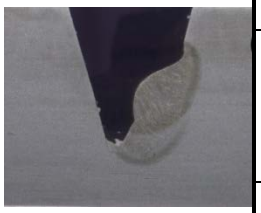
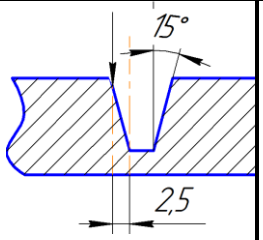
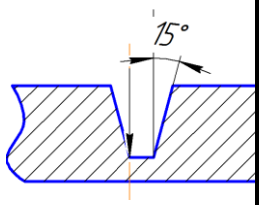
Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные при исследовании влияния угла скоса кромок, положения электрода и скорости сварки

№ образца	Схема	Шлиф	Угол разделки, град	Положение электрода, мм	Скорость сварки, м/ч	Вылет электрода, мм	Содержание CO2 в смеси газов, %	Экспериментальные данные									Площадь наплавленного металла расчетная, мм^2
								Сварочный ток, Iф, А	Напряжение, Uф, В	Скорость подачи проволоки, м/мин	Площадь сечения валика, мм^2	Среднее значение площади сечения валика, мм^2	Полны тепловой КПД процесса сварки	Среднее значение полного теплового КПД процесса сварки	Площадь наплавленного металла эксперимент., мм^2	Среднее значение площади наплавл. металла, мм^2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
01 01 01-1			15	0	18	20	18	194	23,2	6,3	32,31	31,27	0,478	0,463	22,30	22,63	23,45
01 01 01-2			15	0	18	20	18	194	23,2	6,3	33,07		0,489		23,06		
01 01 01-3			15	0	18	20	18	194	23,2	6,3	28,42		0,421		22,54		
01 02 01-1			15	1,5	18	20	18	192	22,6	6,3	31,41	31,59	0,462	0,464	-	-	23,6
01 02 01-2			15	1,5	18	20	18	192	22,6	6,3	32,55		0,478		-		
01 02 01-3			15	1,5	18	20	18	192	22,6	6,3	30,82		0,453		-		
01 03 01-1			15	2,5	18	20	18	194	23,2	6,3	33,92	35,14	0,496	0,514	-	-	24,62
01 03 01-2			15	2,5	18	20	18	194	23,2	6,3	35,7		0,522		-		
01 03 01-3			15	2,5	18	20	18	194	23,2	6,3	35,79		0,523		-		

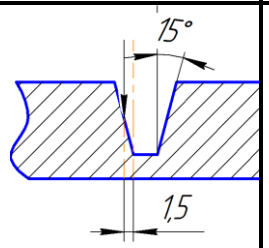
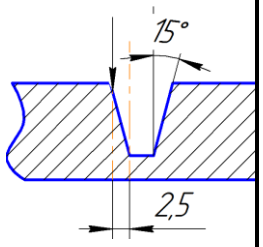
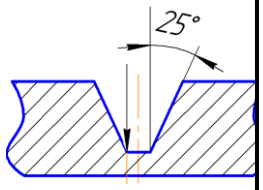
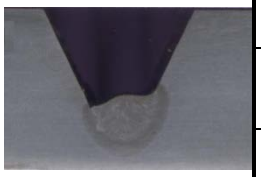
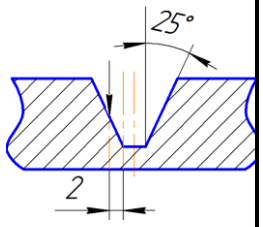
Приложение А

Результаты исследований влияния технологических параметров

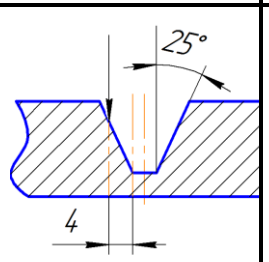
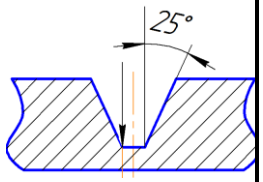
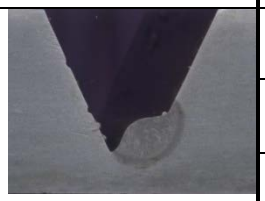
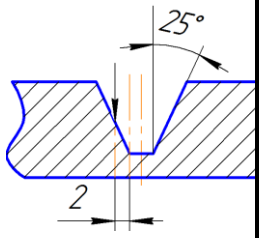
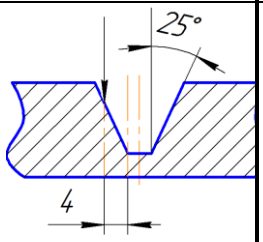
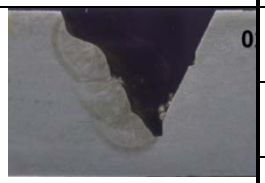
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
01 01 02-1			15	0	30	20	18	191	23,1	6,3	20,47	19,87	0,317	0,308	14,70	13,86	14,03
01 01 02-2			15	0	30	20	18	191	23,1	6,3	20,3		0,314		13,66		
01 01 02-3			15	0	30	20	18	191	23,1	6,3	18,83		0,291		13,23		
01 02 02-1			15	1,5	30	20	18	189	23	6,3	20,06	20,86	0,304	0,316	-	-	14,51
01 02 02-2			15	1,5	30	20	18	189	23	6,3	20,83		0,315		-		
01 02 02-3			15	1,5	30	20	18	189	23	6,3	21,69		0,328		-		
01 03 02-1			15	2,5	30	20	18	186	23,7	6,3	20,78	20,05	0,322	0,310	-	-	15,07
01 03 02-2			15	2,5	30	20	18	186	23,7	6,3	20,14		0,312		-		
01 03 02-3			15	2,5	30	20	18	186	23,7	6,3	19,24		0,298		-		
01 01 03-1			15	0	24	20	18	186	23,6	6,3	23,7	24,40	0,362	0,373	17,07	17,41	18,02
01 01 03-2			15	0	24	20	18	186	23,6	6,3	24,79		0,379		17,95		
01 01 03-3			15	0	24	20	18	186	23,6	6,3	24,72		0,378		17,20		

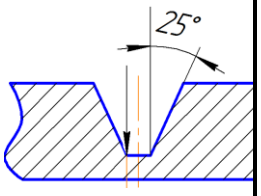
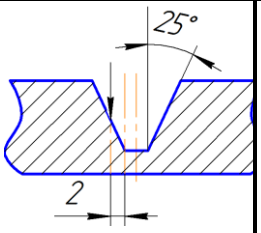
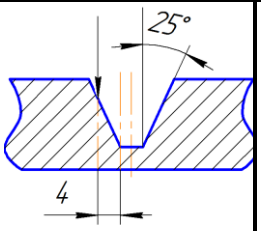
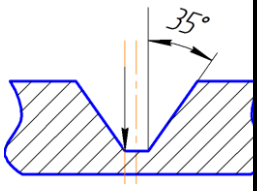
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
01 02 03-1			15	1,5	24	20	18	191	23,3	6,3	24,92	24,35	0,373	0,364	-	-	18,16
01 02 03-2			15	1,5	24	20	18	191	23,3	6,3	22,22		0,332		-		
01 02 03-3			15	1,5	24	20	18	191	23,3	6,3	25,92		0,388		-		
01 03 03-1			15	2,5	24	20	18	192	23,1	6,3	25,37	25,48	0,382	0,384	-	-	18,69
01 03 03-2			15	2,5	24	20	18	192	23,1	6,3	25,9		0,390				
01 03 03-3			15	2,5	24	20	18	192	23,1	6,3	25,17		0,379				
02 01 01-1			25	0	18	20	18	193	23,8	6,3	30,68	30,56	0,472	0,470	24,14	22,48	23,55
02 01 01-2			25	0	18	20	18	193	23,8	6,3	30,78		0,474		21,02		
02 01 01-3			25	0	18	20	18	193	23,8	6,3	30,23		0,465		22,27		
02 02 01-1			25	2	18	20	18	190	23,7	6,3	30,33	31,97	0,457	0,482	-	-	23,29
02 02 01-2			25	2	18	20	18	190	23,7	6,3	33,93		0,512		-		
02 02 01-3			25	2	18	20	18	190	23,7	6,3	31,66		0,477		-		

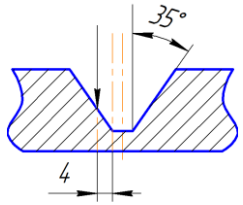
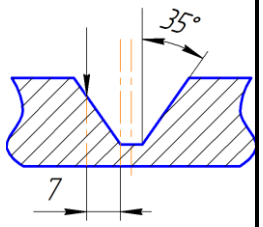
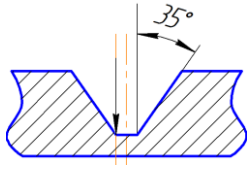
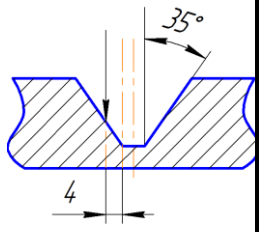
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
02 03 01-1			25	4	18	20	18	192	23,6	6,3	32,39	32,64	0,469	0,473	-	-	25,52
02 03 01-2			25	4	18	20	18	192	23,6	6,3	33,07		0,479		-		
02 03 01-3			25	4	18	20	18	192	23,6	6,3	32,47		0,470		-		
02 01 02-1			25	0	30	20	18	192	23,6	6,3	18,68	20,23	0,291	0,316	12,01	13,43	14,44
02 01 02-2			25	0	30	20	18	192	23,6	6,3	19,62		0,306		13,48		
02 01 02-3			25	0	30	20	18	192	23,6	6,3	22,4		0,349		13,38		
02 02 02-1			25	2	30	20	18	189	23,2	6,3	19,29	19,40	0,294	0,296	-		14,16
02 02 02-2			25	2	30	20	18	189	23,2	6,3	19,38		0,295		-		
02 02 02-3			25	2	30	20	18	189	23,2	6,3	19,54		0,298		-		
02 03 02-1			25	4	30	20	18	184	23,9	6,3	20,34	20,92	0,309	0,318	-	-	14,62
02 03 02-2			25	4	30	20	18	184	23,9	6,3	19,82		0,302		-		
02 03 02-3			25	4	30	20	18	184	23,9	6,3	22,59		0,344		-		

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
02 01 03-1			25	0	24	20	18	190	23,7	6,3	25,53	25,80	0,388	0,392	17,45	16,88	17,85
02 01 03-2			25	0	24	20	18	190	23,7	6,3	24,87		0,378		16,54		
02 01 03-3			25	0	24	20	18	190	23,7	6,3	26,99		0,410		16,66		
02 02 03-1			25	2	24	20	18	192	23	6,3	24,69	24,64	0,358	0,357	-	-	17,94
02 02 03-2			25	2	24	20	18	192	23	6,3	24,39		0,354		-		
02 02 03-3			25	2	24	20	18	192	23	6,3	24,84		0,360		-		
02 03 03-1			25	4	24	20	18	192	23,3	6,3	26,88	25,85	0,398	0,383	-	-	18,67
02 03 03-2			25	4	24	20	18	192	23,3	6,3	25,17		0,373		-		
02 03 03-3			25	4	24	20	18	192	23,3	6,3	25,49		0,378		-		
03 01 01-1			35	0	18	20	18	192	23,8	6,3	29,93	30,16	0,442	0,446	18,64	19,85	23,5
03 01 01-2			35	0	18	20	18	192	23,8	6,3	29,55		0,437		19,85		
03 01 01-3			35	0	18	20	18	192	23,8	6,3	30,99		0,458		21,05		

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
03 02 01-1			35	4	18	20	18	193	24,2	6,3	32,27		0,478		-		
03 02 01-2			35	4	18	20	18	193	24,2	6,3	33,01	32,58	0,489	0,482	-	-	22,6
03 02 01-3			35	4	18	20	18	193	24,2	6,3	32,45		0,480		-		
03 03 01-1			35	7	18	20	18	194	23,8	6,3	31,97		0,467		-		
03 03 01-2			35	7	18	20	18	194	23,8	6,3	29,7	31,10	0,434	0,454	-	-	24,21
03 03 01-3			35	7	18	20	18	194	23,8	6,3	31,64		0,462		-		
03 01 02-1			35	0	30	20	18	192	23,5	6,3	21,47		0,318		15,54		
03 01 02-2			35	0	30	20	18	192	23,5	6,3	19,59	20,81	0,290	0,308	15,11	14,76	14,21
03 01 02-3			35	0	30	20	18	192	23,5	6,3	21,38		0,317		13,64		
03 02 02-1			35	4	30	20	18	190	23,8	6,3	19,44		0,291		-		
03 02 02-2			35	4	30	20	18	190	23,8	6,3	18,14	19,57	0,271	0,293	-	-	14,03
03 02 02-3			35	4	30	20	18	190	23,8	6,3	21,13		0,316		-		

Продолжение таблицы 1

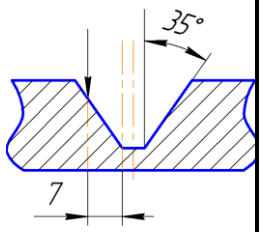
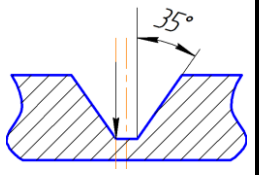
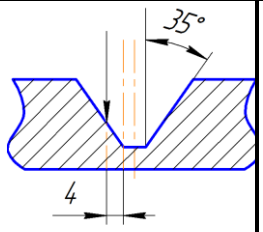
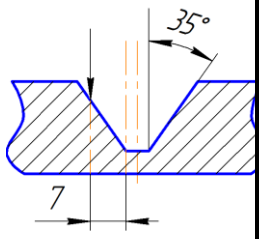
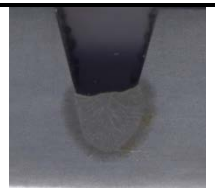
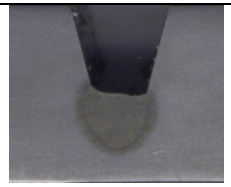
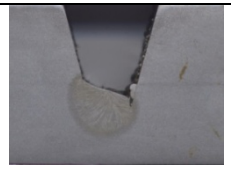
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
03 03 02-1			35	7	30	20	18	192	23,6	6,3	19,98		0,294		-		
03 03 02-2			35	7	30	20	18	192	23,6	6,3	22,09	21,42	0,326	0,316	-	-	14,22
03 03 02-3			35	7	30	20	18	192	23,6	6,3	22,18		0,327		-		
03 01 03-1			35	0	24	20	18	193	23,5	6,3	28,05		0,415		16,80		
03 01 03-2			35	0	24	20	18	193	23,5	6,3	26,19	27,09	0,388	0,401	14,32	15,89	17,53
03 01 03-3			35	0	24	20	18	193	23,5	6,3	27,03		0,400		16,55		
03 02 03-1			35	4	24	20	18	192	23,6	6,3	27,18		0,393		-		
03 02 03-2			35	4	24	20	18	192	23,6	6,3	26,79	27,00	0,387	0,391	-	-	18,29
03 02 03-3			35	4	24	20	18	192	23,6	6,3	27,04		0,391		-		
03 03 03-1			35	7	24	20	18	189	23,9	6,3	25,87		0,384		-		
03 03 03-2			35	7	24	20	18	189	23,9	6,3	27,81	27,30	0,412	0,405	-	-	19,54
03 03 03-3			35	7	24	20	18	189	23,9	6,3	28,23		0,419		-		

Таблица 2 – Экспериментальные и расчетные данные при определении зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от сварочного тока

№ обр.	Фотография макрошлифа	Скорость сварки, $v_{св}$, м/час	Сварочный ток, А	Скорость подачи проволоки, м/мин	Напряжение, В	Площадь сечения валика, F, мм^2			Полный тепловой КПД процесса сварки, $\eta_с$			Площадь наплавленного металла, $F_н$, мм^2	Площадь проплавления, $F_{пр}$, мм^2
						Фактическая ($F_ф$)	По регрессионному уравнению 2.1 ($F_р$)	Поправочный коэффициент ($F_ф/F_р$)	Фактический ($\eta_{с\,ф}$)	По регрессионному уравнению 2.2 ($\eta_{с\,р}$)	Поправочный коэффициент ($\eta_{с\,ф}/\eta_{с\,р}$)		
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**11**	**12**
01 01 2		20	220	9,2	25	36,7	26,19	1,4	0,379	0,381	0,99	31,2	5,5
01 02 2		25	225	9,2	26	33,6	20,26	1,66	0,408	0,395	1,03	25,0	8,6
01 03 2		30	220	9,2	26	30,6	14,82	2,06	0,456	0,385	1,18	20,8	9,8

Продолжение таблицы 2

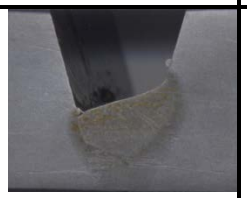
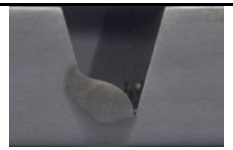
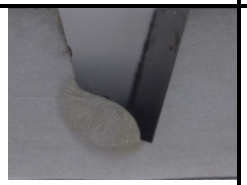
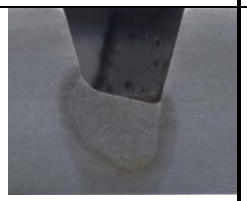
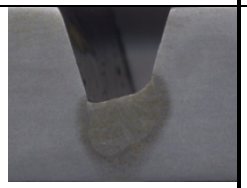
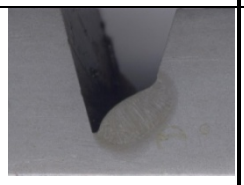
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
02 01 2		20	220	9,2	27	47,7	26,19	1,82	0,456	0,381	1,20	31,2	16,5
02 02 2		25	220	9,2	28	40,4	20,26	1,99	0,474	0,395	1,20	25,0	15,4
02 03 2		30	225	9,2	28	37,0	14,82	2,50	0,5	0,385	1,30	20,8	16,2
03 01 2		20	238	9,2	30	55,3	26,19	2,11	0,437	0,381	1,15	31,2	24,1
03 02 2		25	230	9,2	30	42,8	20,26	2,11	0,437	0,395	1,11	25,0	17,8
03 03 2		30	230	9,2	30	38	14,82	2,56	0,469	0,385	1,22	20,8	17,2

Таблица 3 – Экспериментальные и расчетные данные при определении зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от вылета электрода

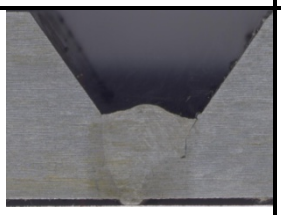
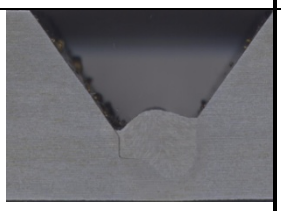
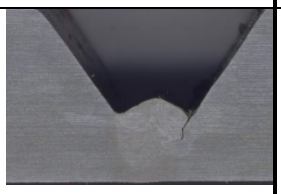
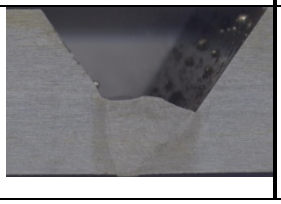
№ обр.		Вылет электрода, $l_э$, мм	Сварочный ток, А (во время сварки)	Напряжение, В (во время сварки)	Площадь сечения валика, F, мм^2			Полный тепловой КПД процесса сварки, $\eta_с$		
					Экспериментальные значения $F_ф$	Расчетные значения ($F_р$)	Поправочный коэффициент ($F_ф$/ $F_р$)	Экспериментальные значения $\eta_{с\,ф}$	Расчетные значения (по уравнениям ($\eta_{с\,р}$)	Поправочный коэффициент ($\eta_{с\,ф}$ / $\eta_{с\,р}$)
1		**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1 01	1	10	198	22	30,58	31,93	0,96	0,399	0,368	1,08
	2	10	198	22	29,64	31,93	0,93	0,386	0,368	1,05
	3	10	198	22	28,12	31,93	0,88	0,367	0,368	1,0
1 02	1	15	198	22	31,25	31,93	0,98	0,407	0,368	1,11
	2	15	198	22	33,05	31,93	1,04	0,431	0,368	1,17
	3	15	198	22	32,06	31,93	1,00	0,418	0,368	1,14
1 03	1	20	198	22	29,47	31,93	0,92	0,384	0,368	1,04
	2	20	198	22	31,42	31,93	0,98	0,410	0,368	1,11
	3	20	198	22	31,38	31,93	0,98	0,409	0,368	1,11
1 04	1	25	198	22	24,31	31,93	0,76	0,317	0,368	0,86
	2	25	198	22	24,6	31,93	0,77	0,321	0,368	0,87
	3	25	198	22	26,7	31,93	0,84	0,348	0,368	0,95
1 05	1	30	198		Нет стабильности процесса					
1 01-1	1	10	180	22	22,7	25,00	0,91	0,325	0,338	0,96
	2	10	180	22	20,54	25,00	0,82	0,294	0,338	0,87
	3	10	180	22	20,14	25,00	0,81	0,288	0,338	0,85

1		**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1 03-1	1	20	180	22	24,1	25,00	0,96	0,345	0,338	1,02
	2	20	180	22	23,83	25,00	0,95	0,341	0,338	1,01
	3	20	180	22	25,96	25,00	1,04	0,372	0,338	1,1
1 05-1	1	25	180	22	24,24	25,00	0,96	0,347	0,338	1,03
	2	25	180	22	23,65	25,00	0,95	0,339	0,338	1,0
	3	25	180	22	23,47	25,00	0,94	0,336	0,338	0,99
1 01-2	1	10	242	27	46,88	49,30	0,95	0,407	0,444	0,92
	2	10	242	27	44,04	49,30	0,89	0,382	0,444	0,86
	3	10	242	27	45,38	49,30	0,92	0,394	0,444	0,89
1 03-2	1	20	242	27	50,13	49,30	1,02	0,435	0,444	0,98
	2	20	242	27	49,14	49,30	1,0	0,426	0,444	0,96
	3	20	242	27	49,18	49,30	1,0	0,427	0,444	0,96
1 05-2	1	25	242	27	46,39	49,30	0,94	0,402	0,444	0,91
	2	25	242	27	48,61	49,30	0,99	0,422	0,444	0,95
	3	25	242	27	49,42	49,30	1,0	0,429	0,444	0,97

Приложение Б

Результаты проверочного эксперимента

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные при проведении проверочного эксперимента

№ образца	Шлиф	Скорость сварки, $v_{св}$, м/час	Сварочный ток, А	Напряжение, В	Площадь сечения валика, F, мм^2	Площадь наплавленного металла, $F_н$, мм^2	Площадь проплавления, мм^2	Коэффициент площадей k (факт.)	Коэффициент площадей k (расчетный.)	Отклонение расчетного значения коэффициента площадей, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
01 01 3		20	270	25	60,9	38,3	22,6	0,59	0,47	19,4
01 02 3		25	265	24	43,8	30,7	13,1	0,43	0,47	-9,5
01 03 3		30	270	24	43,5	25,6	17,9	0,70	0,53	23,9
02 01 3		20	277	27,5	64,1	38,3	25,8	0,67	0,70	-4,8

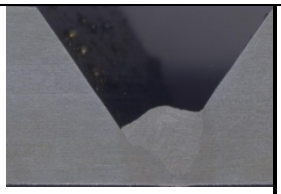
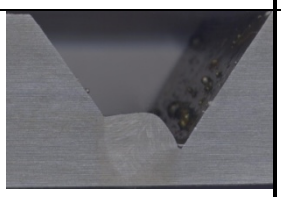
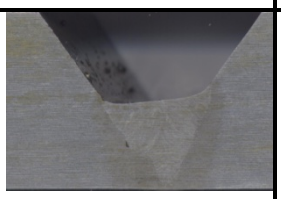
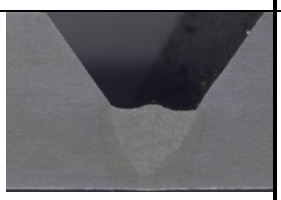
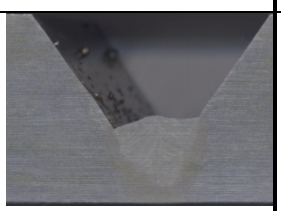
02 02 3		25	270	26	43,8	30,7	13,1	0,43	0,65	-51,7
02 03 3		30	270	26	41,6	25,6	16	0,63	0,66	-5,5
03 01 3		20	275	30	63,8	38,3	25,5	0,66	0,83	-25,4
03 02 3		25	270	28	47,6	30,7	16,9	0,55	0,68	-23,6
03 03 3		30	270	28	42,1	25,6	16,5	0,65	0,79	-22,1

Таблица 2 – Результаты определения коэффициента площадей

№ образца	Угол разделки, град	Положение электрода, мм	Скорость сварки, м/ч	Вылет электрода, мм	Содержание CO2 в смеси защитных газов, %	Экспериментальные данные							Коэффициент площадей k, расч
						Во время сварки		Площадь сечения валика, мм^2	Среднее значение площади сечения валика мм^2	Площадь наплавленного металла эксперим., мм^2	Среднее значение площади наплавленного металла эксперим., мм^2	Коэффициент площадей, kф	
						Сварочный ток, Iф, А	Напряжение, Uф, В						
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
S5													
01 01 01-1	15	0	18	20	18	194	23,2	32,31	31,27	22,30	22,63	0,33	0,31
01 01 01-2	15	0	18	20	18	194	23,2	33,07		23,06			
01 01 01-3	15	0	18	20	18	194	23,2	28,42		22,54			
01 02 01-1	15	1,5	18	20	18	192	22,6	31,41	31,59			0,34	0,29
01 02 01-2	15	1,5	18	20	18	192	22,6	32,55					
01 02 01-3	15	1,5	18	20	18	192	22,6	30,82					
01 03 01-1	15	2,5	18	20	18	194	23,2	33,92	35,14			0,43	0,40
01 03 01-2	15	2,5	18	20	18	194	23,2	35,7					
01 03 01-3	15	2,5	18	20	18	194	23,2	35,79					
01 01 02-1	15	0	30	20	18	191	23,1	20,47	19,87	14,70	13,86	0,42	0,32
01 01 02-2	15	0	30	20	18	191	23,1	20,3		13,66			
01 01 02-3	15	0	30	20	18	191	23,1	18,83		13,23			
01 02 02-1	15	1,5	30	20	18	189	23	20,06	20,86			0,44	0,32
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**

01 02 02-2	15	1,5	30	20	18	189	23	20,83					
01 02 02-3	15	1,5	30	20	18	189	23	21,69					
01 03 02-1	15	2,5	30	20	18	186	23,7	20,78	20,05			0,33	0,33
01 03 02-2	15	2,5	30	20	18	186	23,7	20,14					
01 03 02-3	15	2,5	30	20	18	186	23,7	19,24					
01 01 03-1	15	0	24	20	18	186	23,6	23,7	24,40	17,07	17,41	0,35	0,28
01 01 03-2	15	0	24	20	18	186	23,6	24,79		17,95			
01 01 03-3	15	0	24	20	18	186	23,6	24,72		17,20			
01 02 03-1	15	1,5	24	20	18	191	23,3	24,92	24,35			0,34	0,41
01 02 03-2	15	1,5	24	20	18	191	23,3	22,22					
01 02 03-3	15	1,5	24	20	18	191	23,3	25,92					
01 03 03-1	15	2,5	24	20	18	192	23,1	25,37	25,48			0,36	0,45
01 03 03-2	15	2,5	24	20	18	192	23,1	25,9					
01 03 03-3	15	2,5	24	20	18	192	23,1	25,17					
02 01 01-1	25	0	18	20	18	193	23,8	30,68	30,56	24,14	22,48	0,30	0,29
02 01 01-2	25	0	18	20	18	193	23,8	30,78		21,02			
02 01 01-3	25	0	18	20	18	193	23,8	30,23		22,27			
02 02 01-1	25	2	18	20	18	190	23,7	30,33	31,97			0,37	0,26
02 02 01-2	25	2	18	20	18	190	23,7	33,93					
02 02 01-3	25	2	18	20	18	190	23,7	31,66					
02 03 01-1	25	4	18	20	18	192	23,6	32,39	32,64			0,28	0,34
02 03 01-2	25	4	18	20	18	192	23,6	33,07					
02 03 01-3	25	4	18	20	18	192	23,6	32,47					
02 01 02-1	25	0	30	20	18	192	23,6	18,68	20,23	12,01	13,43	0,40	0,39
02 01 02-2	25	0	30	20	18	192	23,6	19,62		13,48			
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**

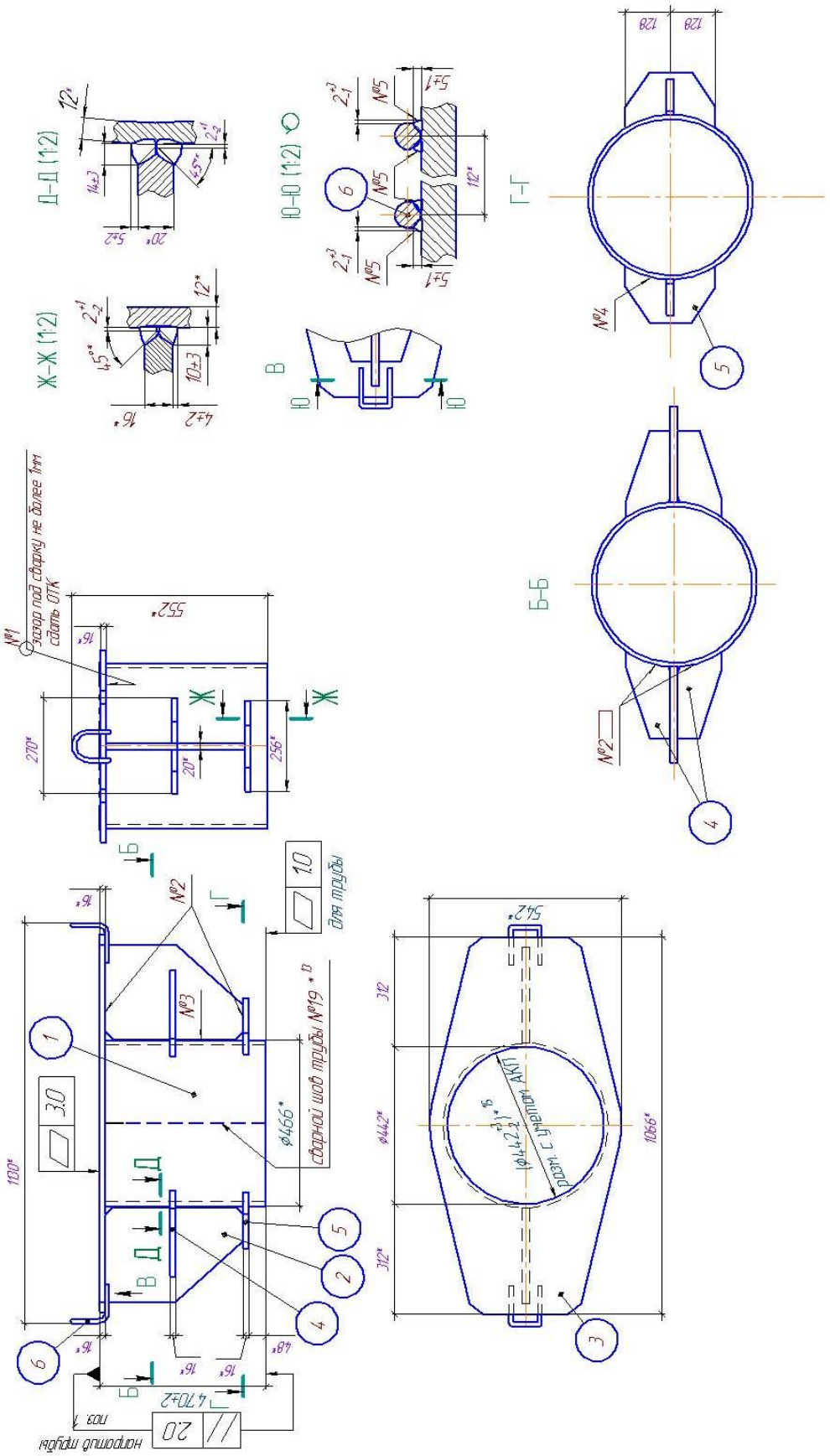
02 01 02-3	25	0	30	20	18	192	23,6	22,4		13,38			
02 02 02-1	25	2	30	20	18	189	23,2	19,29	19,40			0,37	0,33
02 02 02-2	25	2	30	20	18	189	23,2	19,38					
02 02 02-3	25	2	30	20	18	189	23,2	19,54					
02 03 02-1	25	4	30	20	18	184	23,9	20,34	20,92			0,43	0,30
02 03 02-2	25	4	30	20	18	184	23,9	19,82					
02 03 02-3	25	4	30	20	18	184	23,9	22,59					
02 01 03-1	25	0	24	20	18	190	23,7	25,53	25,80	17,45	16,88	0,45	0,36
02 01 03-2	25	0	24	20	18	190	23,7	24,87		16,54			
02 01 03-3	25	0	24	20	18	190	23,7	26,99		16,66			
02 02 03-1	25	2	24	20	18	192	23	24,69	24,64			0,37	0,38
02 02 03-2	25	2	24	20	18	192	23	24,39					
02 02 03-3	25	2	24	20	18	192	23	24,84					
02 03 03-1	25	4	24	20	18	192	23,3	26,88	25,85			0,38	0,44
02 03 03-2	25	4	24	20	18	192	23,3	25,17					
02 03 03-3	25	4	24	20	18	192	23,3	25,49					
03 01 01-1	35	0	18	20	18	192	23,8	29,93	30,16	18,64	19,85	0,28	0,28
03 01 01-2	35	0	18	20	18	192	23,8	29,55		19,85			
03 01 01-3	35	0	18	20	18	192	23,8	30,99		21,05			
03 02 01-1	35	4	18	20	18	193	24,2	32,27	32,58			0,44	0,33
03 02 01-2	35	4	18	20	18	193	24,2	33,01					
03 02 01-3	35	4	18	20	18	193	24,2	32,45					
03 03 01-1	35	7	18	20	18	194	23,8	31,97	31,10			0,28	0,38
03 03 01-2	35	7	18	20	18	194	23,8	29,7					
03 03 01-3	35	7	18	20	18	194	23,8	31,64					

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
03 01 02-1	35	0	30	20	18	192	23,5	21,47	20,81	15,54	14,76	0,46	0,44
03 01 02-2	35	0	30	20	18	192	23,5	19,59		15,11			
03 01 02-3	35	0	30	20	18	192	23,5	21,38		13,64			
03 02 02-1	35	4	30	20	18	190	23,8	19,44	19,57			0,39	0,41
03 02 02-2	35	4	30	20	18	190	23,8	18,14					
03 02 02-3	35	4	30	20	18	190	23,8	21,13					
03 03 02-1	35	7	30	20	18	192	23,6	19,98	21,42			0,51	0,47
03 03 02-2	35	7	30	20	18	192	23,6	22,09					
03 03 02-3	35	7	30	20	18	192	23,6	22,18					
03 01 03-1	35	0	24	20	18	193	23,5	28,05	27,09	16,80	15,89	0,55	0,44
03 01 03-2	35	0	24	20	18	193	23,5	26,19		14,32			
03 01 03-3	35	0	24	20	18	193	23,5	27,03		16,55			
03 02 03-1	35	4	24	20	18	192	23,6	27,18	27,00			0,48	0,42
03 02 03-2	35	4	24	20	18	192	23,6	26,79					
03 02 03-3	35	4	24	20	18	192	23,6	27,04					
03 03 03-1	35	7	24	20	18	189	23,9	25,87	27,30			0,40	0,42
03 03 03-2	35	7	24	20	18	189	23,9	27,81					
03 03 03-3	35	7	24	20	18	189	23,9	28,23					
01 01 1	25	0	20	20	18	245	26,4	47	-	29,80	-	0,47	0,40
01 02 1	25	0	25	20	18	225	25,2	31,6	-	19,07	-	0,42	0,36
01 03 1	25	0	30	20	18	230	25,8	30,6	-	17,65	-	0,63	0,41
02 01 1	25	0	20	20	18	263	29	57,7	-	27,57	-	0,81	0,42
02 02 1	25	0	25	20	18	230	28	38,4	-	17,98	-	0,77	0,54
02 03 1	25	0	30	20	18	230	28,6	29,7	-	17,86	-	0,66	0,56
03 01 1	25	0	20	20	18	282	31,5	71	-	30,70	-	1,23	0,13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
03 02 1	25	0	25	20	18	230	30,7	39,7	-	18,25	-	0,93	0,69
03 03 1	25	0	30	20	18	230	31,3	30,8	-	16,70	-	0,77	0,71
ВДУ-506													
01 01 2	15	0	20	20	18	220	25	36,7	-	28,45	-	0,18	0,29
01 02 2	15	0	25	20	18	225	26	33,6	-	23,70	-	0,35	0,44
01 03 2	15	0	30	20	18	220	26	30,6	-	18,84	-	0,47	0,36
02 01 2	15	0	20	20	18	220	27	47,7	-	30,53	-	0,53	0,39
02 02 2	15	0	25	20	18	220	27,5	40,4	-	24,72	-	0,62	0,48
02 03 2	15	0	30	20	18	225	28	37	-	26,66	-	0,78	0,51
03 01 2	15	0	20	20	18	238	30,2	55,3	-	30,66	-	0,77	0,67
03 02 2	15	0	25	20	18	230	30,2	42,8	-	24,62	-	0,71	0,71
03 03 2	15	0	30	20	18	230	30	38	-	19,52	-	0,83	0,65
01 01 3	35	0	20	20	18	270	25	60,9	-	38,92	-	0,59	0,47
01 02 3	35	0	25	20	18	265	24	43,8	-	31,13	-	0,43	0,47
01 03 3	35	0	30	20	18	270	24	43,5	-	28,35	-	0,70	0,53
02 01 3	35	0	20	20	18	277	27,5	64,1	-	36,19	-	0,67	0,70
02 02 3	35	0	25	20	18	270	26	43,8	-	25,15	-	0,43	0,65
02 03 3	35	0	30	20	18	270	26	41,6	-	24,70	-	0,63	0,66
03 01 3	35	0	20	20	18	275	30	63,8	-	38,03	-	0,66	0,83
03 02 3	35	0	25	20	18	270	28	47,6	-	28,66	-	0,55	0,78
03 03 3	35	0	30	20	18	270	28	42,1	-	23,74	-	0,65	0,79

Приложение В

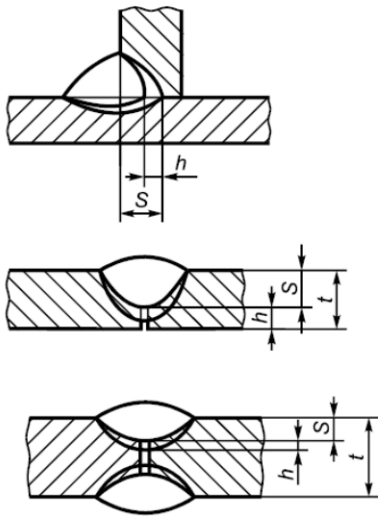
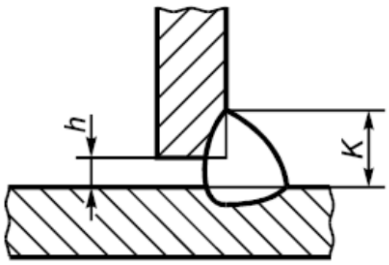
Чертеж опорной муфты

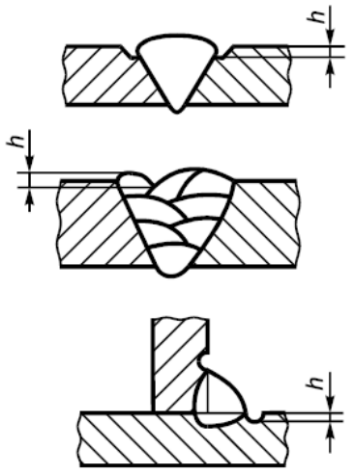
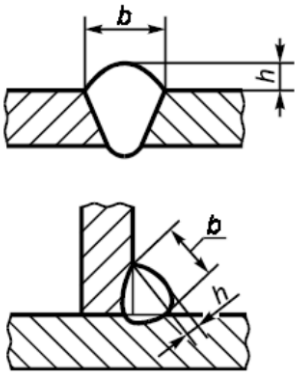
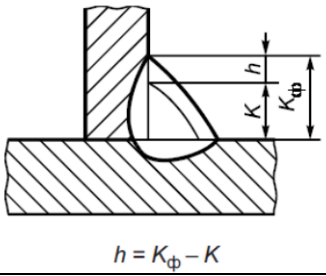
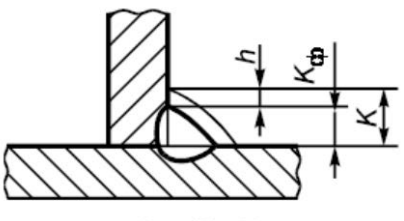


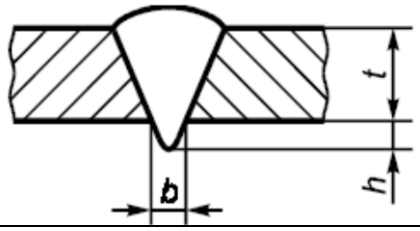
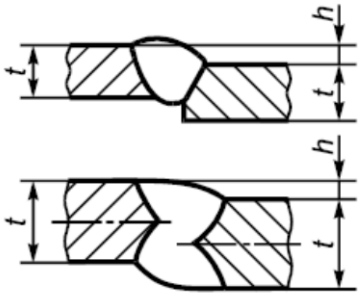
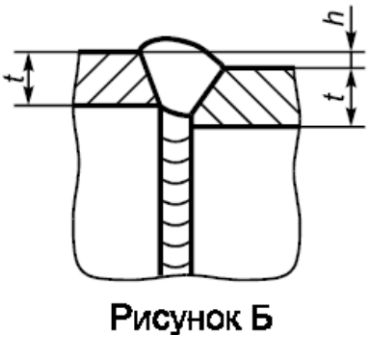
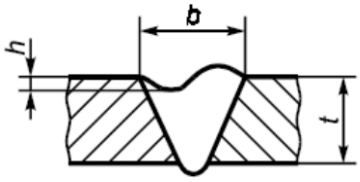
Приложение Г

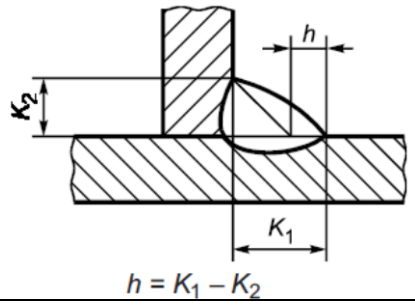
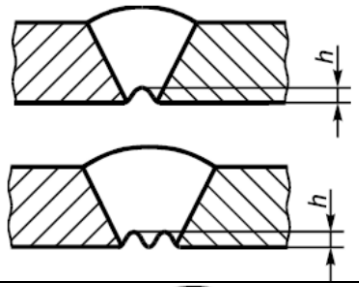
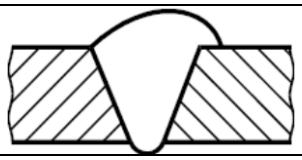
Допустимые дефекты при сварке опорных муфт (выписка из ГОСТ 23118-99)

Наименование дефектов	**Характеристика дефектов по расположению, форме и размерам**	**Допустимые дефекты**
1 Трещины	Трещины всех видов, размеров и ориентации	Не допускаются
2 Поры и пористость	Максимальная суммарная площадь пор от площади проекции шва на оценочном участке	1 %
	Максимальный размер одиночной поры: стыковой шов угловой шов, но не более	 d≤0,2 S d≤0,2 K 3 мм
3 Скопление пор	Максимальная суммарная площадь пор от площади дефектного участка	4 %
	Максимальный размер одиночной поры: стыковой шов угловой шов, но не более	 d≤0,2 S d≤0,2 K 2 мм
	Расстояние между скоплениями	L≥ 12 t
4 Газовые полости и свищи	Длинные дефекты	Не допускаются
	Короткие дефекты: стыковой шов угловой шов	 h≤0,2 S h≤0,2 K
	Максимальный размер газовой полости или свища	2 мм
5 Шлаковые включения	Длинные дефекты	Не допускаются
	Короткие дефекты: стыковой шов угловой шов	 h≤0,2 S h≤0,2 K
	Максимальный размер включения	2 мм
6 Включения меди, вольфрама и другого металла	Инородные металлические включения	Не допускаются

Наименование дефектов	**Характеристика дефектов по расположению, форме и размерам**	**Допустимые дефекты**
7 Непровары и несплавления	Длинные дефекты	То же
	Короткие непровары: стыковой шов угловой шов Расстояние между дефектами	Не допускаются
	Несплавления	Не допускаются
8 Непровар (неполное проплавление)		Не допускаются
9 Неудовлетворительный зазор в тавровом соединении	Чрезмерный или недостаточный зазор между деталями  Превышение зазора в некоторых случаях может быть компенсировано увеличением катета шва	h< 0,5 мм +0,1 К Макс. 2 мм
10 Подрезы	Переход от шва к основному металлу должен быть плавный Очертания подрезов должны быть плавные	h≤0,5 мм

Наименование дефектов	**Характеристика дефектов по расположению, форме и размерам**	**Допустимые дефекты**
		
11 Превышение выпуклости:	Переход от шва к основному металлу должен быть плавный	h ≤ 1 мм + 0,1
- стыкового шва - углового шва		Макс. 5 мм Макс. 3 мм
12 Увеличение катета шва	Превышение катета для большинства угловых швов не является причиной браковки  $h = K_ф - K$	h ≤ 1 мм + 0,1 K Макс. 2 мм
13 Уменьшение катета углового шва	 $h = K - K_ф$	Не допускается

Наименование дефектов	**Характеристика дефектов по расположению, форме и размерам**	**Допустимые дефекты**
14 Превышение выпуклости корня шва	Чрезмерное проплавление корня шва 	h ≤ 1 мм + 0,1 b Макс. 3 мм
15 Линейное смещение кромок	 Рисунок А  Рисунок Б	Рисунок А – Листы и продольные швы h ≤ 0,1 t Макс. 3 мм Рисунок Б – Кольцевые швы h ≤ 0,2 t Макс. 2 мм
16 Неполное заполнение разделки кромок (вогнутость шва)	Переход от шва к основному металлу должен быть плавный 	Длинные дефекты не допускаются Короткие дефекты: h ≤ 0,05 t Макс. 0,5 мм
17 Ассиметрия углового шва	Разнокатетность углового шва, если она не предусмотрена рабочей документацией	h ≤ 1,5 мм + 0,1 K

Наименование дефектов	Характеристика дефектов по расположению, форме и размерам	Допустимые дефекты
		
18 Вогнутость корня шва, утяжка	Переход от шва к металлу должен быть плавный 	h ≤ 0,5 мм
19 Наплывы		Не допускаются
20 Плохое возобновление горения дуги	Местная неровность поверхности шва в месте повторного зажигания дуги	Не допускается
21 Ожог или оплавление основного металла Брызги расплавленного металла Задиры поверхности металла	Местные повреждения вследствие зажигания дуги вне шва Прилипшие брызги к поверхности металла Повреждение поверхности. вызванные удалением временных приспособлений	Без исправления не допускаются

Приложение Д

Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы

«УТВЕРЖДАЮ»
Технический директор
ЗАО «Курганстальмост»
_____ Копырин В.И.
«__»_____ 2013 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представители ЗАО «Курганстальмост» главный сварщик Сидоров В.К., начальник сборо-сварочного производства №8 (ССП №8) Мосин А.А., начальник ЦЗЛ Новолоков А.В. составили настоящий акт в том, что на ЗАО «Курганстальмост» в ССП №8 внедрена в производство роботизированная установка для сварки муфт опорных (черт. 966.КН. МО1225) под основание нефтегазовых труб. В состав установки входит: робот осевой FANUC mod. ArcMate 100 1c/6L-30A-B-PL, интегрированный в единую систему с источником питания S8 ШТОРМ-LORCH, два позиционера Positioner 2 Axes и станция очистки ROBO BRS-CC. В установке реализован алгоритм управления параметрами режима сварки, основанный в том числе на положениях и выводах, изложенных в научных работах к.т.н. Шолохова М.А., Бузориной Д.С., а именно алгоритме управления параметрами режима сварки.

Внедрение робота для сварки муфт позволило автоматизировать процесс сварки, тем самым позволило повысить производительность труда в 2,1 раза по сравнению с механизированной сваркой. Применение автоматической сварки при производстве муфт позволило снизить количество внутренних дефектов выявляемых УЗК на 15%, количество зачистки наружных дефектов угловых сварных швов на 10%.

Приложение 1. Фото роботизированной установки – 1 лист.

Главный сварщик _____ Сидоров В.К. 21.10.13.

Начальник ЦЗЛ _____ Новолоков А.В. 21.10.13

Начальник ССП №8 _____ Мосин А.А. 21.10.13.