

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических материалов

(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Исследование влияние добавок аргона на качество сварных соединений при механизированной сварке проволокой в смеси защитных газов»

Обучающийся

А.Т. Турдубеков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент К.В. Моторин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

## Содержание

Введение.....	3
1 Современное состояние по сварке в смесях углекислого газа с аргоном .....	5
1.1 Особенности механизированной сварки в защитных газах .....	5
1.2 Эффективность газовой защиты .....	18
1.3 Особенности применяемых по сварке смесей аргона с углекислым газом .....	22
1.4 Анализ известных составов смесей газов .....	26
1.5 Анализ известных способов сварки в различных смесях газах .....	28
2 Разработка методики проведения эксперимента по исследованию влияния различных процентных соотношений между углекислым газом и аргоном ..	37
2.1 Методика подготовки опытных образцов .....	37
2.2 Разработка методики процесса сварки образцов .....	40
2.3 Разработка методики контроля образцов .....	42
3 Результаты ранее проведенных экспериментов по влиянию добавок на процесс сварки и на свойства сварного шва .....	45
Заключение .....	67
Список используемой литературы и используемых источников .....	70

## Введение

В настоящее время для сварки в защитных газах применяются различные газовые смеси. Некоторые из них способствуют уменьшению разбрызгивания металла и улучшению формирования шва. В связи с этим особое внимание уделяется поиску оптимальных технологических приемов сварки, обеспечивающих высокое качество соединения и эффективность производства. «Анализ литературных данных показывает, что механизированная сварка в углекислом газе на основе аргона доминирует среди других способов сварки плавлением, причем, сохраняется тенденция замены ручной сварки штучными электродами механизированными способами» [23].

Прогрессивным направлением в этой области считается механизированная сварка с применением газовых смесей, содержащих углекислый газ и аргон. В процессе сварки в этом методе применяется смесь активных газов  $\text{CO}_2$  и инертных газов Ar, который улучшают стабильность горения сварочной дуги и улучшают свойства сварного шва. Однако, несмотря на перспективность данного метода, его тщательное изучение и оптимизация требуют дальнейшего детального анализа.

Важность данной темы определяется необходимостью повышения технологической и экономической эффективности, а также обеспечения высокого качества сварочного процесса в разных отраслях промышленности, где сварным соединениям предъявляются высокие требования по прочности и надёжности. Для этого используется механизированная сварка в смесях углекислого газа с аргоном, которая способна внести существенный вклад в развитие сварочной техники. Механизированная сварка плавящимся электродом в защитной газовой среде является ведущей технологией в современном машиностроительном производстве. В большинстве случаев, при сварке углеродистых сталей используется в качестве защитной среды углекислый газ. Сварка в среде углекислого газа отличается простотой

выполнения процесса сварки и доступностью за счет не высокой стоимости защитного углекислого газа. Однако получаемые сварные швы не всегда обладают высокими качественными характеристиками. Поэтому в последние десятилетия в сварочном производстве наблюдается тенденция замены углекислого газа на добавки смеси углекислого газа с аргоном.

Известны многочисленные научные исследования, посвященные сравнительному анализу защитных газовых сред при сварке легированных конструкционных сталей, однако углеродистым сталям, в данном отношении, уделено значительно меньше внимания [25].

«Современное машиностроительное производство трудно представить без повсеместного применения механизированной сварки в защитной газовой среде. Отечественный и иностранный опыт показывает, что при сварке углеродистых и конструкционных сталей в качестве защитной среды активно используется углекислый газ и аргон. Однако в последние десятилетия широкое применение находит механизированная сварка в смеси инертных и активных газов. Проведенный обзор защитных газов и газовых смесей, применяемых для сварки плавящимся электродом выявил, что использование газовой смеси ( $Ar + CO_2$ ) является наиболее целесообразным – с точки зрения повышения качества процесса дуговой сварки, а также наиболее оправданным - с точки зрения экономических затрат» [24].

В настоящее время недостаточно информации о влиянии различного состава аргона к углекислому газу на качество сварных соединений. Также недостаточно исследованы особенности механизированной сварки в среде углекислого газа с добавлением аргона, включая определение оптимальных параметров процесса, анализ его эффективности и следовательно не всегда обеспечивается необходимое качество. В связи с этим целью настоящей магистерской диссертации является повышение качества сварных соединений.

# 1 Современное состояние по сварке в смесях углекислого газа с аргоном

## 1.1 Особенности механизированной сварки в защитных газах

«Исследования сварки в среде различных смесей с добавлением аргона (далее Ar) берут свое начало с 70-х годов прошлого столетия, однако наибольшее практическое распространение сварочные смеси получили в 90-х годах, особенно в европейских государствах, таких как Германия, Великобритания, Франция, Швеция. На сегодняшний день применение смесей с добавлением аргона в вышеперечисленных государствах занимает не менее 95% рынка защитных газов для MIG/MAG сварки» [12].

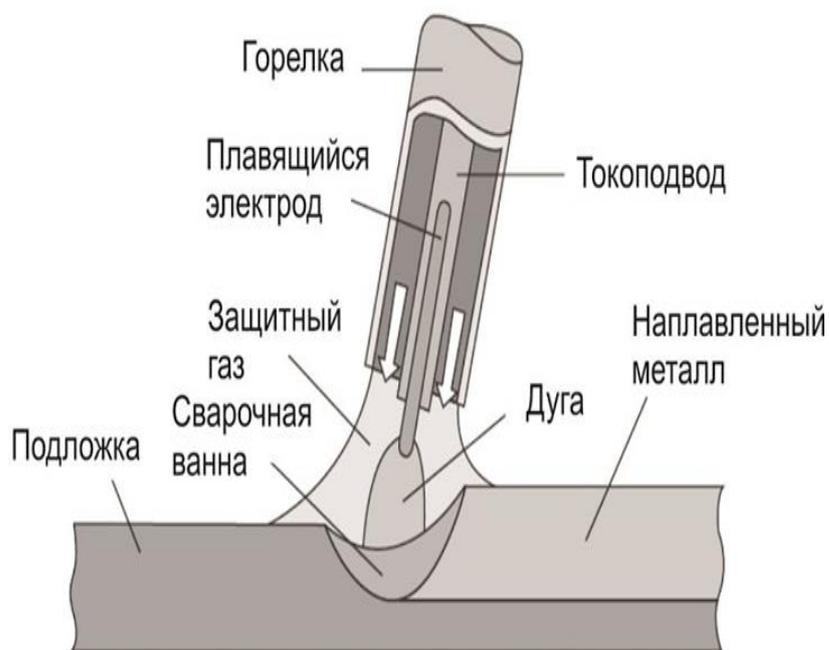


Рисунок 1 - Эскиз процесса механизированной сварки в защитных газах

«Для получения при механизированной сварке (рисунок 1) высококачественных соединений необходимо защита зоны дуги и расплавленного металла от вредного воздействия воздуха, а в ряде случаев

также легирование и металлургическая обработка металла шва. При сварке в защитных газах для защиты зоны дуги и расплавленного металла используют газ, подаваемый струей при помощи горелки; иногда сварку выполняют в камерах, заполненных газом» [22].

«В качестве защитных газов используют инертные газы (аргон, гелий и их смеси), не взаимодействующие с металлом при сварке, и активные газы (углекислый газ, водород, и др.), взаимодействующие с металлом, а также их смеси. Род защитного газа определяет физические, металлургические и технологические характеристики способа сварки. Защитный газ выбирают в зависимости от рода свариваемых материалов, технологических задач, требований, предъявляемых к сварным соединениям, и других условий» [22].

«Механизированная сварка в защитных газах является на сегодняшний день наиболее производительным и динамично развивающимся способом получения неразъемных соединений. Объем её применения составляет около 80 % от всех используемых способов и постоянно растет. Это обусловлено высокой производительностью способа и широкой номенклатурой сварочных материалов, позволяющими выполнять сварку сталей и сплавов различных структурных классов в любых пространственных положениях. Отличительная особенность способа – защита зоны сварки от атмосферного воздуха газом или газовой смесью, выполняющей, как правило, две основные функции: вытеснение воздуха из зоны горения дуги и сварочной ванны и создание необходимых условий для наиболее эффективного протекания физико-металлургических процессов плавления присадочной проволоки и переноса электродного металла через дуговой промежуток. В настоящее время наиболее перспективной защитной газовой средой для сварки конструкционных низкоуглеродистых и низколегированных сталей является смесь на основе аргона ( $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ). Появление новых материалов вызывает необходимость отказа от чистых активных газов, таких как  $\text{CO}_2$ , в пользу смесей, где основную долю занимает инертный газ Ar (аргон)» [28].

Одним из способов улучшения процесса механизированной сварки в защитном газе является применение газа для защиты зоны, где горит дуга и образуется сварной шов вместо углекислого газа использовать смесь на основе аргона ( $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ).

Это способствует устранению некоторых недостатков сварки в углекислом газе, включая сильное разбрызгивание электродного металла, а также недостаточную пластичность и низкую ударную вязкость сварных швов при отрицательных температурах. Наряду с этим, одним из сдерживающих факторов, препятствующих переходу отечественных предприятий на использование сварки в среде  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ , является относительно высокая стоимость аргона.

В данных условиях исследования, направленные на снижение стоимости защитной газовой среды при сохранении высоких эксплуатационных характеристик сварного соединения и технологических преимуществ сварки в смеси  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ . Одним из эффективных направлений в этом контексте выступает реализация комбинированной подачи компонентов газовой смеси непосредственно в зону сварочной дуги.

При механизированной сварке с использованием плавящегося электрода защитный газ обычно выполняет две основные задачи. Первая заключается в удалении атмосферного воздуха из области горения дуги, что предотвращает окисление жидкого металла и сварного шва. Эта функция необходима для получения качественного соединения, но сама по себе не является достаточной.

Вторая задача защитного газа заключается в обеспечении устойчивости дугового разряда и управляемом переносе капель электродного металла через дугу. Для оптимизации сварочного процесса при использовании газовых смесей на основе аргона с добавлением углекислого газа (например,  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ) важно обеспечить эффективную локальную защиту дуговой области и активной части сварочной ванны.

В этой связи рационально использовать комбинированную подачу защитного газа в виде двух concentрических струй:

Центральная (осевая) струя обеспечивает формирование требуемого режима переноса электродного металла и стабильность горения дуги. Как правило, она состоит преимущественно из аргона, способствующего стабильному катодному пятну и мелкодисперсному капельному переносу;

Кольцевая (внешняя) струя служит для защиты сварочной ванны от атмосферного воздуха, препятствуя диффузии кислорода и азота в металл шва. В её составе может преобладать  $\text{CO}_2$ , обеспечивающий активное воздействие на металлургические процессы.

При этом позволено частичное смешивание газовых потоков возможно и определяется такими параметрами, как давление и скорость подачи, форма и размеры сопел, а также пространственное положение сварочной дуги по отношению к выходному отверстию газового сопла.

Данный метод открывает возможности независимого регулирования компонентов газовой смеси непосредственно в зоне сварки, что позволяет адаптировать характеристики газовой атмосферы к конкретным технологическим условиям, повышая стабильность процесса, улучшая качество формируемого шва и обеспечивая рациональный расход газов. [25].

В последние десятилетия широкое распространение получили смеси на основе аргона с добавками кислорода или углекислого газа, а также кислорода и  $\text{CO}_2$ . Эти добавки стабилизируют дугу, швы имеют гладкую ровную поверхность без подрезов, с плавным переходом к основному металлу и благоприятную форму проплавления.

Аргон применяют главным в сварочном производстве и в металлургии. Аргон - представляет собой бесцветный и нетоксичный газ, плотность которого примерно в 1,5 раза тяжелее плотности воздуха таблица 1.

Таблица 1 - Физические свойства газов

Газ	Атомная масса	Молекулярная масса	Плотность при 0 °С и 760 мм рт. ст.	Температура кипения °С	Теплопроводность при нормальных условиях кал/(м×ч.°С)	Удельная теплоемкость 1 т при +20 °С кал/г. °С)
Аргон	39,94	-	$1,7833 \times 10^{-3}$	-185,5	16,1	0,125
Гелий	4	-	$0,17847 \times 10^{-3}$	-268,9	134	1,251
Азот	4,003	28,016	$10^{-3}$	-196	21,6	-
Кислород	14,00	32	$1,251 \times 10^{-3}$	-183	22,5	0,2185
Водород	8	2,016	$1,429 \times 10^{-3}$	-259	150,8	-
Водород	16	29	$0,08988 \times 10^{-3}$	-190	22,1	0,2400
Воздух	1,008	-	$1,293 \times 10^{-3}$	-	-	-
При 15 °С и 760 мм рт. ст. При 41-43 °С и 760 мм рт. ст. При 0 °С						

Аргон практически не вступает в химические реакции с многими элементами, за исключением гидридов. В металлах аргон почти не растворяется ни в жидкой и ни в твердой фазе.

«В промышленности аргон получают из воздуха в разделительных колонках путем избирательного испарения с последующим глубоким охлаждением и фракционной перегонкой.

Для сварки различных сплавов цветных металлов требуется аргон различной чистоты, поэтому промышленность выпускает его трех марок (таблица 2)» [2].

Таблица 2 - Содержание компонентов в газообразном аргоне определяется требованиями ГОСТ 10157-2016

Марка	Ar (не менее)	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Влага при 760 мм рт. ст., г/м <sup>3</sup>
		Не более		
А	99,99	0,003	0,01	0,03
Б	99,96	0,005	0,04	0,03
В	99,90	0,005	0,10	0,03

«В основном используют на практике два основных вида сварки в среде защитных газов - это сварка в среде углекислого газа и аргонодуговая сварка» [21].

«При высоких плотностях тока в электроде, происходит устойчивое горение дуги ( $100 \text{ A/mm}^2$  и выше) при нарастающей её вольтамперной статической характеристике. Геометрические параметры сварного шва (глубина проплавления и ширина) зависят от постоянства длины дуги, которая поддерживается за счет процесса саморегулирования дуги при том, что скорость подачи электродной проволоки остается постоянной. При этом наблюдается условие одинаковой скорости подачи и плавления электрода. Так как процесс сварки выполняется на режимах с высокими плотностями сварочного тока, то в основном используется электродная проволока небольшого диаметра ( $d \approx 0,8-2,5 \text{ мм}$ ), с высокой скоростью ее подачи. В этих условиях при использовании источников питания с падающими характеристиками, процесс саморегулирования не может быть обеспечен. Поэтому используют источники питания с возрастающей или жесткой вольтамперной характеристикой. Сварку в защитных газах в основном выполняют на обратной полярности при постоянном токе» [28, 35].

«Основные параметры режима сварки являются сила тока, напряжение дуги, скорость сварки, диаметр и скорость подачи электродной проволоки, расход защитного газа. Сила сварочного тока зависит от диаметра и состава электрода, которую устанавливают в зависимости от скорости подачи электродной проволоки. Скорость сварки в основном 15-80 м/ч, ее устанавливают с учётом качества формирования шва и производительности. Выбор режимов сварки в основном производится по данным экспериментов, которые сводятся в таблицы. Для лучшего формирования шва сварку ведут на остающейся подкладке из основного металла или на медной подкладке с формирующей канавкой. Проволоку диаметром 0,5-1,2 мм используют для сварки тонколистового металла. Металл толщиной до 4 мм сваривается без

разделки кромок. При большой толщине металла выполняют разделку кромок» [28].

«Аргонодуговая сварка плавящимся электродом в основном используют для сварки цветных металлов (алюминий, магний, медь, титан и их сплавы) и легированных сталей. Сварка выполняется на режимах, при которых обеспечивается мелкокапельный и струйный перенос электродного металла. Струйный перенос металла увеличивает глубину проплавления. Предельное значение сварочного тока, при котором капельный перенос электродного металла изменяется на струйный, различается в зависимости от металла и зависит от диаметра электродной проволоки» [16].

При сварке сталей дуга хорошо держится, если плотность тока находится в пределах 60-120 Ампер на квадратный миллиметр. Для алюминия лучше всего подходит плотность около 70 Ампер на квадратный миллиметр. Какой ток нужен для стабильной сварки, зависит от толщины (диаметра) сварочной проволоки. Например, при сварке стали марки 12Х18Н9Т в аргоне это значение может меняться.

«При введение активных газов стабилизируется горение дуги, снижается разбрызгивание. Параллельно с этим окислительная среда увеличивает стойкость швов против водородной болезни» [18].

«При сварке с использованием импульсного питания дуги сварочным током возникает дополнительная возможность управления переноса электродного металла и процессом плавления. В этом случае используется тот же принцип питания дуги, что и при сварке вольфрамовым электродом при импульсно-дуговой сварке. Дуга питается от источника небольшой мощности, формирующая каплю жидкого металла на электроде сбрасывается в момент наложения импульса тока большого значения. В связи того что возникают электродинамические силы, капле придается строгое направление перемещения в сварочную ванну, чем предотвращается разбрызгивание и обеспечивается возможность сварки швов в различных пространственных

положениях. По сравнению со сваркой вольфрамовым электродом к деталям которые были сварены аргонодуговой сваркой, предъявляют наиболее жесткие требования по качеству сборки. Перед сваркой производят тщательную очистку как электродной проволоки, так кромок свариваемых деталей» [18, 36].

«Сварка плавящимся электродом в углекислом газе. Данным способом можно сваривать большую часть сталей, которые не очень хорошо свариваются другими видами сварки. В первую очередь сваривают углеродистые и низколегированные стали толщиной более 3 мм проволокой диаметром 0,8-2 мм. Данный способ сварки также применяется для сварки стальных конструкций» [29].

Сварка в защитных газах - это эффективный и недорогой способ, поэтому она считается более выгодной по сравнению с другими методами сварки, где тоже используется газ. Этот процесс экономически целесообразен, так как всегда доступный и недефицитный газ, которое обеспечивает хорошее качество сварного соединения. Механизированная сварка углекислым газом является эффективной альтернативой ручной дуговой сварке с покрытыми электродами благодаря большей эффективности и универсальности применения. Однако у неё есть и недостаток - значительное разбрызгивание металла в процессе сварки [18].

«При сварке с использованием в качестве защиты углекислый газ, происходит потери легирующих элементов и окисление металла. Поэтому основной особенностью данного способа сварки является необходимостью применение электродных проволок с повышенным содержанием элементов раскислителей (кремния, марганца), которые компенсируют их выгорание из зоны сварки, предотвращают окисление металла в ванне и образование пор. Для углеродистых сталей в основном используют сварочные проволоки сплошного сечения СВ-10ГС, Св-08Г2С, а также порошковые проволоки, содержащие в наполнителе порошки ферросплавов кремния и марганца.

Автоматическая и механизированная сварка в углекислом газе ведется на постоянном токе обратной полярности. Для обеспечения наиболее устойчивого процесса на высоких плотностях тока, используется проволока малых диаметров 0,8-2,5 мм. При сварке в углекислом газе, даже с применением сварочного тока высокой плотности, практически не удается получить струйного переноса электродного металла в сварочную ванну. Сварочный ток определяют в зависимости от скоростью подачи электродной проволоки. Напряжение дуги должно быть не больше 32-34 В, так как при увеличении напряжения и длины дуги увеличивается разбрызгивание и окисление. Обычно  $U_d=20\dots30$  В скорость сварки от 20 до 80 м/ч, расход газа 6-25 л/мин» [21, 37].

При сварке низкоуглеродистой стали толщиной 8 мм в защитном газе можно применять проволоку диаметром 2 мм. При этом устанавливают ток 260–280 А и напряжение 28-30 В, а расход защитного газа должен быть от 16 до 20 литров в минуту. Сварку выполняют за один раз, без подготовки краёв. Чтобы улучшить качество шва, используют смеси газов – например, углекислый газ с добавлением аргона или кислорода. Такие смеси делают процесс более стабильным, уменьшают разбрызгивание расплавленного металла и позволяют получить аккуратный, ровный шов.

По сравнению с другими способами сварка в защитных газах обеспечивает высокое качество сварных соединений на различных металлах и сплавах разной толщины, позволяет проводить сварку в любых пространственных положениях, а также дает возможность контролирования процесса формирования сварного шва визуально и исключает необходимость засыпки, удаления флюса и зачистки шва в процессе сварки, но и отличается своей высокой эффективностью который хорошо подходит для процессов механизации и автоматизации.

Разнообразие защитных газов с различными теплофизическими свойствами позволит расширить технологические возможности данного

метода сварки, позволяя работать практически с любыми металлами и сплавами, а также с изделиями толщиной от 0,1 мм до нескольких десятков миллиметров. При сварке с плавящимся электродом шов образуется за счёт того, что плавится как основной металл, так и сварочная проволока. Поэтому внешний вид и размер шва зависят не только от скорости сварки и положения электрода, но и от того, как именно расплавляется и переносится металл с электрода в расплавленную зону. На характер переноса основное влияние оказывают такие факторы, как материал электрода, состав защитной газовой среды, плотность сварочного тока и некоторые другие параметры. Помимо защиты расплавленного металла от воздействия воздуха, защитные газы сильно влияют на процесс сварки: они помогают удерживать дугу стабильной, влияют на то, как плавится и переносится металл, а также улучшают качество и внешний вид сварного шва.

Известно, что при сварке в углекислом газе тепло от дуги используется эффективнее, чем при сварке с флюсом. Это значит, что больше тепла уходит на плавление металла, а не теряется. При сварке в  $\text{CO}_2$  более концентрировано распределяется теплота дуги и дуга глубже погружается в основной металл, а потери теплоты на излучение и конвекцию газов меньше, по сравнению с затратами теплоты на нагрев и плавление флюса.

Сварка с газовой защитой обеспечивает высокую степень концентрации дуги, обеспечивающую минимальную зону структурных превращений и относительно имеет небольшие дефекты на изделиях.

Среди методов сварки с использованием в активных защитных газах широкое распространение получила сварка в среде  $\text{CO}_2$ .

К плюсам этого способа сварки можно отнести:

- оборудование легко перемещать, оно более компактное и удобное, чем при сварке под флюсом;
- сварщик может хорошо видеть, где находится дуга и как она движется вдоль шва, что упрощает работу;

- этот метод можно применять в разных условиях и для разных типов изделий;

- сварные детали меньше деформируются по сравнению с ручной сваркой электродами или сваркой под флюсом.

Применение в качестве защитных газов чистых многоатомных газов, прежде всего  $\text{CO}_2$ , на одно из первых мест выдвигает проблему уменьшения разбрызгивания.

При сварке в  $\text{CO}_2$  уровень разбрызгивания может превышать десять двенадцать процентов. Это происходит потому, что во время сварки от электрода отрываются мелкие капли металла. Это бывает, когда разрушается соединение между каплей и электродом, когда остатки расплавленного металла падают вниз, или когда металл в сварочной ванне разбрызгивается или отделяются крупные капли в результате сильных взрывов перемычек, а также при разбросе капель из самой ванны и разрушении крупных капель на электроде. Кроме того, в момент возбуждения дуги возможно отделение нагретых или оплавленных участков электрода.

При сварке с длинной дугой разбрызгивание усиливается из-за того, что в расплавленном металле происходят реакции, при которых выделяются газы. Кроме того, пары металла и потоки плазмы могут выталкивать капли расплавленного металла за пределы сварочной ванны. Главная причина разбрызгивания металла при сварке в  $\text{CO}_2$  с короткими замыканиями — это электрический взрыв перемычки между электродом и расплавленным металлом. Если повысить напряжение дуги, брызг становится больше, особенно при использовании средних значений сварочного тока.

Для снижения разбрызгивания при сварке в углекислом газе рекомендуется: — использовать источники питания с заданными динамическими характеристиками, позволяющими достигать оптимальной скорости роста тока при коротком замыкании; -нужно правильно подбирать скорость сварки, следить за тем, чтобы дуга была стабильной - для этого

регулируют напряжение, скорость подачи проволоки и длину её вылета. Также важно очищать проволоку от грязи и ржавчины, а перед сваркой прокалывать её при температуре 200-250 °С в течение двух часов; - применять технологию принудительного управления процессом переноса электродного металла с помощью токовых импульсов; - использовать легированную титаном и редкоземельными металлами либо активированную сварочную проволоку.

К недостаткам сварки в  $\text{CO}_2$  также следует отнести ухудшение формирования швов и склонность к образованию пор при сварке на форсированных режимах, низкую ударную вязкость при отрицательных температурах.

«В большинстве случаев при сварке используют углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) в качестве защитной среды. Хотя у такого способа есть минусы — например, сильное разбрызгивание металла и менее прочный и пластичный шов — его всё ещё применяют при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Однако с развитием металлургии и появлением новых сталей и сплавов требования к сварке стали выше. Из-за этого проверенная технология всё чаще не справляется с новыми задачами и не всегда может обеспечить нужное качество сварных соединений.

Одним из перспективных решений в таких условиях является переход на защитные газовые смеси на основе аргона (например,  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{O}_2$ ). Такая газовая среда является более инертной по действию, так как в их составе больше 80% аргона. Это позволяет использовать их при сварке сталей с более сложным составом и одновременно устранить многие недостатки, которые возникают при сварке только в  $\text{CO}_2$ . Хотя такие смеси дороже, их использование оправдано: современные низкоуглеродистые и низколегированные стали плохо переносят активное воздействие углекислого газа, который может "сжигать" полезные легирующие элементы в шве. При этом на отечественных предприятиях переход на смеси с аргоном идёт

медленно: стараются сохранить старые документы и инструкции без серьёзных изменений, в том числе по режимам сварки.

Причина перехода на смеси с аргоном заключается в том, что такая газовая смесь не сильно меняет процесс сварки по сравнению с  $\text{CO}_2$  так как она в целом похожа. Используются те же материалы для сварки, например, проволоки Св-08Г2С и Св-08ГС, а также сохраняются те же соотношения между напряжением дуги и силой тока. Однако, при долгосрочной эксплуатации, основываясь на множестве статистических данных, была обнаружена серьёзная проблема при сварке с использованием смеси 82 % аргона и 18 % углекислого газа могут появляться дефекты в виде несплавлений - особенно на кромках металла или между слоями шва. Это сложно обнаружить с помощью обычных методов контроля. Основной причиной этого являются неправильные настройки параметров сварки, в частности, соотношения между напряжением дуги и силой тока, а также проблемы с подготовкой деталей и зачисткой промежуточных слоёв от шлака и загрязнений перед нанесением новых швов. Важно отметить, что при сварке с использованием смесей на основе аргона техника выполнения сварного шва будет отличаться от привычной сварки в углекислом газе. Это связано с тем, как ведёт себя жидкий металл в сварочной ванне и как заполняются кромки деталей. При сварке с аргоном металл плавится глубже, и есть риск, что расплавленный металл может образовать наплывы на нерасплавленные кромки. Хотя это может привести к физическому контакту металлов, этого недостаточно, чтобы создать прочное химическое соединение. В результате могут образовываться ослабленные участки между слоями шва, которые могут стать причиной разрушения сварного соединения» [31, 38].

## 1.2 Эффективность газовой защиты

«Для получения швов высокого качества должна обеспечиваться надежная защита зоны сварки. Защита зоны сварочной ванны должна производиться до её полной кристаллизации.

Защита зоны сварки осуществляется путем подачи в зону сварки струи защитного газа. Истечение газа из сопла, сварочной горелки имеет турбулентный характер.

Наружная сторона струи неизбежно перемешивается с воздухом, а внутренняя струя состоит из чистого защитного газа (рисунок 2). Обычно длина участка чистого газа в 1,5-4 раза больше диаметра сопла» [32].

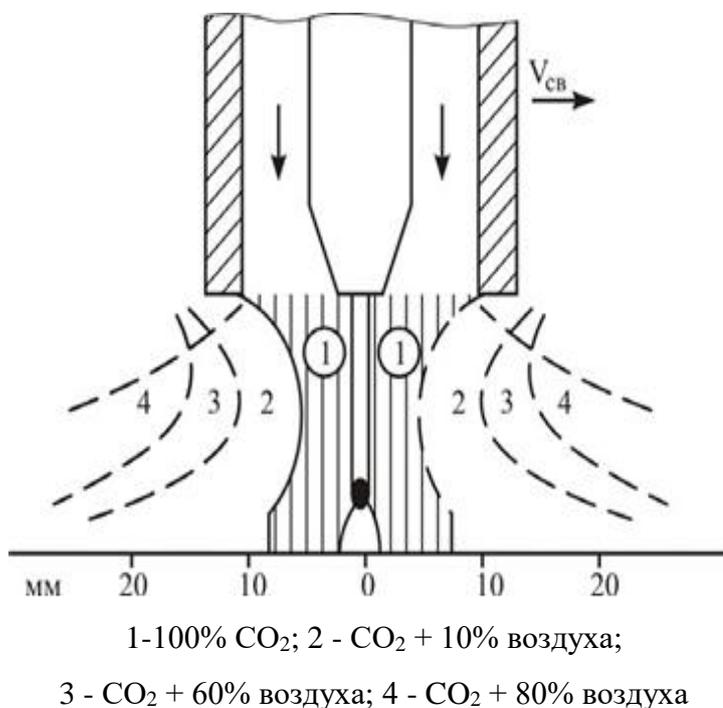


Рисунок 2 - Компонентный состав потока углекислого газа, выходящего из сопла сварочной горелки

«Эффективная защита и форма потока газа зависят от рода защитного газа, а также типа сварного соединения, скорости сварки и движения потоков воздуха (сквозняка, ветра).

Так, при сварке в среде углекислого газа и азота легче обеспечивается хорошая защита сварочной ванны, чем при сварке в среде аргона. Очень трудоемко обеспечивается защита зоны сварки 25% в среде гелия. При сварке угловых швов с внутренней стороны угла и стыковых швов защита намного лучше, чем при сварке угловых швов с наружной стороны угла. В основном защита зоны сварки напрямую зависит от жесткости струи защитного газа и её размеров» [32].

«Жесткость струи определяют родом защитного газа и скоростью его истечения. Поэтому при увеличении диаметра сопла должен одновременно увеличиваться и расход защитного газа. Однако при большом увеличении скорости потока газа из-за турбулентности уменьшается зона чистого газа, и эффективность защиты снижается. Если уменьшается расстояние между соплом и свариваемой детали, то защита зоны сварки улучшается. Для наиболее удобного наблюдения за дугой обычно расстояние принимают равным 10 - 30 мм. Если производить сварку с наклоном горелки углом вперед, то защита зоны сварки улучшается. При сварке с большим наклоном горелки и больших скоростях истечения защитного газа, может происходить нарушение защиты зоны сварки» [32].

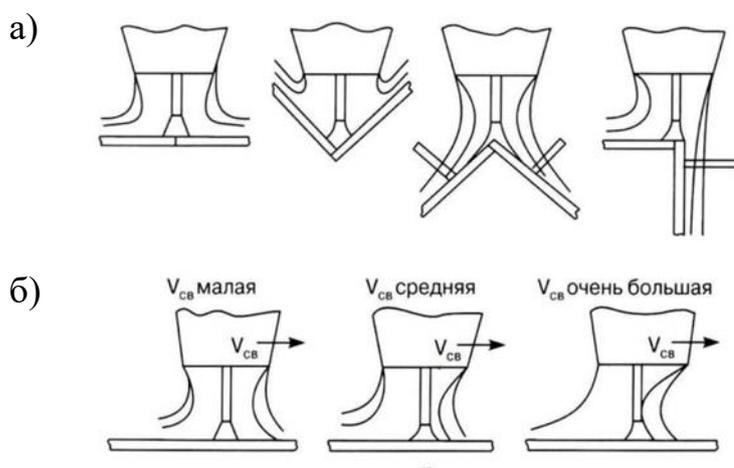
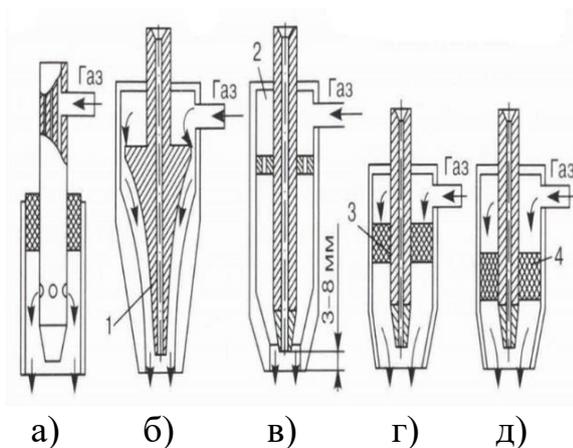


Рисунок 3 - Зависимость эффективности газовой защиты от типа сварного соединения (а) и скорости сварки (б)

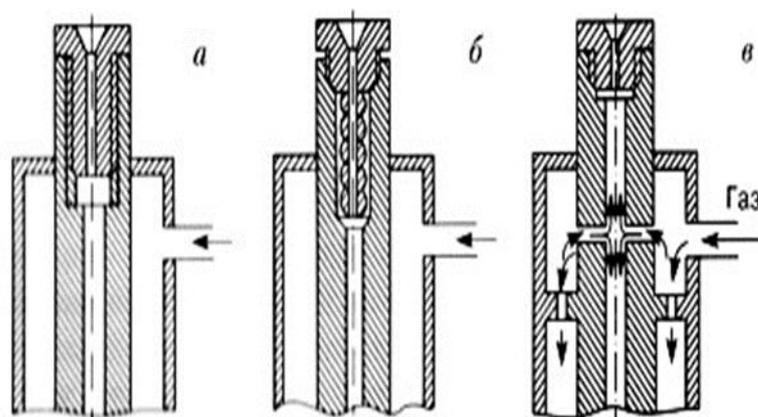
«Для улучшения защиты зоны сварки на больших скоростях и на ветру рекомендуется увеличивать диаметр сопла и расход защитного газа, приближая горелку к детали (рисунок 3). Для того чтобы защитить зону сварки от 26 потоков ветра, её закрывают малогабаритными щитками, которые закрепляют на горелки автомата или устанавливают на детали, а также переносными щитками или палатками» [32].

«Эффективность защиты газом во время сварки зависит от того, как устроена горелка и какие у неё размеры. Эти параметры зависят от того, какой газ используется, какой размер у сварного соединения и какие настройки сварки. Газ должен поступать равномерно по всему диаметру сопла горелки, для чего применяются разные способы подачи газа (рисунок 4). Для лучшей работы мундштук стоит немного углубить в горелке. Но при сварке углекислым газом форма сопла не так важна. Чтобы избежать попадания воздуха в канал подачи проволоки, устанавливаются уплотнители или подводится дополнительный защитный газ (рисунок 5)» [32].



- а - с кольцевой подачей защитного газа; б - с использованием газоотражателей;
- в - с применением камер для стабилизации потока;
- г - с сетчатыми вставками; д - с элементами из металлокерамики
- (1 - газоотражатель; 2 - камера стабилизации потока;
- 3 - сетчатая вставка; 4 - металлокерамическая вставка)

Рисунок 4 - Схемы подачи газа в сварочные устройства



а – горелка, оснащенная сменным цилиндрическим уплотнителем;

б – горелка с уплотнителем типа лабиринт;

в – горелка, в которой подача защитного газа осуществляется через канал для проволоки

Рисунок 5 - Схемы предотвращения попадания воздуха  
в поток защитного газа

«Состав защитного газа существенно влияет на технологические характеристики процесса. Так, в углекислом газе -  $\text{CO}_2$ , в смесях углекислого газа с аргоном -  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ , где более 25% аргона и смесях углекислого газа с аргоном и кислородом -  $\text{Ar}+\text{O}_2$  5%+ $\text{CO}_2$  более 20% на малых токах и низких напряжениях на режимах с принудительными короткими замыканиями сварку можно выполнять во всех пространственных положениях. При сварке в смесях  $\text{Ar}+\text{O}_2+\text{CO}_2$  менее 25% и  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  менее 25% на токах больше критических значений наблюдается струйный перенос электродного металла, очень небольшое разбрызгивание и хорошее формирование шва, но сварку можно выполнять только в нижнем положении. При сварке в смесях  $\text{Ar}+\text{O}_2$  + $\text{CO}_2$  менее 15% и  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  менее 15% успешно применяют импульсно-дуговую сварку швов во всех пространственных положениях» [12].

«Стали толщиной 4-12мм сваривают в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2+\text{O}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  20-25% или  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  20%+  $\text{O}_2$  во всех пространственных положениях. Разделку выполняют в зависимости от толщины металла и расположения шва» [12].

### **1.3 Особенности применяемых по сварке смесей аргона с углекислым газом**

«Применение окислительных газовых смесей на основе аргона при сварке плавящимся электродом позволило устранить или свести к минимуму многие из общеизвестных недостатков, свойственных процессу сварки в чистом  $\text{CO}_2$ , в частности, обеспечить значительное снижение разбрызгивания и набрызгивания электродного металла, улучшить формирование швов, уменьшить удельный расход электродной проволоки на единицу длины шва, повысить механические свойства металла шва и его стойкость к зарождению и распространению хрупких разрушений» [23].

«С большим успехом во многих странах применяются автоматы и полуавтоматы для сварки деталей массового производства в среде защитных газов, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона, благодаря чему производительность сварочного оборудования увеличилась в среднем в 3-4 раза и значительно повысилось качество изделий. Промышленное применение механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах постоянно расширяется, и есть все основания полагать, что это будет происходить и в будущем. С этой точки зрения перспективными отраслями, где осваиваются новые виды металлоемкой продукции и ожидаются связанные с этим инвестиции, являются автомобильная, авиационная промышленность, скоростной железнодорожный транспорт и, в меньшей степени, судостроение.

Изменения в номенклатуре свариваемых материалов, требования к обеспечению высокого качества сварных соединений и конструкций, повышению производительности сварочных работ и приемлемых показателей сварочных процессов с точки зрения гигиены и экологии являются главными факторами, влияющими на объемы использования и ассортимент применяемых защитных газов. Типичная структура себестоимости сварочных работ при сварке в защитных газах плавящимся электродом состоит из затрат

на защитный газ (5 %) и проволоку (15 %), а оплата труда составляет 80 %. В связи с этим использование более дорогого защитного газа (например, смеси газов на основе аргона вместо  $\text{CO}_2$ ) вполне оправдано, поскольку обеспечиваемое в результате такой замены повышение производительности труда (т. е. снижение затрат на зарплату сварщиков) компенсирует повышение стоимости защитного газа. Наряду с технологическими и экономическими преимуществами процесс сварки в смесях газов на основе аргона характеризуется улучшенными гигиеническими и экологическими показателями по сравнению со сваркой в  $\text{CO}_2$ , т. к. в зоне дыхания сварщика и воздухе рабочих помещений выделяется меньше пыли и токсичных газов» [23].

«Благодаря снижению уровня вредных выбросов при сварке и, следовательно, заболеваемости рабочих появляется возможность уменьшить интенсивность обще обменной и местной вентиляции, т.е. установленных мощностей вентиляционных установок и соответственно затрат на электроэнергию и обслуживание. Несколько более высокий уровень удельных выделений озона при сварке в аргоновых смесях не является препятствием для применения этого процесса, поскольку соблюдение оптимальных режимов сварки и использование обычных средств защиты обеспечивают концентрацию озона в зоне дыхания сварщика ниже уровня предельно допустимой концентрации.

Применение в качестве защитного газа смесей аргона с окислительными газами  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  позволяет устранить многие технологические недостатки, присущие процессу сварки в чистом аргоне и углекислом газе, расширив тем самым область применения механизированной сварки плавящимся электродом. Опыт, накопленный в ИЭС им. Е. О. Патона и за рубежом, показывает, что такими защитными смесями являются  $\text{Ar} + \text{O}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  и  $\text{Ar} + \text{O}_2 + \text{CO}_2$ , которые применяются в основном при сварке сталей. Диоксид углерода долгое время преимущественно использовали в странах Восточной

Европы и развивающихся странах благодаря его относительно низкой стоимости и доступности. Однако такие существенные недостатки сварки в  $\text{CO}_2$  серийными кремнемарганцевыми проволоками, как повышенный уровень разбрызгивания и набрызгивания электродного металла, узкое и глубокое проплавление основного металла с высоким валиком, не всегда удовлетворительные механические свойства металла шва и особенно его ударной вязкости при отрицательных температурах стали причиной того, что в последнее время и в этих странах наблюдаются устойчивые тенденции к вытеснению  $\text{CO}_2$  смесями газов на основе аргона в тех отраслях, где уделяется повышенное внимание к показателям качества металла шва и сварных соединений» [23].

Установлено, что для сварки ответственных конструкций эффективно применяется смесь аргона и углекислого газа в соотношении 85 % аргона и 15 %  $\text{CO}_2$ . Добавление углекислого газа к аргону способствует стабилизации дуги, улучшает формирование шва и снижает риск образования пор. В качестве универсального варианта часто используется смесь аргона с 18 %  $\text{CO}_2$ , однако на практике наиболее распространены составы с содержанием углекислого газа от 12 % до 16 %. При увеличении доли  $\text{CO}_2$  свыше 26 % процесс приобретает характеристики сварки в чистом углекислом газе. Оптимальные газовые смеси обеспечивают хорошее формирование шва, увеличивают глубину провара, снижают разбрызгивание, при этом капли металла получаются мелкими, а горение дуги — более стабильным и мягким. Такие составы применяются при сварке легированных сталей марок 10ХСНД, 12ГН2МФАЮ, 30ХГТ, 30ХГСА с использованием сварочной проволоки марок Св-08ХН2ГМТА, Св-07ХН3МД и аналогичных [27].

«Среди промышленно развитых стран только в Японии сохраняются устойчиво высокие объемы применения сварки в  $\text{CO}_2$  (около 70 % общего объема сварочных работ, выполняемых механизированной сваркой в защитных газах). Поскольку это страна с весьма ограниченными

энергетическими ресурсами, то, по-видимому, повышенная энергоемкость производства аргона по сравнению с  $\text{CO}_2$  является основной причиной того, что работы по уменьшению недостатков процесса сварки в  $\text{CO}_2$  в Японии ведутся в направлении совершенствования источников питания или использования новых сварочных проволок как сплошного сечения, так и порошковых.

Необходимо отметить, что процесс сварки в  $\text{CO}_2$  весьма чувствителен к изменениям параметров режимов. Для удовлетворительного формирования швов и снижения потерь металла на швов разбрызгивание сварку в  $\text{CO}_2$  предпочтительнее производить проволокой малого диаметра (0,8-1,4 мм) или на малых (с короткими замыканиями) и больших токах (погруженной дугой), минуя средние режимы, на которых отмечается максимальное разбрызгивание. например, для проволоки диаметром 2,0 мм неблагоприятные режимы находятся в диапазоне  $280 \text{ A} \leq I_{\text{св}} \leq 400 \text{ A}$ ,  $28 \leq U_{\text{д}} \text{ В} \leq 32 \text{ В}$ . К сожалению, такие рекомендации трудно выполнить на практике, поскольку в производственных условиях для обеспечения высокой производительности и оптимального тепло вложения при сварке металлов средних толщин требуются именно средние токи и проволоки диаметром 1,0-1,2 мм» [23, 39].

Механизированную сварку в смеси газов на основе аргона можно выполнять проволоками Св-08Г2С и Св-08ГС (ГОСТ 2246-70) и 07ГС (ТУ 14-1-2963-80) диаметром 1,2, 1,4, 1,6, и 2 мм.

При сварке угловых швов с катетами 4 и 5мм на тонком металле лучшие результаты дает проволока диаметром 1,6 мм. При сварке в окислительной аргоновой смеси глубина проплавления основного металла снижается на 15-20 % по сравнению со сваркой в  $\text{CO}_2$ , что требует корректировки режима сварки. Следует отметить, что сварка в смеси газов на основе аргона требует чистоты свариваемых кромок, а при неполном проплавлении металла – вырубки и зачистки корня шва. Несоблюдение этих требований приводит к образованию в швах скоплений мелких пор [7, 11, 15].

По данным других исследований [30], сварка с использованием смеси газов на основе аргона обладает несколькими значительными преимуществами по сравнению с процессом сварки в углекислом газе. К числу основных преимуществ можно отнести: обеспечение струйного переноса металла электрода при увеличении тока, улучшение формирования и внешнего вида шва, плавность перехода в зоне швов – основной металл; снижение уровня разбрызгивания и набрызгивания. Определили, что циклическая долговечность стыковых, тавровых, угловых и электрозаклепочных видов сварных соединений узлов пассажирского вагона, выполненных в смеси защитных газов на основе аргона, в 1,8-3,92 раза больше, чем у соединений, сваренных в углекислом газе.

Использование смеси 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub> вместо чистого CO<sub>2</sub> способствует улучшению стабильности дуги, облегчая её возбуждение и горение, а также снижает размер капель и улучшает характеристики сварных соединений.

#### **1.4 Анализ известных составов смесей газов**

«Инертные газы и смеси на их основе:

Из инертных газов при сварке наиболее широкое применение получили аргон и гелий. Исследованию защитной газовой среды в соотношении Ar+20 % CO<sub>2</sub> при механизированной сварке уделено большое количество работ. Использование данного соотношения (в сравнении с 100% CO<sub>2</sub>) позволяет обеспечить лучшее формирование шва, уменьшить величину разбрызгивания электродного металла, повысить циклическую долговечность стыковых, тавровых, угловых видов сварных соединений в 1,8...3,92 раза.

Существуют исследования, в которых предложено повысить содержание аргона 85 % Ar+15 % CO<sub>2</sub> и использовать наряду с защитным газом активирующие флюсы. Использование активатора позволяет увеличить глубину проплавления как в сравнении со сваркой в CO<sub>2</sub> (в 1,6 раза). Также изменяется форма сварного шва, а проплавление с пальцеобразного,

характерного для процесса в чистом аргоне, изменяется на клинообразное. Находят применения защитные газовые смеси, содержащие в себе добавки кислорода. Использование газовой смеси 70 % Ar+5 % O<sub>2</sub>+25 % CO<sub>2</sub> позволяет осуществлять сварку в вертикальных положениях, обеспечивая стабильный процесс сварки, высокие механические свойства с одновременным снижением величины разбрызгивания электродного металла. В работе предложено использовать смесь Ar+2...14 % O<sub>2</sub>, при сварке плавящимся электродом алюминия и его сплавов. Данная смесь позволяет увеличить глубину проплавления и уменьшить пористость швов. Находит ограниченное применение и смеси с добавкой водорода при сварке цветным металлов» [3].

«Активные газы и смеси на их основе:

Как показано в исследованиях [34], существует много научных работ, посвящённых использованию активных газов, таких как углекислый газ, кислород и азот. Обычно за основу берут углекислый газ, добавляя к нему кислород, азот или водород. Ещё раньше Х. Секигучи и И. Масумото предложили использовать смесь углекислого газа с кислородом - она стала популярной для сварки углеродистых и низколегированных сталей. Кислород в составе такой смеси снижает поверхностное натяжение металла, усиливает окисление и способствует образованию более крупных капель. В результате получается прочный сварной шов без кристаллических трещин.

По результатам исследований [34] было установлено, что лучше всего шов формируется при использовании газовой смеси, содержащей 70% углекислого газа и 30% кислорода. Смеси с азотом и водородом применяются реже. Азот обычно используют при сварке меди, потому что для неё он не активен и не вступает в реакции. Также в той же работе [34] рекомендуется добавлять немного азота при сварке конструкций, которые будут работать при низких температурах. Если использовать проволоку с элементами, такими как алюминий и титан, которые образуют нитриды, это помогает сделать шов более вязким и прочным. А вот водород добавляют в очень малом количестве,

потому что при его использовании дуга становится нестабильной, шов формируется плохо и в нём может появляться много пор.

В работе [34] показано, что среди всех защитных газов и их сочетаний наиболее выгодно использовать смесь из двух компонентов - аргона и углекислого газа ( $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ). Если же добавить к ним ещё и кислород, то это может привести к тому, что из металла уйдут легирующие элементы, из-за чего прочность шва станет ниже. А если использовать только углекислый газ в качестве основного, то металл электрода начнёт сгорать и сильно разбрызгиваться, что приведёт к большим потерям материала и увеличению стоимости сварки.

### **1.5 Анализ известных способов сварки в различных смесях газах**

«Установлено, что в промышленно развитых странах для сварки плавящимся электродом уже не применяют чистый углекислый газ. Для этого используют газовые смеси. До конца 1990-х годов развитие рынка защитных газов шло по пути замены чистого углекислого газа газовыми смесями на основе аргона сначала двухкомпонентными, затем, по мере совершенствования технологий сварки, трех- и четырехкомпонентными.

При использовании в качестве защитного газа при механизированной сварке углекислого газа молекула  $\text{CO}_2$ , попадая в зону дуги, диссоциирует на угарный газ  $\text{CO}$  и атомарный кислород  $\text{O}$ . Это приводит к окислению основного металла (появляется шлак, окалина, дым и пламя) и выгоранию легирующих элементов переплавляемого металла. В таком процессе газовая среда в зоне сварки имеет более окислительный характер (33%  $\text{O}_2$ ), чем при горении дуги в воздухе (21%  $\text{O}_2$ ). Окисление сварочной ванны происходит по реакции  $\text{Fe} + \text{CO}_2 = \text{FeO} + \text{CO}$ . Рекомбинация  $\text{CO}/\text{O}_2$  дает довольно широкое проплавление на поверхности шва, так как низкие потенциал ионизации и теплопроводность создают горячую зону в центре столба дуги. Шов формируется с отношением ширины к глубине 1:1» [1].

«При сварке тонкого металла в углекислом газе (сварочная проволока диаметром 1 мм, короткозамкнутый перенос электродного металла, сила тока дуги менее 150 А, напряжение 16-23 В) перенос электродного металла будет происходить малыми каплями только за счет поверхностного натяжения. В этом случае можно получить минимальное разбрызгивание. Такой режим применим для сварки стали толщиной менее 2,2 мм. При сварке в  $\text{CO}_2$  более толстой стали нужны большая сила тока дуги и больший диаметр сварочной проволоки, тогда будет иметь место только открытая дуга, неравномерный глобулярный или смешанный перенос металла и соответственно большое разбрызгивание. Чем больше сила тока дуги, тем больше размер капель и больше разбрызгивание, что ведет, как правило, к меньшей скорости наплавки электродного металла. Чтобы уменьшить разбрызгивание, снижают скорость подачи сварочной проволоки» [1].

«Углекислый газ обычно используют при сварке плавящимся электродом с короткозамкнутым переносом металла и при сварке порошковой проволокой углеродистых сталей, так как он обеспечивает хорошее качество швов при низкой стоимости. Однако низкая стоимость газа не всегда ведет к низкой стоимости сварного шва. На конечную стоимость влияет более низкий КПД сварки из-за больших потерь на разбрызгивание и затраты на удаление застывших брызг металла. Окисляющая атмосфера внутри дуги приводит к появлению шлака на поверхности шва при сварке плавящимся электродом (рисунок 6)» [1].



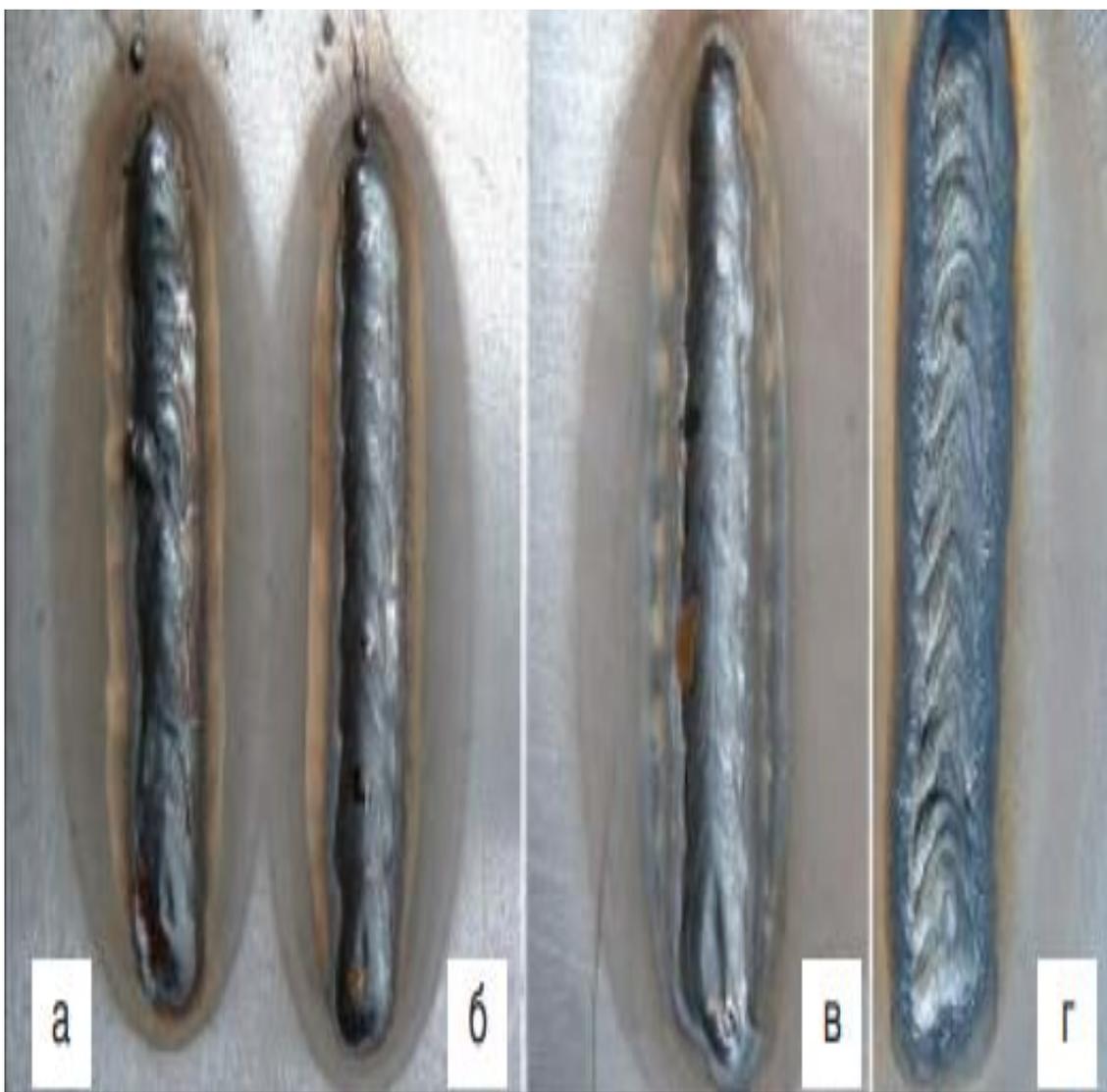
Рисунок 6 - Внешний вид шва, полученного дуговой сваркой в  $\text{CO}_2$

Поверхность сварного шва при защите углекислым газом обычно сильно окислена. Если же зона сварки в дальнейшем подлежит покраске или нанесению других покрытий, то необходима дополнительная сложная операция очистки этой поверхности. Чтобы компенсировать потери легирующих элементов в металле шва, нужно применять электродную проволоку с более высоким содержанием раскислителей (обычно кремния). Достоинствами же сварки в углекислом газе являются малая ширина проплавления и хорошие механические свойства шва.

Использование защитных газовых смесей на основе аргона вместо традиционного углекислого газа позволяет без существенного изменения технологии и оборудования значительно увеличить скорость сварки. При этом повышается стабильность электрической дуги, улучшается текучесть

расплавленного металла и перенос электродного металла в сварочную ванну. Рабочий диапазон регулирования напряжения и силы тока существенно расширяется. Скорость подачи сварочной проволоки может быть увеличена с 6-7 до 12-14 м/мин. При использовании газовых смесей легко реализуют режим струйного переноса электродного металла. Можно достигнуть также практически идеальной формы сварного шва. Благодаря снижению давления электрической дуги на сварочную ванну значительно уменьшается риск прожога тонкостенных деталей даже при большой силе тока и скорости сварки.

Сравнительные испытания ряда типичных защитных сред при сварке стали показали, что использование в качестве защитного газа смеси из 82% аргона + 18% углекислого газа делает дугу очень стабильной и управляемой в отличие от сварки в углекислом газе, когда дуга нестабильна и имеет место повышенное разбрызгивание расплавленного металла (рисунок 7, а). Сварной шов при использовании двойной защитной газовой смеси имеет хороший внешний вид, разбрызгивание расплава мало (рисунок 7, б). При тройной газовой смеси разбрызгивание минимально и шов более плотный (рисунок 7, в). Сварку в чистом аргоне чаще применяют для соединения алюминия, чем для соединения стали. На стали формируется более широкий шов с грубой чешуйчатой поверхностью и большой шероховатостью по его краям (рисунок 7, г), хотя разбрызгивание также минимально. Дуга нестабильна, ею сложно управлять. На тонком металле это ведет к прожогам.



а – CO<sub>2</sub>; б – 82% Ar+ 18% CO<sub>2</sub>; в – 93% Ar + 5% CO<sub>2</sub> + 2% O<sub>2</sub>; г – Ar

Рисунок 7 - Внешний вид шва, полученного дуговой наплавкой стального листа в различной защитной газовой среде

При использовании чистого углекислого газа мундштук загрязняется брызгами металла, а скорость подачи сварочной проволоки меньше, чем при использовании смеси газов, и она имеет меньший диапазон изменений. Наиболее сложно на слух определить, когда скорость подачи сварочной проволоки оптимальная. Легче это установить визуально, так как дуга быстро

становится нестабильной, если скорость слишком высокая или слишком низкая.

Трудности при сварке в чистом аргоне и в чистом углекислом газе заключаются в предотвращении прожогов в стыковых соединениях. Для исключения прожога более предпочтительно нахлесточное соединение, так как имеется больше металла для теплоотвода. Чистый аргон дает широкие швы. Дуга издает громкий звук и имеет голубой цвет. Можно определить по звуку изменение скорости подачи сварочной проволоки.

При использовании защитной газовой смеси из 82% Ar+18% CO<sub>2</sub> формируется чистый шов с почти симметричным профилем. Дуга очень стабильна. Имеет место некоторое «шипение», когда скорость подачи сварочной проволоки оптимальная, и «жужжание/треск», когда неоптимальная.

Глубина проплавления в зависимости от состава смеси защитного газа изменяется незначительно.

При сварке плавящимся электродом и порошковой проволокой рекомендуемый расход газов 0,85-1,27 м<sup>3</sup>/ч. Расход зависит от пространственного положения сварки, силы тока дуги и состава защитного газа. При нижнем положении сварки расход смеси на основе гелия более высокий, чем расход смеси на основе аргона. Расход газов может быть уменьшен, если расстояние «сопло–металл» поддерживают как можно меньшим. Оптимальный вылет электродной проволоки составляет 10 ее диаметров. Для сварки плавящимся электродом наиболее оптимальный расход защитных газов составляет 0,85-1,00 м<sup>3</sup>/ч при давлении 0,138-0,207 МПа. Расход защитных газов более 1,42 м<sup>3</sup>/ч недопустим, так как из-за повышенной турбулентности газового потока атмосферные газы попадают в зону дуги и приводят к плохому качеству шва.

Хотя стоимость защитных газов во всем процессе сварки наименьшая (рисунок 8), их выбор оказывает большое влияние на общие затраты на сварку.

Правильный выбор газа позволяет снизить затраты на ручной труд, который является основным затратным компонентом. Выбор защитного газа критичен для снижения стоимости сварки углеродистых сталей, нержавеющей сталей и алюминия. Двойные газовые смеси  $Ar + CO_2$  оптимальны при сварке большинства марок углеродистых и нержавеющей сталей, когда используют обычный или импульсно-струйный перенос металла. Более низкое содержание углекислого газа будет уменьшать выделение дыма при сварке.

Толщину основного металла, пространственное положение сварки, уровень квалификации сварщика и требования к сварному соединению необходимо учитывать при выборе защитного газа и оптимизации процесса сварки. Оптимизация должна приводить к минимальным затратам на сварку при требуемом качестве сварного соединения.

На первом этапе выбор защитного газа определяют стоимостью газа, стоимостью соответствующего оборудования и местом сварки. Некоторые защитные газы, подобно аргону, дороги, что ограничивает их использование. Оборудование для доставки газа и сама доставка — это дополнительные затраты, поэтому их тоже следует учитывать. Если сварку выполняют на открытом воздухе, то ветер или атмосферные осадки будут приводить к нарушению защитного газового потока, что потребует повышенного расхода газа. Это тоже нужно учитывать при выборе защитного газа.

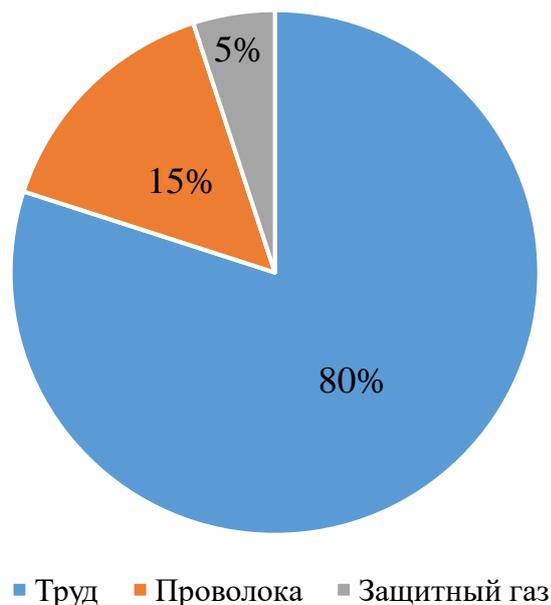


Рисунок 8 - Структура затрат на дуговую сварку в защитных газах

Использование чистого углекислого газа в сварке делает процесс менее эффективным и ухудшает качество шва. Хотя при большем содержании  $\text{CO}_2$  шов получается глубже, это не всегда плюс. Если заменить чистый углекислый газ на смесь аргона с  $\text{CO}_2$ , можно сократить время сварки и последующей очистки, снизить расход электроэнергии и уменьшить износ оборудования. Правда, такая смесь стоит дороже.

Тем не менее, переход на аргоновые смеси может дать заметную экономию – от 10 до 40 % – в зависимости от условий производства. Поэтому для промышленных сварочных работ использование аргоновых газовых смесей вместо чистого  $\text{CO}_2$  считается более выгодным и оправданным решением.

При механизированной сварке применяются схемы, регулирующие величину сварочного тока в процессе плавления и устраняющие полностью разбрызгивание металла.

Таким образом, в результате анализа современного состояния сварки в смесях углекислого газа с аргоном установлено, что такие газовые смеси

являются наиболее эффективными и универсальными для механизированной сварки. Они обеспечивают стабильность дуги, хорошее формирование шва и приемлемую стоимость процесса. Особенности механизированной сварки в защитных газах показывают, что важнейшими факторами качества являются правильный выбор газовой среды, конструкция горелки и режимы сварки. Смеси аргона с углекислым газом позволяют достичь оптимального соотношения между проникающей способностью, устойчивостью дуги и качеством шва. Проведённый анализ составов и способов сварки подтвердил, что наибольшую эффективность обеспечивает двухкомпонентная смесь  $Ar+CO_2$ , в то время как добавление кислорода или других активных компонентов требует осторожности из-за риска ухудшения механических свойств шва. Выбор состава и метода сварки должен основываться на конкретных требованиях к изделию и условиям его эксплуатации.

Таким образом, для достижения поставленной цели, т.е. для повышения качества сварного соединения, следует решить следующие задачи:

1. Разработать методику проведения эксперимента по исследованию влияния различных процентных соотношений между углекислым газом и аргоном.
2. Проведение эксперимента по подготовке и сварке опытных образцов с разными составами защитных газов от 0 до 100 %.
3. Разработка методики проведения испытаний сваренных опытных образцов.
4. Установить влияние различных составов смесей газов на процесс сварки и на качество сварного шва.

## 2 Разработка методики проведения эксперимента по исследованию влияния различных процентных соотношений между углекислым газом и аргоном

### 2.1 Методика подготовки опытных образцов

Целью разработки методики проведения эксперимента является исследование влияния различных процентных соотношений между углекислым газом ( $\text{CO}_2$ ) и аргоном (Ar) на качество сварных соединений, формируемых при сварке различных материалов.

В ходе эксперимента планируется провести анализ влияния состава защитного газа на основные характеристики сварного шва, включая механические свойства (прочность), визуальные показатели (внешний вид), наличие дефектов (поры, трещины, шлаковые включения), а также геометрические параметры соединения (ширина и высота шва).

Разработка методики подготовки образцов для проведения эксперимента начинается с определения исходного материала. В качестве основного материала выбрана конструкционная сталь 30ХГСА рисунок 9, обладающая необходимыми механическими характеристиками.

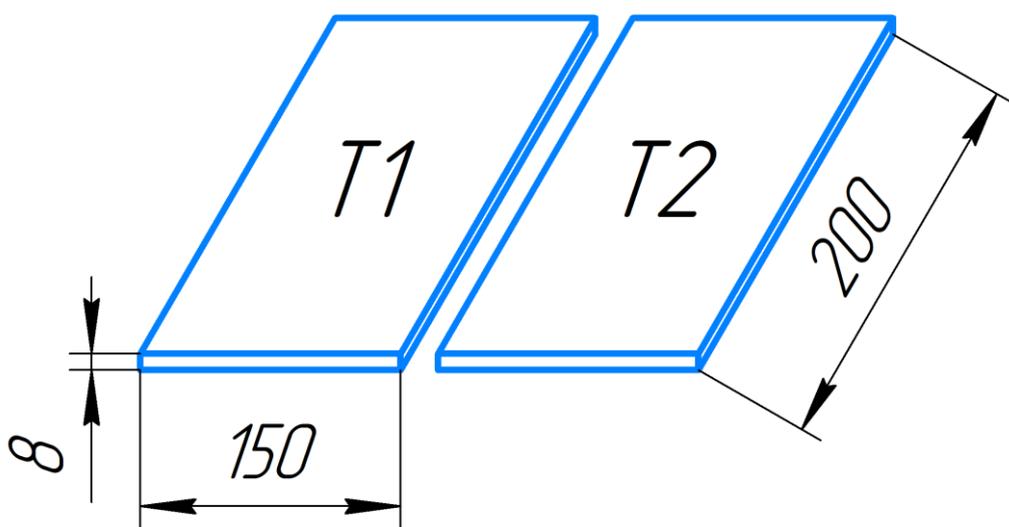
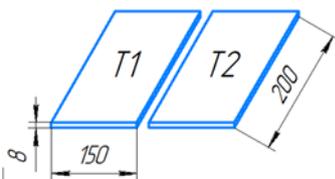
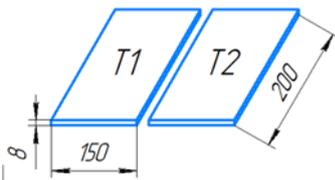
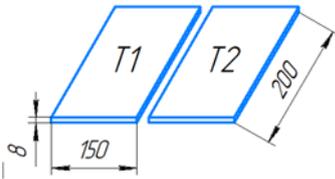
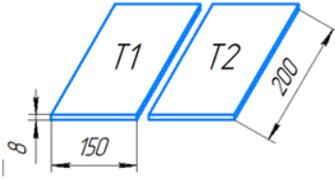
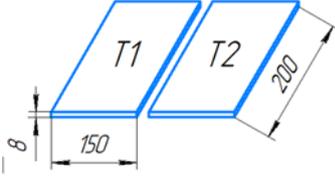


Рисунок 9 - Пластины, подготовленные для сварки

Толщина заготовки составляет 8 мм, а геометрические параметры образцов определены следующим образом: длина - 200 мм, ширина - 150 мм.

Таблица 3 - Нумерация образцов с различными составами газов

Шифр образцов	Номера пластин	Смесь газов CO <sub>2</sub> /Ar, %	Ориентировочные параметры режимов сварки	Примечание
1		100/0		
2		75/25		
3		50/50		
4		25/75		
5		0/100		

1. Ток сварки (I=200 А);  
 2. Напряжение на дуге (U =17 В);  
 3. Скорость подачи проволоки (Vп/п= 3 м/мин);  
 4. Скорость сварки (Vсв = 0,25 м/мин);  
 5. Расход защитного газа (Q=12 л/мин)

Сварку выполнять в три слоя

Планируется провести сварку 5 пар образцов таблица 3 при одинаковых режимах в три слоя при пяти различных составах газов.

При подготовке поверхности опытных образцов проходит процесс обезжиривание. Надо очистить до металлического блеска с двух сторон свариваемые кромки и торец каждой пластины на ширину 20 мм и обработать ацетоном для удаления следов масел, жиров и загрязнений.

Далее сделаем фотографии каждой пары из свариваемых образцов перед проведением сварки. Потом сделаем маркировку образцов для идентификации различных процентных соотношений газов и надо сварить 5 пар образцов применив различный состав газов (таблица 3).

На заключительном этапе выполняется сварка пяти пар образцов с применением различных составов защитных газов в соответствии с заданными параметрами эксперимента.

Разделку кромок выполняли в соответствии с ГОСТ 14771-76, Условное обозначение соединения С17.

После подготовки поверхности образцов осуществляется их фиксация на сварочном столе с использованием струбцин.

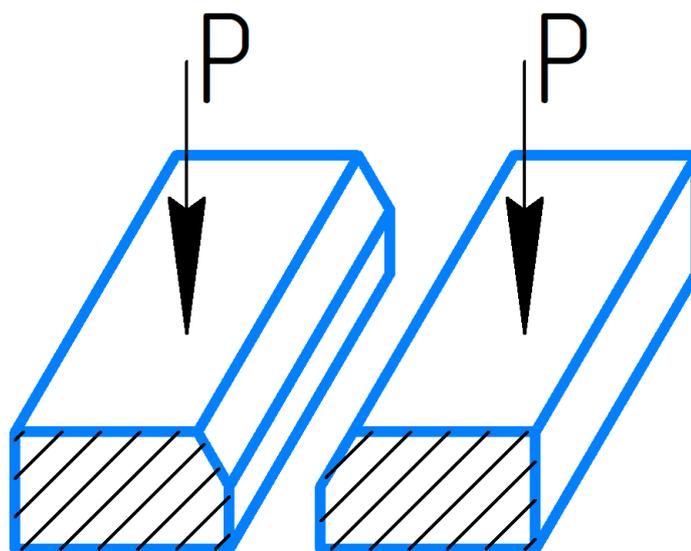


Рисунок 10 - Схема сборки пластин

При этом обеспечивается требуемый зазор в стыке, не превышающий 1 мм, что необходимо для формирования качественного сварного соединения рисунок 10.

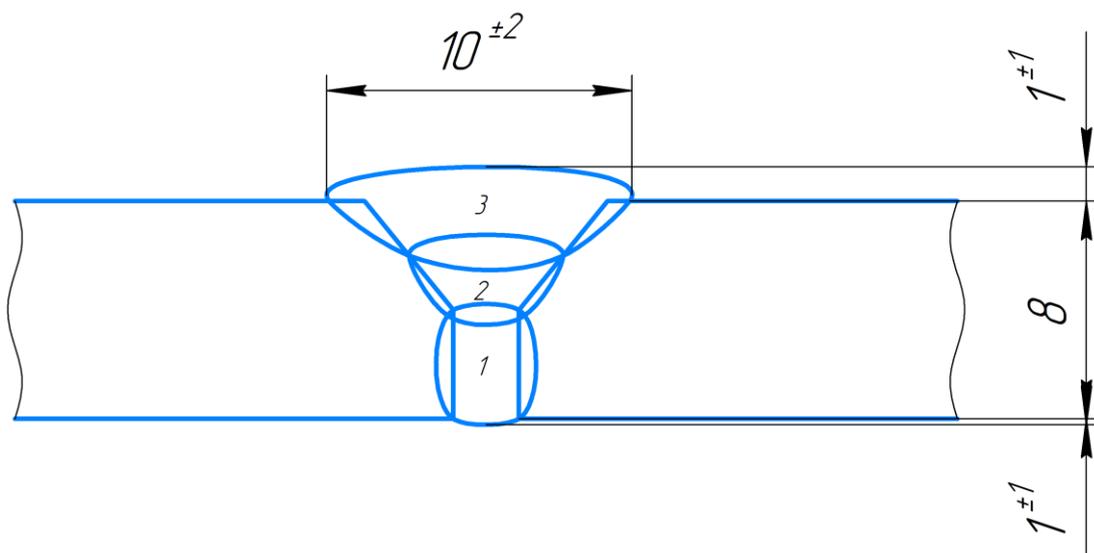
## **2.2 Разработка методики процесса сварки образцов**

Для выполнения сварки применяется источник питания постоянного тока - сварочный выпрямитель с обратной полярностью, обеспечивающий жесткую или пологопадающую вольтамперную характеристику (ВАХ). В качестве сварочного оборудования возможно использование выпрямителя типа ВДУ-506.

Для разработки способа сварки образцов важно учитывать основные параметры: силу тока, напряжение дуги, скорость сварки, диаметр и скорость подачи сварочной проволоки, а также расход защитного газа. Именно от этих показателей зависит, как будет проходить процесс и каким получится шов. Режимы сварки, как правило, определяются на основе экспериментальных данных, обобщённых в технологических таблицах 3.

В рассматриваемом случае сварка осуществляется в механизированном режиме с применением плавящегося электрода. Установленные параметры процесса включают сварочный ток двести Амперов, напряжение дуги составляет семнадцать Вольт, подачу сварочной проволоки со скоростью три м/мин, скорость сварки 0,25 м/мин и расход защитного газа 12 л/мин. Схема заполнения сварного шва предусматривает выполнение сварки в три прохода в соответствии с технологическим процессом (см. рисунок 11).

1. Первым осуществляется корневой проход (формирование корня шва).
2. Вторым - заполняющий слой.
3. Третьим - облицовочный слой, обеспечивающий формирование окончательного контура шва.



1-корневой шов, 2-заполняющий шов, 3-облицовочный шов

Рисунок 11- Схема заполнения шва

В процессе сварки используется сплошная электродная проволока Св-08ГСМТ-О с диаметром 1,2 мм. Для соединения пластин толщиной 8 мм применяется V-образная разделка кромок (рисунок 12), предусматривающая обработку обеих кромок соединяемых элементов.

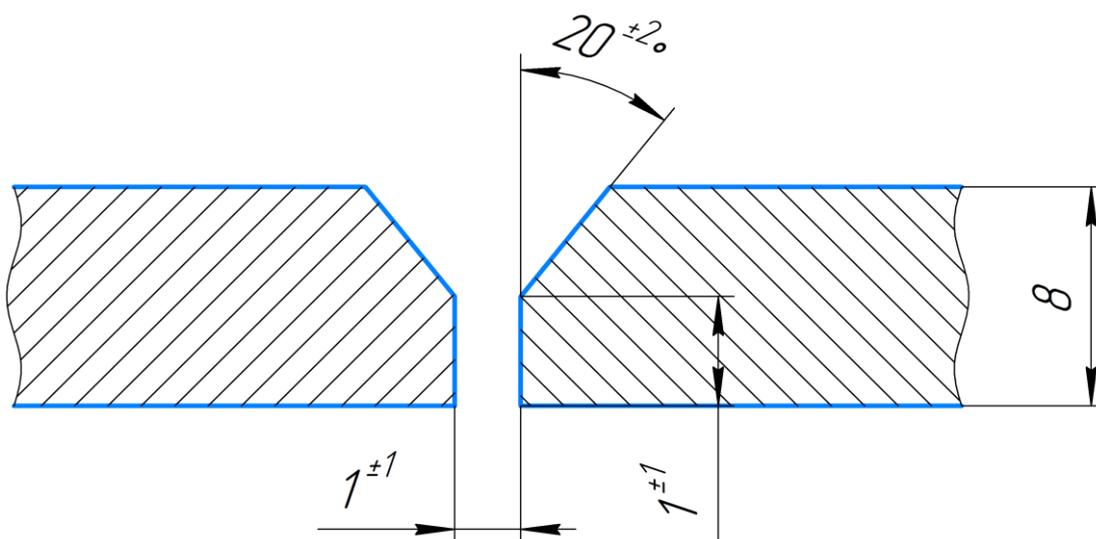


Рисунок 12 - Схема разделки кромок

Затем провести проверку работоспособности сварочного оборудования, убедиться в отсутствии повреждений кабелей, шлангов подачи газа и исправности газового редуктора. Подготовить и надеть средства индивидуальной защиты: сварочную маску, перчатки, защитная спецодежду

Подключить сварочный аппарат к электросети и системе подачи защитного газа. Установить требуемые параметры сварочного тока в соответствии с технологическими рекомендациями.

Далее разместить и зафиксировать подготовленные сварочные образцы на рабочем столе с помощью струбцин таким образом, чтобы кромки пластин плотно прилегали друг к другу, обеспечивая стыковое соединение с зазором не более 1 мм. В соответствии с экспериментальными условиями, подать защитный газ заданного состава ( $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ ) согласно значениям, указанным в таблице 3.

Установить сварочную горелку под углом  $75^\circ$  относительно поверхности пластин. Осуществлять сварку непрерывным движением от начала до конца стыка, обеспечивая стабильное горение дуги и равномерное расплавление кромок. Контролировать формирование сварного шва, исключая наплывы, подрезы и прожоги.

Аналогичным образом выполнить сварку остальных подготовленных пар пластин, используя различные составы защитных газов в соответствии с экспериментальными условиями, приведенными в таблице 3.

### **2.3 Разработка методики контроля образцов**

После выполнения сварочных работ провести первичную оценку качества сварных соединений методом визуального контроля: Осмотреть сварной шов невооруженным глазом на предмет наличия внешних дефектов, таких как наплывы, подрезы, прожоги, поры и другие нарушения целостности шва.

Использовать увеличительную лупу (5-кратное увеличение) для детального изучения структуры поверхности сварного соединения.

Зафиксировать результаты визуального осмотра путем фотофиксации сварных соединений для дальнейшего анализа.

Затем для оценки соответствия сварного соединения заданным требованиям провести замеры его основных параметров: ширина и высота сварного шва измеряются с помощью штангенциркуля и записываются в протокол измерений; проверить поверхность шва на наличие внешних дефектов: отсутствие трещин, подрезов, непроваров, грубой чешуйчатости и иных нежелательных отклонений.

А для выявления скрытых дефектов сварного соединения (трещины, поры, шлаковые включения) применить метод ультразвукового контроля (УЗК). Контроль проводится в соответствии с нормативными требованиями с регистрацией выявленных дефектов.

Затем на основе сваренных заготовок выполнить отбор и подготовку образцов для последующих испытаний: Испытания на разрыв – подготовить продольные и поперечные образцы согласно нормативной схеме рисунок 13.

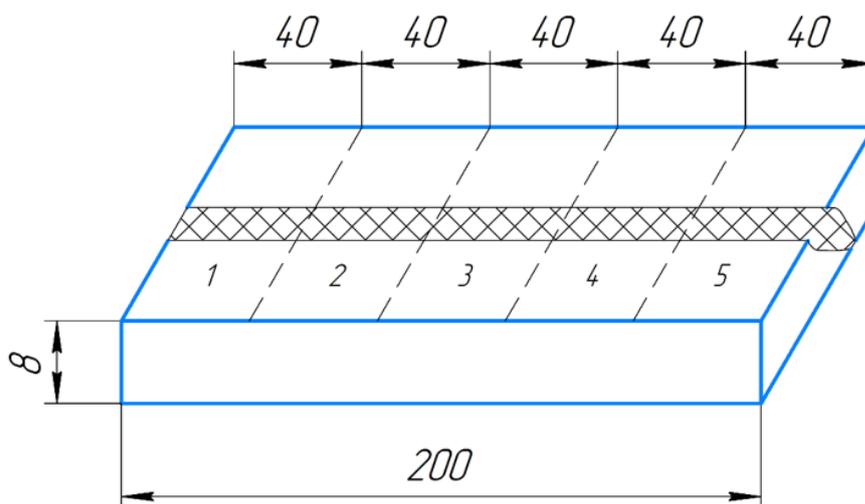


Рисунок 13 - Схема вырезки образцов для испытаний

Испытания на твердость - выполнить вырезку образцов и произвести замеры твердости металла шва и зоны термического влияния с использованием метода Бринелля или Виккерса.

Все полученные данные внести в техническое заключение для последующего анализа влияния состава защитных газов на качество сварного соединения:

- Результаты визуального осмотра;
- Геометрические параметры сварного шва;
- Данные ультразвукового контроля;
- Результаты механических испытаний.

Выводы по второй главе:

В результате выполнения второго раздела разработки методики проведения эксперимента по исследованию влияния различных процентных соотношений между углекислым газом и аргоном была разработана комплексная методика проведения эксперимента по исследованию влияния различных процентных соотношений между углекислым газом и аргоном при сварке. В разделе подробно рассмотрены все этапы подготовки: от подготовки опытных образцов до разработки технологического процесса сварки и последующего контроля качества сварных соединений. Методика подготовки опытных образцов обеспечивает их соответствие требованиям эксперимента и повторяемость условий. Разработанный процесс сварки учитывает основные параметры, влияющие на стабильность дуги и формирование шва при изменении газовой смеси. Методика контроля обеспечивает объективную оценку качества сварных соединений и позволяет сопоставить полученные результаты при разных условиях. Таким образом, разработанная методика создает надежную основу для последующего проведения эксперимента и анализа влияния газовой смеси на механические свойства сварного соединения.

### **3 Результаты ранее проведенных экспериментов по влиянию добавок на процесс сварки и на свойства сварного шва**

После анализа множества публикаций по этой теме было установлено следующее [13]: при сварке смеси углекислого газа с кислородом потери электродного металла на разбрызгивание немного снижаются по сравнению с чистым  $\text{CO}_2$ , но при этом увеличивается угар металла примерно на ту же величину. В итоге общие потери металла (и на разбрызгивание, и на угар) остаются почти одинаковыми в обоих случаях. Эксперименты с обратной полярностью и смесью углекислого газа с аргоном показали, что небольшое добавление аргона практически не меняет процесс сварки. Однако если содержание аргона в смеси превышает 50 %, процесс становится схожим с сваркой в чистом аргоне, что улучшает внешний вид швов и снижает потери металла на угар и разбрызгивание.

Снижение тепловых потерь на диссоциацию способствует повышению стабильности и устойчивости дуги, а также улучшению охвата дугой основного металла. Так, если при сварке в  $\text{CO}_2$  возможно образование швов с недостаточной шириной для достижения необходимой глубины проплавления, то при сварке смеси углекислого газа и аргона (при содержании аргона 20-30 %) достигается более широкий провар. Это способствует получению швов с плавным переходом от основного металла к наплавленному и улучшению дегазации сварочной ванны.

Проведенные исследования также подтвердили, что добавление кислорода или аргона в защитную атмосферу позволяет улучшить формирование швов и снизить потери электродного металла. Улучшение процесса сварки также возможно путем изменения состава сварочной проволоки.

Для сварки использовалась листовая сталь марки «Сталь3», толщиной 2 мм. Сварка производилась встык, односторонним стыковым швом, без скоса кромок, без предварительной зачистки.

«Также были проведены исследования, в ходе которых установлено, что смесь  $Ar+CO_2$  оказывает положительное влияние на технологические свойства сварочной дуги (повышая стабильность ее горения). Это способствует улучшению формирования шва, снижению величины разбрызгивания электродного металла, и уменьшению потерь на угар. Для проведения исследования использовали стальные пластины толщиной 6 мм из стали марки «сталь 3 полуспокойная». В качестве присадочного материала применялась сварочная проволока Св-08ГСМТ-О диаметром 1,2 мм.

Было установлено, что разбрызгивание расплавленного металла увеличивается по мере повышения содержания  $CO_2$  в защитном газе, состоящем из смеси  $Ar + CO_2$ .

В ходе исследования защитных газов и их смесей, проведенного в рамках данной работы, было установлено, что оптимальным вариантом является использование смеси аргона и углекислого газа рисунок 14.

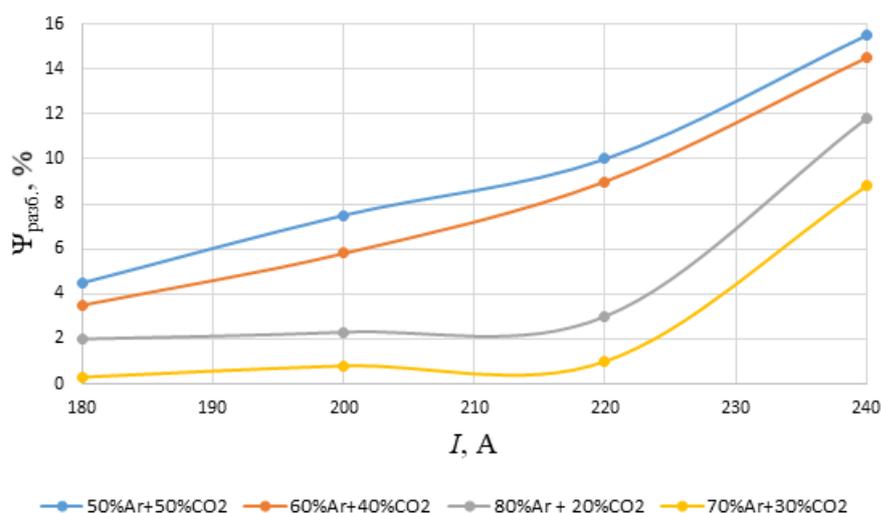


Рисунок 14 - График зависимости величины потерь электродного металла на угар и разбрызгивание ( $\Psi_{разб.}$ ) от величины сварочного тока ( $I$ )

Эта газовая смесь широко используется в промышленности, улучшая технологические характеристики сварочной дуги, что способствует более стабильному горению. Также она снижает размеры брызг, уменьшает потери металла при разбрызгивании и делает шов более ровным, с плавным переходом к основному металлу.

В результате исследования было установлено, что использование смеси аргона с углекислым газом в пропорции семьдесят процентов аргона и тридцать процентов углекислого газа при сварке стали обыкновенного качества, снижает потери электродного металла на угар и разбрызгивание до двух процентов рисунок 14.

«Согласно данным, приведенным в работе Новожилова Н.М., такая комбинация газов ведет к уменьшению размера капель электродного металла и увеличению их количества. Однако если содержание углекислого газа в смеси превышает этот предел, то в некоторых условиях количество капель, образующихся в единицу времени, резко сокращается, а в других – плавно.

Исследования проводились на пластинах из стали 30ХГСА, толщиной десять миллиметров, с X-образной разделкой. Сварка выполнялась проволокой с маркой Св-08ГСМТ-О диаметром 1,2

В ходе исследования полученные сварные образцы подвергли количественному анализу химического состава, а также механическим испытаниям и структурному анализу сварного соединения.

При сравнении химического состава наплавленного металла, полученного разными способами сварки, были выявлены следующие различия: традиционный способ: содержание углерода составляет 0,24-0,26%, кремния - 0,72-0,74%, марганца - 0,61-0,63%, серы - 0,013%, фосфора - 0,017%; предлагаемый способ: содержание углерода несколько ниже - 0,22-0,23%, кремния больше - 0,78-0,8%, марганца также больше - 0,66-0,68%, при этом содержание вредных примесей (серы и фосфора) уменьшено до 0,011% и 0,015% соответственно.

Как видно, при сварке в смеси газов повышение коэффициент перехода химических элементов раскислителей (кремний и марганец) в сварочную ванну на 4-6%. Данное изменение происходит вследствие изменения величины удельной скорости окисления металла  $\omega_{уд}$ .

Совокупность данных факторов позволяет кремнию, растворяясь в феррите повышать предел текучести и уменьшать склонность к хладноломкости, марганец же образует твердый раствор с железом немного повышает твердость и прочность, что способствует повышению величины ударной вязкости на 10-15% по сравнению со сваркой в  $CO_2$ » [13].

При сварке в газовых смесях на основе аргона существенно повышается ударная вязкость металла шва. Причем чем ниже температура испытаний, тем более положительно сказывается применение смеси  $Ar+CO_2$ . Так, при температуре минус 20 оС  $KCV=46$  и  $65$  дж/см<sup>2</sup> соответственно для сварки в  $CO$  и  $Ar+CO_2$ , а при температуре минус 40 оС  $KCV=25$  и  $53$  дж/см<sup>2</sup>.

«Для достижения высокого качества сварки углеродистых сталей при использовании смесей газов (аргон + углекислый газ) важно провести исследование, чтобы понять, как состав этих смесей влияет на свойства сварных соединений, особенно в сравнении с использованием только углекислого газа. Этот анализ имеет большое значение, так как существует множество разных рекомендаций от производителей газовых смесей по оптимальным пропорциям газов, что может быть связано с рыночной конкуренцией, патентными вопросами, а также с различиями в химическом составе сварочной проволоки и сталей» [4].

В ходе проведенных исследований было установлено [4], что состав газовой смеси оказывает влияние на качество сварных соединений. В экспериментах использовались образцы из стали марки Ст3 размером 300x150 мм, всего было изготовлено 259 образцов. Сварка проводилась в смесях с различным содержанием углекислого газа (18%, 22% и 25%). Результаты показали, что использование смеси аргона и углекислого газа способствует

повышению производительности благодаря увеличению скорости сварки. Также улучшилось формирование шва и внешний вид соединений. При применении механизированной сварки с плавящимся электродом производительность значительно возросла. По результатам механических испытаний на прочность и угол загиба, наилучшие результаты были получены при использовании смеси с 18% углекислого газа.

«В работе подчеркивается необходимость применения газовых смесей, так как защита только аргоном не обеспечивает хорошего переноса электродного металла и стабильность горения дуги» [9].

«Известно, что применение газовых смесей, в состав которых входят углекислый газ, аргон и кислород, позволяет уменьшить разбрызгивание металла сварке с обычной скоростью» [14].

«Механизированная сварка плавящимся электродом в аргоне сталей различных классов используется в промышленности сравнительно мало из-за неудовлетворительной формы швов, интенсивного излучения дуги и повышенной склонности металла шва к образованию пор» [10].

«Для механизированной сварки плавящимся низколегированным электродом по узкому зазору можно рекомендовать применять в качестве защитной среды газовую смесь аргона и 25% углекислого газа, эффективность которой установлена в ряде научных и производственных работ» [20].

«Механизированная сварка в газовой смеси аргона с окислительными газами позволяет значительно повысить хладостойкость сварных швов по сравнению со сваркой в чистом углекислом газе. В ряде исследований приведены результаты изучения особенностей структуры металла швов, выполненных в смеси, содержащей 70% аргона, 25% углекислого газа и 5% кислорода» [8]. Полученные данные свидетельствуют о том, что при сварке сталей всех исследованных марок применение данной тройной газовой смеси в качестве защитной среды обеспечивает высокую ударную вязкость металла шва и смещает порог хладноломкости в область температур ниже  $-70^{\circ}\text{C}$ .

Достичь аналогичных показателей при использовании чистого углекислого газа в качестве защитного газа не удаётся [8].

Повышение ударной вязкости металла шва при сварке в газовых смесях аргона и углекислого газа, по-видимому, обусловлено сниженным содержанием неметаллических включений и более благоприятными условиями формирования первичной кристаллической структуры шва. Для точного установления влияния указанных факторов требуются дополнительные специализированные исследования [5].

«Однако повышение эксплуатационных характеристик в случае обеспечивается применением дорогостоящих компонентов (Cr, Mo, Nb, W и V), что существенно повышает затраты на сварочные материалы. Кроме того, перечисленные элементы являются химически активными и могут интенсивно окисляться. Производители порошковых проволок подобного состава рекомендуют использовать в качестве защитных газов смеси на основе аргона с добавлением углекислого газа, при этом, как правило, рекомендуют ограничивать количество последнего до 2,5...5,0 %, однако допускают применение более привычных сварочных смесей с содержанием углекислого газа до 18...20 %. При этом не раскрывается, каким образом увеличение активного газа в составе защитной смеси повлияет на эксплуатационные характеристики покрытия в целом» [26].

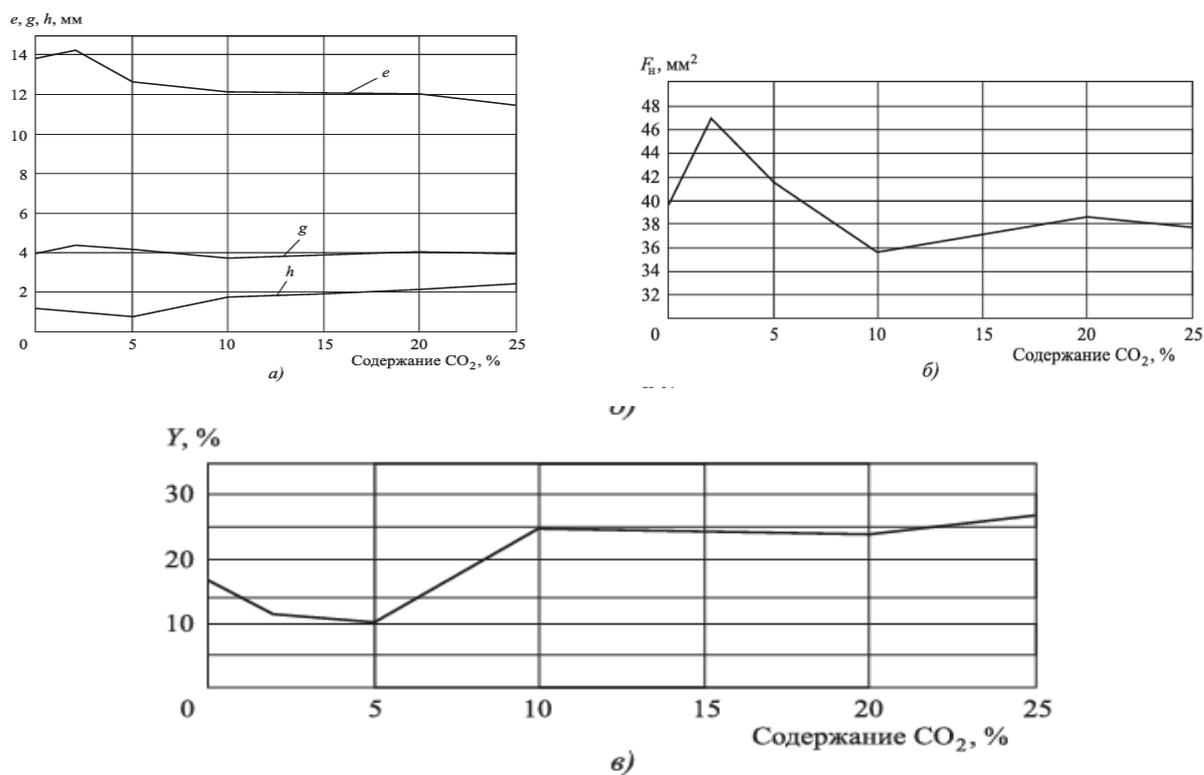
Проведены исследования, в ходе которого установлено, «что во всём диапазоне исследованных режимов получены образцы с качественным формированием наплавленного валика, без выявленных дефектов в наплавленном металле. Изменение количества углекислого газа ведет к изменению геометрических параметров наплавленного валика, а также к изменению его формы (рисунок 15). Увеличение количества углекислого газа выше 5 % в составе защитной смеси приводит к увеличению глубины проплавления более чем на 40 %. При этом добавление 2 и 5 %  $\text{CO}_2$  не

увеличивает глубину проплавления. Ширина наплавленного валика уменьшается при увеличении содержания углекислого газа» [26].

«Анализ площади наплавленного металла показывает увеличение этого показателя при применении защитных газов, в состав которых введено 2 и 5 %  $\text{CO}_2$ , при этом дальнейшее повышение количества углекислого газа приводит к снижению площади наплавленного металла до значений, полученных при использовании чистого аргона. Скорость подачи порошковой проволоки во всех случаях была идентичной. Исходя из приведенного выше, добавление небольшого количества углекислого газа (до 5 %) в смесь на базе аргона снижает разбрызгивание электродного металла, тогда как дальнейшее увеличение количества  $\text{CO}_2$  нивелирует этот эффект. Такое влияние углекислого газа на геометрические параметры наплавленного металла приводит к изменению доли основного металла (рисунок 15, в). При использовании смеси защитных газов на базе аргона с содержанием углекислого газа до 5 % доля участия основного металла снижается (до 10 % для 5 %  $\text{CO}_2$ ), при увеличении количества углекислого газа выше 5 % доля участия основного металла увеличивается до 26 % для 25 %  $\text{CO}_2$ . Таким образом, содержание углекислого газа в составе защитной смеси оказывает влияние как на глубину проплавления, так и на долю участия основного металла, а значит, может происходить не только окисление легирующих элементов активным газом, но и разбавление наплавленного металла основным» [26].

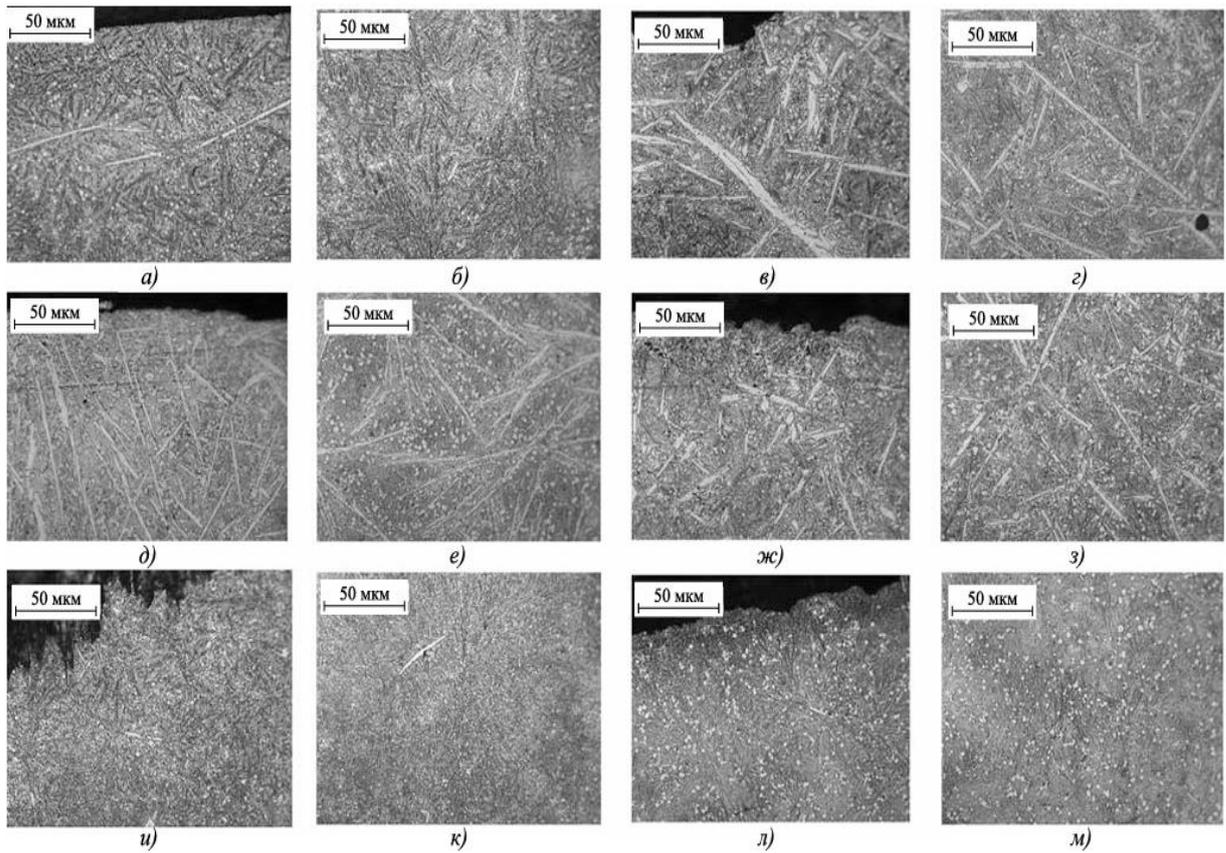
«Микроструктура наплавленного металла представляет собой матрицу с твердыми карбидными и интерметаллидными включениями (рисунок 16). Карбидные включения представляют собой иглообразную фазу карбида хрома. Состав защитного газа оказывает существенное влияние на размер и концентрацию карбидной фазы (рисунок 17). С введением в состав защитного газа небольшого количества  $\text{CO}_2$  (до 5 %) наблюдается увеличение ширины и концентрации карбидной фазы, при дальнейшем повышении количества углекислого газа ширина карбидной фазы уменьшается. Максимальная

ширина карбидной фазы составляет 5 мкм и наблюдается в верхней части наплавленного валика при использовании смеси, в состав которой введено 2 % CO<sub>2</sub>. Концентрация карбидной фазы максимальна также в верхней части наплавленного валика и составляет около 8 %, при использовании смеси, в состав которой введено 5 % CO<sub>2</sub>. Кроме того, размер и концентрация карбидной фазы в наплавленном металле снижаются по мере приближения к линии сплавления» [26].



e, g – соответственно ширина и высота наплавленного валика; h – глубина проплавления

Рисунок 15 - Влияние содержания углекислого газа в составе смеси защитного газа на геометрические параметры наплавленного валика (а), площади наплавленного металла (б) и доли участия основного металла (в)



а, б - 100 % Ar; в, г - 98 % Ar + 2 % CO<sub>2</sub>; д, е - 95 % Ar + 5 % CO<sub>2</sub>; ж, з - 90 % Ar + 10 % CO<sub>2</sub>; и, к - 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>; л, м - 75 % Ar + 25 % CO<sub>2</sub>; а, в, д, ж, и, л - зона I.

Рисунок 16 - Микроструктуры наплавленного металла (S240)

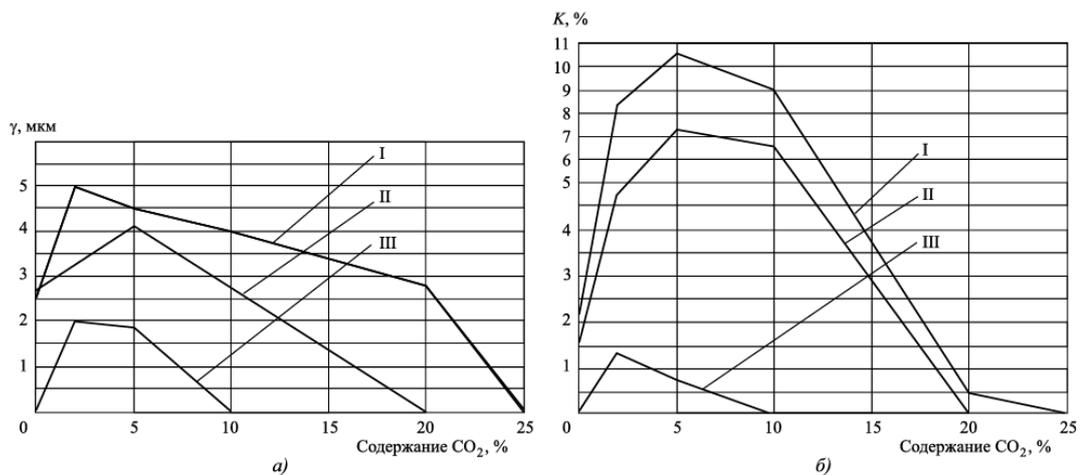
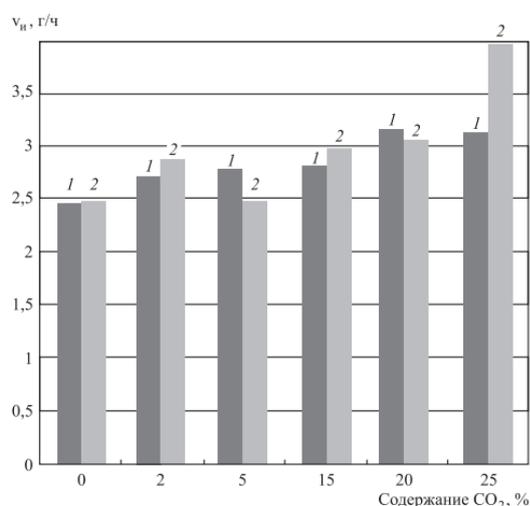


Рисунок 17 - Зависимости ширины иглообразной карбидной фазы (а) и ее концентрации (б) от состава защитного газа в различных областях наплавленного валика

«Уменьшение количества карбидной фазы коррелируется с ростом участия основного металла. Так, максимальная доля участия основного металла наблюдается при использовании смеси газа 75 % Ar + + 25 % CO<sub>2</sub>, при этом карбидная фаза полностью отсутствует в наплавленном металле. Таким образом увеличение содержания CO<sub>2</sub> в составе защитного газа прежде всего приводит к разбавлению наплавленного металла основным, что приводит к снижению количества легирующих элементов. Следует отметить наличие в структуре наплавленного металла дисперсной интерметаллидной фазы, размер которой составляет 3...7 мкм. При этом размер и концентрация интерметаллидной фазы незначительно зависят от состава защитного газа, наблюдается только тенденция к снижению этих параметров с ростом содержания CO<sub>2</sub>. Твердость наплавленного металла равномерна по всему сечению и практически не зависит от состава защитного газа. Среднее значение твердости наплавленного металла составило 67,6 HRC (при разбросе от 64,5 до 70 HRC). Анализ результатов, полученных при испытании наплавленного металла на гидроабразивный износ, показал, что с увеличением содержания CO<sub>2</sub> в составе защитного газа наблюдается снижение износостойкости (рисунок 17)» [26].



1 – 5 мин воздействия; 2 – 10 мин воздействия

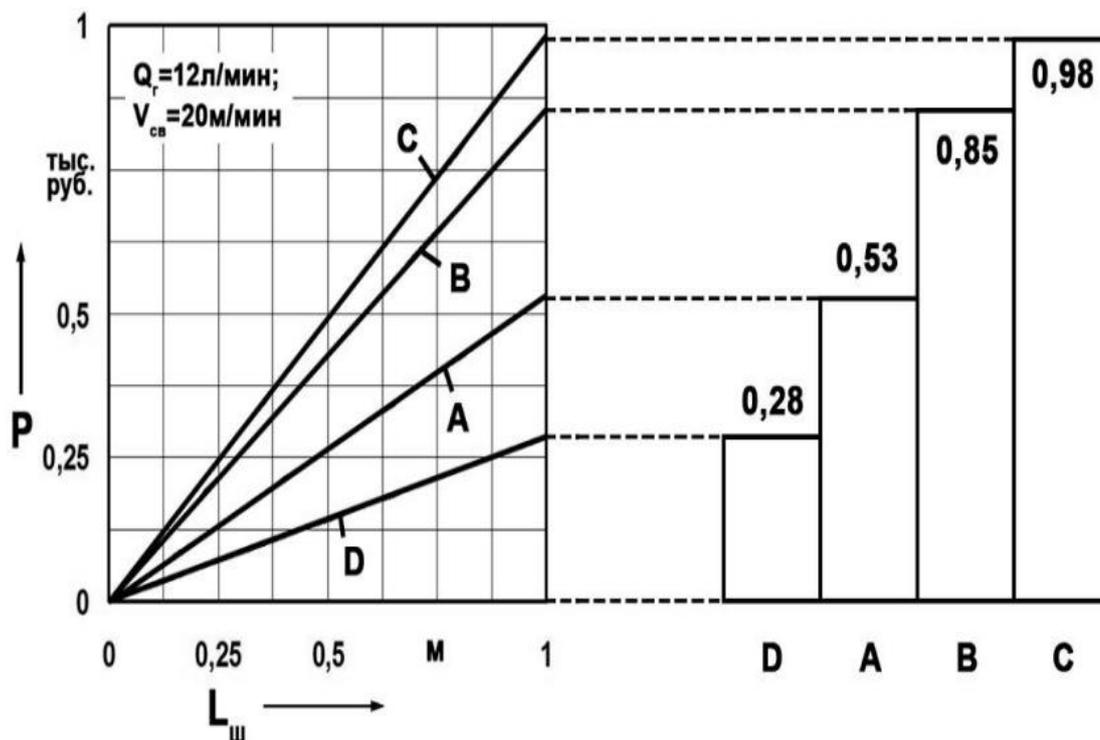
Рисунок 17 - Скорость изнашивания наплавленного металла

«Скорость изнашивания наплавленного металла, полученного с применением в качестве защитного газа аргона, составила 2,46 и 2,48 г/ч при времени испытания 5 и 10 мин соответственно, т.е. по мере заглубления в наплавленный металл износостойкость покрытия существенно не изменяется. Такие результаты являются следствием равномерности размера и концентрации карбидной фазы по глубине наплавленного металла (рисунок 16), что свидетельствует о преобладающей роли карбидной фазы при рассмотрении износостойкости наплавленных покрытий такого рода. Покрытия, полученные с добавлением  $\text{CO}_2$  в защитный газ, по сравнению с покрытием, полученным с применением в качестве защитного газа аргона, показывают увеличение скорости изнашивания за первые 5 мин на 10...14 % при использовании защитных смесей с добавлением углекислого газа до 10 % и на 27...28 % при использовании защитных смесей с добавлением углекислого газа до 20 и 25 %. Наибольшей износостойкостью по результатам 10-минутного испытания на износостойкость обладают покрытия, полученные с применением защитного газа состава 100 % Ar и 95 % Ar + 5 %  $\text{CO}_2$ , при этом скорость изнашивания этих покрытий одинакова» [26].

«Таким образом, добавление  $\text{CO}_2$  в защитный газ в количестве 5 % приводит к снижению доли участия основного металла и тем самым способствует формированию структуры с оптимальным соотношением концентрации и размера карбидной фазы. Увеличение содержания углекислого газа в защитной смеси приводит к окислению легирующих элементов и увеличению доли участия основного металла, что приводит к снижению как концентрации, так и размера карбидной фазы, что в свою очередь приводит к росту скорости изнашивания. Применение смеси 98 % Ar + 2 %  $\text{CO}_2$  снижает износостойкость, по-видимому, в связи с окислением легирующих элементов и недостаточным уменьшением доли основного металла, не позволяющее скомпенсировать выгорание легирующих элементов. Эти факторы способствуют формированию карбидной фазы с

недостаточным сочетанием ее размера и концентрации. Таким образом, максимальной износостойкостью обладают покрытия, выполненные с применением в качестве защитного газа 100 % Ar, добавление углекислого газа ведет к снижению износостойкости. По всей видимости, из-за наличия активного газа хром выгорает и формируются карбиды, обедненные хромом и имеющие меньшую твердость. Так, согласно данным, карбид Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> обладает твердостью > 9 по шкале Мооса, а карбид Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> - 7» [26].

В работе [25] «установлено, что соотношение расходов компонентов комбинированной защиты, характеризующееся минимальным значением коэффициента потерь, составляет 4,5 л/мин Ar и 7,5 л/мин CO<sub>2</sub>. При этом общий расход газов (12 л/мин) будет соответствовать расходу при сварке с традиционной газовой защитой смесью, состоящей из 82 % Ar и 18 % CO<sub>2</sub>, однако процентную долю более дорогостоящего компонента аргона в этом случае удалось снизить до 37 % от общего расхода газов. Анализ экономической эффективности использования комбинированного способа подачи защитной газовой смеси в зону горения дуги представлен на рисунке 18 в виде графика затрат на метр шва. Как видно из полученных результатов, использование предлагаемой технологии позволяет снизить затраты на защитный газ примерно на 35 % по сравнению со сваркой в готовой газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> и на 50 % по сравнению со сваркой в чистом аргоне. Для оценки механических свойств сварных соединений, полученных с использованием комбинированной газовой защиты зоны горения дуги, были проведены механические испытания на ударный изгиб, статическое растяжение и статический изгиб образцов, вырезанных поперек шва. В качестве основного материала использовалась листовая горячекатаная сталь 09Г2С толщиной 10 мм. Сварка осуществлялась в нижнем положении в автоматическом режиме. Подготовка кромок сварного соединения С21 велась согласно ГОСТ 14771-76» [2].



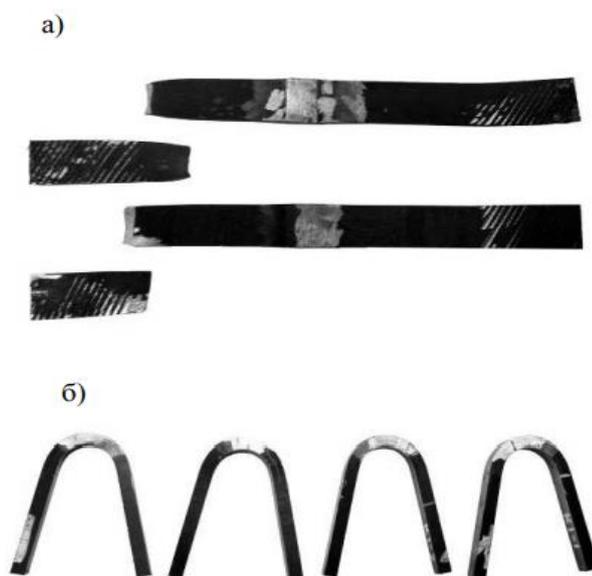
A – сварка с комбинированной газовой защитой; B – 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>;  
C – 100 % Ar; D – 100 % CO<sub>2</sub>

Рисунок 18 - Стоимость защитного газа, необходимого для сварки одного метра сварного шва

«Результаты испытаний на статическое растяжение показали, что разрушение образцов происходит по основному металлу. При этом значение временного сопротивления разрыву соответствует сертификату на основной материал. При испытаниях на статический изгиб (боковой поверхности шва) угол загиба на всех испытуемых образцах составил 180° за вычетом упругой деформации. Испытания на ударный изгиб проводились при температуре минус 45 °С. Для охлаждения использовалась углекислота в твердой фазе (сухой лед). Тип образца - VWT 0/1,25 согласно СТБ ЕН 875-2002. Результаты испытаний показали, что значение ударной вязкости KCV-45 почти полностью совпадает с аналогичным параметром при сварке традиционной газовой защитой омывающим потоком смеси 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>. При этом

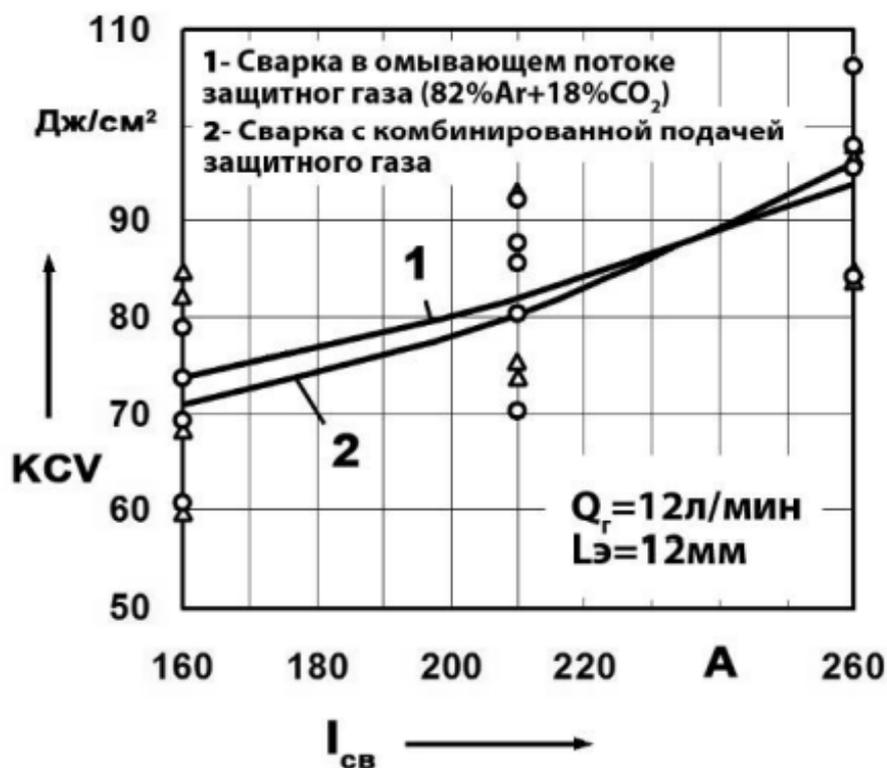
повышение силы сварочного тока (от 160 до 260 А) в обоих случаях приводит к росту ударной вязкости примерно на 35 %.

Проведённые исследования позволили установить оптимальные соотношения расходов газов, подаваемых по центральному и кольцевому каналам комбинированного сопла (7,5...8 л/мин CO<sub>2</sub>, 4...5 л/мин Ar). При этом оптимизация велась преимущественно по расходу аргона. На основании механических испытаний сварных соединений установлено, что снижение расхода центрального потока защитного газа, состоящего из аргона, открывает возможности его существенной экономии (снижение затрат на защитный газ на метр сварного шва около 35 % по сравнению со сваркой в смеси 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> и на 50 % по сравнению со сваркой в среде чистого аргона) и что сварные соединения не уступают по свойствам наплавленного металла сварного шва соединениям, полученным в готовой газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>»[2].



а – статическое растяжение; б – статический изгиб (SBB) 180°

Рисунок 19 - Внешний вид сварных образцов  
после механических испытаний



1 – сварка с традиционной газовой защитой; 2 – комбинированная газовая защита

Рисунок 20 - Ударная вязкость металла шва сварного соединения в зависимости от силы сварочного тока

При сварке сталей в чистом аргоне иногда наблюдается блуждание дуги, что приводит к образованию дефектов формирования шва: неравномерной ширине, подрезам, наплывам и грубой чешуйчатости. Поэтому сварку плавящимся электродом в чистом аргоне используют весьма ограниченно, например, с целью обеспечения высокой коррозионной стойкости швов некоторых нержавеющей сталей.

Введение в аргон 1 % O<sub>2</sub> уже способствует стабилизации формирования шва, а при добавке 5 % перенос металла улучшается и существенно уменьшается разбрызгивание. Присутствие слабо окислительной среды понижает поверхностное натяжение расплавленного металла, что приводит к снижению пористости и улучшению конфигурации шва.

При применении смеси, состоящей из восьмидесят процентов аргона и двадцать процентов углекислого газа, наблюдается струйный перенос металла с минимальным разбрызгиванием, а также формируется чашеобразный профиль проплавления основного материала, аналогичный тому, что возникает при сварке в чистом углекислом газе. Когда содержание углекислого газа в защитной газовой смеси превышает тридцать процентов и составляет менее семьдесят процентов аргона, горение дуги и перенос электродного металла становится похожим на процесс сварки в чистом углекислом газе. Таким образом, сварку с использованием смесей на основе аргона с добавками кислорода и углекислого газа следует рассматривать как альтернативу сварке в чистом  $\text{CO}_2$ .

Практика сварочного производства показывает, что при сварке в газовой смеси, состоящей из 75-80 % Ar и 20-25 %  $\text{CO}_2$ , разбрызгивание металла значительно меньше, чем при сварке в чистом  $\text{CO}_2$ .

Авторы отмечают, что с увеличением напряжения дуги с 25 до 33 В коэффициент разбрызгивания металла при сварке в  $\text{CO}_2$  увеличивается, а при сварке в чистом аргоне и смеси 82 % Ar + 18 %  $\text{CO}_2$  непрерывно снижается.

В целом, при сварке с газовыми смесями, где больше аргона, получается меньше брызг, а шов выходит более аккуратным и качественным. Поверхность шва становится ровной, без крупных частиц шлака. При увеличении силы тока и содержания углекислого газа в смеси, оптимальное напряжение дуги также увеличивается.

На рисунке 21 показаны профили сечения швов, полученные при оптимальном напряжении дуги и разных пропорциях углекислого газа в смеси. Когда содержание  $\text{CO}_2$  в смеси увеличивается на 10%, напряжение дуги нужно повысить на 0,5 В. При этом ширина шва остаётся примерно одинаковой, а глубина проплавления немного увеличивается.

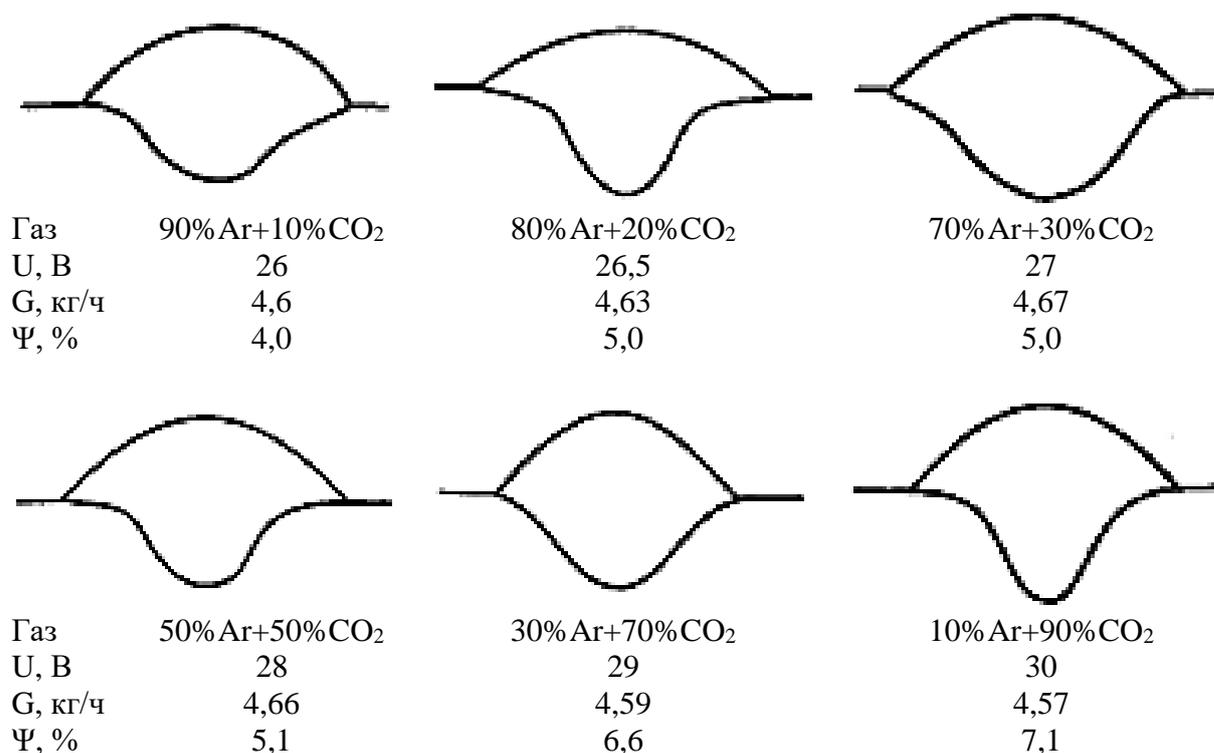


Рисунок 21 - Изображенные профили сечения сварных швов, производительность плавления и уровень разбрызгивания металла при сварке с использованием газовой смеси Ar + CO<sub>2</sub>, осуществляемой при оптимальном напряжении дуги

Одним из главных преимуществ газовых смесей с аргоном является то, что они позволяют получать сварные швы с высокими механическими свойствами, особенно хладостойкости по сравнению с механическими свойствами сварных швов, полученных при сварке в CO<sub>2</sub>.

В таблице 4 приведены механические свойства сварных швов, выполненных в газовых смесях Ar + CO<sub>2</sub> и чистом CO<sub>2</sub>. Данные таблицы показывают, что при сварке в смеси газов любого состава временное сопротивление разрыву и относительное удлинение выше, чем при сварке в CO<sub>2</sub> для всех исследованных статей.

Таблица 4 - Механические свойства металла шва

Марка стали	Состав газовой защиты	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С				
				20	0	-20	-40	-70
ВСтЗсп	CO <sub>2</sub>	<u>532-553</u> 540	<u>10,6-25,3</u> 15,9	<u>149-170</u> 154	<u>105-145</u> 123	<u>78-160</u> 113	<u>98-125</u> 107	-
	25% Ar + 75% CO <sub>2</sub>	<u>524-568</u> 549	<u>10,3-23,6</u> 17,5	<u>113-140</u> 123	<u>99-140</u> 124	<u>93-110</u> 100	<u>80-88</u> 84	-
	50% Ar + 50% CO <sub>2</sub>	<u>518- 572</u> 570	<u>16,2-18,5</u> 17,0	<u>113-160</u> 136	<u>103-164</u> 141	<u>44-111</u> 81	<u>79-121</u> 77	-
	75% Ar + 25% CO <sub>2</sub>	<u>518-548</u> 545	<u>17,7-27,0</u> 26,7	<u>103-170</u> 140	<u>103-143</u> 123	<u>63-128</u> 105	<u>75-120</u> 102	-
10Г2С1	CO <sub>2</sub>	<u>615-630</u> 622	<u>20,0-22,8</u> 21,4	<u>120-151</u> 139	-	<u>38-42</u> 40	<u>52-52</u> 52	<u>35-53</u> 42
	75% Ar + 25% CO <sub>2</sub>	<u>674-685</u> 679	<u>19,3-27,3</u> 3,8	<u>161-190</u> 175	-	<u>113-125</u> 119	<u>92-125</u> 98	<u>37-74</u> 55
16Г2АФ	CO <sub>2</sub>	<u>630-657</u> 639	<u>13,2-20,0</u> 16,4	<u>84-105</u> 94	-	<u>38-42</u> 40	<u>26-78</u> 48	<u>13-29</u> 19
	75% Ar + 25% CO <sub>2</sub>	<u>655-676</u> 663	<u>16,3-19,6</u> 13,0	<u>114-158</u> 131	-	<u>51-97</u> 74	<u>38-88</u> 67	<u>24-73</u> 55

Ударная вязкость металла сварного шва при использовании газовой смеси на основе аргона и углекислого газа (75 % Ar + 25 % CO<sub>2</sub>) для сталей 10Г2С1 и 16Г2АФ в большинстве случаев превосходит аналогичные показатели при сварке в чистом углекислом газе, при этом сварка стали стали ВСтЗсп с использованием углекислого газа показывает ударную вязкость, сопоставимую с результатами сварки в чистом CO<sub>2</sub>.

«Улучшение механических и служебных свойств металла швов и сварных соединений, выполненных в смесях на основе аргона, является результатом снижения количества кислорода в швах, образования благоприятной формы шва и микроструктуры металла шва. Следует подчеркнуть, что показатели механических свойств металла швов и сварных соединений, выполненных в смесях на основе аргона, соответствуют

требованиям, предъявляемым к соединениям и конструкциям, которые должны работать в условиях отрицательных температур, динамических нагрузок и других неблагоприятных факторов. Хотя газовые смеси на основе аргона имеют более высокую стоимость, чем  $\text{CO}_2$ , при их использовании достигают существенного экономического эффекта за счет снижения расхода сварочной проволоки, уменьшения потерь проволоки на разбрызгивание, снижения 15 трудовых затрат на зачистку сварных соединений от приваренных брызг, повышения производительности труда сварщиков на 10–20 %. В настоящее время объемы применения сварки в смесях на основе аргона имеют устойчивую тенденцию к росту» [4]. Это можно объяснить как снижением цен на  $\text{CO}_2$  и смеси  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ , так и стремлением производителей сварных конструкций выпускать продукцию высокого качества. Использование более сложных защитных смесей, например, 60 %  $\text{Ar} + 30$  %  $\text{He} + 10$  %  $\text{CO}_2$  и 70 %  $\text{Ar} + 15$  %  $\text{He} + 10$  %  $\text{CO}_2$ , не оказало существенного влияния на сварочно-технологические и механические свойства наплавленного металла. «Недостатком сварки в смесях на основе аргона является повышенное излучение дуги, большой нагрев сварочной горелки, большая склонность швов к образованию пор и кристаллизационных трещин по сравнению с этими же характеристиками при сварке в углекислом газе. Как показали исследования, максимальная температура нагрева узлов горелки при сварке в смеси 75 %  $\text{Ar} + 25$  %  $\text{CO}_2$  больше, чем при сварке в  $\text{CO}_2$ , но нагрев медных наконечников и их стойкость в работе практически одинаковы при сварке в  $\text{CO}_2$  и смеси  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ » [4].

«Установлено, что получение качественного сварного соединения без образования пор при сварке с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси защитных газов ( $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ) возможно на соотношениях от 50% до 80% аргона в общем объеме. 8 Экспериментально было установлено, что наименьшие потери электродного металла на угар и разбрызгивание достигаются при содержании 70% $\text{Ar} + 30$ % $\text{CO}_2$  и не превышает 2%.

Основываясь на данных описанных в работе Новожилова Н.М. полученное соотношение обусловлено, тем что добавление к аргону углекислого газа до  $70\%Ar + 30\%CO_2$  сопровождается уменьшением размера электродных капель и соответствующим увеличением их количества. Повышение содержания углекислого газа в аргоне сверх этого предела при одних условиях сопровождается резким, а при других условиях плавным уменьшением количества капель, образующихся в единицу времени» [19].

Выводы по третьей главе.

В данной главе был проведён подробный обзор и анализ большого количества научных публикаций, в которых рассматривается влияние состава защитных газовых смесей на процесс сварки и характеристики получаемого сварного соединения. В результате обобщения и сопоставления данных из различных источников установлено, что тип и состав защитного газа играют ключевую роль в формировании сварочного шва и в протекании самого сварочного процесса.

Было выявлено, что состав газовой смеси влияет на ряд важных параметров, включая устойчивость горения сварочной дуги, количество и характер образующихся брызг, а также на структуру, форму и механические свойства сварного соединения. Например, стабильность дуги напрямую зависит от пропорции активных и инертных компонентов в смеси, что, в свою очередь, сказывается на равномерности плавления металла и качестве его переноса в сварочную ванну.

Особое внимание в рамках анализа было уделено работам таких известных исследователей, как Г.И. Лашенко и Г.П. Демьяненко (1976), а также В.Н. Бучинского и Н.М. Воропая (1978). Эти авторы в своих трудах показали, что добавление углекислого газа к инертному аргоновому фону существенно повышает стабильность дуги, делает процесс сварки более предсказуемым и технологичным, а также способствует снижению количества разбрызгивания расплавленного металла.

Кроме того, увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в газовой смеси положительно влияет на перенос электродного металла: капли становятся меньше, они равномернее переходят в сварочную ванну, что способствует более аккуратному формированию шва и уменьшает дефекты, такие как поры и непровары.

Такой подход позволяет достичь более высокого качества сварных соединений, увеличить производительность процесса, а также снизить количество потерь металла на угар и разбрызгивание.

Таким образом, выбор и регулирование состава защитной газовой смеси – это важнейший инструмент для улучшения всех стадий сварочного процесса, от стабильности дуги до конечных характеристик сварного шва.

В процессе изучения влияния газовых смесей на сварочные характеристики особое внимание было уделено работам В.Г. Свещинского, С.Т. Римского и Ю.Н. Петрова (1974), которые наглядно продемонстрировали, что структура металла шва напрямую зависит от концентрации углекислого газа в защитной среде.

Эти изменения в структуре, в свою очередь, заметно сказываются на механических свойствах соединения, таких как прочность и ударная вязкость. Аналогичное влияние состава газовой смеси подтверждается более современными исследованиями А.О. Коротеева и соавторов (2014, 2020), где отмечено, что точный подбор компонентов смеси позволяет снизить потери электродного металла и стабилизировать параметры дуги, повышая общую эффективность сварки.

Одним из наиболее значимых преимуществ применения смеси аргона с углекислым газом ( $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ) является возможность тонкой настройки характеристик сварочной ванны.

За счёт регулирования процессов диссоциации газа можно добиться более устойчивого горения дуги и равномерного расплавления металла. Это позволяет значительно уменьшить разбрызгивание, упростить процесс сварки

и получить качественный, плотный и однородный шов с минимальным количеством дефектов.

Дополнительные эксперименты показали, что при использовании  $Ar+CO_2$  по сравнению с чистым  $CO_2$  наблюдается повышение прочностных характеристик сварного соединения в среднем на 10-15 %. Такой результат объясняется как лучшим формированием сварного шва, так и более эффективным переносом легирующих элементов из проволоки в металл шва, что особенно важно при сварке легированных сталей, где критично соблюдение заданного химического состава.

В целом, проведённый анализ подтверждает: правильный подбор газовой среды - ключевой фактор, влияющий на качество сварных соединений. Оптимизация состава защитного газа позволяет улучшить механические свойства шва, снизить потери металла, уменьшить количество дефектов и повысить производительность сварочного процесса в целом.

## Заключение

Проведённые исследования, направленные на изучение влияния различных процентных соотношений различных защитных газов между аргоном и углекислым газом при механизированной сварке, позволило сделать ряд важных выводов, имеющих практическое значение для повышения качества сварных соединений и оптимизации сварочного процесса.

На основе анализа литературных источников и собственных экспериментальных данных было установлено, что при сварке в смесях защитных газов любого состава временное сопротивление разрыву и относительное удлинение сварных соединений выше, чем при сварке в чистом углекислом газе ( $\text{CO}_2$ ).

Данный факт подтверждает эффективность использования газовых смесей с аргоном в качестве более предпочтительного защитного газа для повышения прочностных характеристик сварного шва.

Особенно выраженное положительное влияние на качество сварного соединения оказывает увеличение содержания аргона в смеси.

Смеси с преобладанием аргона (в частности, 80 % Ar + 20 %  $\text{CO}_2$ ) обеспечивают стабильный струйный перенос металла с минимальным уровнем разбрызгивания. Это положительно сказывается не только на внешнем виде шва, но и снижает потребность в дополнительной механической обработке после сварки, экономя ресурсы и время.

Одним из существенных факторов, влияющих на коэффициент разбрызгивания, является диаметр сварочной проволоки.

Установлено, что при увеличении диаметра проволоки коэффициент разбрызгивания возрастает как в среде чистого углекислого газа, так и при использовании смесей Ar+ $\text{CO}_2$ . Однако при этом именно смеси с высоким содержанием аргона позволяют значительно смягчить этот эффект за счёт более плавного и контролируемого переноса капель металла в зону сварки.

Кроме того, обеспечивается характерный чашеобразный профиль проплавления основного металла, аналогичный таковому при сварке в  $\text{CO}_2$ , но при этом с улучшенным качеством и равномерностью формирования шва.

По результатам анализа известных составов газовых смесей и способов сварки можно заключить, что использование смеси  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  является наилучшим выбором для механизированной сварки. Такая смесь сочетает в себе преимущества аргона как инертного газа (стабильность дуги, минимизация разбрызгивания) и активного участия  $\text{CO}_2$  в обеспечении достаточной глубины проплавления.

Эта комбинация обеспечивает оптимальный баланс между механическими характеристиками сварного соединения, технологичностью процесса и экономической эффективностью.

При добавке даже 1-5 % углекислого газа в аргон повышаются устойчивость горения дуги и прочностные характеристики сварного шва, такие как, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и ударная вязкость.

А также при добавке в углекислый газ 8, 10, 20, 30, 50% аргона, также повышается стабильность горения дуги и качество формирования шва.

Выводы:

1. Установлено, что смесь защитных газов, по сравнению со сваркой в чистых газах аргоне или углекислом газе предпочтительнее из-за повышения стабильности горения сварочной дуги, а, следовательно, стабильность параметров сварного шва.
2. Добавка аргона к углекислому газу приводит к равномерной ширине шва, а также снижению вероятности таких дефектов, как подрезы, наплывы и грубая чешуйчатость.
3. При использовании смесей с высоким содержанием аргона (более 75 %) приводит к значительному снижению разбрызгивания и размеров брызг.

4. Добавка аргона до 80% обеспечивают стабильный струйный перенос металла.
5. Добавка аргона к углекислому газу от 20 до 80 %. Приводит к повышению прочности сварного соединения. Наибольшее временное сопротивление разрыву достигается при использовании смесей с содержанием аргона с 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>, где прочность превышает показатели соединений, выполненных в чистом CO<sub>2</sub> на 10-15 %.
6. Увеличением доли аргона в смеси приводит к увеличению ударной вязкости сварного шва.
7. Добавка аргона к углекислому газу повышает стойкость к зарождению и распространению хрупких разрушений.
8. Добавка аргона к углекислому газу улучшает гигиенические и экологические показатели.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. А.А. Кайдалов, А.Н. Гаврик, Эффективность применения защитных газовых смесей при дуговой сварке сталей, «Сварщик», № 4 (80) 2011[Электронный ресурс]. URL: <http://mathey-russia.ru/about/pub/stati-i-obzory/effektivnost-primeneniya-zashhitnyh-gazovyh-smesej-pri-dugovoj-svarke-stalej.html>
2. А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров, О потерях электродного металла при дуговой сварке в условиях комбинированной газовой защиты, «Вестник Белорусско-Российского университета» № 3 (44), 2014.
3. А.В. Крюков, Н.В. Павлов, Газовые смеси как способ совершенствования процессов сварки mig/mag, «Современные проблемы науки и образования» 2014. № 6. С. 36.
4. А.О. Коротеев, Е. А. Фетисова, В. П. Куликов, Особенности дуговой сварки высокопрочных низколегированных сталей с двухструйной коаксиальной подачей компонентов защитной газовой смеси, « Вестник Белорусско-Российского университета» 2020, № 1 (66), С. 46-57.
5. А.Т. Дибец, В.Г. Гордонный, Сварка в газовых смесях стали 30Х2Н2М, «Автоматическая сварка» №7, 1969.
6. Акулов А.И. и др Технология и оборудование сварки плавлением, М-Л., Машиностроение, 1977. – 425 с
7. В.В. Забара, Исследование влияния состава газовой защиты при сварке в защитных газах на качество свариваемого металла, «Студенческий вестник ДДМА» с.7-15, 2018.
8. В.Г. Свечинский, С.Т. Римский, Ю.Н. Петров, Особенности тонкой структуры металла швов, сваренных в защитных газах, «Автоматическая сварка» № 8, 1974.

9. В.К. Лебедев, Н.И. Каховский, В.С. Савченко, В.Ю. Кондратьев, Сварка в защитных газах соединений низкоуглеродистых высоколегированных сталей по щелевой разделке, «Автоматическая сварка», №5, 1977.
10. В.Н. Бучинский, Н.М. Воропай, Особенности импульсно дуговой сварки сталей в смеси аргона с углекислым газом, «Автоматическая сварка» №3, 1978.
11. В. М. Белоконь, А. О. Коротеев, О сварке в двух струях защитного газа, «Вестник Белорусско-Российского университета», №4, (37) 2012.
12. Влияние состава защитного газа на процесс MAG –сварки низколегированных и углеродистых сталей [Электронный ресурс]. URL: <https://welder.stc-paton.com/pdf/welderua201401.pdf>
13. Влияние состава защитного газа на качество сварного соединения при сварке среднелегированных мартенситно-бейнитных сталей [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24359636>
14. Г.И. Лащенко, Г.П. Демьяненко, Влияние состава защитного газа на разбрызгивание металла при сварке с повышенной скоростью, «Автоматическая сварка» №10, 1976.
15. Защитные газовые смеси на основе Аргона [Электронный ресурс]. URL: [https://ihsantechgaz.kz/sites/default/files/product\\_images/primenenie\\_gazov\\_yh\\_smesey\\_v\\_svarke\\_260\\_kb.pdf](https://ihsantechgaz.kz/sites/default/files/product_images/primenenie_gazov_yh_smesey_v_svarke_260_kb.pdf)
16. К 70-летию изобретения в СССР сварки в CO<sub>2</sub> [Электронный ресурс]. URL: [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/126798/1/978-5-9544-014-8\\_2023\\_037.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/126798/1/978-5-9544-014-8_2023_037.pdf)
17. Н.В. Павлов, Применение методов математического моделирования для определения технологических параметров процесса сварки с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси защитных газов, «Автореферат» 2012.
18. Новиков О.М., Радько Э.П., Иванов Е.Н., Иванов Н.С. Разработка новых технологий дуговой сварки в защитных газах на основе применения

- пульсацтй газových потоков и потенциалов ионизации  $\wedge$  Сварщик – профессионал. – 2006. - № 6. – С. 10-13, 16.
- 19.Н.П. Роцупкин, Н. А. Близнец, Н.М. Медведев и др Опыт производственного применения защитных газových смесей на основе аргона заводами В/О «Союзстальконструкция» // Полуавтоматическая сварка. – 1984. – № 3. – С. 51-53.
- 20.Н.Я. Титов, Г.А. Бельчук, Н.В. Мельник, Механизированная сварка плавящимся электродом в газовой смеси по узкому зазору, «Автоматическая сварка» № 2, 1973.
- 21.Потаповский А.Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монографии/ А.Г. Потаповский, Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 208 с
- 22.Потаповский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М., «Машиностроение», 1974, 240с.
- 23.Применение защитных газов в сварочном производстве (обзор) [Электронный ресурс]. URL: <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2014/pdfarticles/06/4.pdf>
- 24.Повышение экономической эффективности дуговой сварки углеродистых сталей в защитной среде путем внедрения смеси газов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30319822>
- 25.Повышение стойкости металла шва к возникновению кристаллизационных трещин при сварке ст.3.сп посредством замены углекислого газа на смесь газов [Электронный ресурс] : Шаг в науку №3/2017 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36964613> (дата обращения: 19.09.2024).
- 26.С.П. Сорокин, Г.В. Орлик, А.Г. Орлик, Н.В. Коберник, А.Л. Галиновский, Р.С. Михеев, Влияние защитного газа на структуру и свойства стойких

- против абразивного износа покрытий, «Упрочняющие технологии и покрытия» Том 14, № 11, 2018.
27. Сварка в смеси активных газов [Аркадий Ефимович Аснис] (djvu) [Электронный ресурс]. URL: <https://coollib.com/b/569770>
28. Сварка и свариваемые материалы: В 3 – х т. Т. 1. Свариваемость материалов: справ. изд./под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Metallurgia, 1991 – 528с.
29. Федоренко Г.А. , Иванова И.В., Синяков К.А. Совершенствование технологического процесса сварки в защитных газах на ветру// Сварочное производство. – 2010. - № 1. – С. 6 – 13.
30. Цыган Б.Г. Сопротивление усталости сварных кузовов пассажирского вагона, выполненных сваркой в CO<sub>2</sub>, И Ar<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> // Автоматическая сварка. – 1998. – №10. – С. 42-46
31. Kah, P., Suoranta, R., & Martikainen, J. Advanced Gas Metal Arc Welding Processes. \*International Journal of Advanced Manufacturing Technology\*. – 2013. – Vol. 67 № 1-4. – P. 655-674.
32. Kumar, A., & Sundarrajan, S. Optimization of Welding Parameters for MIG Welding of Austenitic Stainless Steel Using Taguchi Method. \*Journal of Materials Processing Technology\*. – 2009. – Vol. 209 № 5. – P. 2201-2207.
33. Lancaster, J. F. The Physics of Welding. Pergamon Press. – 1986. – 450 p.
34. Modern problems of science and education [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/en/article/view?id=15482>
35. Norrish, J. Advanced Welding Processes: Technologies and Process Control. Woodhead Publishing. – 2006. – 328 p.
36. Zhang, Y. M., & Li, P. Characteristics of Welding and Arc Behaviour in Pulsed GMAW with Different Shielding Gases. Welding Journal. – 2001. – Vol. 80 № 12. – P. 271-279.
37. Lancaster, J. F. The Physics of Welding. Pergamon Press. – 1986. – 450 p.