

621.79  
С-24

9

А.Е.АСНИС, Л.М.ГУТМАН,  
В.Р.ПОКЛАДИЙ, Я.М.ЮЗЬКИВ

# СВАРКА В СМЕСИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ

(Ндиф. + Ност.)  $< 4 \text{ мл/100 г}$



АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР  
Ордена Ленина  
и ордена Трудового Красного Знамени  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона

А. Е. АСНИС, Л. М. ГУТМАН,  
В. Р. ПОКЛАДИЙ, Я. М. ЮЗЬКИВ

---

# СВАРКА В СМЕСИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ

Под редакцией  
доктора технических наук  
А. Е. АСНИСА

КИЕВ «НАУКОВА ДУМКА» 1982

Сварка в смеси активных газов / Аснис А. Е., Гутман Л. М., По-  
кладий В. Р., Юзькив Я. М. — Киев : Наук. думка, 1982. — с. 216.

В монографии приведены результаты исследований процесса сварки в смеси углекислого газа и кислорода с увеличенным вылетом электрода стандартной проволокой и проволокой с цирконием типа Св-08Г2СЦ. Рассмотрены вопросы нагрева, плавления и переноса электродного металла при сварке в активных газах, описаны металлургические особенности процесса и возможности повышения стойкости швов против образования пор и трещин, вопросы уменьшения разбрызгивания и приваривания брызг к свариваемому металлу. Приведены механические свойства швов и сварных соединений, а также их конструкционная прочность. Процесс рекомендуется для сварки ответственных конструкций, а также конструкций, эксплуатирующихся в условиях Севера.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами сварки.

Ил. 82. Табл. 63. Библиогр.: с. 204—212 (192 назв.).

Рецензенты В. Ф. Мусияченко, Б. М. Шинкарев

Редакция технической литературы

БИБЛИОТЕКА  
31206-024  
А 122/104-82 238-82. 2704080000

© Издательство «Наукова думка», 1982

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы сварка в защитных газах получила широкое распространение. Значительная часть конструкций сваривается в углекислом газе. Однако этот процесс обладает некоторыми недостатками — повышенными разбрызгиванием металла и привариваемостью брызг, особенно при использовании электродной проволоки диаметром 1,6—2,0 мм.

Д. А. Дудко, В. К. Любавским, Н. М. Нечкожиловым, А. Г. Потаповским, И. И. Зарубой, Б. С. Касаткиным, [Н. И. Каховским] и другими выполнен ряд работ по улучшению процесса. Одним из путей стабилизации процесса является увеличение степени окислительной способности защитного газа путем добавления кислорода. По этому направлению пошла Х. Секигучи и И. Масумото.

В Институте электросварки (ИЭС) им. Е. О. Патона АН УССР с целью улучшения процесса выполнены исследования по сварке в смеси углекислого газа и кислорода с применением проволоки, содержащей цирконий (Св-08Г2СЦ), и удлиненного вылета. Этот процесс обеспечивает резкое снижение разбрызгивания и приваривания брызг при одновременном повышении производительности.

В результате исследований установлена возможность полуавтоматической и автоматической сварки в смеси углекислого газа и кислорода с обычным и увеличенным вылетом проволоки Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ углеродистых и низколегированных конструкционных сталей. С учетом технологических факторов определен оптимальный состав смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

Исследована взаимосвязь между сопротивлением вылета электрода и параметрами режима сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . Оказалось, что зависимость тока от вылета при прочих равных условиях имеет нелинейный характер: четырехкратное увеличение вылета снижает сварочный ток на 30—40%. Для получения неизменного тока, а следовательно, глубины проплавления, увеличение вылета должно сопровождаться увеличением скорости подачи электродной проволоки и напряжения холостого хода. Это позволяет повысить скорость сварки угловых швов.

Для исследования зависимостей переноса металла при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  от вылета электрода применялась скоростная киносъемка, выполняемая синхронно с осциллографированием процесса. Удлинение вылета при неизменном токе приводит к увеличению массы капель и снижению частоты их перехода в сварочную ванну. Удлинение вылета электрода сокращает потери металла на разбрызгивание, что связано с ограничением тока короткого замыкания и сил, действующих

пл. влияю. Замена  $\text{CO}_2$  смесью  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  благодаря увеличению окисленности капли резко снижает привариваемость брызг к изделию при сварке.

Стойкость металла швов, выполненных в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , против образования пор и горячих трещин возрастает по сравнению со стойкостью швов, сваренных в углекислом газе. Кислород в смеси способствует более интенсивному протеканию реакций и, как следствие, снижению содержания водорода, углерода и кремния в швах.

Большое значение имеет изучение вопросов технологии сварки, аппаратуры, необходимой для сварки в смеси углекислого газа и кислорода, металлургических особенностей разработанного процесса.

ВНИИавтогенмашем с участием ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР разработан однопостовой смеситель газов УКП-1 и многопостовой — рамповый УКР-1, обеспечивающий питание до 100 сварочных постов. В последнее время при участии Барнаульского аппаратурно-механического завода созданы конструкции автоматизированных установок смешения газов УСД-1А и УСД-1Б. Эти установки позволяют работать при низком давлении на входе углекислого газа и кислорода, плавно регулировать состав газов, анализировать и записывать его в процессе сварки.

Сварка в смеси активных газов способствует улучшению физико-механических свойств швов и конструкций. Швы, сваренные в смеси активных газов, имеют более плавный переход к основному металлу, чем швы, выполненные в углекислом газе. Это улучшает работу конструкций при динамических нагрузках.

При использовании сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электродной проволоки облегчается сварка сталей с повышенным содержанием углерода и легирующих примесей. Температура предварительного подогрева может быть снижена.

Сварку в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  электродной проволокой диаметром 2 мм с увеличенным вылетом можно использовать для изготовления конструкций, эксплуатирующихся при низких температурах, взамен механизированной сварки проволокой диаметром 1,2 мм в  $\text{CO}_2$ .

Комплекс исследований конструктивной прочности соединений, сваренных в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом, показал, что они отвечают требованиям, предъявляемым к соединениям, выполненным электродами с фтористо-кальциевым покрытием типа Э50А. При сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  электродной проволокой диаметром 2 мм с увеличенным вылетом на 35—40% повышается производительность процесса сварки. Количество наплавленного металла достигает 14—15 кг/ч.

Разработанные технология и оборудование для сварки в смеси активных газов широко внедрены на различных предприятиях страны и позволяют получать большой экономический эффект.

Авторы выражают благодарность Д. Г. Дубинскому и В. А. Позднякову за помощь в работе и Н. П. Очеретной за участие в оформлении рукописи.

## ЗАЩИТНЫЕ ГАЗЫ И МЕТОДЫ ИХ СМЕШЕНИЯ

Газы занимают одно из ведущих мест среди средств защиты, применяемых при сварке плавлением. Защитный газ, подаваемый через специальные устройства в зону сварки, вытесняет воздух и предохраняет расплавленный металл от вредного воздействия кислорода и азота атмосферы. Иногда защитным газом заполняют специальные камеры или с его помощью удаляют из этих камер воздух (сварка в вакууме).

Сначала, предлагая в качестве защитной среды газ, исследователи считали, что он должен быть инертным по отношению к расплавленному металлу. Так, в 40-х годах в США был предложен способ сварки вольфрамовым электродом в аргоне. Дальнейшие исследования показали, что в качестве защитного газа могут применяться и активные газы. В 1952 г. в Советском Союзе был разработан способ сварки в углекислом газе. Получение бездефектных швов в активном окислительном газе, как и является углекислый газ, обеспечивается благодаря применению электродных проволок, содержащих повышенное количество элементов-раскислителей. Сварка в углекислом газе получила широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом.

### 1. Сварка в углекислом газе и методы ее совершенствования

Углекислый газ (двуокись углерода, углекислота) бесцветный, со слабым запахом, с резко выраженными окислительными свойствами. Поставляется в жидком виде в баллонах и изотермических цистернах или в твердом состоянии в виде сухого льда.

При температуре 0°C и давлении 0,1 МПа плотность двуокиси углерода составляет 1,977 кг/м<sup>3</sup>. Углекислый газ тяжелее воздуха и формирует эффективную защитную оболочку над зоной сварки.

В соответствии с ГОСТ 8050—76 углекислота производится в жидком состоянии трех марок: сварочная, пищевая и техническая. Эти марки отличаются друг от друга по содержанию CO<sub>2</sub> и количеству примесей — воздуха, влаги, окиси углерода, минеральных масел. Для сварки следует применять углекислоту сварочную и пищевую с дополнительной осушкой. Применять техническую углекислоту не рекомендуется.

Имеется обширная литература по требуемой чистоте углекислого газа [40, 58, 143, 154, 161], однако мнения исследователей о максимально допустимом количестве примесей в нем весьма противоречивы. Это подтверждается стандартами на углекислоту, действующими в различных странах, которыми предусматривается содержание основного продукта в следующих количествах (%):

СССР		ФРГ	99,7—99,9
сварочная	99,5	Франция	98,0
пищевая	98,8	Япония	99,0—99,5
США	99,0	Австрия	99,9

Одни исследователи считают, что углекислый газ, применяемый для сварки, должен иметь чистоту 99,8%, общее количество примесей должно быть не более 0,2%, из них водорода и азота не более 0,1% каждого [150]. В работе [192] показано, что максимально допустимое содержание примесей не должно превышать 0,05%, допустимое содержание воздуха должно составлять 0,1% и требуемая чистота CO<sub>2</sub> для сварки должна быть не ниже 99,85%.

Нет единого мнения и о допустимой влажности применяемого для сварки углекислого газа. Однако большинство исследователей считают, что он должен иметь температуру насыщения (точку росы) не выше минус 35—40° С [145, 147, 166, 180, 190]. Повышенная влажность может привести к образованию пор в швах и способствовать образованию холодных трещин в металле.

Углекислый газ является побочным продуктом ряда производств. Его получают из отходящих газов при брожении спирта, пива, расщеплении жиров, при производстве синтетического аммиака и метанола, а также из дымовых газов промышленных котельных, сжигающих уголь,

природный газ и другое топливо. Стоимость углекислого газа значительно ниже стоимости аргона и смесей на его основе.

Сварка плавящимся электродом в углекислом газе получила широкое распространение в нашей стране и за рубежом для изготовления конструкций из углеродистых и низколегированных сталей. Этому способствовал ряд преимуществ указанного способа сварки перед ручной дуговой (высокая производительность, низкая стоимость, минимальные затраты времени на освоение, широкая возможность механизации и автоматизации), а также перед полуавтоматической сваркой под флюсом (возможность сварки в различных пространственных положениях, наблюдение за ванной и дугой).

Сварка в углекислом газе не лишена и недостатков. Основные из них следующие:

повышенное разбрызгивание расплавленного металла. Брызги засоряют сопло, что может вызвать образование пор в шве вследствие нарушения защиты. Они привариваются к основному металлу и требуют последующей зачистки;

характерная бугристость шва с более резким переходом к основному металлу, чем под флюсом;

узкое и глубокое проплавление основного металла при сварке на больших токах, препятствующее хорошей дегазации металла шва и способствующее образованию горячих трещин.

Имеются различные способы устранения указанных недостатков и совершенствования сварки в углекислом газе. Одни из них улучшают формирование и внешний вид шва, другие снижают разбрызгивание или влияют не только на плавление и перенос металла, но и на металлургические стороны процесса сварки.

Улучшение формирования шва при сварке в углекислом газе достигается применением гофрированной проволоки [181]. Дуга, перемещаясь по гофрам, совершает колебательные движения, которые обеспечивают хорошее формирование шва. При автоматической сварке применяют также специальные устройства для колебания конца электрода. При этом получают шов с небольшим усилением и плавным переходом к основному металлу.

Поскольку зачистка брызг является тяжелой и трудоемкой операцией, большое внимание уделяется способам снижения разбрызгивания при сварке в углекислом газе.

Для этих целей в сварочную цепь вводят дополнительное сопротивление, снижающее величину тока короткого замыкания и уменьшающее разбрызгивание [42, 43]. Применяют системы оптимизации режимов сварки, обеспечивая протекание процесса в области с минимальным разбрызгиванием. Для достижения мелкокапельного переноса и снижения разбрызгивания предложено создавать на электродной проволоке «шейки» на определенном расстоянии друг от друга или подогревать конец электрода дополнительным источником тепла [172]. Стабильное горение дуги и уменьшение разбрызгивания достигается также при применении проволок сплошного сечения специального легирования [174] или с поверхностью, активированной соединениями цезия и щелочных металлов [33, 146, 169, 170]. Сварка возможна на постоянном токе прямой и обратной полярности, а также на переменном токе. Активирующие, а также стабилизирующие и шлакообразующие вещества могут наноситься в канавки, прорезанные на поверхности проволоки, или вводиться в ее сердечник [74].

В США запатентована проволока [171], представляющая собой сердечник, покрытый тонким слоем токопроводящего флюса. Сварку производят постоянным током обратной полярности. Применение этой проволоки обеспечивает незначительное разбрызгивание, стабильное горение дуги. Внешний вид шва хороший, увеличивается глубина проплавления и производительность сварки.

В ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР проведены исследования по созданию электродной проволоки сплошного сечения, легированной редкоземельными элементами. Эта проволока в широком диапазоне режимов обеспечивает получение стабильного процесса горения дуги практически без разбрызгивания. Так, если общие потери при сварке в углекислом газе проволокой Св-08Г2С диаметром 2 мм на токе 350 А составляют более 13%, а количество налипших брызг достигает 3%, для проволоки, легированной редкоземельными элементами, они не превышают 2,5 и 0,3% соответственно.

Разработан ряд порошковых проволок для сварки в углекислом газе: ПП-АН4, ПП-АН8, ПП-АН10 и др. [96, 98], которые значительно расширяют технологические и металлургические возможности сварки. Применение порошковых проволок позволяет обеспечить более высокую производительность, лучший внешний вид шва, меньшее

разбрызгивание по сравнению с проволоками сплошного сечения.

В работах [48, 134, 168] описан способ сварки сплошной или порошковой проволокой в углекислом газе с введением в зону сварки магнитного флюса, что дает возможность резко снизить разбрызгивание, получить швы с хорошим формированием, удовлетворительными прочностными и пластическими свойствами. Исследовалась также возможность улучшения процесса сварки в углекислом газе путем добавления синтетических шлаков [137] или применения плавного флюса (сварка электродом повышенного диаметра переменным током в углекислом газе по слою флюса) [116].

Для улучшения металлургической обработки и дополнительного легирования металла шва, повышения производительности труда, улучшения внешнего вида швов при сварке в углекислом газе в разделку кромок предлагается укладывать стержень с основным покрытием [67, 136].

Рассмотрев приведенные способы совершенствования процесса сварки в углекислом газе, можно отметить, что из всего многообразия способов в промышленности наиболее широко используется лишь сварка порошковой проволокой. Однако порошковые проволоки по сравнению с проволокой сплошного сечения отличаются более сложной технологией изготовления, большим выделением пыли и газов в процессе сварки, что ухудшает условия работы.

Существует еще одно важное направление, позволяющее в той или иной мере устранить недостатки, присущие сварке в углекислом газе, — применение для защиты зоны сварки смесей газов. Это направление наряду с применением порошковой проволоки наиболее интенсивно развивается как в нашей стране, так и за рубежом. Для изготовления конструкций из углеродистых и низколегированных сталей чаще всего используются смеси инертных газов с активными и смеси активных газов.

Обзор защитных газов, проведенный Комиссией XII Международного института сварки, показал, что за рубежом чаще всего используются смеси инертных газов с активными на основе аргона. Содержание аргона в этих смесях колеблется от 60 до 99% [185]. Ввиду высокой стоимости аргона затраты на защитную среду при сварке возрастают в 3—5 раз [132]. Высокая стоимость этих

сварки), а также интенсивное излучение при сварке, требующее применения водоохлаждаемых держателей при полуавтоматической сварке и дополнительной защиты оператора, сдерживают широкое применение смесей на основе аргона для изготовления конструкций общего назначения.

## 2. Смесей активных газов

Основой смеси активных газов чаще всего является углекислый газ. В качестве дополнительных компонентов в основном используется кислород, в отдельных случаях вводят также азот и водород.

Кислород вводится как добавка к инертным и активным газам. Содержание кислорода в смеси  $Ar + O_2$  колеблется от 1 до 12%, в тройной смеси  $Ar + CO_2 + O_2$  — от 2 до 5% [185]. Кислород является активным окислителем, и при его введении в защитную среду необходимо применять проволоки с достаточным количеством раскислителей. Добавка кислорода в защитную смесь позволяет повысить стабильность горения дуги, интенсифицировать

Таблица 1. Зависимость влажности кислорода от давления в баллоне

Остаточное давление в баллоне, МПа	Содержание водяных паров, г/м³	Температура насыщения (точка росы), °C
15	0,060—0,107	От —50 до —45
6	0,163—0,203	От —35 до —33
5	0,203—0,228	От —33 до —32
3	0,280—0,500	От —30 до —25

металлургические процессы, улучшить формирование, снизить содержание водорода в металле шва.

В нашей стране для сварки используют технический кислород по ГОСТ 5583—78. По этому стандарту выпускается кислород трех сортов с содержанием кислорода 99,7; 99,5 и 99,2% по объему. Содержание водяных паров не должно превышать 0,07 г/м³ (по температуре насыщения не выше —43°C). Необходимо отметить, что влажность кислорода также повышается с понижением давления в баллоне (табл. 1) [14].

Азот при сварке находит ограниченное применение. Его используют в качестве защитной среды при сварке меди, по отношению к которой азот является практически

инертным газом. Как аустенизатор азот иногда используют для сварки аустенитных сталей, применяя проволоки, металл которых способен в большом количестве растворять азот. При сварке углеродистых сталей азот вызывает образование пор в швах.

Для сварки конструкций, работающих в условиях низких температур, в защитный газ предлагают вводить в небольшом количестве азот, а в электродную проволоку — нитридообразующие элементы, такие, как алюминий, титан, цирконий, ниобий, ванадий [173]. Образующиеся при сварке нитриды измельчают структуру и повышают вязкость металла шва на низкоуглеродистых и низколегированных сталях повышенной прочности. Наилучшие механические свойства получены при содержании нитридов в шве 0,01—1,0%.

Водород — это горючий газ с сильными восстановительными свойствами. Он нашел применение в качестве защитной среды при атомно-водородной сварке, которая в настоящее время практически не применяется. Сварка плавящимся электродом в атмосфере водорода характеризуется низкой устойчивостью дуги и плохим формированием шва, а также образованием большого количества пор. Водород находит ограниченное применение в смеси с аргоном для сварки аустенитных сталей и цветных металлов [185]. Содержание водорода в смеси колеблется от 5 до 20%. В Японии предложен процесс дуговой сварки конструкционных сталей в углекислом газе с добавкой более 0,1% водорода, имеющих поверхность, загрязненную маслом, ржавчиной, краской и т. п. без образования дефектов. Сварку выполняют порошковой проволокой [69]. Водород также используется как добавка к аргону при микроплазменной сварке.

Воздух является смесью активных газов — азота, кислорода и некоторого количества водорода в виде водяных паров. При сварке открытой дугой углеродистой или кремнемарганцевой проволокой сплошного сечения получить качественные швы не удастся из-за плохих механических свойств и большой пористости. Причиной низкого качества швов является прежде всего азот.

Для нейтрализации вредного воздействия азота и кислорода атмосферы при сварке открытой дугой предложена проволока сплошного сечения, легированная алюминием, титаном, церием, цирконием, т. е. элементами, имеющими большое химическое сродство к кислороду и



азоту и образующими с ними прочные нитриды и окислы [72, 108]. Сварка открытой дугой позволяет механизировать процесс на открытых площадках (в строительстве, судостроении, судоремонте и др.). Проволоки сплошного сечения подобного состава для сварки без дополнительной защиты были предложены и другими исследователями [68, 160]. Применяется также самозащитная порошковая проволока, сердечник которой содержит шлакообразующие, газообразующие вещества, защищающие расплавленный металл от азота и кислорода атмосферы, а также легирующие элементы [96].

Смесь углекислого газа и кислорода была предложена Х. Секигучи и И. Масумото [66] и нашла широкое применение для сварки углеродистых и низколегированных сталей.

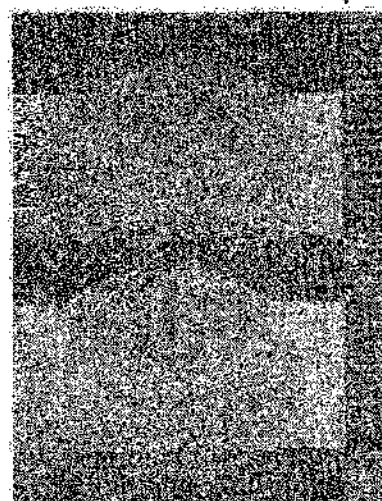
Институт электросварки АН УССР предложил сварку в смеси углекислого газа и кислорода проволокой сплошного сечения с увеличенным вылетом электрода [3]. Сварка выполняется проволокой марки Св-08Г2С по ГОСТ 2246—70 и Св-08Г2СЦ по ТУ 14-4-791—76 или ТУ 14-287-19—78. Исследования показали, что эти марки проволок содержат достаточное количество кремния и марганца для раскисления металла жидкой ванны и получения плотных швов. Дешевизна защитной среды, минимальные затраты при внедрении и ряд особенностей этого процесса, изложенных ниже, предопределили широкое применение способа сварки на заводах нашей страны.

Оптимальный состав смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  должен обеспечивать хорошее формирование и внешний вид шва; стабильность процесса сварки в широком диапазоне режимов с минимальным разбрызгиванием; высокую стойкость швов против образования пор и трещин и требуемые свойства швов при использовании стандартных проволок, применяемых для сварки в углекислом газе.

Для выбора оптимального состава смеси производили наплавку валиков, сварку стыковых и угловых соединений, образцов для определения стойкости швов против пор и трещин. Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 1,6—2,0 мм, так как эти проволоки получили наиболее широкое распространение для изготовления конструкций из углеродистых и низколегированных сталей. Состав смеси изменяли ступенчато, и сварку образцов выполняли при объемной доле кислорода 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 и 50%, остальное — углекислый газ. Контроль

состава смеси в экспериментах осуществлялся газоанализатором ВТИ-2.

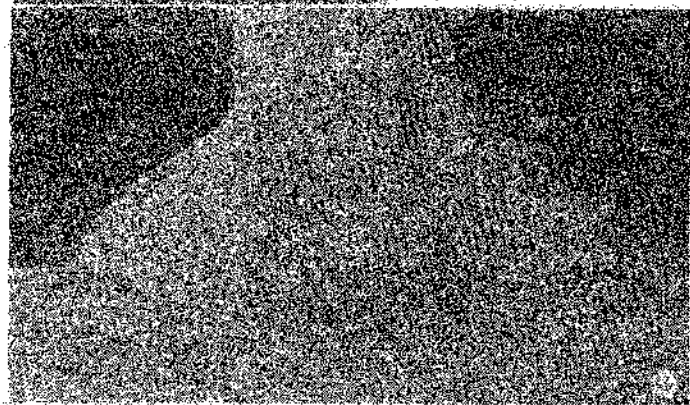
Влияние защитного газа на формирование и внешний вид шва при наплавке и сварке в угол показано на рис. 1.



При сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  несколько снижается высота усиления, уменьшается бугристость. Наиболее плавный переход от шва к основному металлу наблюдается при содержании кислорода в смеси 20—30%. Дальнейшее увеличение содержания кислорода приводит к

Рис. 1. Влияние защитной среды на формирование швов:

а, б —  $\text{CO}_2$ ; в, г — 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$ .



появлению грубой чешуйчатости на поверхности швов, большого количества шлака, а при увеличении количества кислорода свыше 50% — к ухудшению формирования шва и во многих случаях к появлению в них пор.

Следует отметить, что внешний вид шва при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  отличается от вида шва, сваренного в углекислом газе. При сварке в смеси оптимального состава



на поверхности шва образуется тонкий слой шлаковой корки. После отделения корки шов имеет серебристый цвет.

При сварке многопроходного (до 5—6 проходов) шва зачистка шлаковой корки не требуется, так как она переплавляется и практически не влияет на химический состав и механические свойства швов.

Как показали исследования [11], стойкость металла шва против образования горячих трещин возрастает при добавке кислорода к углекислому газу и достигает максимума при составе смеси 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$ . Таким образом, состав смеси 70—80%  $\text{CO}_2$  + 30—20%  $\text{O}_2$  был принят за оптимальный по формированию и внешнему виду шва, а также по сопротивляемости против образования горячих трещин.

Показателем стабильности процессов сварки считают допустимые отклонения энергетических параметров режима и соответствующие им геометрические размеры шва от номинальных значений. Проведенные исследования процесса горения дуги при сварке в смеси оптимального состава в широком диапазоне режимов с помощью осциллографирования и изучения макрошлифов продольного и поперечного сечений шва показали высокую устойчивость процесса, а также стабильность провара по длине и ширине шва.

Дальнейшие исследования технологических и металлургических особенностей процесса сварки в смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$  проводились в основном с защитой дуги оптимальным составом смеси (70—80%  $\text{CO}_2$  + 30—20%  $\text{O}_2$ ).

### 3. Смесители газов

Готовая смесь углекислого газа и кислорода требуемого состава не выпускается. Смешивание газов осуществляется непосредственно на заводах, использующих эту смесь для сварки. Такой метод приготовления смеси наиболее целесообразен, так как большинство заводов имеет централизованные кислородные станции и сложившуюся систему питания постов углекислым газом. К тому же физически невозможно получить однородную смесь  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$  при давлениях, выше критического, при котором происходит сжижение углекислого газа, так как компоненты будут находиться в различных агрегатных состояниях.

Смешивание газов можно осуществить простейшим ме-

тодом с помощью редукторов и ротаметров. Состав смеси, подаваемой в держатель, регулируется изменением расхода газов с помощью редукторов и измеряется ротаметром типа РС-3. При концентрации смешиваемого газа не выше 10% расход его следует измерять ротаметром РС-3А. Каждый ротаметр должен быть отградуирован путем пересчета характеристики его, определяемой заводом-изготовителем, применительно к воздуху. Такая схема получения смеси не обладает достаточной надежностью поддержания постоянного состава смеси газов в процессе сварки. С развитием сварки в смеси газов возникла необходимость создания специальных приборов-смесителей.

К смесителям предъявляются следующие основные требования: получение смеси любого требуемого состава и автоматическое поддержание его в процессе сварки; обеспечение расхода смеси, достаточного для получения бездефектного шва; возможность использования смесителей как при индивидуальном, так и при централизованном питании сварочных постов газами; простота в обслуживании и надежность в эксплуатации.

ВНИИавтогенмаш разработал конструкцию прибора-смесителя двух газов ИАГ-1-63, который предназначен для получения аргоно-гелиевой смеси и может быть использован для смешивания любых других газов. Составы газовых смесей устанавливаются на основании расчета размеров дозирующих отверстий в сменных калиброванных вставках. Смеситель ИАГ-1-63 имеет пропускную способность до 5 м³/ч. Расходы смеси изменяются от 0,5 до 2,5 м³/ч. Максимальное давление смешиваемых газов до 0,5 МПа. Масса смесителя 3,35 кг.

Недостатком указанного смесителя является низкое давление смешиваемых газов на входе. Так как давление кислорода в цеховых магистралях может превышать его в 1,5—2 раза, возникла необходимость в применении редуктирующего устройства для снижения величины магистрального давления кислорода перед входом его в смеситель. Это приводит к усложнению оборудования и увеличению его стоимости. Кроме того, конструкция смесителя ИАГ-1-63 имеет также некоторые недоработки.

В связи с изложенным был создан более совершенный универсальный смеситель углекислого газа и кислорода. ВНИИавтогенмаш с участием ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР разработал специальный постовой смеситель углекислого газа и кислорода.

Устройство смесителя для получения двухкомпонентных газовых смесей определенного процентного состава основано на зависимости расхода газа, проходящего через калиброванные отверстия — расходные дюзы, от проходного сечения дюзы и давления газа перед ней.

Расход газа  $V$ , проходящего через калиброванное отверстие, подсчитывается по формуле [25]

$$V = \eta f A \omega \tau p, \quad (1.1)$$

где  $V$  — расход газа,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\eta$  — коэффициент расхода газа (для круглого отверстия  $\eta = 0,8-0,85$ );  $f$  — проходное сечение расходной дюзы,  $\text{мм}^2$ ;  $A$  — коэффициент рода газа;  $\omega$  — коэффициент перепада давления на расходной дюзе (приведенный расход);  $\tau$  — температурный коэффициент, учитывающий отклонение температуры газа перед расходной дюзой от нормальной ( $+20^\circ\text{C}$ );  $p$  — избыточное давление газа перед расходной дюзой.

Коэффициент рода газа зависит от его физических свойств и подсчитывается по формуле

$$A = \frac{9,31}{\gamma_n} \sqrt{\frac{k}{(k+1)R'}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (1.2)$$

где  $\gamma_n$  — плотность газа при нормальных условиях;  $k$  — показатель адиабаты;  $R'$  — отношение универсальной газовой постоянной  $R$  к молярной массе газа.

Коэффициент перепада давления газа на расходной дюзе

$$\omega = \frac{V}{V_{\text{кр}}}. \quad (1.3)$$

Большинство расходных дюз работает при сверхкритическом перепаде давления, поэтому можно принять  $\omega = 1$ . Температурный коэффициент

$$\tau = \sqrt{\frac{293}{273+t}}. \quad (1.4)$$

Принцип действия смесителя углекислого газа с кислородом основан на выравнивании давлений смешиваемых газов перед расходными дюзами ( $P_{\text{CO}_2} = P_{\text{O}_2} = P_{\text{вх}}$ ).

В соответствии с формулой (1.1) расходы смешиваемых газов с достаточной для практики точностью можно считать пропорциональными площадям сечений соответствующих расходных дюз вне зависимости от давления газа перед

дюзами и величиной отбора смеси газов потребителем:

$$\frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{O}_2}} = \frac{\eta_{\text{CO}_2} A_{\text{CO}_2} \omega_{\text{CO}_2} \tau_{\text{CO}_2} P_{\text{вх}}}{\eta_{\text{O}_2} A_{\text{O}_2} \omega_{\text{O}_2} \tau_{\text{O}_2} P_{\text{вх}}} \approx N \frac{f_{\text{CO}_2}}{f_{\text{O}_2}}, \quad (1.5)$$

где

$$N = \frac{A_{\text{CO}_2} \omega_{\text{CO}_2} \tau_{\text{CO}_2}}{A_{\text{O}_2} \omega_{\text{O}_2} \tau_{\text{O}_2}} = \text{const.}$$

В смесителе газов (рис. 2) получение требуемого состава смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  осуществляется двумя расходными

дюзами 5 и 6, проходные сечения которых прямо пропорциональны содержанию газов в смеси. Выравнивание давлений углекислого газа и кислорода осуществляется регулирующей частью смесителя. Принцип работы регулирующей части состоит в следующем.

Если углекислый газ к смесителю не подведен, редуцирующий клапан 2 клапанной пружиной 1 прижимается к седлу 3 и кислород из камеры высокого давления не поступает в камеру низкого давления и к расходной дюзе 5. При подаче углекислого газа к смесителю он поступает к расходной дюзе 6 и в подмембранное пространство, отжимает мембрану 7 и через шток 8 — редуцирующий клапан 2. Через образовавшийся зазор между клапаном 2 и седлом 3 кислород поступает в рабочую камеру смесителя и к расходной дюзе 5. Усилие регулирующей пружины 4 подбирается таким образом, чтобы давление кислорода перед дюзой 5 всегда было равным давлению углекислого газа на входе в смеситель (перед дюзой 6).

Таким образом, конструкция смесителя обеспечивает равенство давлений углекислого газа и кислорода перед расходными дюзами и, следовательно, пропорциональное сечению расходных дюз смешивание этих газов вне зависимости от их потребления и давления перед смесителем. Смеситель обеспечивает автоматическое поддержание заданного состава смеси и возможность получения требуемого расхода газов.

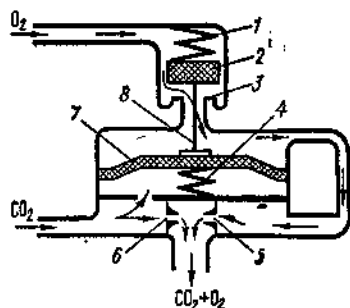


Рис. 2. Принципиальная кинематическая схема пистолетного смесителя углекислого газа и кислорода.

В результате проведенной экспериментальной и производственной проверки опытного образца постового смесителя был создан серийный смеситель газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  марки УКП-1 (рис. 3), технические характеристики которого приведены ниже:

Давление на входе в смеситель, МПа:	
углекислый газ	0,02—0,1
кислород	0,15—1,5
Концентрация газов в смеси, %	
углекислый газ	70
кислород	30
Точность поддержания заданного состава смеси, %	±5
Расход смеси состава 70% $\text{CO}_2$ и 30% $\text{O}_2$ при давлении углекислого газа 0,05 МПа, л/мин	$20 \pm 2$
Габаритные размеры, мм	$200 \times 110 \times 160$
Масса, кг	2,15

Смеситель УКП-1 предназначен для смешивания углекислого газа и кислорода, поступающих из баллонов или

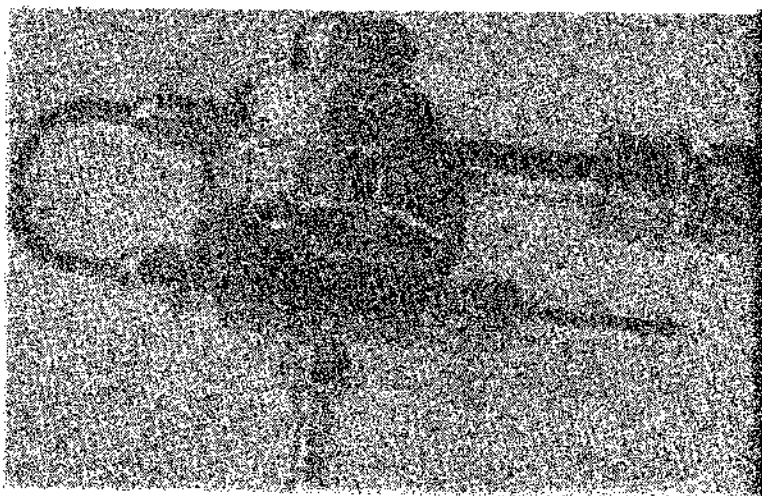


Рис. 3. Постовый смеситель газов УКП-1.

магистрала, и автоматического поддержания постоянным заданного состава и расхода смеси. Смеситель присоединяется накидной гайкой к кислородопроводу или через редуктор, понижающий давление кислорода, к баллону. Смеситель отрегулирован на состав смеси 70%  $\text{CO}_2$  +

30%  $\text{O}_2$ . Для получения смеси другого состава необходимо заменить расходные дюзы. Диаметр отверстий в дюзах указан в табл. 2. Возможны и другие сочетания диаметров отверстий в расходных дюзах для получения смеси того или иного состава, но при этом будет изменяться пропускная способность смесителя. Смеситель может быть использован и для смешивания других газов, но площадь сечения отверстия расходных дюзов должна быть изменена с учетом плотности и физических свойств смешиваемых газов.

Поскольку большинство предприятий страны осуществляет питание сварочных постов углекислым газом от рампы с баллонами или изотермических цистерн, возникла необходимость разработки рампового смесителя газов для централизованного питания сварочных постов ВНИИ-автогенмашем совместно с ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР создан рамповый смеситель газов с возможностью одновременного питания 90—100 постов. Ниже приведена техническая характеристика смесителя УКР-1:

Давление на входе в смеситель, МПа:	
углекислый газ	0,5—0,8
кислород	0,5—1,5
Пропускная способность смесителя при давлении смешиваемых газов перед расходными шайбами (дюзами) 0,1 МПа, м³/ч	60
Содержание кислорода в смеси, %	20—30
Габаритные размеры, мм	$980 \times 490 \times 290$
Масса, кг	40,2

На рис. 4 приведена схема смешивания углекислого газа с кислородом рамповым смесителем марки УКР-1. Смеситель состоит из следующих основных узлов: регулятора давления кислорода 1, регулятора давления углекислого газа 6, пускового редуктора 7, смесительного коллектора 3, расходных дюз 5 и 2 и пускового вентиля 4. В качестве регуляторов давления в рамповом смесителе использованы серийные редукторы типа ДКР-250 и ДКР-500. Принцип смешения газов в рамповом смесителе анало-

Таблица 2. Зависимость состава смеси от диаметра отверстий в расходных дюзах

Диаметр отверстий в дюзах, мм		Состав смеси об %	
$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$
1,6	0,3	90	10
2,0	0,7	85	15
1,5	0,6	80	20
1,6	0,8	75	25
1,45	0,8	70	30
1,4	1,0	60	40
1,0	0,8	50	50

гичен принципу смешивания их в постовом смесителе. Внешний вид смесителя представлен на рис. 5.

В настоящее время постовые (марки УКР-1) и рамповые (марки УКР-1) смесители углекислого газа с кислородом

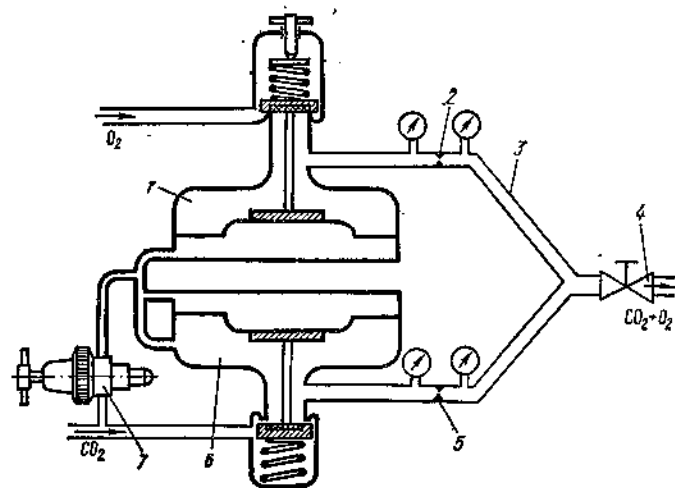


Рис. 4. Схема рампового смесителя газов.

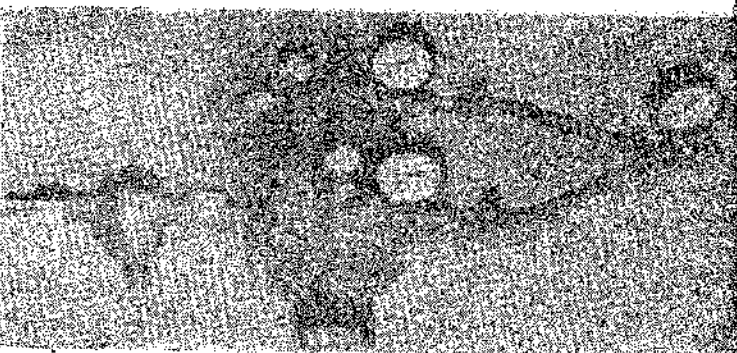


Рис. 5. Рамповый смеситель УКР-1.

дом выпускаются серийно Барнаульским аппаратно-механическим заводом.

Опыт работы смесителей в производственных условиях показал, что они отвечают требованиям, предъявляемым к приборам — смесителям газов, — и могут быть рекомендованы для эксплуатации на заводах, применяющих свар-

ку в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . Однако рамповый смеситель газов УКР-1 наряду с определенными достоинствами (высокая степень унификации с массовой аппаратурой, простота и надежность конструкции) имеет отдельные недостатки: невысокая точность поддержания процентного состава смеси и непостоянство ее давления при значительном изменении количества одновременно работающих сварочных постов.

ВНИИавтогенмаш совместно с Барнаульским аппаратно-механическим заводом и при участии ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР разработал конструкции автоматизированных установок УСД-1А и УСД-1Б, предназначенных для получения двухкомпонентной газовой смеси — углекислого газа и кислорода. Ниже приведены технические характеристики этих установок:

Давление газов на входе в установку, МПа		
углекислый газ		0,2—0,6
кислород		0,3—1,6
Давление смеси на выходе, МПа		(0,035 ± 0,05) ± 0,01
Концентрация газов в смеси, %		
углекислый газ		70—95
кислород		5—30
Наибольший расход смеси, м³/ч		60
Точность поддержания заданного состава смеси, %		±2
Напряжение питания, В		220
Частота, Гц		50
Габаритные размеры, мм	УСД-1А	УСД-1Б
	1600 × 930 × 860	1400 × 500 × 660
Масса, кг	220	160

Установка УСД-1А оснащена автоматическим газоанализатором, позволяющим вести автоматически запись состава смеси. Внешний вид смесителя показан на рис. 6. Установка УСД-1Б выпускается заводом без газоанализатора. Установки работают по одной принципиальной

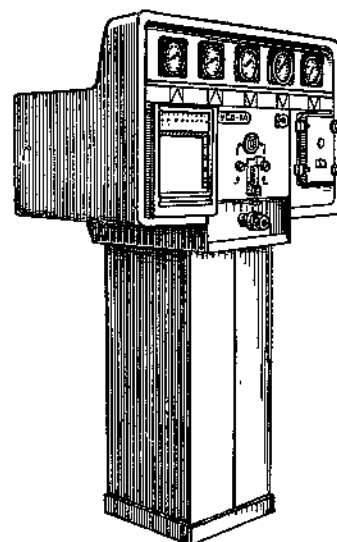


Рис. 6. Установка для смешения газов УСД-1А.

схеме, позволяющей получать высокую точность поддержания процентного состава смеси и стабилизировать ее давление в заданном диапазоне независимо от количества одновременно работающих сварочных постов.

Наличие в установке УСД-1А электронного регистрирующего газоанализатора позволяет быстро и плавно изменять процентное содержание смеси в любую сторону, при этом контроль состава смеси осуществляется по показаниям самописца газоанализатора.

Рамповые установки для смешения газов одновременно обеспечивают работу 50—70 сварочных постов. При не большой переделке смесители можно использовать для одновременного питания смесью  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  до 100 сварочных постов. Установки УСД-1А и УСД-1Б выпускаются серийно Барнаульским аппаратурно-механическим заводом.

## Глава вторая

### ВЛИЯНИЕ ВЫЛЕТА ЭЛЕКТРОДА НА ПЛАВЛЕНИЕ И ПЕРЕНОС МЕТАЛЛА В ДУГЕ

Защитная среда при сварке плавящимся электродом существенно влияет на перенос металла с электрода на изделие, а также на величину потерь его на угар и разбрызгивание. Теплопроводность дуговой атмосферы, степень ее ионизации и диссоциации, величина активных ионов, силы, действующие на каплю, зависят от состава защитной среды и определяют вид переноса металла. Например, если при сварке кремнемарганцевыми проволоками в среде аргона можно получить струйный перенос металла в дуге, то при сварке в углекислом газе этими проволоками струйного переноса достичь невозможно.

Плавление электродной проволоки и перенос капель через дугу зависят не только от рода защитной среды, но и от энергетических параметров процесса сварки, полярности, состава и диаметра электрода. Существенное влияние на режимы сварки, а значит, и на перенос металла оказывает вылет электрода.

Вылетом электрода условно считают участок проволоки от токоподводящего наконечника до оплавленного торца. Многими исследователями установлено, что длина вылета электрода является важным параметром режимов сварки и в значительной степени влияет на скорость плавления электродной проволоки [20, 71, 75, 86, 156, 162, 191].

Увеличение вылета электрода вызывает подогрев его протекающим током и повышает скорость плавления [70, 183]. Вылет электрода — один из составных элементов цепи сварочного тока. Введение того или иного участка разогретого электрода в сварочную цепь увеличивает ее сопротивление, что приводит к изменению тока в этой цепи, а следовательно, и величины коэффициента плавления электрода.

# 1. Зависимость параметров режима сварки от длины вылета

Длина вылета электрода  $L$  влияет на рабочее напряжение дуги и режим сварки. Изменение ее влечет за собой перераспределение напряжения на дуге и вылете электродной проволоки. Так как напряжение на дуге влияет на геометрические параметры шва — ширину, высоту усиления, коэффициент формы и, по данным работы [88], на интенсивность металлургических реакций при сварке в защитных газах, представляло интерес исследовать величину действительного напряжения на дуге при различных вылетах электрода.

Непосредственное измерение напряжения на дуге в процессе сварки связано со значительными трудностями. В исследовательской и производственной практике при выборе режимов сварки с обычным вылетом электрода не учитывают падение напряжения на вылете  $U_v$  и допускают, что величина действительного напряжения на дуге  $U_d$  равна величине суммарного напряжения  $U_c = U_d + U_v \approx U_d$ . Однако такое допущение при сварке с увеличенным в два-три раза вылетом может привести к значительной погрешности при определении напряжения на дуге. Особенно важно знать величину напряжения на дуге в производственных условиях при подборе режима сварки. Величину  $U_d$  можно определить путем косвенного измерения, т. е. фиксируя падение напряжения на вылете электрода и суммарное напряжение. В связи с этим возникла необходимость в изучении величины падения напряжения на вылете электродной проволоки и зависимости  $U_v$  от различных факторов — длины вылета, напряжения холостого хода источника питания, скорости подачи проволоки и др.

Проведенные ранее исследования по определению падения напряжения на вылете относятся к сварке электродами большого диаметра под флюсом [70] или к сварке в углекислом газе тонкой (диаметром до 1,2 мм) проволокой [39]. Данные по измерению падения напряжения на вылете проволоки марки Св-08Г2С диаметром 1,6—2,0 мм в углекислом газе и смеси его с кислородом отсутствуют. Была разработана методика экспериментального определения падения напряжения на вылете для указанных условий.

Падение напряжения на вылете измерялось осциллографом Н-700, вибратор которого был соединен с токо-

подводящим мундштуком и специальным медным щупом, перемещавшимся по оси, параллельной вылету электрода. Вылет изменялся ступенчато от минимального (20 мм) до максимального (80 мм) значения. Через каждые 20 мм вылета производилась запись режимов сварки и падения напряжения на вылете, снимаемого медным щупом, жестко зафиксированным на расстоянии 3 мм от торца электрода. При расположении щупа на указанном расстоянии от торца исключалась ошибка при измерении падения напряжения на вылете, которая могла бы быть вызвана дополнительным нагревом щупа теплом дуги. Действительно, нагрев электрода дугой распространяется не более чем на 1,5—2,0 мм от торца электрода [71].

Измерение градиента потенциала вылета производили и другим методом. При постоянных параметрах режима сварки ( $I_{св}$ ,  $U_d$ ,  $v_{св}$ ) величина вылета была неизменной (80 мм), а щуп плавно перемещался в процессе сварки от токоподводящего наконечника к торцу электрода. Это позволило сравнить величину падения напряжения в контрольных точках, где она измерялась различными способами. Сварка производилась на постоянном токе обратной полярности. Падение напряжения измерялось на проволоке марки Св-08Г2С диаметром 1,6—2,0 мм следующего химического состава, %: С 0,07; Мп 1,9; Si 0,78; S 0,021; Р 0,016.

Сварка выполнялась аппаратом ТС-35 с устройством для увеличенного вылета и полуавтоматом А-765. Опыты

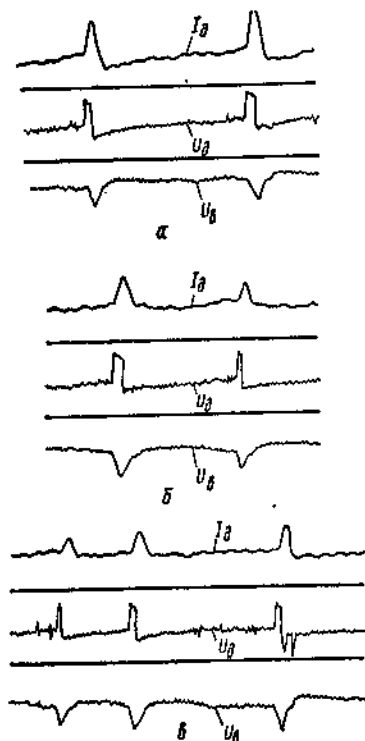


Рис. 7. Типичные осциллограммы тока, напряжения на дуге и вылете при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволокой диаметром 1,6 мм ( $I_{св} = 250$  А;  $U_d = 27$  В): а —  $L = 40$  мм;  $U_v = 4$  В; б —  $L = 60$  мм;  $U_v = 6$  В; в —  $L = 80$  мм;  $U_v = 7,5$  В.



проводились с защитой дуги углекислым газом и смесью  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

На рис. 7 приведены типичные осциллограммы процесса сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , дополненные кривыми падения напряжения для различных вылетов электрода. При этом значение сварочного тока и напряжения на дуге поддерживались постоянными. Как видно из осциллограмм, характер изменения во времени кривой падения напряжения на вылете идентичен характеру изменения кривой сварочного

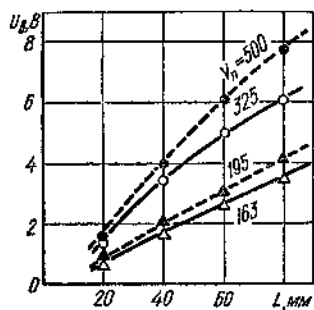


Рис. 8. Зависимость падения напряжения на вылете от его длины при постоянной скорости подачи проволоки диаметром 1,6 мм (штриховые кривые) и 2,0 мм (сплошные).

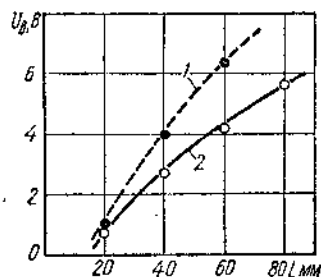


Рис. 9. Зависимость падения напряжения на вылете от его длины при неизменном токе ( $I_{\text{св}} = 300$  А):  
1 — проволока диаметром 1,6 мм;  
2 — проволока диаметром 2,0 мм.

тока. Увеличение длины вылета электродной проволоки при постоянстве тока, напряжения на дуге и других параметров режима приводит к росту падения напряжения на нем. Падение напряжения на вылете исследовалось в зависимости от следующих факторов: величины вылета и сварочного тока, напряжения холостого хода источника питания, скорости подачи электродной проволоки.

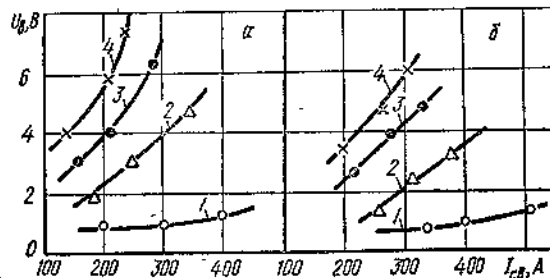
На рис. 8 приведены зависимости  $U_{\text{в}} = f(L)$ , построенные для различных скоростей подачи проволоки. Как следует из рис. 8, повышение скорости подачи проволоки в 2—2,5 раза при обычном вылете (20 мм) практически не изменяет величину  $U_{\text{в}}$ . При сварке с увеличенным (80 мм) вылетом такое же увеличение подачи повышает падение напряжения на вылете до 3—4 В.

При сварке от источника тока с пологопадающей внешней характеристикой изменение величины напряжения холостого хода в широком диапазоне не сказывается на па-

дении напряжения на вылете для данной длины его и расчет на одну и ту же величину с увеличением длины вылета. Это позволяет сделать вывод о том, что повышение напряжения холостого хода источника питания приводит к увеличению напряжения на дуге. В производственных условиях переход с обычного на увеличенный вылет электрода с сохранением постоянного напряжения на дуге должен сопровождаться увеличением напряжения холостого хода источника питания.

Очевидно, что наибольшее влияние на изменение величины падения напряжения на вылете должны оказывать

Рис. 10. Вольтамперные характеристики вылета электродной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,6 мм (а) и 2,0 мм (б):  
1 —  $L = 20$  мм;  
2 —  $L = 40$  мм;  
3 —  $L = 60$  мм;  
4 —  $L = 80$  мм



длина вылета и величина сварочного тока. Исследование этих зависимостей были проведены для двух случаев:

$$U_{\text{в}} = f(L) \text{ при } I_{\text{св}} = \text{const};$$

$$U_{\text{в}} = f(I_{\text{св}}) \text{ при } L = \text{const}.$$

На рис. 9 представлена экспериментальная зависимость падения напряжения на вылете от его длины при токе 300 А (первый случай). Нелинейность зависимости  $U_{\text{в}} = f(L)$  может быть объяснена непропорциональным изменением удельного сопротивления кремнемарганцевой проволоки с повышением температуры ее подогрева.

Зависимость падения напряжения на вылете от тока имеет также нелинейный характер. Крутизна кривых функциональной зависимости  $U_{\text{в}} = f(I_{\text{св}})$  (второй случай) возрастает с увеличением свободного конца электрода. Это приводит к более интенсивному выделению тепла на вылете и повышению температуры его подогрева током. Зависимость  $U_{\text{в}} = f(I_{\text{св}})$  (рис. 10) позволяет подсчитать мощность, которая выделяется на вылете при прохождении сварочного тока.

С увеличением вылета электрода выделяющаяся на нем мощность увеличивается (рис. 11). Как следствие, темпера-

тура электрода, поступающего в зону дуги, возрастает, что приводит к изменению падения напряжения в столбе дуги и приэлектродных областях.

При сварке с увеличенным вылетом мощность перераспределяется между вылетом электрода и сварочной дугой. Большая часть мощности источника затрачивается на подогрев вылета, вследствие чего снижается мощность, приходящаяся на дугу, и ее проплавливающая способность.

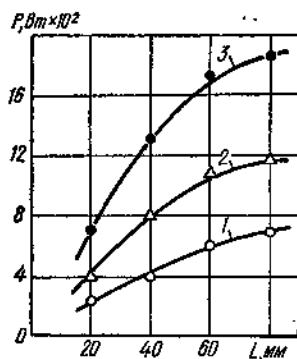


Рис. 11. Зависимость мощности, выделяющейся на вылете электродной проволоки диаметром 2,0 мм, от его длины при различной скорости подачи проволоки:

1 —  $v_{\text{п}} = 163$  м/ч; 2 —  $v_{\text{п}} = 240$  м/ч; 3 —  $v_{\text{п}} = 325$  м/ч.

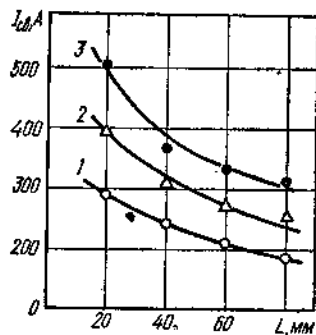


Рис. 12. Зависимость величины тока от длины вылета электродной проволоки диаметром 2,0 мм при различной скорости подачи проволоки: 1—3 — то же, что на рис. 11.

Характер изменения мощности и падения напряжения на вылете электрода необходимо учитывать при определении режимов сварки и выборе источника питания.

Учитывая, что падение напряжения на электроде зависит от тока и длины вылета, его можно аналогично с напряжением дуги выразить динамическим сопротивлением  $\left. \frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial I_{\text{св}}} \right|_{L = \text{const}}$ ,

и градиентом потенциала по длине  $\left. \frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial L} \right|_{I_{\text{св}} = \text{const}}$ .

Исследование динамического сопротивления вылета в широком диапазоне режимов сварки позволяет сделать следующий вывод: динамическое сопротивление вылета низколегированной проволоки практически мало зависит от скорости ее подачи и сварочного тока, а находится в функциональной зависимости от величины вылета. Четырех-

кратное увеличение вылета электрода повышает динамическое сопротивление вылета в шесть-семь раз.

При неизменном значении сварочного тока с увеличением вылета градиент потенциала в направлении к торцу электрода возрастает и величина его при сварке с  $L = 60$  мм (для проволоки диаметром 1,6 мм) может достигать 0,1 В/мм.

Таблица 3. Зависимость параметров режима сварки от длины вылета электродной проволоки диаметром 1,6 мм

$L$ , мм	$v_{\text{п}}$ , м/ч	$I_{\text{св}}$ , А	$U_{\text{х.х.}}$ , В	$U_{\text{с}}$ , В	$U_{\text{в}}$ , В	$U_{\text{д}}$ , В
20	195	200	34	27	1,0	26,0
40	195	180	34	28	2,0	26,0
60	195	160	34	29	3,0	26,0
80	195	140	34	30	4,0	26,0
20	300	300	38	28	1,0	27,0
40	300	240	38	30	3,0	27,0
60	300	220	38	31	4,0	27,0
80	300	190	38	32	5,0	27,0
20	500	400	38	30	1,3	28,7
40	500	340	38	32	4,1	27,9
60	500	300	38	33	6,4	26,6
80	500	240	38	34	7,6	26,4
40	224	200	34	27	2,0	25,0
60	278	200	34	27	3,9	23,1
80	415	200	34	27	6,5	20,5
40	450	300	38	29	3,9	25,1
60	500	300	38	30	6,3	23,7

Примечание. Приведенные параметры являются средними из пяти — семи замеров.

Влияние вылета на ток и напряжение на дуге изучали при двух вариантах сварки.

По первому варианту кратное, ступенчатое увеличение вылета проводилось при неизменных скорости подачи электродной проволоки и напряжении холостого хода  $U_{\text{х.х.}}$  источника питания. По второму варианту сварки вылет удлинляли при постоянной величине  $U_{\text{х.х.}}$  источника и постоянном значении  $I_{\text{св}}$ , что достигалось соответствующим изменением скорости подачи проволоки.

Табл. 3 и рис. 12 иллюстрируют влияние изменения длины вылета при сварке проволокой соответственно диаметром 1,6 и 2,0 мм (источник питания ВС-600 и ВС-1000,  $v_{\text{св}} = 20$  м/ч, расход смеси состава 70%  $\text{CO}_2$  +

+30% O<sub>2</sub> — 12—15 л/мин) на соответствующие изменения параметров режима.

При прочих равных условиях зависимость тока от вылета электрода (см. рис. 12) нелинейна. Как видно из табл. 3 и рис. 12, четырехкратное увеличение вылета при  $U_n = \text{const}$  снижает ток на 30—40%. Это объясняется введением в сварочную цепь дополнительного сопротивления, которым является предварительно подогретый вылет электродной проволоки. Уменьшение тока связано с падением напряжения на вылете.

Напряжение на дуге практически остается постоянным при сварке по первому варианту, если вылет электрода увеличивают, сохраняя первоначальное напряжение холостого хода источника питания. По-видимому, это связано со следующим: уменьшение сварочного тока сопровождается ростом внешней составляющей дуги, т. е. увеличением суммарного напряжения (см. табл. 3), однако при этом повышается и напряжение на вылете, так что напряжение на дуге остается неизменным или уменьшается незначительно (не более чем на 8%). Результаты экспериментов показывают, что изменение вылета в широких пределах при  $U_n = \text{const}$  практически не влияет на напряжение дуги, а следовательно, на ширину шва. Это особенно важно при полуавтоматической сварке, в процессе которой длина вылета колеблется вследствие изменения угла наклона электрода, изделия или утомления сварщика.

При сварке по второму варианту с сохранением постоянной величины тока для всех случаев изменения вылета (скорость подачи проволоки изменялась) снижается напряжение на дуге и ширина шва уменьшается. Это вызвано тем, что внешняя составляющая дуги остается неизменной при  $I_{св} = \text{const}$ , а падение напряжения на вылете возрастает по мере удлинения последнего. Как указывалось выше, для поддержания первоначального напряжения на дуге с удлинением вылета необходимо повышать напряжение холостого хода на величину падения напряжения на вылете.

Существенными параметрами вылета являются его динамическое сопротивление и градиент потенциала по длине. Так как ток и напряжение на дуге зависят от величины сопротивления вылета, можно полагать, что вылет влияет и на перенос электродного металла при дуговой сварке.

Характер распределения напряжения по длине вылета является нелинейным, с увеличением тока нелинейность

проявляется сильнее. По-видимому, характер такого распределения должен совпадать с характером распределения температур по длине вылета.

## 2. Зависимость температурного поля электрода от длины вылета

Изучение нагрева электродного металла и распределения температур по длине вылета позволяют оценить условия, в которых происходит его плавление.

Экспериментальные данные и расчетные зависимости для определения температурных полей кремнемарганцевого электрода диаметром 1,6 и 2,0 мм при сварке в CO<sub>2</sub> и смеси CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> отсутствуют. Известные методы расчета температуры нагрева вылета электрода усложняются для случая сварки с увеличенным (более 40 мм) вылетом, так как при этом необходимо знать коэффициенты, определяемые специальными опытами [103].

Были определены зависимости температуры нагрева вылета кремнемарганцевой проволоки при различных условиях сварки и проведено сравнение расчетных и экспериментальных величин. Электродная проволока в процессе сварки нагревается протекающим током, а также теплом дуги до температуры плавления [1, 2]. Разогрев электродной проволоки теплом дуги при сварке с удлиненным вылетом незначителен, как и нагрев проволоки при сварке с обычным вылетом [71], и им можно пренебречь.

Анализ результатов предварительных опытов по определению изменения температуры по длине вылета от его величины для низколегированной проволоки показал, что известные методы расчета температур [103, 111] справедливы лишь для вылетов электрода длиной не более 40 мм. Расчетные значения температур для вылетов проволоки длиной более 40 мм значительно ниже экспериментальных. Это различие, вероятно, может быть объяснено тем, что в расчетах обычно пользуются усредненной величиной удельного сопротивления электродной проволоки  $\rho_{ср}$ .

Однако если величина  $\rho$  для аустенитного электрода изменяется незначительно в широком интервале температур (рис. 13) и зависимость  $\rho = f(T)$  линейна, то для кремнемарганцевого электрода удельное сопротивление в зависимости от температуры нагрева изменяется значительно (от  $30 \cdot 10^{-8}$  до  $130 \cdot 10^{-8}$  Ом · м при изменении температуры от 50 до 1200°С), а зависимость  $\rho = f(T)$  нелинейна. Эту

особенность изменения удельного сопротивления низколегированной проволоки от температуры следует учитывать при определении температуры нагрева вылета током, в противном случае усреднение значения  $\rho$  для широкого интервала температур приводит к большим ошибкам в расчетах.

Зависимость удельного сопротивления кремнемарганцевой проволоки от температуры в интервале от 20°С до температуры плавления имеется в работе [64]. В этой работе химический состав кремнемарганцевой проволоки

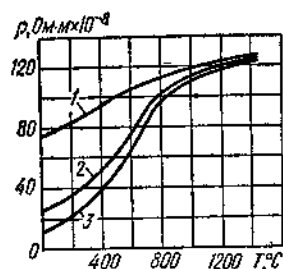


Рис. 13. Удельное сопротивление электродных проволок [64]:  
1 — аустенитная; 2 — кремнемарганцевая; 3 — низкоуглеродистая.

коэффициенты в выражениях (2.1) и (2.2) имеют следующие значения:  $A = 95,714 \cdot 10^{-6}$ ;  $B = 24,07 \cdot 10^{-3}$ ;  $D = 24,41$ ;  $E = 24,455 \cdot 10^{-3}$ ;  $F = 89,98$ .

Различие в зависимости  $\rho = f(T)$  до температуры 800°С (квадратичная) и выше 800°С (линейная) объяснено Н. Г. Остапенко [64]. Нагрев вылета электрода при сварке определялся по уравнению теплового баланса.

Уравнение теплового баланса электрода без покрытия имеет вид

$$c\gamma \frac{dT}{dt} = 0,24\rho i \alpha (T - T_0) \frac{4}{d_e}, \quad (2.3)$$

где  $T$  — температура нагрева электрода, °С;  $\frac{dT}{dt}$  — мгновенная скорость нагрева, °С/с;  $i$  — плотность тока, А/см²;  $\rho$  — удельное сопротивление электродной проволоки, Ом·см;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(см²·°С);  $T_0$  — начальная температура электрода, °С;  $d_e$  —

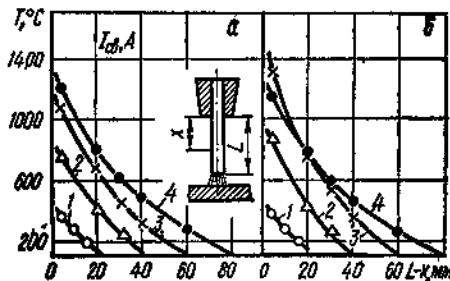
диаметр электрода, см;  $c\gamma$  — объемная теплоемкость, Дж/(см³·°С).

Решение уравнения (2.3) с усредненным значением  $\rho_{\text{ср}}$  приводит к большим погрешностям при расчете температур по длине вылета. Поэтому уравнение (2.3) решали, учитывая изменение  $\rho$  в интервале температур 20—1500°С.

Подставляя (2.1) в (2.3), а затем (2.2) в (2.3) и решая уравнения, получаем зависимость температуры вылета электрода от плотности тока и времени нагрева вылета.

Рис. 14. Распределение температуры по длине вылета проволоки диаметром 1,6 мм:

а — при неизменной скорости подачи проволоки ( $v_{\text{п}} = 195$  м/ч; 1 —  $I_{\text{св}} = 200$  А; 2 —  $I_{\text{св}} = 180$  А; 3 —  $I_{\text{св}} = 160$  А; 4 —  $I_{\text{св}} = 140$  А); б — при постоянном токе ( $I_{\text{св}} = 200$  А; 1 —  $v_{\text{п}} = 195$  м/ч; 2 —  $v_{\text{п}} = 224$  м/ч; 3 —  $v_{\text{п}} = 278$  м/ч; 4 —  $v_{\text{п}} = 415$  м/ч).



Полученные зависимости имеют следующий вид:  
для  $T \leq 800^\circ\text{C}$

$$T = 490 \lg (1,12 \cdot 10^{-8} i^2 t + 0,484) - 125; \quad (2.4)$$

для  $T \geq 800^\circ\text{C}$

$$T = 800 + 4470 (0,73 e^{0,588 \cdot 10^{-8} i^2 t} - 1). \quad (2.5)$$

Расчет температуры нагрева свободного конца электрода для типичных режимов полуавтоматической сварки производился для двух вариантов. По первому варианту вылет увеличивали при неизменных скорости подачи проволоки и напряжении холостого хода источника, при этом изменялась величина сварочного тока.

По второму варианту сварки вылет удлиняли при постоянной величине  $U_{\text{х.х}}$  и постоянном значении  $I_{\text{св}}$ , что достигалось соответствующим изменением  $v_{\text{п}}$ . Подставляя полученные в экспериментах значения  $v_{\text{п}}$ ,  $I_{\text{св}}$ ,  $L$  в уравнения, вычисляли температурные поля для различных длин вылетов электродной проволоки.

Зависимость распределения температур по длине вылета электродной проволоки диаметром 1,6 мм представлена на рис. 14. Как видно из уравнений (2.4) и (2.5) и рис. 14, изменение кривых функциональной зависимости

$T = f(L)$  при температурах ниже  $800^\circ\text{C}$  носит тангенциальный характер, при повышении температуры подогрева вылета более  $800^\circ\text{C}$  изменение зависимости  $T = f(L)$  происходит по экспоненте.

При постоянной скорости подачи проволоки (сварка по первому варианту) предварительный подогрев свободного конца электрода возрастает пропорционально расстоянию от токоподвода до изделия независимо от диаметра сварочной проволоки. Из приведенных на рис. 14, а кривых видно, что при снижении величины сварочного тока ( $v_n = \text{const}$ ) температурный градиент возрастает с увеличением вылета электрода. Это объясняется тем, что преобладающее место в нагреве вылета электрода занимает не величина тока, а время его прохождения по электродной проволоке. Так, для проволоки диаметром 1,6 мм ( $v_n = 195 \text{ м/ч}$ ) с увеличением длины вылета от 20 до 80 мм величина тока снизилась почти в 1,5 раза (с 200 до 140 А), а температура подогрева вылета значительно возросла. Сравнивая кривые температурных полей различных длин вылетов и диаметров электродной проволоки, можно заметить, что повышение скорости подачи электрода при прочих равных условиях не вносит существенных изменений в зависимость нагрева вылета током. Удлинение свободного конца электрода во всех случаях приводит к увеличению количества тепла, выделяющегося на вылете электрода.

На рис. 14, б показано распределение температур по длине вылета при неизменной величине сварочного тока. Как видно, интенсивность подогрева вылета током, как и в случае неизменной скорости подачи проволоки, определяется расстоянием от торца токоподводящего наконечника до изделия. Увеличение расстояния приводит к повышению температуры на вылете проволоки.

Температурные кривые вылетов электрода длиной до 60 мм на рис. 14 с координатами температура — вылет не имеют точек пересечения. Это показывает, что увеличение свободного конца электрода от 20 до 60 мм всегда приводит к повышению его температуры. Удлинение вылета более 60 мм (при  $I_{\text{св}} = \text{const}$ ) не всегда вызывает повышение температуры в вылете сварочной проволоки. Как видно из рис. 14, б, на вылете электрода с  $L = 80 \text{ мм}$  имеется участок определенной длины, для которого значения температур ниже, чем для аналогичного участка электрода с  $L = 60 \text{ мм}$ . Снижение температуры с увеличением вылета свыше 60 мм можно объяснить следующим.

В уравнения (2.4) и (2.5) кроме величины плотности тока входит и значение  $t$  — время нахождения электрода под током, которое можно представить как

$$t = \frac{x}{v_n}, \quad (2.6)$$

где  $x$  — расстояние данной точки электрода от торца токоподводящего наконечника.

При неизменном значении плотности тока решающими факторами, влияющими на изменение температуры в вылете электрода, являются длина вылета и скорость подачи проволоки. При этом действие их противоположно: увеличение вылета повышает температуру самоподогрева электрода, а рост скорости подачи снижает нагрев вылета сварочной проволоки. Анализируя данные рис. 14, можно установить, что величина приращения длины вылета электрода  $\Delta L$ , выраженная в процентах, для вылета до 60 мм во всех случаях больше величины приращения скорости подачи проволоки, т. е.  $\Delta L > \Delta v_n$ . Естественно, что при этом условии температура предварительного подогрева электрода будет повышаться [см. (2.4) и (2.5)].

В приведенном выше случае величина приращения вылета при изменении его длины с 60 до 80 мм составляет 25%  $\left(\frac{80-60}{60} \cdot 100\right)$ , а приращение скорости подачи проволоки — 33%, иначе можно записать:  $\Delta L < \Delta v_n$ . Более быстрое приращение скорости подачи электродной проволоки (при  $I_{\text{св}} = \text{const}$ ) вызывает снижение температуры в вылете.

Таким образом, при постоянной величине сварочного тока и остальных параметров режима температура нагрева вылета зависит от величины отношения приращения длины вылета электрода к приращению скорости его подачи, причем если  $\frac{\Delta L}{\Delta v_n} > 1$ , то происходит рост температуры вылета, если  $\frac{\Delta L}{\Delta v_n} = 1$ , нагрев вылета остается неизменным, при  $\frac{\Delta L}{\Delta v_n} < 1$  температура вылета электрода снижается.

Из анализа экспериментальных данных установлено, что для реальных режимов полуавтоматической сварки для вылетов электрода с  $L \leq 60 \text{ мм}$  отношение  $\frac{\Delta L}{\Delta v_n}$  всегда больше единицы, т. е. любое увеличение вылета до 60 мм (при  $I_{\text{св}} = \text{const}$ ) повышает его температуру. Результаты

расчетов дают основание полагать, что оптимальная величина вылета составляет для проволоки диаметром 1,6 мм — 40 мм, для проволоки диаметром 2,0 мм — 60 мм, так как любое увеличение вылета от обычного значения 20 мм до 60 мм приводит к повышению его температуры и, как следствие, к увеличению скорости расплавления электродной проволоки.

С целью исследования зависимости нагрева вылета от его длины, а также сравнения опытных данных с расчетными производились непосредственные измерения температур различных по длине вылетов электродной проволоки диаметром 2,0 мм марки Св-08Г2С. Измерения температур в процессе сварки автоматом ТС-35 осуществляли термопарой (платино-платинородиевая), которая зачеканивалась в проволоку. Сварку выполняли на постоянном токе обратной полярности при неизменной скорости перемещения дуги (20 м/ч) и расходе защитной смеси газов  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  15 л/мин. Вылет электрода изменяли ступенчато (20, 40, 60 и 80 мм) и фиксировали температуру при неизменной скорости подачи проволоки. Изменение температуры регистрировали осциллографом Н-700 с высокочувствительными шлейфами.

Экспериментами установлено, что кривые температурных полей вылетов, измеренные в процессе сварки, отличаются от расчетных на расстоянии 3 мм от торца электрода. Различие температур объясняется тем, что на расстоянии 3 мм от торца электрода начинает сказываться повышение температуры нагрева электрода за счет тепла дуги, которое в приведенных расчетах не учитывалось. В остальных точках расчетные кривые удовлетворительно совпадают с экспериментальными.

Таким образом, из приведенных кривых зависимости температуры от длины вылета для различных условий сварки видно, что температура подогрева вылета током повышается в направлении плавящегося торца. Для обычной длины вылета значение  $T$  на расстоянии 5 мм от торца не превышает  $800^\circ\text{C}$ , а при увеличенной длине вылета вблизи торца электрода может достигать температуры плавления (например, кривая 3, рис. 14, б).

Высокая степень нагрева удлиненного вылета вблизи торца электрода обуславливает более интенсивное плавление проволоки, которое должно способствовать увеличению объема капли и изменению показателей переноса электродного металла.

### 3. Особенности плавления и переноса металла в дуге

Процесс плавления и переноса металла через жидкую промежуток достаточно полно изучен при сварке в инертных газах. Ему посвящены работы В. И. Дятлова, И. И. Зарубы, А. В. Петрова, В. Р. Варченко, Л. М. Ронского, А. Лесневича, А. А. Смита, Ямамото и других советских и зарубежных исследователей.

Разработаны показатели, характеризующие перенос электродного металла. К ним относятся усредненная частота переходов  $N_{\text{пр}}$ , равная количеству капель, переходящих в ванну за 1 с, либо средняя продолжительность жизни капли  $\tau_k$ , масса капли, переходящей в ванну  $m_{\text{ср}}$ , время короткого замыкания  $\tau_{\text{кз}}$  и др.

Вопросы плавления и переноса металла при сварке в углекислом газе с обычным вылетом электрода изучены достаточно полно [21, 31, 76, 78, 87, 89, 90, 110, 126].

В ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР исследовали влияние величины вылета и добавки кислорода к углекислому газу на процесс плавления и перенос металла.

Показатели переноса электродного металла определяли методом скоростной киносъемки синхронно с осциллографированием напряжения на дуге и сварочного тока. Съемка со скоростью 1500 кадров в секунду выполнялась кинокамерой СКС-1М. Осциллографирование электрических параметров режима сварки производилось с помощью осциллографа Н-700.

Синхронизация осуществлялась подачей общего сигнала на отметчики времени осциллографа кинокамеры. Для облегчения условий киносъемки дуга горела между электродом и пластиной, закрепленной на самоходной тележке.

Совместная обработка осциллограмм и кинограмм позволяет определить частоту переходов и массу капель. Частота переходов капель электродного металла  $N_{\text{пр}}$  определялась как отношение количества полных капель  $n_k$ , переход которых зафиксирован на киноплёнке или осциллограмме, к общему времени  $\Sigma\tau$ , которое отсчитывалось по отметчикам времени от первой капли до отрыва последней:

$$N_{\text{пр}} = \frac{n_k}{\Sigma\tau} \quad (2.7)$$

Средняя масса капли  $m_{\text{ср}}$  определялась как отношение массы электродной проволоки, расплавившейся за время  $\Sigma\tau$ , к числу полных капель  $n_k$ .



Сварка выполнялась автоматом с независимой скоростью подачи проволоки. Применялась электродная проволока марки Св-08Г2С диаметром 1,6 мм следующего химического состава, %: С 0,11; Si 0,83; Mn 1,92; S 0,021; P 0,013.

Расход углекислого газа и смеси 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$  составлял 10—13 л/мин в зависимости от режима сварки. В качестве источников питания при сварке с обычным вылетом электрода использовался селеновый выпрямитель.

Таблица 4. Зависимость показателей переноса от длины вылета электрода и защитного газа

L, мм	Защитный газ	$U_{\text{в}}$ , В	$I_{\text{к.з.}}$ , А	$U_{\text{к.з.}}$ , В	$v_{\text{п}}$ , г/с	Показатель переноса			
						$N_{\text{пр}}$ , с <sup>-1</sup>	$m_{\text{ср}}$ , г	$\tau_{\text{к}}$ , с	$\tau_{\text{к.з.}}$ , с
20	$\text{CO}_2$	25,1	575	5,6	1,04	20	0,052	0,05	0,005
20	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	25,1	550	5,1	1,04	24	0,044	0,03	0,006
40	$\text{CO}_2$	24,6	560	7,5	1,29	13	0,098	0,07	0,006
40	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	24,6	550	7,0	1,29	14,5	0,090	0,06	0,006
60	$\text{CO}_2$	30,2	530	11,0	1,62	12,5	0,129	0,09	0,007
60	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	30,2	500	10,5	1,62	14,0	0,116	0,08	0,005
80	$\text{CO}_2$	28,5	460	12,4	2,04	10,5	0,193	0,10	0,006
80	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	28,5	430	12,0	2,04	13,5	0,150	0,09	0,006

Примечание. Постоянный ток, обратная полярность  $I_{\text{св}} = 240\text{—}260$  А; расход газа 12 л/мин;  $d_{\text{э}} = 1,6$  мм.

ВС-300, для сварки с удлиненным (свыше 40 мм) вылетом для повышения холостого хода использовали два последовательно соединенных выпрямителя ВС-300.

В первой серии опытов при неизменном значении сварочного тока изучали влияние величины вылета на усредненную частоту переходов  $N_{\text{пр}}$ , массу капли  $m_{\text{ср}}$ , среднюю продолжительность ее существования  $\tau_{\text{к}}$ , время  $\tau_{\text{к.з.}}$  и величину тока короткого замыкания  $I_{\text{к.з.}}$  дугового промежутка. Результаты обработки кинограмм и осциллограмм процесса представлены в табл. 4. Как видно из таблицы, введение в зону дуги, горящей в атмосфере  $\text{CO}_2$ , кислорода в количестве 30% по объему приводит к увеличению частоты переходов и уменьшению массы капли. Это вызвано более интенсивным окислением металла капли и уменьшением его поверхностного натяжения.

Зависимость показателей переноса металла при сварке в смеси 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$  от длины вылета и величины

сварочного тока имеет тот же характер, что и при сварке в углекислом газе. Различие процессов состоит лишь в том, что при прочих равных условиях кислород в смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$  повышает частоту переходов и способствует измельчению капли.

Повышение температуры предварительного подогрева электрода с удлинением вылета приводит к возрастанию массы капель и снижению частоты их перехода в сварочную ванну. Особенность переноса металла при сварке с удлиненным вылетом электрода можно объяснить следующим. Рост массы капель вызван увеличением количества тепла, выделяющегося в вылете по мере его удлинения, и, как следствие, расплавлением относительно большого участка электродной проволоки. Снижение частоты перехода капель в ванну с повышением сопротивления вылета связано с увеличением средней продолжительности существования капли благодаря длительному времени нагрева электрода сварочным током.

Удлинение вылета при неизменном значении сварочного тока ( $I_{\text{св}} = \text{const}$ ) приводит к ограничению величины амплитуды тока короткого замыкания ( $I_{\text{к.з.}}$ ) (см. табл. 4). Четырехкратное увеличение обычного вылета электрода уменьшает величину  $I_{\text{к.з.}}$  на 20%, что объясняется нарастанием падения напряжения  $U_{\text{к.з.}}$  на участке токоподвода капли. Как известно, величина тока короткого замыкания оказывает существенное влияние на разбрызгивание металла.

Разбрызгивание является основным недостатком способа сварки в  $\text{CO}_2$ . Потери металла на разбрызгивание достигают максимальной величины в среднем диапазоне режимов.

По данным работы [91], разбрызгивание металла при сварке в диапазоне токов 280—380 А электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 2 мм может достигать 12—14%. Уменьшение диаметра проволоки смещает максимум разбрызгивания в сторону меньших значений сварочного тока.

Причины, вызывающие повышенное разбрызгивание в углекислом газе, до настоящего времени остаются невыясненными. Некоторые исследователи [87] связывают процесс разбрызгивания с окислением углерода в капле электродного металла, которое сопровождается образованием окиси углерода, скапливающейся в газовых пузырьках. При соответствующих условиях пузырьки взрываются. Наиболее правильным, по нашему мнению, является объяснение причин и механизма разбрызгивания, приведенное в работах

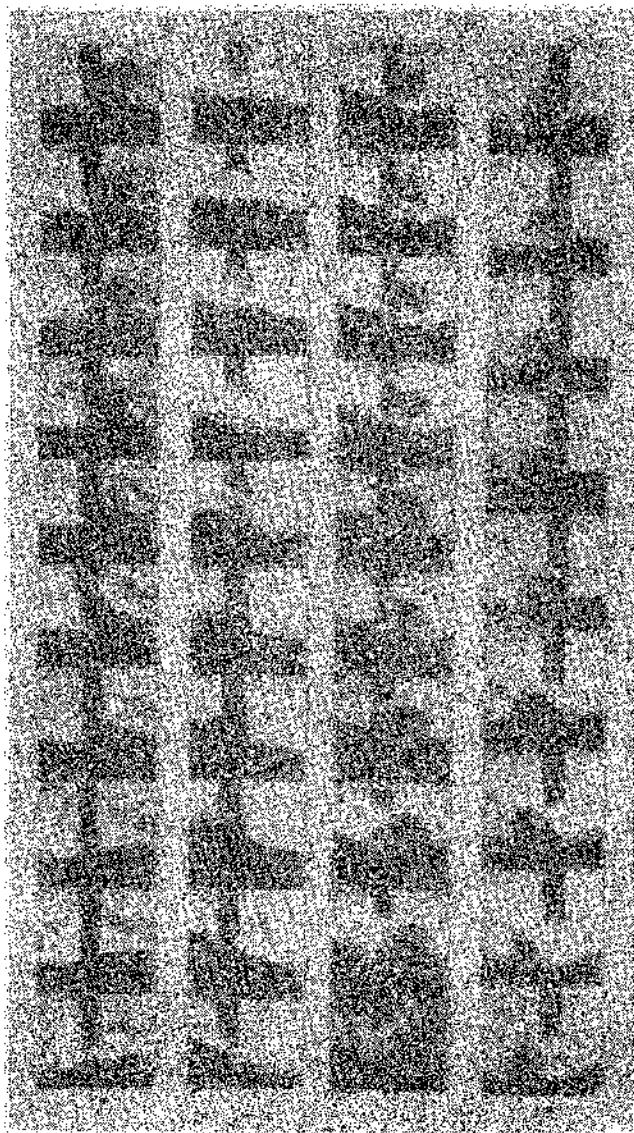


Рис. 15. Кинограммы процесса сварки с обычным (а) и увеличенным (б) вылетами электродной проволоки при различной защите дуги:

1, 3 —  $\text{CO}_2$ ; 2, 4 — смесь 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$ .

К. Лебедева, И. И. За-  
субы и др., в которых раз-  
ривание связывают со  
сварочным перемычки между  
электродом и ванной при  
сварке с короткими замы-  
каниями и между каплями и  
электродом при отсутствии  
коротких замыканий дуго-  
вого промежутка. Роль по-  
верхностной силы, как и  
силы поверхностного натя-  
жения, сводится к созда-  
нию условий для взрыва  
перемычки путем уменьше-  
ния ее толщины.

На рис. 15 приведены  
микрограммы переноса ме-  
талла при сварке с обыч-  
ным (20 мм) и увеличенным  
(40 мм) вылетом электрода,  
а на рис. 16 — отдельные  
микрокадры образования и  
разрыва перемычки металла  
при определенных парамет-  
рах режима и различной  
величине вылета.

Как видно из кино-  
грамм, крупнокапельный  
перенос металла при свар-  
ке с удлиненным вылетом  
обуславливает утонение пе-  
ремычки между каплями и  
электродом (рис. 16, б)  
вследствие увеличения си-  
лы тяжести. Снижается так-  
же энергия взрыва в момент  
короткого замыкания дуго-  
вого промежутка. Мощность  
взрыва пропорциональна  
квадрату значению тока  
короткого замыкания  $I_{кз}$ .  
Наличие кислорода в смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$   
приводит к уменьшению

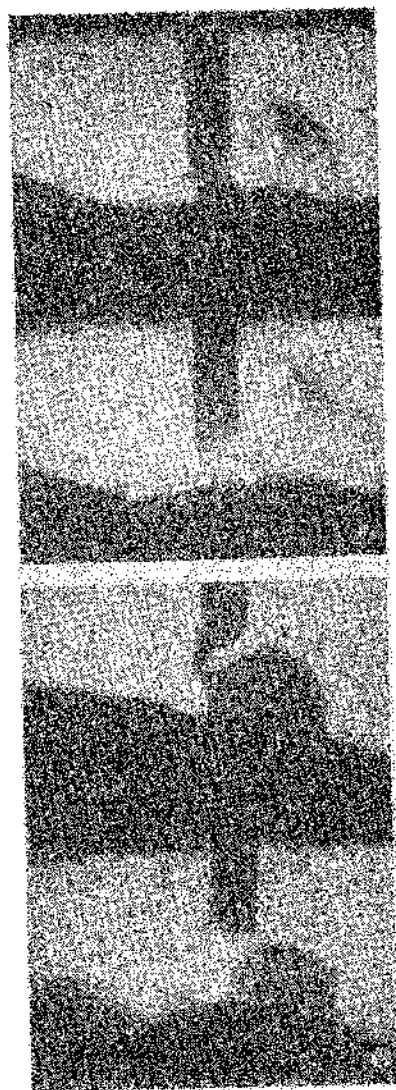


Рис. 16. Типичные кадры взры-  
ва перемычки в момент короткого  
замыкания при сварке с обычным  
(а) и увеличенным (б) вылетом элек-  
трода.

тока короткого замыкания подобно снижению величины критического тока перехода от капельного переноса к струйному при сварке в смеси  $Ag + O_2$  [76]. Во время короткого замыкания дуга гаснет, капля под действием силы тяжести и сил поверхностного натяжения втягивается в сварочную

Таблица 5. Зависимость параметров перемычки и величин действующих на нее сил от длины вылета электрода и состава защитного газа

Показатель	L = 20 мм		L = 40 мм	
	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
Диаметр перемычки d <sub>ш</sub> , см	0,120	0,104	0,107	0,092
Длина перемычки l <sub>ш</sub> , см	0,146	0,152	0,150	0,158
Масса перемычки, г	0,0132	0,0090	0,0094	0,0073
Сила поверхностного натяжения P <sub>п</sub> · 10 <sup>-3</sup> , Н	3,72	3,23	3,23	2,84
Аксиальная электромагнитная сила F <sub>эл</sub> · 10 <sup>-3</sup> , Н	5,29	4,21	4,41	3,82

Показатель	L = 60 мм		L = 80 мм	
	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
Диаметр перемычки d <sub>ш</sub> , см	0,090	0,080	0,072	0,055
Длина перемычки l <sub>ш</sub> , см	0,133	0,138	0,160	0,163
Масса перемычки, г	0,0062	0,0050	0,0045	0,0022
Сила поверхностного натяжения P <sub>п</sub> · 10 <sup>-3</sup> , Н	2,74	2,45	2,15	1,66
Аксиальная электромагнитная сила F <sub>эл</sub> · 10 <sup>-3</sup> , Н	3,52	2,94	2,74	2,25

ванну, напряжение падает и практически становится равным падению напряжения на вылете, ток резко увеличивается. При этом происходит рост электромагнитных сил, возникающих при взаимодействии собственного магнитного поля проводника (перемычки) с током и вызывающих образование шейки. Разрыв сопровождается взрывом утоненной до некоторого критического значения перемычки жидкого металла. На разрыв перемычки будет влиять также сила поверхностного натяжения P<sub>п</sub> и электромагнитная сила F<sub>эл</sub>. В табл. 5 приведены значения указанных сил, а также геометрические размеры перемычек по данным об-

работки кинограмм процесса сварки на обычном и увеличенном вылетах электрода в CO<sub>2</sub> и смеси 70% CO<sub>2</sub> + 30% O<sub>2</sub>. Сила поверхностного натяжения определялась по формуле

$$P_p = \sigma 2\pi r, \quad (2.8)$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения расплавленного металла, составляющий 1,0—1,1 Н/м [130, 131];  $r$  — радиус перемычки, определяемый по кинограмме процесса, м.

Силу взаимодействия магнитного поля с проводником (перемычкой) определяли по формуле, предложенной К. К. Хреновым [122]:

$$F_{эл} = 1 \cdot 10^{-5} I_{к.з}^2 \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (2.9)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  — радиусы перемычки соответственно меньшего и большего сечений, см.

Расчет сил, произведенный для различных вылетов при постоянной величине тока (см. табл. 5), показывает, что для всех случаев осевая электромагнитная сила превышает силу поверхностного натяжения, а взаимное действие сил P<sub>п</sub> и F<sub>эл</sub> в момент короткого замыкания ослабевает по мере удлинения вылета электрода.

Уменьшение величины сил, действующих на перемычку жидкого металла, способствует спокойному переходу капли в ванну при сварке с удлиненным вылетом. Снижение амплитуды тока короткого замыкания, изменение величины сил, действующих на каплю, и характера переноса металла должны уменьшить разбрызгивание металла при сварке с удлиненным вылетом. Такое предположение хорошо согласуется с работами [42, 43], в которых установлено, что разбрызгивание металла при сварке в углекислом газе определяется величиной амплитуд токов короткого замыкания. Показано, что увеличение крутизны внешней статической характеристики источника питания в результате введения в сварочную цепь активного сопротивления (балластного реостата) значительно снижает величину коэффициента разбрызгивания.

Удлинение вылета можно рассматривать как увеличение сопротивления системы источник питания — дуга. Влияние повышения сопротивления вылета на снижение разбрызгивания должно быть аналогичным введению в сварочную цепь балластного реостата.

Как известно, при сварке в углекислом газе значительное количество брызг приваривается к свариваемому

изделию, особенно вблизи шва. В экспериментах помимо общих потерь на разбрызгивание  $\Phi$  оценивали также процент привариваемых брызг  $\Theta$ .

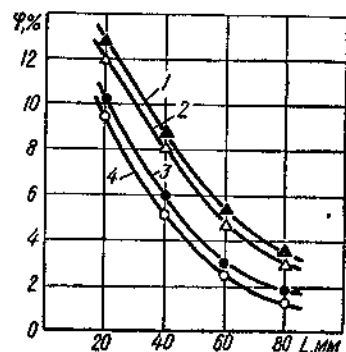
Для оценки разбрызгивания металла при сварке в углекислом газе и смеси 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$  с различной

Таблица 6. Параметры режимов сварки при определении потерь металла на разбрызгивание

$d_{\text{э}}$ , мм	$L$ , мм	$v_{\text{п}}$ , м/ч	$I_{\text{св}}$ , А	$U_{\text{д}}$ , В
20	20	240	340—360	34
	40	300		
	60	415		
	80	500		
1,6	20	300	290—310	32
	40	450		
	60	500		
	80	582		

Примечание.  $v_{\text{св}} = 20$  м/ч.

Результаты экспериментов приведены на рис. 17. Как видно из рисунка, увеличение вылета электрода при неизменной величине тока приводит к снижению потерь металла



на разбрызгивание независимо от диаметра электрода и вида защиты дуги.

Особо следует остановиться на вопросе изменения переноса металла при сварке электродной проволокой, легиро-

Рис. 17. Зависимость общих потерь металла на угар и разбрызгивание от длины вылета и состава защитной среды:

1, 3 —  $\text{CO}_2$ ; 2, 4 — 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$ ; 1, 2 —  $d_{\text{э}} = 2,0$  мм; 3, 4 — 1,6 мм.

ванной цирконием. Было замечено, что использование проволоки типа Св-08Г2СЦ (содержание циркония 0,15—0,25%) позволяет в сочетании со смесью и удлиненным вылетом электрода получать струйный перенос электродного

металла. Характерными признаками такого переноса является мелкая капля (не более  $\frac{1}{8} d_{\text{э}}$ ) и оплавляющийся конец электрода, имеющий конусообразную форму [4]. Известно, что при сварке этим способом дуга погружается в основной металл, киносъемка ее представляет значительную сложность. Поэтому была осуществлена специальная фотосъемка дуги, которая подтверждает наличие струйного переноса металла при сварке в смеси активных газов с увеличенным вылетом проволоки, легированной цирконием. Конусообразная форма конца электрода, по-видимому, обусловлена образованием на его торце тугоплавкой монокристаллической пленки окиси циркония [4]. Это является также причиной снижения разбрызгивания при переходе от проволоки Св-08Г2С к проволоке Св-08Г2СЦ.

Как показали исследования, общие потери металла на разбрызгивание при защите дуги углекислым газом и смесью газов состава 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$  практически одинаковы. Однако в смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$  привариваемость брызг к основному металлу снижается. Так, величина  $\Theta$  при сварке с обычным вылетом в углекислом газе на режимах, приведенных в табл. 7, находится в пределах 2,2—2,5%, при тех же условиях добавление 30% кислорода к  $\text{CO}_2$  снижает количество привариваемых брызг до 0,8—0,9%, что объясняется более высокой окисленностью капли. Увеличивая длину вылета электродной проволоки ( $I_{\text{св}} = \text{const}$ ) при сварке в смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$ , можно снизить величину  $\Theta$  до 0,5—0,6%.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что при постоянной величине сварочного тока увеличение вылета изменяет характер переноса металла, снижает величину амплитуды тока короткого замыкания, уменьшает величину сил, действующих на каплю, сокращает потери электродного металла на разбрызгивание при сварке в углекислом газе и смеси его с кислородом.

Кроме того, нами были определены зависимости показателей переноса металла от величины тока при сварке с удлиненным (60 мм) вылетом для электродной проволоки диаметром 2,0 мм. Идентичные зависимости при сварке с обычным вылетом известны [89, 90]. Показатели переноса металла на вылетах 30 и 60 мм по результатам обработки осциллограмм процесса приведены в табл. 7. С ростом сварочного тока и увеличением расстояния от токоподводящего наконечника до изделия наблюдается увеличение частоты перехода и уменьшение массы капель. Эти зависи-

мости аналогичны полученным при сварке с обычным вылетом. Различие процесса — в изменении пиковых значений токов короткого замыкания.

Как видно, амплитуда тока короткого замыкания при обычном вылете возрастает с увеличением сварочного тока. При сварке с удлиненным вылетом наблюдается обратная картина. Это явление можно объяснить ростом падения напряжения на вылете особенно в момент короткого замыкания дугового промежутка. При коротком замыкании сопротивление

Таблица 7. Зависимость показателей переноса металла от сварочного тока при обычном и удлиненном вылетах

L, мм	$I_{св}$ , А	$U_{в}$ , В	$I_{к.з.}$ , А	$U_{к.з.}$ , В	$v_{п.}$ , г/с	Показатель переноса			
						$N_{пр.}$ , с-1	$m_{ср.}$ , г	$\tau_{г.д.}$ , с	$\tau_{к.з.}$ , с
30	250	2,3	475	4,3	1,04	12	0,087	0,09	0,006
	285	2,3	500	3,75	1,62	19	0,085	0,04	0,006
	330	3,2	565	4,5	2,04	26	0,078	0,04	0,006
60	250	5,2	565	9,0	1,62	10	0,162	0,09	0,006
	285	7,0	515	10,0	2,24	16	0,140	0,04	0,006
	330	7,8	435	9,85	3,28	24	0,136	0,05	0,004

ление удлиненного вылета возрастает, вызывая снижение величины  $I_{к.з.}$  (см. табл. 7).

Влияние напряжения на показатели переноса при сварке с удлиненным вылетом такое же, как и при сварке с обычным вылетом; с повышением напряжения дуги размеры капли возрастают, а частота переходов капель уменьшаются.

Плавнение электродной проволоки всесторонне исследовано при автоматической сварке под флюсом и в защитных газах. Исследователями установлены основные зависимости скорости плавления электрода от режима и условий сварки. К показателям производительности расплавления электродной проволоки при дуговой сварке относят либо общую производительность расплавления  $G_{пл.}$ , либо коэффициент наплавки  $\alpha_n$ , определяющий количество металла, перешедшего с электрода на основной металл за единицу времени при прохождении по электроду сварочного тока величиной в 1 А.

Коэффициент наплавки как показатель, характеризующий производительность плавления электрода, получил распространение только в отечественной практике. Зарубежные, а в последнее время и некоторые советские [49,

исследователи для оценки производительности расплавления электрода пользуются показателем общей производительности расплавления  $G_{пл.}$ , которая определяется выражением

$$G_{пл.} = G_r + G_d, \quad (2.10)$$

где  $G_r$  — скорость плавления электрода от нагрева вылета протекающим током, кг/ч;  $G_d$  — скорость расплавления электрода от нагрева дугой, кг/ч.

По нашему мнению, этот показатель более приемлем для оценки производительности расплавления электрода различными способами дуговой сварки металлов. Коэффициент наплавки  $\alpha_n$  является весьма условным показателем при оценке производительности способа. Так, при сварке в смеси 70%  $CO_2$  и 30%  $O_2$  проволокой марки Св-08Г2С диаметром 1,6 мм, напряжении на дуге 27 В, расходе смеси 10 л/мин и неизменной скорости подачи проволоки 195 м/ч общая производительность расплавления (3 кг/ч) не изменяется с увеличением вылета, в то время как коэффициент наплавки увеличивается.

Вылет, мм	Коэффициент наплавки, г/А·ч
20	15,0
40	16,7
60	18,7
80	21,5

Как показывают цифры, судить о повышении производительности по коэффициенту наплавки не всегда правильно.

В исследованиях скорость плавления электрода при различных условиях сварки оценивали показателем общей производительности расплавлением  $G_{пл.}$  по формуле (2.10).

Значения и характер изменения величин  $G_{пл.}$ ,  $G_r$  и  $G_d$  определяли при сварке проволокой марки Св-08Г2С диаметром 2,0 мм в смеси 70%  $CO_2$  + 30%  $O_2$ . Скорость наплавки валиков на пластины из стали ВСт.3 толщиной 12 мм составляла 20 м/ч. Сварку выполняли на токе обратной полярности 200, 300 и 400 А с напряжением дуги 27—30 В с записью режимов осциллографом. Источником питания служили выпрямители ВС-300 и ВС-600. Общую производительность расплавления определяли по разности массы электродной проволоки до и после сварки. Для каждого тока выполняли серию опытов с различными

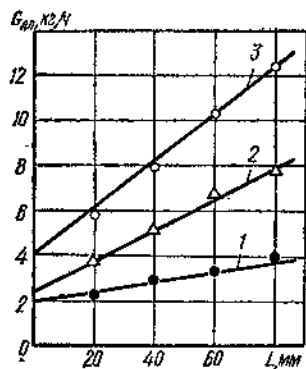


Рис. 18. Зависимость производительности расплавления электродной проволоки диаметром 2,0 мм от длины вылета и тока:

1 — 200 А; 2 — 300 А; 3 — 400 А.

параметра режима сварки — ток и вылет электрода, — можно добиться получения максимального количества наплавленного металла. Снижение мощности, затрачиваемой на расплавление электрода при увеличении вылета, уменьшает удельный расход электроэнергии на 1 кг наплавленного металла [20].

#### 4. Оптимальный вылет электрода

В результате исследования процессов плавления электрода при сварке с удлиненным вылетом под флюсом и в защитных газах некоторыми авторами [73, 75, 86] было экспериментально установлено, что в системе саморегулирования могут возникнуть колебания, вызывающие неравномерное плавление электродной проволоки. При этом увеличивается разбрызгивание, наблюдается неравномерное проплавление основного металла, ухудшается формирование и внешний вид шва.

Были проведены специальные исследования, давшие возможность определить энергетические параметры, при которых возникает неравномерное плавление электродной проволоки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , установить оптимальные величины вылетов для полуавтоматической сварки и режимы, обеспечивающие устойчивое горение дуги.

значениями вылета проволоки и токоподводящего наконечника. Рис. 18 иллюстрирует общую производительность расплавления электродной проволоки диаметром 2,0 мм при сварке в смеси 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$  в зависимости от величины вылета сварочного тока. При одном значении сварочного тока, варьируя длину вылета электрода, можно повысить значение  $G_{\text{пл}}$  в два-три раза.

Как видно из рис. 18, увеличение вылета электродной проволоки является дополнительным резервом повышения производительности полуавтоматической сварки. Увеличивая оба

Для этого наплавляли валики на пластины из малоуглеродистой стали с защитой дуги  $\text{CO}_2$  или смесью  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  при постоянной скорости сварки (20 м/ч) и ступенчатом увеличении длины вылета электродной проволоки марки 08Г2С диаметром 1,6—2,0 мм. Наплавку валиков проводили на режимах, типичных для полуавтоматической сварки. Электрические параметры режима фиксировали

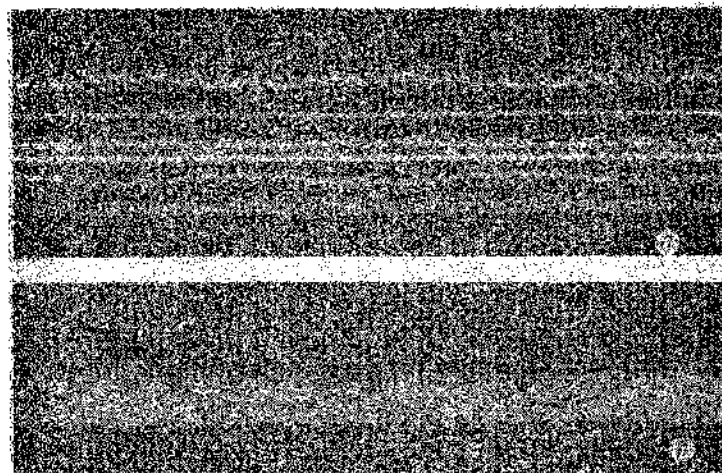


Рис. 19. Типичные осциллограммы (а) и макрошлиф (б) шва, выполненного при пульсирующем режиме плавления электродной проволоки.

осциллографом Н-102М. Анализируя осциллограммы сварочного тока, напряжения на дуге и падения напряжения на вылете, устанавливали существование колебательного процесса.

Неравномерное плавление электродной проволоки приводит к пилообразному характеру изменения глубины проплавления по длине шва. Режим сварки, вызывающий нарушение саморегулирования дуги и возникновение процесса в результате неравномерного плавления увеличенного вылета электрода, условно назван «пульсирующим режимом». Для пульсирующего режима характерно совпадение частот колебаний электрических параметров, зафиксированных на осциллограммной ленте, с колебаниями в проваре основного металла по длине, выявленными на продольных макрошлифах. Типичные осциллограммы и продольный макрошлиф шва, выполненные при пульсирующем режиме сварки ( $d_{\text{э}} =$



$= 2,0$  мм;  $L = 20$  мм;  $I_{св} = 300 \div 400$  А;  $U_d = 37 \div 38$  В;  $v_n = 415$  м/ч;  $v_{св} = 40$  м/ч), приведены на рис. 19.

Как видно из рис. 20, пульсирующий режим может возникать в основном в среднем диапазоне токов и напряжений на дуге.

В результате большого количества наблюдений в лабораторных и производственных условиях установлено, что сварка в пульсирующем режиме с увеличенным вылетом не

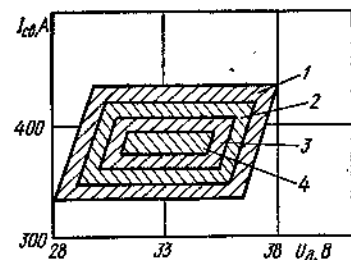


Рис. 20. Область вероятного возникновения неравномерного плавления проволоки при сварке с увеличенным вылетом (70 мм): 1, 2 —  $d_s = 2,0$  мм; 3, 4 —  $d_s = 1,6$  мм; 1, 3 —  $CO_2$ ; 2, 4 —  $CO_2 + O_2$ .

при обычном вылете в среднем диапазоне токов (300—450 А) и напряжении на дуге (27—33 В) имеет место переход каплей электродного металла в ванну как при коротких замыканиях дугового промежутка, так и без них. Для этого процесса характерно интенсивное блуждание дуги, колебание капли и ванны, неравномерный сброс капель.

Вероятное возникновение и существование пульсирующего режима сварки с увеличенным вылетом именно в среднем диапазоне токов и напряжений позволяет сделать предположение о связи колебательного процесса горения дуги с особенностями переноса металла в указанном диапазоне токов и предварительным подогревом вылета электродной проволоки.

Из полученной нами осциллограммы пульсирующего режима (см. рис. 19, а) видно, что в моменты горения дуги без коротких замыканий средняя величина тока меньше, чем в моменты ее горения с короткими замыканиями. Это вызвано следующим. После возбуждения дуги сопротивление

всегда характеризуется колебательным процессом расплавления электрода. Возникновение неустойчивого горения дуги с пульсирующим плавлением проволоки в диапазоне, приведенном на рис. 20, является лишь достаточным условием, а необходимое условие возникновения пульсирующего процесса — наличие смешанного вида переноса электродного металла (с короткими замыканиями и без них).

В работах [45, 90] было установлено, что при сварке в  $CO_2$  проволокой марки Св-08Г2С диаметром 2,0 и 1,6 мм

при вылета возрастает вследствие его подогрева током, теплосодержание увеличивается и создаются условия для повышения скорости плавления проволоки. Скорость плавления проволоки настолько возрастает, что опережает скорость ее подачи. При этом перенос металла осуществляется крупными каплями без коротких замыканий. Средняя величина тока и падение напряжения на вылете уменьшаются, а напряжение на дуге возрастает. Изменение указанных факторов вызывает снижение скорости плавления проволоки,

Таблица 8. Зависимость длины вылета электродной проволоки от величины сварочного тока

$d_s$ , мм	$I$ , А	Длина вылета, мм	
		допустимая	оптимальная
1,6	150—250	80, 60	80
	250—320	80, 60, 50	70
	320—450	50, 40	40
2,0	150—250	100, 80	80
	250—350	80, 60	70
	350—440	60, 50	60
	450 и выше	50, 60	60

Примечания. 1. Величина вылета при сварке реальных конструкций выбирается в зависимости от типа источника питания и обеспечения геометрических размеров шва. 2. При меньшем значении тока рекомендуется больший вылет электрода.

которая становится меньше скорости ее подачи. Конец электрода начинает приближаться к основному металлу, уменьшая величину дугового промежутка, величина тока и температура нагрева вылета возрастают, происходит короткое замыкание. Затем мгновенное возбуждение дуги приводит к последующему ее закорачиванию. Время горения дуги значительно уменьшается, так как скорость подачи проволоки больше скорости ее плавления.

Из рис. 19 видно, что в этих фазах может происходить более четырех коротких замыканий. При этом температура нагрева вылета повышается, сопротивление его  $R_v$  увеличивается. Рост  $R_v$  приводит к снижению сварочного тока, снижению напряжения на дуге и скорости плавления проволоки. Колебательный цикл повторяется.

Можно считать, что возникновение пульсирующего режима при сварке с увеличенным вылетом вероятно лишь в определенном диапазоне токов и напряжений дуги, для

которого перенос электродного металла является смешанным, т. е. капли переносятся в ванну как при коротких замыканиях дугового промежутка, так и без них.

На основании анализа большого количества осциллограмм процессов сварки и макрошлифов швов были установлены допустимые и оптимальные величины вылетов для различных режимов сварки, при которых обеспечивается основное условие процесса саморегулирования — равенство скоростей подачи и плавления электродной проволоки.

Допустимые и оптимальные величины вылетов и соответствующие значения токов (для широкого диапазона напряжений на дуге), при которых обеспечивается устойчивое горение дуги, приведены в табл. 8.

Одним из направлений, позволяющих стабилизировать процесс сварки с увеличенным вылетом в активных газах, является активирование сварочной проволоки элементами, снижающими эффективный потенциал ионизации. Так, при сварке с увеличенным вылетом в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволокой, легированной микродобавками циркония (проволока марки Св-08Г2СЦ по ТУ 14-4-791—76), диапазон пульсирующего режима сужается в 2—2,5 раза по сравнению с проволокой марки Св-08Г2С. Это, по-видимому, можно объяснить различным потенциалом ионизации элементов в проволоке Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ: потенциал ионизации железа составляет 7,9, марганца — 7,4, кремния — 8,1, а циркония — 6,8 эВ. При сварке на форсированных режимах с использованием увеличенного вылета проволоки, легированной цирконием, возникновение пульсирующего режима исключается полностью.

Проведенные исследования по определению условий устойчивого горения дуги позволили определить оптимальные величины вылетов, которые могут быть рекомендованы для полуавтоматической сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  или в  $\text{CO}_2$ . Из табл. 8 следует, что величины оптимальных вылетов значительно (в два—четыре раза) превосходят ранее применявшиеся в практике.

## МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ

При дуговой сварке плавлением состав металла шва и его свойства зависят не только от состава присадочных материалов, типа покрытия или флюса, рода защитного газа, но и от металлургических процессов в зоне плавления, т. е. в каплях расплавленного металла на конце электрода и в процессе их перехода через дуговой промежуток, а также в сварочной ванне, образующейся в результате плавления основного и электродного металла.

Взаимодействие расплавленного металла с газами, окисление, раскисление и рафинирование металла шва, удаление газов и другие металлургические процессы протекают и в сварочной ванне. Интенсивность протекания металлургических процессов и их завершенность определяются температурой металла сварочной ванны, длительностью пребывания ее в расплавленном состоянии, поверхностью контактирования и др. Поверхность, объем сварочной ванны и ее форма оказывают значительное влияние на процессы, протекающие в ней. Металл ванны при затвердевании образует сварной шов. Глубокое и узкое проплавление, с одной стороны, снижает стойкость против образования горячих трещин, препятствует дегазации расплавленного металла, с другой — позволяет сваривать листы большой толщины без разделки кромок, что снижает стоимость сварного соединения и повышает производительность труда.

Процессами проплавления основного металла необходимо уметь управлять, так как от площади проплавления зависит соотношение основного и электродного металла в шве, а значит, и химический состав его.

## 1. Влияние кислорода на температуру сварочной ванны и ее размеры

Температура сварочной ванны является основным параметром, который определяет направление и интенсивность физико-химических процессов в ней. Распределение температуры в сварочной ванне влияет на размеры столбчатых кристаллитов и направление их роста.

Температурный режим сварочной ванны можно оценить средней температурой жидкого металла  $T_{ср}$ . Для определения  $T_{ср}$  В. И. Дятлов [26] предложил формулу, полученную на основе уравнения предельного состояния процесса распределения тепла быстродвижущегося мощного источника в полубесконечном теле. Он высказал предположение о том, что средняя температура сварочной ванны не зависит от режимов сварки и определяется теплофизическими свойствами основного металла.

Экспериментальное определение температур в сварочной ванне сопряжено со значительными трудностями, что обусловлено небольшими размерами ванны, большим перепадом температур, скоростью их нарастания и спада, а также воздействием дуги на термопару. Поэтому экспериментальные измерения температур в сварочной ванне весьма немногочисленны.

Наиболее полные исследования температуры сварочной ванны при сварке под флюсом были проведены И. И. Фруминым и И. К. Походней [93, 119]. Ими установлено, что в широком диапазоне режимов при сварке под флюсом низкоуглеродистой стали средняя температура расплавленного металла равна  $2040 \pm 100$  К [119]. Они также исследовали распределение температур по длине и ширине ванны с помощью термопар погружения [93]. Расчетные данные, приведенные в работах [26, 36], значительно превышают экспериментальные, что объясняется расхождением принятых для теоретических расчетов условий и действительных условий процесса.

Для исследования влияния кислорода на температуру сварочной ванны при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  была использована высокотемпературная вольфрамиевая термопара ВР 5/20. Она предназначена для измерения температур до  $2300^\circ\text{C}$ . Градуировочная характеристика термопары близка к линейной с отношением  $\Delta e/\Delta t = 13$  мкВ/ $^\circ\text{C}$ . Погрешность термопар в связи с неоднородностью невелика и составляет  $5^\circ\text{C}$  при  $1500^\circ\text{C}$ . Термопару ВР 5/20 кратковременно мож-

но применять для работы в окислительной атмосфере. Диаметр термоэлектродов 0,5 мм. Они изолировались с помощью одно- и двухканальных алуновых трубок. Термо-ЭДС регистрировалась высокочувствительным шлейфом осциллографа.

Градуировка термопары совместно со шлейфом осциллографа производилась по эталонной платино-платинородиевой термопаре. Обе термопары зачеканивались на близком расстоянии друг от друга в пластине, нагреваемой током. Образцовая термопара подключалась к потенциометру, рабочая — к шлейфу осциллографа. По показаниям потенциометра в момент достижения определенной температуры и по кривым, записанным осциллографом, строили градуировочный график. Для получения на градуировочной кривой точки выше  $1200^\circ\text{C}$  рабочую термопару закрепляли в платиновой пластине. Пластины нагревали током до расплавления, одновременно проводя запись кривой осциллографом (максимальная температура  $2042$  К).

Исследования проводились при наплавке валика на пластины из малоуглеродистой стали в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . Содержание кислорода в смеси: 0; 30; 70 и 100%. Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм. Режимы наплавки:  $I_{св} = 400-420$  А;  $U_d = 34$  В;  $v_n = 283$  м/ч;  $L = 20$  мм.

Схема крепления термопары аналогична приведенной в работе [93]. Горячий спай термопары находился на строго фиксированном расстоянии от оси электрода. Глубина погружения горячего спае 4 мм.

Предварительные опыты проводили с применением защитного чехла из ультрафарфора. Такая защитная оболочка достаточно стойка, однако максимальная температура, замеренная подобным образом, ниже температуры плавления малоуглеродистой стали. Можно предположить, что горячий спай отделен сравнительно толстой керамической стенкой и не воспринимает температуру расплавленного металла, поэтому основные опыты проводили с открытым горячим спаем. После каждого замера горячий спай оставался в металле шва и длина термоэлектродов уменьшалась. Для сохранения постоянства градуировки из запасных катушек клеммного устройства сматывались проволоочки, как это делали в работе [93].

Результаты исследований приведены на рис. 21, из которого видно, что с увеличением содержания кислорода в смеси температура сварочной ванны повышается. Абсолютные значения измеренных нами температур не совпа-

дают с данными, приведенными в работе [105], что объясняется применением разных методов определения температуры и различием условий проведения опытов. Однако характер влияния добавки кислорода к углекислому газу на температуру сварочной ванны такой же.

С повышением температуры сварочной ванны увеличивается количество тепла, вводимого в изделие, что способствует снижению скорости охлаждения.

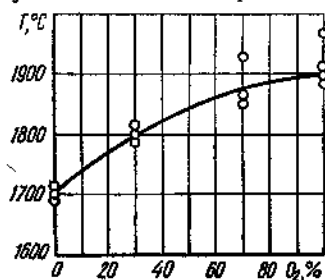


Рис. 21. Зависимость температуры хвостовой части ванны от содержания кислорода в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

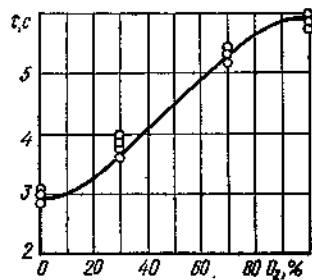
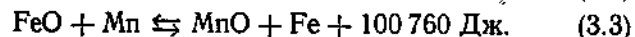
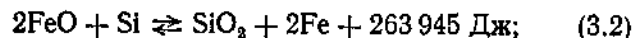
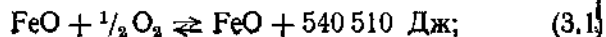


Рис. 22. Зависимость времени существования сварочной ванны от содержания кислорода в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

На рис. 22 приведена зависимость времени существования стационарной ванны в жидком состоянии от содержания кислорода в смеси. С увеличением содержания кислорода в смеси время существования ванны в жидком состоянии непрерывно увеличивается. При содержании 30%  $\text{O}_2$  в смеси оно в 1,1—1,3 раза больше, чем при сварке в чистом углекислом газе. Увеличение времени пребывания ванны в жидком состоянии при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  способствует более полному удалению неметаллических включений и лучшей дегазации металла ванны.

Повышение температуры сварочной ванны, увеличение времени пребывания ванны в жидком состоянии и снижение скорости охлаждения, по-видимому, можно объяснить выделением дополнительного количества тепла при протекании окислительно-восстановительных реакций в сварочной ванне при сварке в атмосфере с большей окислительной способностью — смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , так как реакции окисления железа и раскисления жидкого металла сварочной ванны кремнием и марганцем экзотермичны. Количество выделившегося тепла при протекании указанных реакций равно



Расчеты показали, что при сварке в смеси 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$  в результате протекания экзотермических реакций дополнительно выделяется 900—2200 Дж тепла на 1 см шва.

Взаимодействие металла с газами, смешивание основного и наплавленного металла, его раскисление и дегазация происходят в сварочной ванне. На эти процессы немалое влияние оказывают размеры и форма сварочной ванны.

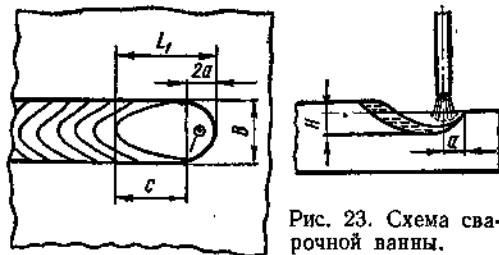


Рис. 23. Схема сварочной ванны.

Защитные газы помимо оттеснения воздуха из зоны сварки существенно влияют на все физические и металлургические стороны процесса сварки, в том числе на плавление основного металла и формирование сварочного шва.

Основными параметрами сварочной ванны являются длина  $L_1$ , ширина  $B$  и глубина  $H$  (рис. 23). В зависимости от режимов сварки, состава атмосферы дуги, теплофизических свойств основного металла размеры ванны могут существенно изменяться.

Исходя из теории распространения тепла можно определить длину сварочной ванны, которая ограничивается изотермической поверхностью с температурой, равной температуре плавления. При наплавке валика на массивную пластину длина сварочной ванны определяется по формуле [28]

$$L_1 = \frac{IU\eta_{\text{пл}}}{2\pi\lambda T_{\text{пл}}} \quad (3.4)$$

Полагая, что  $\frac{\eta_{\text{пл}}}{2\pi\lambda T_{\text{пл}}} = P_2$  ( $P_2$  — коэффициент пропорциональности), окончательно получаем

$$L_1 = P_2 UI, \quad (3.5)$$

т. е. длина ванны пропорциональна мощности дуги.

Подставляя средние значения коэффициента теплопроводности  $\lambda = 37,8$  Вт/мкм, температуры плавления для стали  $T_{пл} = 1500^\circ\text{C}$  и эффективного КПД  $\eta_{\text{э}} = 0,8$ , подсчитываем  $P_2$  для сварки в углекислом газе:

$$P_2 = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ мм/Вт.}$$

Как показал опыт, коэффициент пропорциональности  $P_2$  не является постоянной величиной, а зависит от мощнос-

Таблица 9. Размеры сварочной ванны при сварке в смеси углекислого газа и кислорода

Номер опыта	Содержание $\text{O}_2$ , %	$I$ , А	$L$ , мм	Расчетная длина ванны, мм	Параметры сварочной ванны, мм			
					$L_1$	$B$	$H$	$a$
149	0	200	20	21	20,5	8,3	2,6	3,0
153	15				21,6	8,3	2,6	3,2
157	30				21,9	8,7	2,6	3,0
150	0	300	20	37	38,1	11,7	3,4	4,0
154	15				40,5	12,3	3,6	3,9
158	30				42,1	12,5	3,5	4,1
151	0	400	20	54	50,2	15,4	6,5	5,0
155	15				54,4	15,8	6,0	4,9
159	30				56,5	15,8	6,0	5,0
152	0	400	60	58	52,0	16,2	5,6	5,0
156	15				55,0	18,3	5,8	5,0
160	30				57,5	18,3	5,4	5,5

ти, способа сварки и изменяется в значительных пределах (для аргонодуговой сварки плавящимся электродом  $P_2 = (3,8 \div 4,8) \cdot 10^{-3}$  мм/Вт) [28].

Длину сварочной ванны в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  определяли по формуле (3.5) и опытным путем. Для экспериментального определения границы сварочной ванны авторы работы [178] вводили порошковую проволоку, содержащую элементы, отсутствующие в основном металле, а затем спектральным анализом определяли границы распространения этого элемента.

Более простой и наглядной является методика, при которой в сварочную ванну вводится медная проволока. Для этого в пластине по оси шва сверлили отверстия и запрессовывали в них медную проволоку диаметром 4 мм. В момент пересечения дугой отверстия медная проволока расплавлялась и перемешивалась с жидким металлом сварочной ванны.

Границы распространения металла определяли травлением.

Наплавку валиков производили на разных токах при различном содержании кислорода в смеси его с углекислым газом. Величина тока и вылет, а также состав смеси указаны в табл. 9. Расход защитного газа составлял 12—16 л/мин. Скорость сварки 23 м/ч. При сварке на токе 300 и 400 А внешний вид шва улучшается при добавлении кислорода к углекислому газу.

На рис. 24 представлены макрошлифы швов после травления. Форма сварочной ванны четко проявляется при использовании указанной методики. Интересно отметить, что с добавлением кислорода форма проплавления изменяется особенно на больших токах. Если при сварке в чистом углекислом газе форма характеризуется относительно узким и глубоким проплавлением (рис. 24, а), то при использовании смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  форма проплавления приближается к клинообразной, ширина шва при этом несколько увеличивается (рис. 24, б). Такая форма проплавления способствует увеличению стойкости швов против образования горячих трещин.

Изменение формы проплавления при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  связано, по-видимому, с увеличением теплопроводности защитного газа и более равномерным распределе-

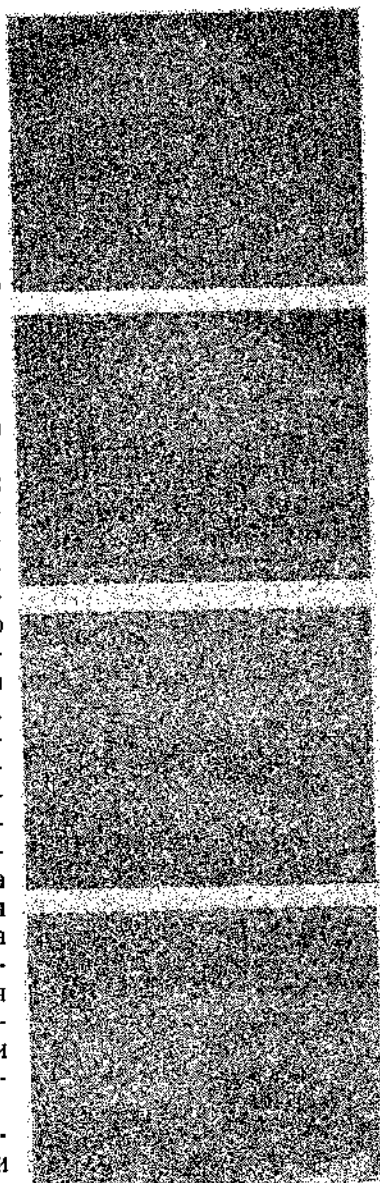


Рис. 24. Форма сварочной ванны в поперечном сечении (а, б) и в плане (в, г): а, в —  $\text{CO}_2$ ; б, г — 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$ .

нием теплового потока. Дополнительное количество тепла, выделяющееся при протекании окислительно-восстановительных реакций, также способствует получению линзообразной формы проплавления при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

В табл. 9 приведены также результаты определения размеров сварочной ванны.

В сварочной ванне различают две зоны. В активной (головной) высокотемпературной зоне происходит насыщение

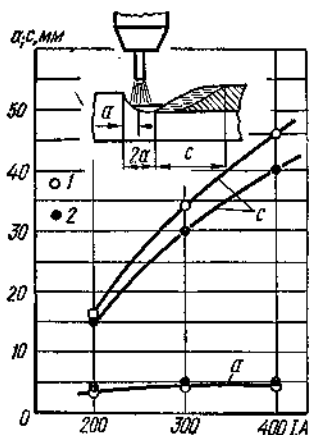


Рис. 25. Зависимость размеров активной (головной) и хвостовой частей ванны от тока и состава смеси:  
1 —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ; 2 —  $\text{CO}_2$ .

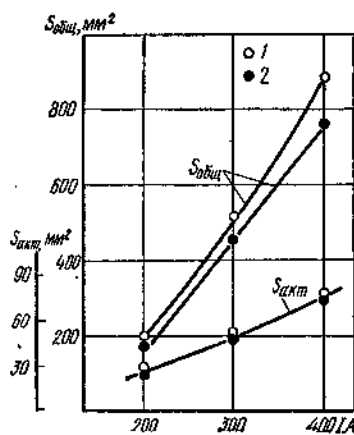


Рис. 26. Зависимость активной и общей поверхностей ванны от тока и состава смеси:  
1, 2 — то же, что на рис. 25.

металла газами и прежде всего кислородом [28, 47, 177]. В хвостовой части ванны происходит раскисление металла, десорбция газа, кристаллизация и образование шва.

Размер активной зоны зависит от размеров плазменной струи. Г. Р. Салтер и Д. Милнер отождествляют эту зону с ярко светящейся областью на поверхности ванны. А. А. Ерохин [28] принимает условно за активную поверхность ванны площадь круга с диаметром, соответствующим ширине ванны.

Можно предположить, что активная зона совпадает с пятном нагрева. Размеры этой зоны можно определить по расположению проволоки, закристаллизовавшейся в кратере сварного шва, при резком прекращении процесса сварки. Расстояние  $a$  от проволоки до оплавленной кромки кратера (см. рис. 23) определяет в первом приближении радиус

активной зоны, а площадь зоны равна площади круга диаметром  $2a$ . Результаты замеров радиуса активной зоны  $a$  приведены в табл. 9.

На рис. 25 представлена зависимость радиуса  $a$  высокотемпературной зоны и длины хвостовой части  $c$  сварочной ванны от тока. Из табл. 9 и рис. 25 видно, что с увеличением тока длина сварочной ванны возрастает. С добавлением кислорода длина хвостовой части ванны несколько увеличивается, особенно при сварке на больших токах. Чем выше сварочный ток, тем длиннее ванна при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  по сравнению со сваркой в чистом углекислом газе. Размер активной части ванны с увеличением силы тока изменяется незначительно. Добавка кислорода к углекислому газу практически не влияет на размер активной части.

Рис. 26 иллюстрирует зависимость площади активной поверхности и общей поверхности ванны от тока. Площадь активной поверхности несколько возрастает с увеличением тока. Кислород практически не влияет на величину активной поверхности.

При добавке кислорода к углекислому газу возрастает окислительная способность защитного газа и можно было бы ожидать сильного выгорания легирующих элементов и углерода, образования пор в шве. Однако в действительности это не происходит.

При сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  размеры активной зоны, в которой происходит интенсивное насыщение металла газами и в первую очередь кислородом, практически не изменяются. Вместе с тем увеличивается длина хвостовой части ванны и соответственно — масса жидкого металла. Отношение площади активной поверхности к общей площади сварочной ванны уменьшается, уменьшается количество кислорода на единицу массы жидкого металла и интенсивность выгорания легирующих элементов снижается. Увеличение размеров хвостовой части ванны способствует хорошему раскислению металла и, как указано выше, более полному удалению газов и крупных неметаллических включений.

Увеличение длины сварочной ванны при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  связано с повышением длительности пребывания ее в жидком состоянии. Так как смесь  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  имеет большую окислительную способность, чем углекислый газ, то в сварочной ванне выделяется больше тепла при протекании экзотермических реакций окисления и восстановления элементов, таких, как железо, кремний, марганец.



Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило установить более точно значение коэффициента  $P_2$ . При сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$   $P_2 = (4,0 \div 4,3) \cdot 10^{-3}$  мм/Вт в диапазоне сварочных токов 200—400 А.

При сварке на одном и том же токе с увеличением вылета электродной проволоки возрастают размеры сварочной ванны. Это объясняется увеличением количества расплавленного металла, так как для поддержания сварочного тока постоянным с увеличением вылета скорость подачи проволоки повышается. Добавка кислорода к углекислому газу не сколько увеличивает жидкотекучесть сварочной ванны, что благоприятно сказывается на формировании шва. Повышение жидкотекучести связано с ростом температуры расплавленного металла при добавке кислорода и снижением поверхностного натяжения [114].

Глубина проплавления с изменением состава смеси при одном и том же токе почти не изменяется, хотя заметна тенденция к снижению при сварке с увеличенным вылетом электрода. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что с увеличением количества расплавленного металла он подтекает под дугу. При этом толщина слоя жидкого металла в пятне нагрева увеличивается, а глубина проплавления несколько уменьшается.

Коэффициент формы проплавления увеличивается с повышением содержания кислорода в смеси. Это благоприятно сказывается на стойкости швов против образования кристаллизационных трещин. Проведенные исследования показали, что форма сварочной ванны в плане изменяется при добавке кислорода к углекислому газу. В плоскости, совпадающей с наружной поверхностью пластины, ванна жидкого металла при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  имеет эллипсовидную форму. Такая форма сварочной ванны способствует тому, что оси растущих кристаллитов, перпендикулярные к линии раздела фаз, не имеют постоянного направления и предпочтительной ориентации. Такая схема кристаллизации способствует более равномерному распределению ликвирующих примесей, таких, как фосфор, сера, кремний, и тем самым обеспечивает более высокую стойкость против образования горячих трещин.

## 2. Неметаллические включения в швах

В результате взаимодействия жидкого металла с защитным газом и продуктами его диссоциации в зоне плавления происходит окисление металла. Особенно интен-

сивно этот процесс протекает при сварке в окислительных защитных газах и смесях:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{O}_2$ ,  $\text{Ar} + 1 \cdot \text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . Вместе с окислением сплавы на основе железа обладают способностью, хотя и ограниченной, растворять кислород. Растворимость его возрастает с повышением температуры.

При снижении температуры в хвостовой части ванны происходит раскисление металлов. Этот процесс представляет собой растворение в жидком металле элементов-раскислителей, содержащихся в проволоке алюминия, кремния, марганца. Они соединяются с кислородом и образуют нерастворимые соединения — продукты реакций раскисления. Часть продуктов раскисления удаляется с дымом и брызгами, другая — формирует шлаковую корку на поверхности валика, при этом содержание кислорода в металле уменьшается. Раскисление никогда не проходит до конца, так как часть продуктов раскисления не успевает всплыть на поверхность и остается в закристаллизовавшемся металле в виде окисных включений.

Кроме окисных включений в шве всегда имеются и сульфидные включения, количество которых зависит от содержания серы. При сварке проволоками, содержащими сильные карбидо- и нитридообразующие элементы, или при сварке сталей с нитридной или карбонитридной фазой в металле шва можно обнаружить нитриды.

Неметаллические включения заметно влияют на структуру и свойства металла шва. Степень влияния зависит от их формы, размеров и расположения. Наиболее неблагоприятное воздействие оказывают неметаллические включения, располагающиеся по границам зерен в виде пленок или цепочек, а также включения остроугольной формы, являющиеся концентраторами напряжений и могущие служить очагами зарождения микротрещин.

Процессы образования неметаллических включений, их подробное описание и характеристики, а также влияние на свойства металла шва приведены в ряде работ [59, 60, 82, 140]. Наиболее полно эти данные применительно к сварке стали изложены в монографии В. В. Подгаецкого [84].

Изучение неметаллических включений при сварке сталей в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проводили металлографическим методом с использованием оптического и электронного микроскопов, а также методом электролитического растворения образцов, вырезанных из швов, и определения окислов, содержащихся в металле шва. Наиболее универсальным

методом исследования неметаллических включений является металлографический, позволяющий определить вид, размеры, форму и количество включений, а также характер их расположения. Для проведения исследований из наплавов и стыковых швов вырезали темплеты перпендикулярно к оси шва и изготавливали микрошлифы. Нетравленные шлифы исследовали под микроскопом при различных увеличениях и определяли количество, форму и расположение неметаллических включений.

Установлено, что в шве, сваренном в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , преобладают очень мелкие включения, главным образом в виде глобулей, равномерно расположенные по всему шлифу. Включения остроугольной формы или продолговатые встречаются очень редко. Крупные включения единичны, и их размер редко превышает 2—3 мкм.

Выявленные металлографическим методом неметаллические включения в швах по минералогическому составу можно разделить на несколько главных типов: железомарганцевые силикаты — серые включения с вкраплениями шариков более темного цвета; силикаты железа (фаялит) — темно-серые резко очерченные глобулы с кольцевым отсветом; кварцевые стекла — характерные глобулы различных размеров черного цвета с блестящей точкой в центре и кольцевым отсветом. Реже в металле шва встречаются смешанные железомарганцевые окислы, окись алюминия, закись железа. В швах на стали 16Г2АФ с помощью электронного микроскопа обнаружены нитриды ванадия, имеющие кубическую форму. Они очень дисперсны, расположены чаще всего внутри зерен, что благоприятно сказывается на свойствах металла шва.

Влияние содержания кислорода и длины вылета на количество неметаллических включений в швах изучали на установке «Quantimet-720». Для проведения исследований в канавку, простроганную в пластине из стали Ст. 3сп, были наплавлены валики. Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм в три прохода на токе 400 А. Перед каждым проходом пластина остывала до комнатной температуры. Из наплавленного валика вырезали темплеты для металлографических исследований, образцы для определения химического состава металла и неметаллических включений. Результаты определения количества неметаллических включений приведены в табл. 10.

Исследования показали, что минимальное количество окисных включений наблюдается при сварке в углекислом

газе. С удлинением вылета электрода несколько увеличивается количество включений. По-видимому, это можно объяснить снижением температуры капель и металла сварочной ванны. При этом уменьшается жидкотекучесть металла, что затрудняет всплывание неметаллических частиц.

Несмотря на большую окислительную способность атмосферы, при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с удлинением

Таблица 10. Общее количество включений в металле шва, шт.

Исходный газ	L, мм	Количество включений		Распределение по размерам, мкм						
		%	шт.	0—0,5	0,5—1,0	1,0—1,5	1,5—2,0	2,0—2,5	2,5—3,0	Σ
100% $\text{CO}_2 +$	60	0,42	12 598	2555	6666	2333	645	218	88	93
30% $\text{O}_2$	60	0,42	10 740	1303	5875	2313	768	256	94	131
$\text{CO}_2$	20	0,37	11 127	2665	5243	2115	646	260	92	161

вылетом количество неметаллических включений не увеличивается по сравнению со сваркой в углекислом газе с таким же вылетом. Добавка кислорода повышает температуру сварочной ванны, длительность пребывания ее в жидком состоянии, ее жидкотекучесть, что облегчает всплывание окисных включений.

Увеличение количества окисных включений при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  по сравнению со сваркой в углекислом газе с обычным вылетом происходит за счет мелких включений размером до 1,0—1,5 мкм. Необходимо отметить, что при этом снижается количество более крупных включений (см. табл. 10). Это благоприятно сказывается на стойкости шва против хрупкого разрушения.

Состав окисных включений определяли методом электролитического растворения образцов, вырезанных из швов. Методика обеспечивала суммарное определение окислов, входящих в силикаты и шпинели, а также содержание свободной окиси алюминия. Установлено, что окисные включения в металле шва состоят в основном из окислов марганца, кремния, а также окислов алюминия и в незначительном количестве — из окислов железа. Предполагают, что окислы алюминия, содержащиеся в электродных

проволоках, не успевают в процессе сварки выделиться в шлак и переходят в металл шва [61]. Добавка кислорода и удлинение вылета электрода не влияют на состав окисных включений. При сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  несколько увеличивается процентное содержание окислов железа и общее количество включений.

При сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  количество шлака на поверхности швов несколько увеличивается. При многослойной сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  шлаковую корку следует удалять после наложения пяти-шести слоев. Количество шлака составляет примерно 1—1,5% массы наплавленного металла. Химический состав шлака, %:  $\text{SiO}_2$  29 — 32;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  23 — 25;  $\text{MnO}$  40 — 42;  $\text{Fe}_{\text{мет}}$  3 — 4.

Как указано выше, кроме окисных включений в металле шва встречаются и сульфидные. Если в литом металле шва окислы имеют преимущественно форму глобул или неправильных многогранников, то сульфидные включения могут выделяться в виде пленок по границам зерен. Сульфид железа отличается низкой температурой плавления и, как известно, приводит к образованию кристаллизационных трещин в швах. В металле шва всегда содержится определенное количество серы, поэтому форма и расположение сульфидных включений определяют влияние их на свойства металла шва.

В ряде работ установлено, что на форму и расположение сульфидных включений в сталях большое влияние оказывает химический состав [81, 85, 99, 101]. В зависимости от степени раскисленности сульфидные включения могут быть трех типов. При низкой концентрации углерода и малом содержании других элементов-раскислителей в швах преобладают окиссульфидные глобулярные включения. При высоком содержании углерода в присутствии алюминия или других сильных раскислителей образуются пленки или цепочки сульфидов по границам зерен. Добавка алюминия, циркония, титана в количестве, несколько большем, чем необходимо для полного раскисления, приводит к превращению этих включений в сульфиды третьего типа, имеющие неправильную форму и менее вредные, чем сульфиды второго типа.

В работе [85] было установлено, что при наличии взвешенных в жидкой ванне неметаллических частиц сульфиды выделяются преимущественно на этих частицах в ранних стадиях затвердевания. Центрами выделения сульфидов могут служить включения железомарганцевых

окислов и силикатов. Образующиеся окиссульфиды имеют глобулярную форму и менее опасны, чем пленочные сульфиды. Поскольку при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  число железомарганцевых окислов и силикатов возрастает, вероятность образования глобулярных окиссульфидов выше, чем при сварке в углекислом газе.

Косвенным подтверждением того, что при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  распределение серы более равномерно, являются результаты исследований, проведенных на установке «Сатеса». Микрорентгеноспектральный анализ распределения серы в металле шва показал, что при сварке в углекислом газе наблюдается скопление сульфидов, предположительно по границам зерен (рис. 27, а). При сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  сера расположена более равномерно (рис. 27, б). Это способствует резкому повышению стойкости шва против образования кристаллизационных трещин.

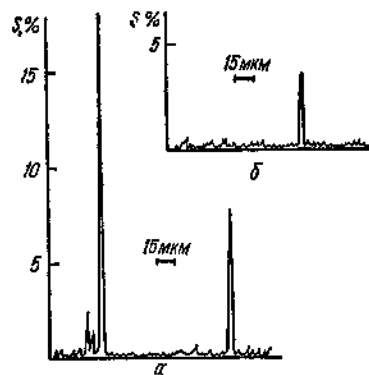


Рис. 27. Распределение серы в металле шва при сварке в углекислом газе,  $L = 20$  мм (а) и в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $L = 60$  мм (б).

### 3. Содержание водорода в металле шва

При сварке плавлением, несмотря на применение защитных сред, в зоне сварки неизбежно присутствуют газы, оказывающие вредное влияние на свойства металла шва. Количество этих газов зависит от способа защиты, качества сварочных материалов, чистоты свариваемых кромок и др.

Одним из таких газов является водород. Он отрицательно влияет как на металл шва, так и на сварное соединение в целом. Водород является одной из причин образования пор, флокенов и холодных трещин в швах, способствует образованию холодных трещин в околосшовной зоне, особенно при сварке сталей повышенной прочности, чувствительных к водородному охрупчиванию [37, 50, 79, 84,

95, 153, 155]. Кроме того, водород может вызвать временное ухудшение механических свойств металла.

Растворимость водорода в металле шва зависит от его парциального давления в атмосфере дуги, которое определяется металлургическими процессами при сварке, наличием водородсодержащих соединений в сварочных материалах и основном металле, режимом сварки, химическим составом и структурой основного металла.

Дуговая сварка характеризуется значительно большими скоростями растворения и более высокими концентрациями водорода в затвердевающем металле по сравнению с процессами большой металлургии. Это объясняется наличием атомарного водорода в атмосфере дуги, большой удельной поверхностью контактирования металла с газом, высокими температурой и скоростью кристаллизации сварочной ванны [95].

В процессе кристаллизации металла сварочной ванны часть водорода удаляется, часть переходит в металл шва. В отличие от азота и кислорода водород обладает высокой диффузионной способностью и продолжает выделяться из металла при его охлаждении и даже в процессе вылеживания его при комнатной температуре. Это так называемый диффузионный водород. Считают, что диффузионный водород существует в металле шва в атомарном состоянии [84]. Диффузия водорода происходит при наличии градиента концентрации, вызванной разностью температур и различной растворимостью при этих температурах, а также вследствие растягивающих напряжений различной степени, когда поток водорода направлен к более напряженным участкам. При большом содержании диффузионного водорода металл становится хрупким, причем наиболее сильно водородное охрупчивание проявляется при комнатной температуре. Процесс выделения диффузионного водорода при комнатной температуре обычно продолжается несколько суток, а то и недель. После его выделения механические свойства металла восстанавливаются. Скорость выделения диффузионного водорода растет с повышением температуры.

Часть водорода остается в металле шва. Это остаточный водород. Принято считать, что остаточный водород в стали при комнатных температурах находится в газообразном состоянии в микропорах металла (щелях, пустотах, трещинах, скоплениях дислокаций и других несовершенствах кристаллической решетки). Возможно, что в микропустотах определенная часть водорода находится в виде  $H_2O$

или  $CH_4$ . Некоторая часть водорода в атомарном или ионизированном состоянии образует с железом твердый раствор шпеднения. Необходимо отметить, что при нагреве остаточный водород может перейти в диффузионно-подвижный и вызвать временное ухудшение свойств в отдельных объемах металла, что приводит к образованию дефектов. Поэтому необходимо контролировать количество не только диффузионного, но и остаточного водорода.

Так как часть водорода выделяется в процессе охлаждения металла, то начальную концентрацию его определить довольно трудно. Этим объясняется противоречивость данных о содержании водорода в швах, приведенных в работах разных авторов [46, 56, 57, 95, 182]. Ниже приведено содержание диффузионного водорода, выделившегося в вакууме при комнатной температуре ( $см^3/100 г$ ), в швах на низкоуглеродистой стали при различных способах сварки [80]:

Газовая ацетилено-кислородная сварка (нормальное пламя, сварка левым способом с присадкой Св-08А)	25—36
Ручная дуговая сварка электродами марки АНО-4 и ЦМ-7	45—60
марки УОНИ 13/45:	
прокаленными при 350°С	5—7
увлажненными при хранении	12—19
Автоматическая дуговая сварка под флюсом ОСЦ-45 (провода Св-08А)	
флюс просушен	2—4
флюс увлажнен при хранении	4—7
Дуговая сварка в углекислом газе (провода Св-08Г2С диаметром 2,0 мм)	2—5

При сварке в защитных газах водород может поступать в реакционную зону в чистом виде или в виде продуктов диссоциации воды и различных водородсодержащих соединений.

Источниками водорода при сварке в защитных газах могут быть атмосферная влага, попадающая в зону дуги при нарушении защиты; остаточный водород в металле проволоки и основном металле; водородсодержащие соединения (ржавчина, смазка и др.) на поверхности проволоки и свариваемых кромок; водород и влага в защитных газах.

При изучении влияния состава смеси  $CO_2 + O_2$  и длины вылета на количество водорода в швах определяли как диффузионный  $[H]_{диф}$ , так и остаточный  $[H]_{ост}$  водород.

Существуют различные методы определения  $[H]_{диф}$ . Наиболее часто используется метод сбора диффузионного

водорода в эвдиометрах с различными запирающими жидкостями (глицерином, смесью глицерина с водой, спиртом, ртутью, парафином). Международный институт сварки рекомендует в качестве запирающей жидкости применять ртуть [187]. Однако недостатком этого метода является высокая токсичность ртути, хотя точность измерения несколько выше, чем с применением других запирающих жидкостей, в которых водород частично растворяется. В работе [138] для определения  $[H]_{\text{диф}}$  использовали вакуумный прибор, в котором образцы выдерживают в течение 6—13 дней при комнатной температуре или при  $40^\circ\text{C}$ .

Некоторые исследователи применяли методику определения водорода в металле шва без разделения его на диффузионный и остаточный. Авторы работ [188, 189] предложили использовать для определения содержания водорода тонкую пленку неодима или другого редкоземельного элемента. Выделяющийся водород реагирует с неодимом, нанесенным на полированный и травленный шлиф в вакууме. Пленка в местах выделения водорода темнеет. По степени почернения можно судить о концентрации водорода. На наш взгляд, этот метод пригоден для изучения распределения водорода в сварном соединении, однако он дает только качественную картину.

В ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР разработан новый метод, основанный на измерении скорости выделения водорода в вакууме [97]. Этот метод позволяет определить  $[H]_{\text{диф}}$  с большей точностью, экстраполированием можно учесть водород, выделившийся с момента окончания сварки до начала измерения.

Остаточный водород достаточно надежно определяется методом вакуум-нагрева до температуры  $650^\circ\text{C}$  на специальной установке или методом вакуум-плавки. Последним можно определить и химически связанный водород, который нельзя определить при экстракции в вакууме даже при температурах выше  $600^\circ\text{C}$ .

Для определения  $[H]_{\text{диф}}$  нами был использован метод сбора его в эвдиометрах с глицерином. Применяемый метод наиболее прост и удобен для сравнительных испытаний и широко применяется в практике. Этот метод рекомендуется Американским обществом испытания материалов (ASTM) в проекте по унификации определения водорода в сварных швах, выполненных дуговой сваркой [135].

Методика определения  $[H]_{\text{диф}}$  предусматривала наплавку швов на образец из стали Ст.3 размером  $10 \times 14 \times 70$  мм.

Наплавку производили в тисках с водоохлаждаемыми губками. Образцы перед наплавкой подвергали нагреву до  $400^\circ\text{C}$  в течение 1 ч. Такая обработка обеспечивала одинаковый уровень остаточного водорода в основном металле, что уменьшает ошибку измерений. После наплавки образец освобождали, охлаждали в воде для фиксации всего поглощенного водорода, удаляли выводные планки и помещали его в эвдиометр с глицерином. Время от окончания сварки до установки образца в глицерин было всегда постоянным. Образцы в эвдиометрах выдерживались до полного прекращения выделения водорода. Для ускорения этого процесса образцы нагревались до  $40^\circ\text{C}$ .

Остаточный водород определяли методом плавки в вакууме образцов, вырезанных из валика, после полного прекращения выделения диффузионного водорода.

Исследовали влияние состава защитной смеси, влажности защитного газа, чистоты и вылета электродной проволоки на содержание водорода в металле шва [14]. Сварку производили проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм. В качестве защитного газа применяли пищевую углекислоту и смесь ее с кислородом. Пищевая углекислота до сих пор находит широкое применение для сварки конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Известно, что влажность углекислого газа изменяется с уменьшением остаточного давления в баллоне [40, 180]. Для определения пределов, в которых может изменяться влажность защитного газа, было исследовано влияние остаточного давления в баллоне на влажность углекислого газа и кислорода.

Существуют различные методы определения влажности газов [22]. Наиболее просто и с достаточной степенью точности содержание влаги можно определить конденсационным методом — замером точки росы [159]. Этот метод оговорен в ГОСТе на углекислый газ. Сущность метода заключается в том, что контролируемый газ пропускается над искусственно охлаждаемой зеркальной поверхностью. При охлаждении до температуры, соответствующей насыщенному состоянию испытуемого газа водяными парами, на этой поверхности начинает конденсироваться влага. Замеряя температуру зеркальной поверхности в момент выпадения росы, определяют содержание влаги в контролируемом газе.

Было установлено, что влажность углекислого газа зависит не только от количества влаги в баллоне, но и от агрегатного состояния. Если углекислый газ находится в

жидком состоянии, то точка росы изменяется в небольших пределах. Влажность газа в начале отбора выше, затем она становится постоянной и колеблется в пределах 0,3—0,9 г/м<sup>3</sup> (от —31 до —19° С) в зависимости от степени чистоты.

По мере отбора жидкая углекислота полностью переходит в газообразное состояние. При этом влажность газа зависит от остаточного давления его в баллоне (рис. 28). При давлении в 1 МПа влажность газа составляет 5—7 г/м<sup>3</sup>

(0—10° С), т. е. увеличивается в 7—10 раз. Значит, при сварке в углекислом газе и смеси CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> влажность защитной атмосферы может колебаться в значительных пределах.

Для изучения влияния влажности защитной среды на содержание водорода в металле шва применяли углекислый газ трех степеней влажности: осушенный, нормальной влажности, т. е. на уровне влажности пищевой углекислоты, и увлажненный.

Газ осушали с помощью силикагеля, для увлажнения газа его пропускали через воду при различной температуре. Чем выше температура воды, тем влажнее становился газ.

Мнения различных исследователей о влиянии влажности защитного газа на содержание водорода в металле шва весьма противоречивы. Одни считают [19, 164], что с увеличением влажности защитного газа содержание водорода увеличивается, другие [143] — что с изменением влажности углекислого газа в значительных пределах количество водорода не изменяется. Противоречивость выводов обусловлена большим влиянием условий проведения опытов на результаты исследований.

Режим наплавки валиков для определения содержания водорода в сварном шве следующий:  $I_{св} = 220—240$  А;  $U_{д} = 25—26$  В;  $v_{св} = 19$  м/ч.

Образцы выдерживали в эвдиометрах в течение 7—8 суток. Результаты исследований приведены в табл. 11.

Как видно из таблицы, основным источником водорода

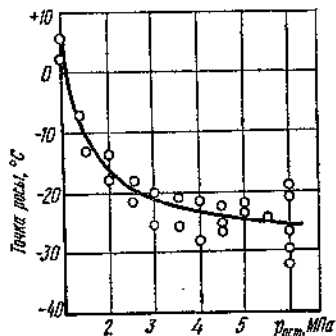


Рис. 28. Зависимость влажности углекислого газа от остаточного давления  $P_{ост}$  в баллоне.

является технологическая смазка или антикоррозионные покрытия на поверхности проволоки. Большое количество водорода может быть внесено в шов при сварке ржавой проволокой. Кроме того, технологическая смазка, покры-

Таблица 11. Содержание водорода в металле шва, см<sup>3</sup>/100 г

Защитный газ	Точка росы защитного газа, °С	Способ очистки проволоки	L, мм	[H] <sub>диф</sub>	[H] <sub>ост</sub>	[H] <sub>сум</sub>
CO <sub>2</sub>	—29	Без очистки	20	$\frac{8,6—10,7}{9,5}$	1,8	11,3
CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	—30	» »	20	$\frac{5,7—8,9}{6,9}$	1,5	8,4
CO <sub>2</sub>	—24	» »	60	$\frac{2,1—2,8}{2,4}$	1,2	3,6
CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	—25	» »	60	$\frac{1,4—2,2}{1,8}$	0,4	2,2
CO <sub>2</sub>	—20	Очистка шлифовальной бумагой	20	$\frac{4,3—6,3}{5,2}$	—	—
CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	—22	То же	20	$\frac{2,6—4,6}{3,5}$	—	—
CO <sub>2</sub>	—19,5	Нагрев до 400° С в течение часа, очистка шлифовальной бумагой	20	$\frac{2,1—2,7}{2,4}$	—	—
CO <sub>2</sub>	—22	Без очистки	20	$\frac{7,5—8,6}{8,0}$	—	—
CO <sub>2</sub>	+11	» »	20	$\frac{8,5—13,5}{11,6}$	—	—
CO <sub>2</sub>	—47	» »	20	$\frac{7,2—7,3}{7,2}$	—	—

Примечание. Здесь и далее над чертой — минимальные и максимальные значения, под чертой — средние из трех — восьми определений.

тие и ржавчина засоряют шланги, нарушают токоподвод и стабильность горения дуги, увеличивают разбрызгивание.

Очистка проволоки механическим способом, которая чаще всего применяется на предприятиях, с точки зрения уменьшения количества водорода малоэффективна, так как

часть смазки остается на поверхности проволоки. Прокалка проволоки уменьшает содержание водорода в шве, но на поверхности проволоки образуется оксидная пленка, которая увеличивает сопротивление контакта проволоки — токоподводящий наконечник. После прокалки требуется механическая зачистка. Наиболее эффективной является электрохимическая обработка проволоки, резко уменьшающая содержания газов в шве.

Минимальное количество водорода наблюдается при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электрода. Основной причиной резкого уменьшения содержания водорода является выгорание смазки и удаление части остаточного водорода, так как проволока нагревается до  $500\text{--}800^\circ\text{C}$  при вылете, равном 60 мм.

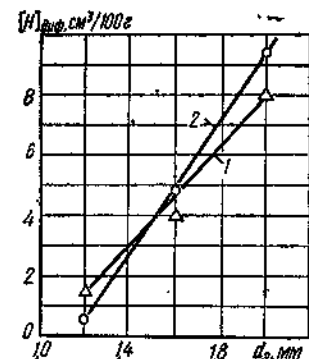


Рис. 29. Влияние диаметра электрода на количество диффузионного водорода в шве:

1 —  $I = 260 \text{ А}$ ; 2 —  $I = 170 \text{ А}$ .

Уменьшение растворимости водорода в металле шва при добавке кислорода связано, по-видимому, и с окислением водорода [83, 84] в атмосфере дуги и сварочной ванне.

Другим источником водорода является влажность защитного газа. При изменении влажности защитного газа от  $0,086$  ( $-47^\circ\text{C}$ ) до  $10,0 \text{ г/м}^3$  ( $+11^\circ\text{C}$ ) количество диффузионного водорода увеличивается примерно в 1,5 раза, хотя количество потенциального водорода возрастает более чем в 125 раз (от  $3,49$  до  $440 \text{ см}^3$ ), если считать, что влага в зоне дуги полностью диссоциирует на водород и кислород.

На содержание водорода в наплавленном металле сильно влияет диаметр электрода. Зависимость количества  $[H]_{\text{диф}}$  от диаметра проволоки представлена на рис. 29. С уменьшением диаметра проволоки уменьшается длина дугового промежутка и время контактирования капли с атмосферой дуги. Кроме того, с уменьшением диаметра проволоки уменьшаются размеры сварочной ванны и улучшается удель-

ная защита расплавленного металла, что также снижает насыщаемость металла шва водородом. Полученные данные о количестве  $[H]_{\text{диф}}$  при сварке проволокой диаметром  $1,2 \text{ мм}$  в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  хорошо согласуются с данными Х. Секигучи [180], который также установил, что при сварке проволокой диаметром  $1,2 \text{ мм}$  в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  содержание водорода в металле шва минимально. Необходимо отметить, что содержание водорода в шве при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволокой диаметром  $2,0 \text{ мм}$  с увеличенным

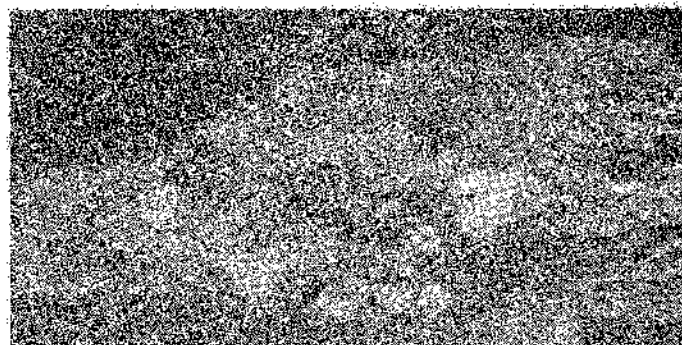


Рис. 30. Флокены в изломе образца, сваренного в углекислом газе проволокой диаметром  $2,0 \text{ мм}$ .

вылетом лишь незначительно превышает количество водорода при сварке проволокой диаметром  $1,2 \text{ мм}$  в углекислом газе.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволоками больших диаметров (до  $2,0 \text{ мм}$ ) с увеличенным вылетом обеспечивается низкое содержание водорода, значительно ниже, чем при сварке в углекислом газе проволокой такого же диаметра или электродами с фтористо-кальциевым покрытием. Количество водорода в швах при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электродной проволоки диаметром  $2,0 \text{ мм}$  сравнимо с количеством водорода в швах при сварке в углекислом газе проволокой диаметром  $1,2 \text{ мм}$ .

Снижение содержания водорода в швах имеет большое значение, особенно при сварке сталей, склонных к образованию холодных трещин. Если при испытании образцов, вырезанных из соединений, сваренных в углекислом газе, встречаются флокены в металле шва (рис. 30), то при испытании большого количества образцов, сваренных в смеси



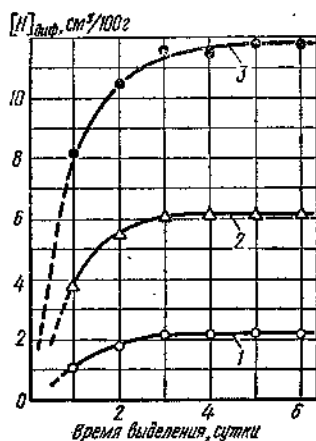


Рис. 31. Зависимость количества выделившегося диффузионного водорода от времени выдержки образцов:  
1 —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $L = 60$  мм; 2 —  $\text{CO}_2$ ,  $L = 20$  мм, влажность газа  $0,086$  г/м³; 3 —  $\text{CO}_2$ ,  $L = 20$  мм, влажность газа  $10$  г/м³.

$\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электрода, флокены не были обнаружены.

На рис. 31 показана зависимость количества выделившегося при комнатной температуре водорода от времени вылеживания образца. За первые сутки из металла удаляется более половины всего количества диффузионного водорода. Через 72—

80 ч практически выделяется весь диффузионно-подвижный водород. С повышением температуры скорость выделения водорода увеличивается.

#### 4. Влияние содержания кислорода и длины вылета электрода на переход легирующих элементов в шов

Состав и свойства металла шва при дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах определяются в основном составом присадочного металла, долей участия основного металла в образовании шва и реакциями между расплавленным металлом и окружающей средой. На состав наплавленного металла влияют также изменение параметров режима сварки и состава защитного газа.

Для получения металла шва требуемого состава и свойств необходимо изучить закономерности окисления расплавленного металла защитными газами. Полноту реакции и интенсивность окисления металла при дуговой сварке можно оценить по изменению состава металла шва или по коэффициентам перехода легирующих элементов в шов. Такой метод оценки наиболее распространен, так как позволяет выявить влияние отдельных факторов на состав металла шва.

При сварке плавящимся электродом в защитных газах шов образуется из электродного и основного металла. Химический состав металла шва при сварке в инертном газе определяется долей участия в нем основного и электродного

(присадочного) металла, так как при этом практически не происходит выгорания легирующих элементов (возможно лишь испарение или окисление элементов кислородом, содержащимся в проволоке или основном металле). Состав металла шва с достаточной степенью точности может быть определен по правилу смешения.

При сварке в активных газах и их смесях ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ) происходит выгорание легирующих элементов, и содержание их в металле шва отличается от рассчитанного по правилу смешения.

Химический состав металла шва, выполненного в инертных газах и чистом углекислом газе, можно изменить главным образом путем изменения состава электродной проволоки. Несколькими расширяет возможности регулирования состава шва применение смесей активных газов, например углекислого газа и кислорода. Изменяя содержание кислорода в защитном газе, можно регулировать концентрацию элементов-раскислителей в металле шва, а значит, и свойства сварного соединения.

Авторами изучено влияние содержания кислорода в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , длины вылета электродной проволоки и ее диаметра на интенсивность окисления жидкого металла по коэффициентам перехода (усвоения) легирующих элементов и по изменению состава металла шва.

Для подсчета коэффициентов перехода  $\eta$  была предложена следующая формула [29]:

$$C_{\text{ш}} = C_0\Theta + \eta C_s (1 - \Theta), \quad (3.6)$$

где  $C_{\text{ш}}$  — содержание элемента в металле шва, %;  $C_0$ ,  $C_s$  — исходное содержание элемента в основном и электродном металле, %;  $\Theta$  — доля основного металла в металле шва.

В формуле (3.6) не принимали во внимание участие основного металла в реакциях. В действительности основной металл участвует в реакциях в сварочной ванне, однако влияние его обычно невелико. Долю основного металла в шве можно определить по отношению площади проплавления в поперечном сечении шва к общей его площади.

Для исследований особенностей перехода легирующих элементов в шов наплавливали валики на пластины из стали марки Ст.3Гпс одной плавки толщиной 18 мм. Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ в углекислом газе и смеси его с кислородом при содержании кислорода 15 и 30% по объему. Химический состав основного металла и электродных проволок приведен в табл. 12.

Таблица 12. Химический состав основного и электродного металла, %

Марка стали или проволоки	C	Mn	Si	Zr	Al	S	P
Ст.3Гпс	0,161	1,03	0,04	—	—	0,027	0,022
Св-08Г2С	0,110	1,92	0,79	—	—	0,021	0,020
Св-08Г2СЦ	0,094	1,89	0,80	0,09	0,06	0,014	0,015

Наплавка выполнялась на различных токах при разной величине вылета электродной проволоки. Использовалась проволока Св-08Г2СЦ диаметром 2,0; 1,6 и 1,2 мм одного химического состава. Это позволило исследовать влияние диаметра проволоки на коэффициенты перехода легирующих примесей. При изучении влияния одного из параметров на переход легирующих элементов в шов все остальные параметры процесса поддерживались постоянными. Наплавка

Таблица 13. Переход легирующих элементов в шов в зависимости от состава смеси и сварочного тока

Содержание $O_2$ , %	Марка электродной проволоки	I, А	Химический состав и коэффициент перехода					
			C		Si		Mn	
			$C_{ш}$ , %	$\eta$	$C_{ш}$ , %	$\eta$	$C_{ш}$ , %	$\eta$
0	Св-08Г2С	300	0,11	0,76	0,12	0,41	0,90	0,67
		400	0,12	0,83	0,15	0,51	1,03	0,77
		500	0,12	0,84	0,18	0,59	1,14	0,84
	Св-08Г2СЦ	300	0,12	0,87	0,17	0,50	0,92	0,67
		400	0,12	0,89	0,19	0,67	1,10	0,84
		500	0,13	0,93	0,20	0,80	1,13	0,85
15	Св-08Г2С	300	0,10	0,74	0,10	0,31	0,85	0,62
		400	0,11	0,82	0,11	0,41	0,85	0,65
		500	0,11	0,84	0,13	0,45	1,00	0,75
	Св-08Г2СЦ	300	0,11	0,82	0,13	0,39	0,88	0,64
		400	0,12	0,88	0,15	0,47	0,97	0,71
		500	0,12	0,90	0,20	0,62	1,03	0,76
30	Св-08Г2С	300	0,10	0,73	0,08	0,27	0,83	0,62
		400	0,11	0,82	0,09	0,32	0,85	0,64
		500	0,11	0,82	0,11	0,38	0,93	0,70
	Св-08Г2СЦ	300	0,11	0,82	0,08	0,24	0,85	0,62
		400	0,12	0,89	0,14	0,42	0,88	0,65
		500	0,12	0,89	0,14	0,45	0,92	0,69

производилась на токах 200, 300 и 400 А, скорость сварки во всех опытах была постоянной (21,5 м/ч). Расход защитной среды 15 л/ч.

Содержание элементов в швах определялось химическим и спектральным анализом. Из наплавов вырезались поперечные темплеты, по которым определялись площадь проплавления поперечного сечения шва и доля основного металла в нем. Результаты исследований приведены в табл. 13.

Из таблицы видно, что с увеличением содержания кислорода в смеси коэффициенты перехода уменьшаются, причем более резко уменьшается коэффициент перехода кремния. Для раскисления жидкого металла сварочной ванны расходуется большее количество кремния, сродство которого к кислороду при температуре кристаллизации металла (1600° С) больше, чем у углерода и марганца. Увеличение выгорания кремния благоприятно сказывается на стойкости металла против образования горячих трещин. С уменьшением содержания кремния увеличивается пластичность и вязкость металла.

С увеличением тока окисление металла уменьшается, так как увеличивается количество расплавленного металла и уменьшается количество защитного газа, приходящегося на единицу массы переплавляемого металла. Кроме того, возрастает испарение металла, снижается парциальное давление окислительных газов в зоне сварки, что также способствует более полному переходу легирующих элементов в шов.

Ни в одном из наплавленных валиков поры не обнаружены, хотя содержание кремния в шве при сварке в смеси  $CO_2 + O_2$  значительно ниже 0,17%, т. е. минимально необходимого количества, по мнению автора работы [61], для получения плотных швов. Мы полагаем, что это связано с более интенсивным протеканием металлургических процессов при добавке кислорода и с увеличением длительности пребывания ванны в жидком состоянии. При сварке в смеси  $CO_2 + O_2$  образуется большее количество шлаков, которые защищают металл электродных капель и сварочной ванны от дальнейшего насыщения его газами. Этим объясняется тот факт, что даже при сварке сталей с содержанием кремния ниже 0,05% в смеси  $CO_2 + O_2$  поры в швах отсутствуют.

Большое влияние на окисление и переход легирующих элементов оказывает химический состав проволоки. Введение небольших количеств таких сильных раскислителей,

как алюминий и цирконий, снижает выгорание кремния и марганца.

Исследовали также влияние диаметра проволоки на выгорание легирующих элементов. Наплавку производили на токе 300 А и напряжении 32—34 В для всех диаметров проволоки. Химический состав проволок был одинаковым, проволоки изготавливали из металла одной плавки. Результаты исследований приведены на рис. 32. С увеличением

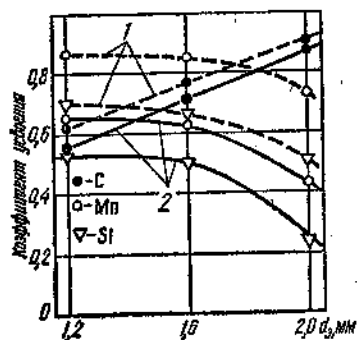


Рис. 32. Зависимость коэффициента усвоения от состава среды и диаметра проволоки:

1 —  $\text{CO}_2$ ; 2 — 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$ .

диаметра проволоки содержание кремния и марганца уменьшается, в то время как содержание углерода увеличивается. Это связано с тем, что окисление углерода в жидкой стали протекает преимущественно в зоне высоких температур, а окисление марганца и кремния — в зоне относительно низких температур. С увеличением диаметра проволоки при одном и том же токе диаметр капли возрастает, удельная поверхность контактирования уменьшается. С уменьшением плотности тока снижается температура капель жидкого металла. Несколько увеличиваются размеры сварочной ванны и время пребывания ее в жидком состоянии. Это приводит к более сильному окислению кремния и марганца и снижению выгорания углерода. При сварке проволоками малых диаметров размер капли уменьшается, увеличивается удельная поверхность и время контактирования, температура капель повышается. Резко увеличивается выгорание углерода.

В табл. 14 приведены химический состав и коэффициенты перехода при сварке проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм в защитных газах различного состава и композиций. Сварку выполняли на токе 400 А с обычным и увеличенным вылетом электрода.

Из таблицы видно, что увеличение вылета заметно снижает выгорание легирующих элементов. Уменьшение выгорания легирующих элементов характерно для всех составов защитной среды. По-видимому, это можно объяснить тем, что так как с увеличением вылета ток снижается, для его восстановления подача проволоки увеличивается, при этом

на единицу массы переплавляемого металла приходится меньше защитного газа окислительного действия и выгорание элементов уменьшается. К тому же, с увеличением вылета повышается температура подогрева его проходящим током, что должно способствовать снижению температуры электродных капель и металла сварочной ванны. Размер капель увеличивается, уменьшается поверхность контактирования и выгорание легирующих элементов.

Важно отметить, что выгорание углерода не определяется лишь увеличением содержания кислорода в защитной

Таблица 14. Химический состав и коэффициенты перехода при сварке в различных защитных газах

Защитный газ	L, мм	Химический состав и коэффициент перехода					
		C		Si		Mn	
		$C_{ш}, \%$	$\eta$	$C_{ш}, \%$	$\eta$	$C_{ш}, \%$	$\eta$
$\text{CO}_2$	20	0,11	0,83	0,15	0,41	1,03	0,67
	60	0,12	0,89	0,26	0,61	1,20	0,80
85% $\text{CO}_2$ + 15% $\text{O}_2$	20	0,10	0,82	0,11	0,31	0,85	0,62
	60	0,12	0,86	0,26	0,67	1,14	0,79
70% $\text{CO}_2$ + 30% $\text{O}_2$	20	0,10	0,82	0,08	0,27	0,85	0,62
	60	0,11	0,84	0,19	0,49	1,06	0,74
95% Ar + 5% $\text{O}_2$	20	0,07	0,51	0,28	0,73	1,23	0,85
	60	0,06	0,45	0,36	0,81	1,35	0,89
75% Ar + 20% $\text{CO}_2$ + 5% $\text{O}_2$	20	0,08	0,57	0,16	0,44	0,98	0,70
	60	0,07	0,52	0,26	0,63	1,20	0,76

смеси. Значительно большее влияние, на наш взгляд, оказывает характер переноса электродного металла. Этим и объясняется сильное выгорание углерода при сварке в смесях на основе аргона, так как в этих смесях наблюдается струйный перенос на токах выше критического. Характерной особенностью этого процесса является мелкокапельный перенос электродного металла и непрерывное горение дуги. Капли имеют сильно развитую поверхность контактирования и значительно более высокую температуру по сравнению с каплями среднего и крупного размера. Так как углерод интенсивно окисляется при высокой температуре, то при сварке со струйным переносом наблюдается его резкое выгорание.

Из сказанного следует, что выгорание углерода не может служить оценкой окислительной способности защитных

**СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ПРОТИВ ОБРАЗОВАНИЯ  
ПОР И ТРЕЩИН**

газов. С увеличением содержания кислорода в смеси выгорает большее количество марганца и кремния. Степень их выгорания может характеризовать окислительную способность защитного газа. Необходимо только иметь в виду, что выгорание легирующих элементов в большой мере зависит от режимов сварки — тока, напряжения, длины вылета. Поэтому при оценке окислительной способности защитных газов необходимо строго соблюдать их постоянство.

Оценка окислительной способности защитного газа по содержанию кислорода в шве [176], по нашему мнению, является менее точной. Кислород в металле шва находится преимущественно в составе неметаллических окисных включений и частично в растворенном состоянии. Количество кислорода, находящегося в окисных включениях, определяется способностью их выделения из металла шва, а эта способность может быть разной при изменении состава защитной смеси. Повышение длительности пребывания ванны в жидком состоянии и жидкотекучести будет облегчать выделение окисных включений. Это подтверждается тем, что при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  наблюдается (в процентном отношении) большее выгорание кремния, чем увеличение содержания кислорода.

По степени возрастания окислительной способности (по коэффициентам перехода кремния и марганца) исследуемые защитные газы (см. табл. 14) можно расположить в такой последовательности: 95% Ar + 5%  $\text{O}_2$ ; 75% Ar + 20%  $\text{CO}_2$  + 5%  $\text{O}_2$ ; 100%  $\text{CO}_2$ ; 85%  $\text{CO}_2$  + 15%  $\text{O}_2$ ; 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$ . Это хорошо согласуется с данными, полученными Н. М. Новожиловым [61].

Поры и трещины — наиболее распространенные дефекты при сварке углеродистых и низколегированных сталей. Указанные дефекты встречаются при любом виде сварки плавлением, однако частота их возникновения зависит от многих причин, в том числе от способа сварки, сварочных материалов, режимов сварки и др. До сих пор нет единых методик и критериев оценки стойкости швов против образования пор и трещин. Поэтому при разработке новых сварочных материалов, новых процессов сварки необходимо в одинаковых условиях оценивать стойкость швов против образования пор и трещин и сравнивать ее со стойкостью швов, выполненных применяемыми способами сварки. Без такой оценки широкое внедрение разрабатываемых процессов и материалов в производство немыслимо.

**1. Стойкость швов  
против образования пор**

Поры в металле шва могут быть сквозными и внутренними. Сквозные поры являются недопустимым дефектом для сварных конструкций, работающих под давлением и вакуумом или предназначенных для транспортировки жидких и газообразных продуктов (химнефтеаппаратура, цистерны, емкости, трубопроводы и др.). Для большинства конструкций общего машиностроения и строительных конструкций (сельскохозяйственные машины, автомобили и тракторы, конструкции зданий и сооружений) допускаются единичные сквозные поры, если их величина и количество не превышают норм, установленных соответствующей технической документацией.

Внутренние поры — допустимый дефект практически для всех сварных конструкций, однако их величина и коли-

чество строго регламентированы, так как значительная пористость приводит к уменьшению сечения шва и к снижению его прочностных и служебных характеристик.

Поры образуются в результате выделения газов при кристаллизации металла сварочной ванны. Часть образовавшихся газовых пузырьков не успевает всплыть на поверхность ванны и остается в шве в виде пустот. Поры образуются только в том случае, если металл сварочной ванны пересыщен газами и их количества достаточно для зарождения и развития пузырьков до критического размера, а всплывание этих пузырьков затруднено.

Вопросам образования пор в металле шва посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей [6, 24, 27, 47, 61, 84, 95, 120, 149, 158]. Как считает большинство из них, решающую роль в образовании пор играют окись углерода, азот и водород, хотя не исключена возможность влияния других газов (паров воды, металла, сероводорода и др.).

Рассмотрим возможные источники газов, вызывающих поры в швах, при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

Окись углерода образуется при недостаточной раскисленности сварочной ванны. Это возможно при малом содержании элементов-раскислителей в электродной проволоке и основном металле, а также при слишком интенсивном их окислении в результате высокого содержания кислорода в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , наличия толстого слоя окалины на свариваемых кромках. Чрезмерное выгорание кремния и образование окиси углерода при затвердевании металла шва может наблюдаться в случае, если скорость сварки мала и металл сварочной ванны очень долго находится в жидком состоянии.

Причины, вызывающие повышенное содержание водорода в швах, приведены выше. Источниками азота при сварке в защитных газах могут быть воздух, попадающий в зону дуги при нарушении защиты или вследствие подсоса через корень шва; остаточные газы в металле проволоки и основном металле; азотсодержащие соединения на поверхности проволоки и свариваемых кромок; азот в защитных газах. Насыщение металла шва азотом может наблюдаться и при сварке металла, подготовка кромок которого производилась воздушно-плазменной резкой без последующей механической обработки.

Для определения стойкости швов против пор применяются различные методики — сварка по ржавчине, засыпан-

ной в стык или канавку, сварка в защитных газах с добавлением азота или водорода, преднамеренное увлажнение сварочных материалов [84, 180] и др. Критерием стойкости против образования пор является максимальное количество ржавчины, влаги или процентное содержание азота (водорода) в защитном газе, при котором в швах не возникают поры. Указанные методики позволяют определить влияние одного из газов на стойкость против образования пор, при этом влияние других газов учитывается косвенно или совсем не учитывается.

По нашему мнению, наиболее вероятной причиной образования пор при сварке в углекислом газе и смеси его с кислородом является наличие водорода и азота, так как образование окиси углерода подавляется применением проволок с достаточным количеством раскислителей. Для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  применяются проволоки Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ. Применение этих проволок позволяет получить плотные швы на чистых пластинках из стали Ст.3сп при содержании кислорода в смеси до 50 об. %. При сварке стыковых соединений или наплавке валиков на пластинах из стали Ст.3кп поры в швах не наблюдаются при содержании кислорода до 30—40 об. %. Опыт применения полуавтоматической сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  показал, что при выполнении швов на горячекатаных листах с толстым слоем окалины содержание кислорода в смеси необходимо уменьшить до 15—20 об. %, так как в зону плавления вносится дополнительное количество кислорода, содержащееся в окалине.

Возможность попадания в зону дуги водорода и азота предопределила выбор методики определения стойкости швов против образования пор: введение в шов водородсодержащих соединений; увлажнение защитного газа; введение в защитный газ азота.

В реальных условиях чаще всего поры возникают при сварке соединений, кромки которых покрыты ржавчиной или другими водородсодержащими соединениями. Поэтому для определения стойкости швов против образования пор при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  авторы выбрали методику, предложенную в работе [94], по которой в канавки укладывают порошковую проволоку, содержащую в сердечнике ржавчину. Изменение количества ржавчины на единицу длины достигается изменением числа укладываемых проволок и утонением самой порошковой проволоки. По уложенной проволоке с ржавчиной наплавляли шов в защитных газах

проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм, а для сравнения — под флюсом АН-348А проволокой Св-08ГА [11]. Для выявления пор образец разрезали по продольной оси шва. При наличии четырех пор и менее на 100 мм шва их оценивали как единичные. Для получения сопоставимых данных все опыты проводились на одинаковом режиме с равными скоростями подачи электродной проволоки и сварки. При этом во всех случаях количество расплавляемого металла независимо от способа сварки было одинаковым. Сварка выполнялась на таком режиме:  $I_{\text{св}} = 280 - 300$  А,  $U_{\text{д}} = 30 - 32$  В,

Таблица 15. Стойкость швов против пор, вызванных ржавчиной при сварке под флюсом и в защитных газах

Количество ржавчины на 100 мм шва, г	Наличие пор в швах		
	Флюс АН-348А	CO <sub>2</sub>	70% CO <sub>2</sub> + 30% O <sub>2</sub>
0,5	Нет	Нет	Нет
0,6	Единичные	»	»
0,7	Много	»	»
0,8	То же	Единичные	»
1,0	»	Много	»
1,2	»	То же	Единичные
1,3	»	»	Много

$u_{\text{св}} = 20$  м/ч,  $L = 20$  мм. В табл. 15 приведены данные по пористости швов, вызванной ржавчиной, при различных способах сварки.

Другой причиной возникновения пор при сварке в углекислом газе является повышенная влажность защитного газа. Как при сварке ржавого металла, так и при использовании защитной среды повышенной влажности в швах могут возникнуть поры, вызванные пересыщением металла сварочной ванны водородом.

Влияние влажности газа на стойкость металла шва против образования пор определяли при наплавке валиков на пластины из стали 09Г2С толщиной 20 мм. Расход защитной среды во всех случаях был одинаков (15 л/мин). Расстояние от нижней кромки сопла до пластины было постоянным, т. е. качество защиты примерно одинаково. Сварку выполняли проволоками Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм в углекислом газе и смеси 70% CO<sub>2</sub> + 30% O<sub>2</sub> на режиме  $I_{\text{св}} = 320 - 340$  А;  $U_{\text{д}} = 30 - 32$  В. Количество наплавленного металла в единицу времени было постоянным.

Для увлажнения защитный газ пропускали через воду различной температурой. Чем выше температура воды, тем больше влажность защитного газа, прошедшего через воду. Замер влажности осуществляли конденсационным методом — определением точки росы. Результаты исследований представлены в табл. 16.

Как видно из табл. 15 и 16, при сварке в смеси CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> стойкость швов против образования пор, вызванных водородом, выше, чем при сварке в углекислом газе. Как уже

Таблица 16. Зависимость стойкости швов против образования пор от влажности защитного газа

Влажность защитного газа, г/м <sup>3</sup>	Наличие пор в швах			
	CO <sub>2</sub> , L = 20 мм		70% CO <sub>2</sub> + 30% O <sub>2</sub> , L = 60 мм	
	Св-08Г2С	Св-08Г2СЦ	Св-08Г2С	Св-08Г2СЦ
3,81	Нет	Нет	Нет	Нет
5,12	»	»	»	»
6,84	Единичные внутренние	Единичные внутренние	»	»
9,4	Единичные наружные	То же	»	»
10,7	Много	Много	Единичные наружные	Единичные наружные
17,05	Сетка	Много	Много	Много

указывалось, добавка кислорода к углекислому газу снижает количество водорода, поглощаемого металлом сварочной ванны, и способствует лучшей ее дегазации в результате более длительного пребывания ванны в жидком состоянии и более благоприятной формы проплавления.

Влияние добавки кислорода к углекислому газу на стойкость швов против образования пор, вызванных азотом, изучалось нами при введении последнего в защитную среду. Для этого наплавливали валики на пластины из стали Ст.Зсп в углекислом газе и смеси 70% CO<sub>2</sub> + 30% O<sub>2</sub> с добавкой небольшого количества азота (2—10 об. %). Фиксировали содержание азота в защитной среде, которое соответствовало появлению наружных пор. Кроме того, сваривали тавровые соединения при различном содержании азота в защитном газе и определяли количество пор в изломе на 100 мм шва. Сварку образцов производили проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм на токе 330—350 А при напряжении на дуге 30—32 В. Результаты эксперимента приведены на рис. 33.

Из рисунка видно, что при сварке в углекислом газе наружные поры в наплавке, а также поры в изломе таврового образца не наблюдаются при введении 4,5% азота. Дальнейшее повышение количества азота в защитном газе приводит к появлению пор в изломе шва. Количество пор возрастает и достигает максимума при содержании азота, равном 7% по объему.

При сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  поры в швах возникают при содержании азота 6—7 об. %, а максимум пористости в изломе наблюдается при 8,5 об. % азота. Более высокая стойкость швов против образования пор, вызванных азотом при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  по сравнению со сваркой в углекислом газе, по-видимому, объясняется тем, что на торце электрода образуется шлак  $\text{FeO} - \text{SiO}_2 - \text{MnO}$ , препятствующий поглощению азота каплями электродного металла [95]. Известно также, что по влиянию газов на их взаимную растворимость активные газы можно расположить в следующем порядке: кислород, водород и азот [61]. Впереди стоящий газ может препятствовать растворению или вытеснять из

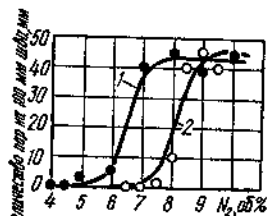


Рис. 33. Зависимость количества пор от содержания азота:  
1 —  $\text{CO}_2$ ; 2 —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

раствора последующий. Таким образом, при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  наблюдается более высокая стойкость против образования пор по сравнению со сваркой в углекислом газе.

Для многих изделий стойкость швов против образования пор имеет первостепенное значение. Например, швы сосудов, работающих под давлением, должны обеспечивать полную герметичность. В швах сосудов, подвергающихся эмалированию, не допускаются никакие дефекты. При грунтовке или эмалировании подготовленное изделие нагревается до температуры около  $950^\circ \text{C}$ . При наличии мельчайшей поры газ в ее полости разогревается, создается давление и он выходит на поверхность, образуя свищ или пузырек, нарушающий целостность покрытия. Изделие ремонтируется и повторно подвергается нагреву под эмалирование.

Пористость часто возникает при сварке сталей с защитными покрытиями. Учитывая более высокую стойкость против образования пор при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , этот способ был опробован для сварки сталей с защитными

покрытиями, так как на ряде предприятий страны возрастает объем листового и фасонного проката, прошедшего очистку поверхности и покрытого антикоррозионными грунтами. Такая предварительная консервация проката исключает или уменьшает коррозию углеродистых и низколегированных сталей при межоперационном хранении и транспортировке деталей, предохраняет поверхность деталей от прилипания брызг при сварке.

В отечественной практике для предварительной консервации проката широко применяются фосфатирующие грунты. Применение этих грунтов обусловлено их высокими защитными и пассивирующими свойствами, хорошей кроющей способностью, а также хорошей адгезией ко всем металлам и неметаллическим материалам. Используются грунты марок ВЛ-023, ВЛ-02, ВЛ-05. Фосфатирующие грунты изготовлены на основе поливинил-бутирала, они включают хромсодержащие пигменты и свободную фосфорную кислоту. Такие грунты применяются для покрытия проката на киевском заводе «Ленинская кузница», где создана механизированная линия по зачистке и консервации металла.

Известно, что при сварке в углекислом газе грунтовочные покрытия снижают стойкость металла против образования пор [8, 113]. В связи с расширением объема применения грунтовочных покрытий необходимо было исследовать влияние покрытий различных типов на качество сварных соединений, изыскать меры по повышению их стойкости против образования пор.

Были исследованы процесс автоматической сварки листов с предварительно нанесенным покрытием при соединении судового набора с полотнищем швами с катетом 3—4 мм. Толщина привариваемого к полотнищу элемента 4 мм, толщина полотнища 8—10 мм. Сварка выполнялась проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в углекислом газе и в смеси 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$  автоматическими установками на режимах: катет 3 мм —  $I_{\text{св}} = 160 - 170 \text{ A}$ ;  $U_{\text{д}} = 24 \text{ В}$ ;  $v_{\text{св}} = 36 \text{ м/ч}$ ; катет 4 мм —  $I_{\text{св}} = 170 - 180 \text{ A}$ ;  $U_{\text{д}} = 28 \text{ В}$ ;  $v_{\text{св}} = 30 \text{ м/ч}$ . Для сопоставления часть кромок зачищали от грунта до металлического блеска.

При сварке в углекислом газе и в его смеси с кислородом по очищенной от грунта поверхности поры, как наружные так и внутренние, в соединениях с катетом шва 4—5 мм не возникали. В швах с катетом 3 мм встречались одиночные поры. При сварке в углекислом газе по загрунтованной поверхности в шве, выполненном первым, обнаружены поры



в основном по оси шва. При этом с уменьшением катета количество пор возрастало. Изменение режима сварки, пределах, обеспечивающих хорошее формирование шва, не оказало заметного влияния на его качество. Шов двустороннего таврового соединения, выполненный вторым, был поражен порами в значительно большей мере, причём поры располагались по всему сечению шва. По-видимому, увеличение количества пор во втором шве связано с тем, что первый шов препятствует выходу газов, которые образуются при сгорании грунта, через зазор между соединяемыми деталями во время сварки второго шва.

При сварке в смеси углекислого газа с кислородом на загрязнённой поверхности в соединениях с катетом шириной 4 мм наружные поры не наблюдались. На длине около 700 мм в изломе шва обнаружено несколько не выходящих на поверхность пор диаметром не более 0,5 мм, не сказывающихся существенно на качестве соединений. При катете 3 мм в швах возникают одиночные поры, по характеру и количеству отличающиеся от пор в швах, выполненных по очищенной от грунта поверхности. Это свидетельствует о том, что введение кислорода в защитную смесь значительно улучшает условия дегазации жидкой ванны при сварке по загрязнённой поверхности и позволяет получать плотные, хорошо сформированные швы.

Таким образом, антикоррозионный грунт на поверхности свариваемых деталей снижает стойкость металла угловых швов против образования пор при автоматической сварке в углекислом газе, причём количество пор существенно возрастает с уменьшением катета шва.

Применение для защиты дуги смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  позволяет значительно повысить стойкость угловых швов против пор при сварке по загрязнённой поверхности.

## 2. Сопротивляемость швов образованию горячих трещин

Горячие трещины зарождаются в процессе первичной кристаллизации металла шва и развиваются при дальнейшем остывании. Характерная особенность горячих трещин — межкристаллитный характер разрушения. Горячие трещины являются одним из основных видов брака при сварке. Трещины — недопустимый дефект, так как они могут послужить причиной разрушения сварной конструкции.

Существует обширная литература о горячих трещинах в сварных швах [41, 44, 53, 55, 81, 84, 100, 101, 124, 139, 141, 147]. Тем не менее при изучении новых способов сварки определение стойкости против образования горячих трещин является одной из главных и обязательных задач. Конечная цель исследований стойкости швов против образования горячих трещин — определить условия, когда они не возникают, и найти наиболее эффективные меры их предупреждения.

Исследование сопротивляемости швов образованию горячих трещин при сварке в углекислом газе и смеси его с

Таблица 17. Химический состав основного металла и металла швов, %

Серия опытов	Защитный газ, %		C	Mn	Si	S	P
	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$					
Основной металл	—	—	0,21	0,68	0,20	0,030	0,021
I	100	0	0,13	0,95	0,20	0,019	0,018
II	90	10	0,12	0,90	0,17	0,018	0,018
III	70	30	0,12	0,77	0,12	0,018	0,019
IV	50	50	0,11	0,50	0,03	0,016	0,017

кислородом проводили на низкоуглеродистой стали Ст.3 и на сталях трех различных групп: низкоуглеродистых низколегированных марок 15Г2АФДпс, 16Г2АФ; среднеуглеродистых 25ГЛ, 30, 45 и среднеуглеродистых низколегированных 38ХС. Химический состав исследуемых сталей соответствует требованиям ГОСТа, содержание элементов — ближе к верхнему пределу.

Методы оценки стойкости металла швов против образования горячих трещин весьма разнообразны и многочисленны [115, 125, 142, 151].

Нами для исследования сопротивляемости образованию горячих трещин применялись технологические пробы — тавровая и МВТУ им. Н. Э. Баумана. Для количественной оценки испытывали образцы по методике, описанной в работе [115]. Применяемые технологические пробы имитируют реальные сварные соединения — тавровые и стыковые.

Для исследования влияния добавки кислорода к углекислому газу на стойкость против образования горячих трещин использовали методику [115], которая заключается в испытании сварных швов статическим изгибом в процессе сварки на специальной машине. За меру сопротивления

швов образованию горячих трещин принята максимальная скорость принудительной поперечной деформации, при которой в шве еще не образуются трещины. Исследования проводили на пластинах из стали марки Ст. 3. Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм постоянным током обратной полярности на режиме:  $I_{св} = 340 - 350$  А,  $U_d = 33 - 34$  В;  $v_{св} = 25$  м/ч. Химический состав основного металла и металла швов приведен в табл. 17. Результаты

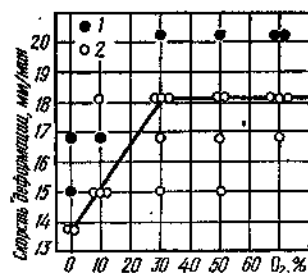


Рис. 34. Зависимость стойкости швов против образования горячих трещин от состава смеси: 1 — трещины; 2 — нет трещин

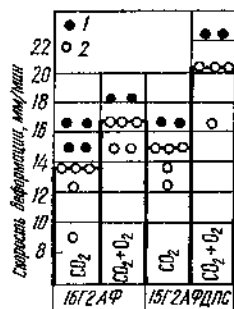


Рис. 35. Стойкость швов против образования горячих трещин на стали 16Г2АФ и 15Г2АФДпс: 1, 2 — то же, что на рис. 34.

испытаний представлены на рис. 34. Из рисунка видно, что кислород повышает стойкость металла швов против образования горячих трещин, достигая максимума при 30 об.%. Дальнейшее увеличение содержания кислорода не изменяет стойкости швов против трещин.

По той же методике были испытаны образцы из стали 15Г2АФДпс и 16Г2АФ толщиной 12 мм. Сравнивались швы, сваренные в смеси  $CO_2 + O_2$  проволокой Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм с увеличенным вылетом (60 мм) и швы, сваренные в углекислом газе теми же проволоками с вылетом (20 мм). Образцы сваривали трактором ТС-17 на режиме:  $I_{св} = 350 - 380$  А;  $U_d = 30 - 32$  В, ток постоянный обратной полярности. Результаты исследований приведены на рис. 35. Из рисунка видно, что критическая скорость деформации при сварке в смеси  $CO_2 + O_2$  выше, чем в  $CO_2$ . Сталь 15Г2АФДпс во всех случаях обладает более высокой стойкостью против образования горячих

трещин, чем сталь 16Г2АФ. По-видимому, это связано с увеличением содержания кремния в швах на стали 15Г2АФДпс по сравнению со швами на стали 16Г2АФ. Добавка циркония в проволоку практически не влияет на стойкость швов против образования горячих трещин, так как он почти полностью выгорает в дуге.

Дополнительные данные по сопротивляемости швов на стали 15Г2АФДпс и 16Г2АФ образованию горячих трещин получены при сварке технологических проб — тавровой пробы. Для этого две пластинки длиной 300 мм собирали в тавр с зазором 1,5—2,0 мм. Пластины прихватывали между собой по торцам и сваривали контрольный угловой шов катетом 8—9 мм в положении «в лодочку». После сварки и остывания контрольного шва по оси его наносили острым зубилом продольный надраз, что определяло разрушение образца по критическому сечению. Образец разрушали под прессом и определяли размеры и количество трещин в шлеме. Изменяя величину тока, получали количественную характеристику стойкости против образования трещин. Чем больше ток, при котором в шве не образуются горячие трещины, тем лучше свойства испытываемых материалов. Так можно оценить в первом приближении стойкость реальных угловых швов против образования горячих трещин.

Для оценки стойкости швов на стали 16Г2АФ и 15Г2АФДпс против образования трещин собирали тавровые образцы из пластин толщиной 30 и 32 мм соответственно. Сварка выполнялась полуавтоматом А-537 проволокой Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм постоянным током обратной полярности в углекислом газе и смеси его с кислородом. Содержание кислорода в смеси равно 30 об.%. Как показали опыты [11], швы, выполненные в смеси такого состава, обладают максимальной стойкостью против образования горячих трещин. Расход газа составлял 12—15 л/мин.

Исследованиями установлено, что стойкость швов на низколегированных сталях с нитридной фазой против образования трещин при сварке в смеси  $CO_2 + O_2$  выше, чем при сварке в углекислом газе с обычным вылетом. Так, трещины в кратере при сварке стали 16Г2АФ в углекислом газе наблюдаются на токе 440—460 А, а при сварке стали 15Г2АФДпс — на токе 500—550 А. В то же время при сварке с увеличенным вылетом в смеси  $CO_2 + O_2$  скорость подачи проволоки и сварочный ток могут быть увеличены на 25—30% и трещины в кратере не возникают. Сопротивляемость металла шва образованию трещин при сварке

Таблица 18. Стойкость швов на стали 38ХС против образования горячих трещин

Номер опыта	Защитный газ	Режимы сварки					Наличие трещин и их размеры, мм
		d <sub>св</sub> , мм	L, мм	Полярность тока	Температура подогрева, °С	I <sub>св</sub> , А	
Проволока Св-08Г2СЦ							
1	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	2,0	60	Обратная	Без подогрева	340	34
3		1,6	40	»	То же	210	31—32
184		1,6	40	»	200	210	31—32
183		1,6	20	Прямая	Без подогрева	200—220	29—30
171				»	То же	160	28
173		1,2	12—15	»	»	200—210	30
176				Обратная	»	200—210	30
Электрод НИАТ-3М							
379	—	5,0	—	Обратная	Без подогрева	200	25—28
Проволока Св-08ХГ0МФА							
380	CO <sub>2</sub>	1,6	20	Обратная	Без подогрева	220—250	26—30
381	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,6	40	»	То же	220—250	30—31
Проволока Св-08ХГ3Г2СМ							
376	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,6	40	Обратная	Без подогрева	300	32—33
391	CO <sub>2</sub>	1,2	12—15	»	То же	300—320	32—34
393	CO <sub>2</sub>	1,2	12—15	»	»	300—320	32—34
392	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,2	12—15	Обратная	200	300—320	32—34
390	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,2	12—15	То же	Без подогрева	200—210	30
Проволока Св-08ХГ3Г2СМ							
382	CO <sub>2</sub>	1,6	20	Обратная	Без подогрева	200—240	28—30
387	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,6	40	»	То же	200—240	30—31
388	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,6	40	»	200	200—240	30—31
385	CO <sub>2</sub>	1,2	12—15	»	Без подогрева	280—290	29—30
384	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,2	12—15	Обратная	Без подогрева	280—290	29—30
386	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>			»	200	280—290	29—30
383	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,2	12—15	»	Без подогрева	200—210	28

проволокой Св-08Г2СЦ такая же, как и при сварке проволокой марки Св-08Г2С. Стали 16Г2АФ и 15Г2АФДпс можно сваривать в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом проволок Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм практически со скоростями подачи проволоки до 600 м/ч.

Известно, что углерод резко снижает стойкость швов против образования горячих трещин [101]. Вместе с тем углерод — наиболее дешевый и наименее дефицитный из всех легирующих элементов, которые используются для получения углеродистых сталей повышенной прочности. Поэтому большое количество деталей и узлов машин изготавливается из сталей с повышенным содержанием углерода, например из сталей марок 30, 45, 38ХС и др. Как показали опыты, швы на низкоуглеродистых и низколегированных сталях, выполненные в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , обладают более высокой стойкостью против образования горячих трещин по сравнению со швами, выполненными в углекислом газе. Представляло интерес выяснить стойкость швов против образования трещин при сварке сталей с повышенным содержанием углерода.

С помощью тавровой пробы из пластин толщиной 12 мм определяли стойкость швов на стали 38ХС против образования горячих трещин. Выбор этой марки стали объясняется тем, что сталь 38ХС имеет не только повышенное содержание углерода, но и высокое содержание кремния. Кремний, как и углерод, способствует образованию горячих трещин [101].

Исследовали влияние режимов сварки, диаметра электродной проволоки, полярности, температуры предварительного подогрева. Сварку выполняли проволокой различных марок в углекислом газе и смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . Для сравнения часть образцов была сварена вручную электродами НИАТ-3М. Режимы сварки, применяемые материалы и результаты опытов приведены в табл. 18. Расход защитного газа 12–15 л/мин. Сварку проволокой диаметром 1,2 мм выполняли полуавтоматом А-547.

Из табл. 18 видно, что при сварке в смеси углекислого газа и кислорода стойкость против образования трещин выше, чем в углекислом газе. Несмотря на более высокую стойкость швов против образования трещин и при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , ток необходимо ограничивать: для проволоки диаметром 1,2 мм — 180–200 А; для проволоки диаметром 1,6 мм — 200–240 А. С уменьшением диаметра проволоки абсолютное значение тока также должно быть

снижено для обеспечения одной и той же стойкости против образования трещин. Это связано с тем, что с уменьшением диаметра проволоки при одном и том же токе плотность его возрастает, глубина проплавления увеличивается, снижается коэффициент формы шва. Известно, что снижение коэффициента формы шва отрицательно сказывается на стойкости против образования кристаллизационных трещин [65, 112].

Предварительный подогрев до 200° С позволяет увеличить ток на 100–200 А без снижения стойкости швов против образования трещин. Положительное влияние подогрева хорошо известно, и он используется как один из эффективных методов повышения сопротивляемости образованию трещин.

При сварке образцов проволокой Св-08Г2СЦ на прямой полярности стойкость против образования горячих трещин выше, чем в швах, сваренных на обратной полярности. Это объясняется тем, что уменьшается доля основного металла в шве, так как при сварке с одной и той же скоростью подачи проволоки при переходе на прямую полярность ток снижается. Для сохранения постоянной величины тока скорость подачи должна быть увеличена и доля электродного низкоуглеродистого металла также увеличивается, что благоприятно сказывается на стойкости против образования горячих трещин. С увеличением тока сопротивляемость образованию горячих трещин снижается независимо от вида защиты. Глубина проплавления при этом увеличивается, снижается коэффициент формы шва, увеличивается переход углерода в металл шва, что обуславливает снижение стойкости.

Высокой стойкостью против образования горячих трещин отличается шов, выполненный электродами НИАТ-3М. При сварке углового шва вручную он формируется в основном из электродного металла, имеющего низкое содержание серы, фосфора и углерода.

Тавровая проба — сравнительно простой и надежный способ проверки стойкости швов против образования трещин. Однако недостатком этой пробы является то, что она дает только качественную характеристику. Для получения количественной оценки сопротивляемости швов образованию трещин были сварены образцы по методике МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Образцы изготавливались из стали 15Г2АФДпс и 25ГЛ толщиной 12 мм в виде пластины длиной 200 мм. Ширина

образцов различна (30, 40, 50, 60, 80 и 100 мм). На концах пластины нанесены прорезы длиной 60 мм. Критерием стойкости металла шва против образования горячих трещин является наименьшая ширина пластины, при которой в шве не образуются трещины, а также длина трещины при одинаковой ширине пластины.

Обязательным условием при использовании технологической пробы МВТУ им. Н. Э. Баумана является получение полного провара. Сварку начинают на выводной планке от конца к центру пластины. Образцы из стали 15Г2АФДпс и 25ГЛ сваривали проволокой Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм с обычным вылетом в углекислом газе и увеличенным вылетом в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  на режимах, обеспечивающих полный провар. Образцы из стали 25ГЛ дополнительно сваривали вручную покрытыми электродами. Сварочные материалы, режимы сварки и результаты опытов на стали 25ГЛ приведены в табл. 19.

Внешний вид образцов после сварки представлен на рис. 36. Из табл. 19 и рис. 36 видно, что при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  трещины не образуются даже при ширине пластины 40 мм. При сварке электродами УОНИ 13/45 и АНО-4 трещины возникают при  $b = 60$  мм, причем длина трещины максимальна при использовании электродов АНО-4. Сварка в углекислом газе отличается более низкой стойкостью против образования трещин, чем в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , но более высокой, чем при ручной сварке покрытыми электродами.

Те же исследования, проведенные на стали 15Г2АФДпс, показали, что трещины при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электродной проволоки Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм не образуются при изменении ширины от 80 до 30 мм. Иногда в кратере возникают трещины длиной до 10 мм при замене смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  чистым углекислым газом.

По нашему мнению, рассматриваемая технологическая проба мало чувствительна к образованию трещин при сварке в активных защитных газах низколегированных сталей. Пробу можно применять для сталей, более склонных к образованию горячих трещин (литые стали, стали с повышенным содержанием углерода и вредных примесей).

Проведенные исследования показали, что при замене углекислого газа смесью его с кислородом стойкость швов против образования горячих трещин на 15—30% выше. Причины повышения стойкости следующие:

Таблица 19. Стойкость швов на стали 25ГЛ против образования горячих трещин

Сварочный материал	L, мм	$v_{\text{ш}}, \text{ м/ч}$	$i_{\text{св}}, \text{ А}$	$U_{\text{д}}, \text{ В}$	Ширина образца, мм	Длина трещины, мм	Место расположения трещины
Св-08Г2С 70% $\text{CO}_2 + 30\% \text{ O}_2$ $d_s = 2,0 \text{ мм}$	60	283	300—310	34	100	2—3	В кратере
						4—5	»
						4—5	»
						7—8	»
Св-08Г2С $d_s = 2,0 \text{ мм},$ $\text{CO}_2$	20	172	290—300	30—32	60	12	В начале шва
						7	В кратере
						15	»
						40	В начале шва
УОНИ 13/45	—	—	260—280	36—40	100	7—9	В кратере
						15—20	»
						25	В начале шва
						15	В кратере
АНО-4	—	—	260—280	36—38	100	10—15	»
						65	По всей длине
						68	»
						50	»

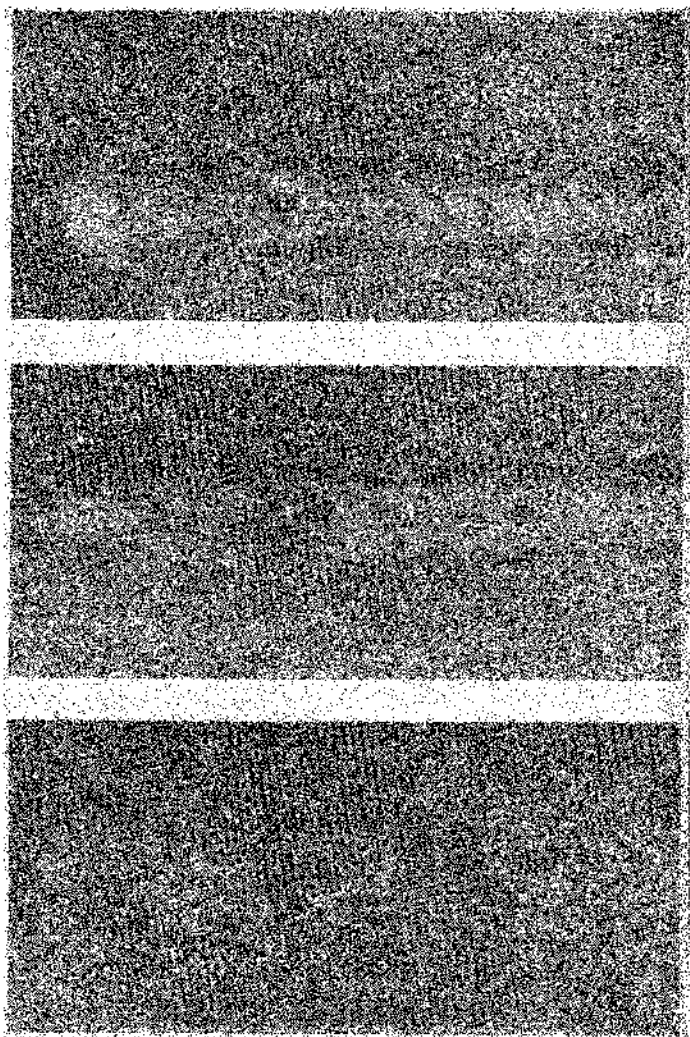


Рис. 36. Внешний вид образцов пробы МВГУ после сварки:  
 $a$  — Св-08Г2С,  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $b = 40$  мм;  $b$  — УОНИ 13/45,  $b = 60$  мм;  
 $c$  — АНО-4;  $b = 60$  мм.

1) повышенная окисленность металла сварочной ванны. Образующиеся при этом дисперсные окислы служат центрами выделения сульфидов. Окиссульфиды имеют глобулярную форму, более равномерно расположены по сечению шва и менее опасны, чем пленочные сульфиды;

2) более благоприятная форма шва, особенно при сварке на больших токах;

3) несколько меньшее содержание в металле шва углерода и кремния, отрицательно сказывающихся на стойкости против образования трещин (см. табл. 17).

О степени влияния некоторых легирующих элементов и кислорода на склонность к горячему растрескиванию можно судить по уравнению регрессии, которое вывели авторы работы [163]. Они установили, что кислород является сильным ингибитором, препятствующим образованию горячих трещин. Уравнение регрессии для определения склонности к растрескиванию имеет вид

$$CSF = 42 [C] + 847 [S] + 265 [P] - 10 [Mo] - 3042 [O_2] + 19, \quad (4.1)$$

где  $CSF$  — чувствительность металла шва к образованию горячих трещин.

Видно, что незначительное увеличение содержания кислорода резко повышает стойкость против образования горячих трещин.

Общеизвестно, что при сварке первого слоя многослойного стыкового шва с разделкой кромок и полным проваром создаются неблагоприятные условия в отношении формы затвердевания сварочной ванны. Такие швы обладают очень низкой стойкостью против образования горячих трещин.

На рис. 37 представлены макрошлифы, вырезанные из стыка с V-образной разделкой кромок и углом раскрытия  $30^\circ$ , что обеспечивает неблагоприятную форму шва. Видно, что при сварке в углекислом газе проволокой Св-08Г2С с обычным вылетом наблюдается горячая трещина в месте стыка столбчатых кристаллитов. В шве, сваренном на пластине из той же стали в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  той же проволокой, трещины отсутствуют.

На рис. 38 показаны кратеры швов, наплавленных на пластины из стали 45 с содержанием углерода 0,48%. При сварке в углекислом газе длина трещины в кратере достигает 20 мм, в то время как при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электрода трещины в кратере не наблюдаются.

Высокую стойкость швов против образования кристаллизационных трещин при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  отмечают авторы работы [102]. Из всех защитных сред ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2 + 20\% \text{O}_2$ ,  $\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2 + 4\% \text{O}_2$ )



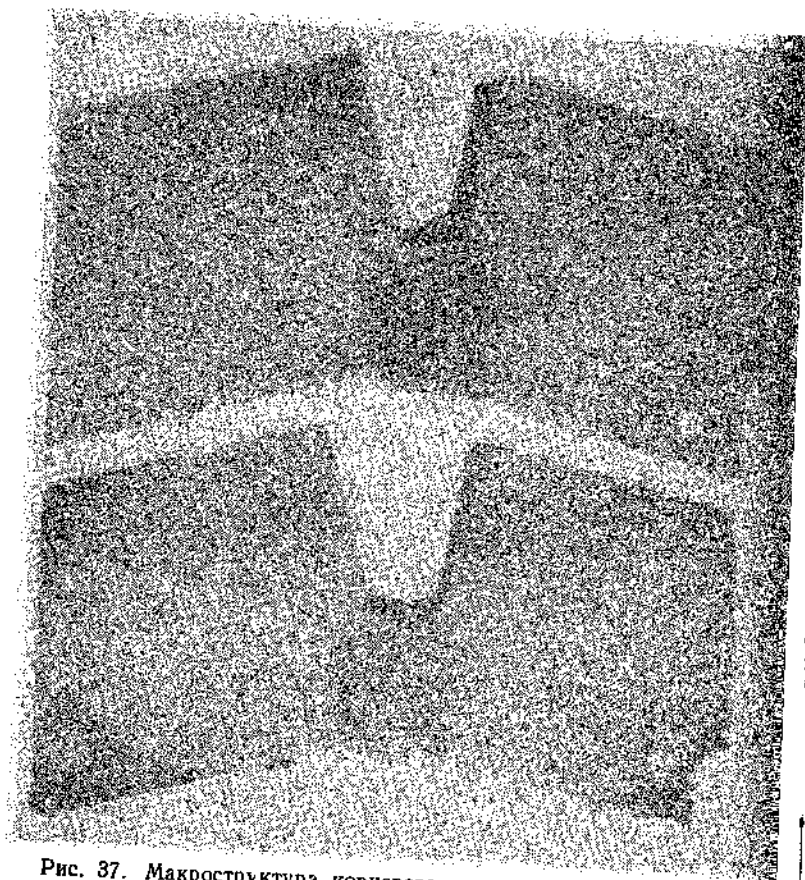


Рис. 37. Макроструктура корневого шва на стали 16Г2АФ при сварке в углекислом газе (а) и смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  (б).

швы, выполненные в смеси  $\text{CO}_2 + 20\% \text{O}_2$ , обладают наиболее высокой стойкостью против образования горячих трещин.

### 3. Стойкость сварных соединений против образования холодных трещин

Характерной особенностью холодных трещин является их замедленное развитие — они часто возникают через некоторое время после сварки.

Холодные трещины образуются как в металле шва, так и в околошовной зоне сталей, склонных к образованию малопластичных метастабильных структур, и являются ти-

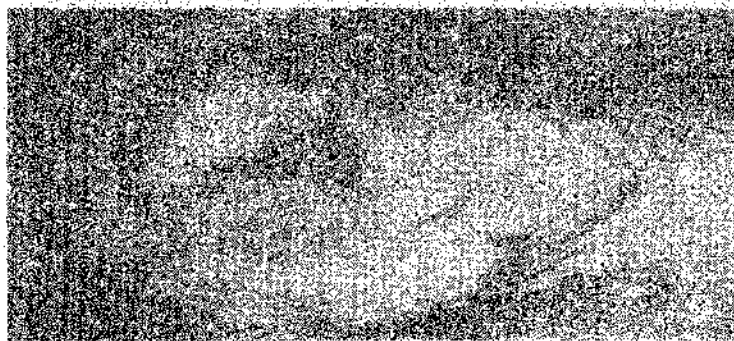
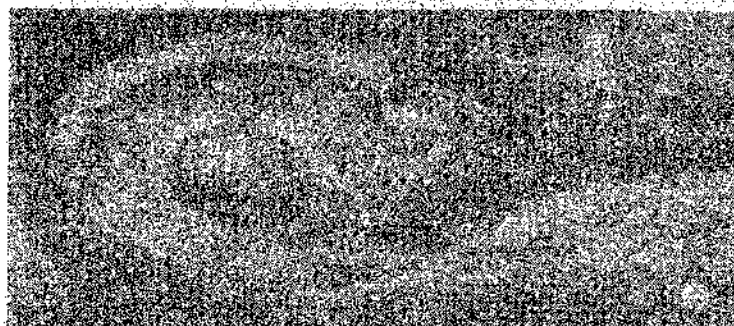


Рис. 38. Трещины в кратере при наплавке валиков на пластину из стали 45:

а —  $\text{CO}_2$ ,  $L = 20$  мм; б —  $70\% \text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$ ,  $L = 20$  мм; в —  $70\% \text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$ ,  $L = 60$  мм.



пичным дефектом сварных соединений из средне- и высоколегированных сталей перлитного и мартенситного классов а также сталей с повышенным содержанием углерода. Довольно часто они встречаются при сварке низколегированных сталей повышенной прочности. Поскольку стали повышенной прочности и стали с повышенным содержанием углерода имеют широкое применение, исследование стойкости против образования холодных трещин при изучении новых процессов сварки имеет большое значение.

Возможность образования холодных трещин в околошовной зоне низколегированных сталей повышенной прочности отмечает ряд исследователей. Автор работы [165] считает, что основным затруднением, с которым сталкиваются при сварке сталей повышенной прочности, является образование трещин в околошовной зоне. Для их предупреждения необходим подогрев и использование сварочных материалов, вносящих минимальное количество водорода в металл шва.

По мнению авторов [133], при разработке технологии сварки сталей с нитридным упрочнением (типа 16Г2АФ) главное внимание необходимо уделять исследованию стойкости против образования холодных трещин и хрупкого разрушения. Ими было установлено, что склонность исследуемой стали к холодным трещинам зависит от погонной энергии и для сварки под флюсом погонная энергия должна ограничиваться 25—42 кДж/см.

Опасность возникновения холодных трещин при полуавтоматической сварке в углекислом газе стали 16Г2АФ толщиной выше 12 мм при скорости охлаждения больше 30° С/с отмечается в статье [18]. Для их предупреждения рекомендуют предварительный подогрев до 120—160° С.

Нет единого мнения о механизме образования холодных трещин. Многочисленные исследования позволили лишь четко установить основные факторы, влияющие на их возникновение. Документ Международного института сварки МИС—IX—348—71 [175] определяет условия возникновения трещин следующим образом: «Холодные трещины возникают в случае, когда совместно действуют три фактора: закаливаемость, водород и напряжения, связанные с процессом сварки и зависящие от жесткости соединения».

Появление околошовных трещин при сварке слабопрокаливающихся конструкционных сталей, как правило, связано с влиянием водорода [118]. Накопление водорода в участках околошовной зоны может привести к резкому сни-

жению пластичности. Водород выделяется в полостях или инлокациях и вызывает возникновение высоких локальных напряжений. Если к существующим напряжениям от сварочных и структурных превращений добавляются дополнительные напряжения от выделившегося водорода, то в малопластичном металле околошовной зоны могут возникнуть трещины. Поэтому выбор способа сварки, при котором в шов вводится минимальное количество водорода, становится особенно важным при изготовлении конструкций из сталей повышенной прочности.

Для оценки стойкости сварных соединений против образования холодных трещин применяются различные способы: определение эквивалента углерода  $C_{экр}$  и твердости металла в околошовной зоне [106, 186]; испытание сварных соединений на замедленное разрушение [35, 109, 124, 125]; сварка специальных технологических проб [125, 142, 151].

Определение твердости в подваликовом слое — простой метод, позволяющий сделать важные выводы о влиянии легирующих элементов на образование закалочных структур. Это влияние чаще всего оценивается эквивалентом углерода.

В настоящее время существует около 30 различных формул для определения  $C_{экр}$ , а также для соотношения между твердостью и эквивалентом углерода. Формулы отличаются друг от друга учетом разных легирующих элементов, выбором различных коэффициентов для одного и того же элемента, а также различными критериями оценки.

Для определения эквивалента углерода IX комиссия Международного института сварки приняла следующую формулу [152]:

$$C_{экр} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (4.2)$$

Считают, что если  $C_{экр}$  меньше 0,4%, то трещины в околошовной зоне не возникают, при  $C_{экр} = 0,4—0,7\%$  необходим предварительный подогрев. Если  $C_{экр} = 0,7—1,0\%$ , то для предотвращения трещин в околошовной зоне нужен высокотемпературный подогрев перед сваркой или предварительный и сопутствующий подогрев. При  $C_{экр} > 1,0\%$  сталь не сваривается обычными методами сварки плавлением.

Д. Сефериан [106] предложил формулу для подсчета полного эквивалента углерода:

$$C_{экр} = [C]_x + [C]_p \quad (4.3)$$

где  $[C]_x$  — химический эквивалент углерода, характеризующий состав стали,

$$360 [C]_x = 360 C + 40 (Mn + Cr) + 20 Ni + 28 Mo; \quad (4.1)$$

$[C]_p$  — размерный эквивалент углерода, определяющий размеры свариваемых деталей,

$$[C]_p = 0,005s [C]_x, \quad (4.2)$$

где  $s$  — толщина свариваемых листов, мм.

Во избежание образования трещин максимальную твердость в околошовной зоне ограничивают значением 350 H.V.

Японские исследователи И. Ито и К. Бессю [175] вместе с  $C_{экс}$  предложили оценивать склонность к образованию холодных трещин параметром  $P_c$ , который определяется по формуле

$$P_c = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{t}{600} + \frac{H}{60}, \quad (4.3)$$

где  $t$  — толщина свариваемого металла, мм;  $H$  — количество диффузионного водорода,  $cm^3/100$  г.

В формулах (4.2) — (4.6) символ элемента обозначает его содержание в процентах.

Если  $P_c \leq 0,3$ , то холодные трещины не образуются, при  $P_c > 0,4$  возможность образования холодных трещин составляет 100%.

Описанный метод оценки стойкости сварного соединения против холодных трещин является приближенным и может быть применен для сравнительной предварительной оценки различных сталей.

Существуют количественные методы оценки стойкости сварных соединений против образования холодных трещин, основанные на теории замедленного разрушения и предусматривающие механические испытания сварных образцов или образцов из основного металла, обработанных по термическому циклу сварки. Сюда относятся методы МВТУ им. Н. Э. Баумана, ИМЕТ-4, TRC, метод «вставок», ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР и ряд других. Недостатки этой группы методов заключаются в том, что в настоящее время нет достаточной корреляции между результатами испытаний и стойкостью против образования холодных трещин в реальных конструкциях.

Наиболее широкое применение получили методы определения стойкости металла против образования холодных

трещин на специальных технологических пробах, имитирующих сварное соединение. Это позволяет достаточно точно воспроизводить условия сварки реальных конструкций с учетом основных факторов, влияющих на образование трещин: толщины и жесткости конструкции, температуры основного металла, способа и технологии сварки и т. п. Указанные методы получили широкое распространение благодаря их простоте и наглядности.

Стойкость против образования холодных трещин оценивается по наличию или отсутствию их (качественная оценка), по относительной длине трещины, скорости охлаждения околошовной зоны и времени до появления первой трещины (количественная оценка).

Влияние содержания кислорода в защитной смеси на образование холодных трещин при сварке стали 16Г2АФ, 15Г2АФДис определяли с помощью технологических проб — пробы Теккен и крестовой [151]. Выбор этих проб обусловлен тем, что в них сочетаются реальные термические циклы сварки с некоторой жесткостью, обеспечивающей определенный уровень напряжений первого рода, которые способствуют образованию холодных трещин.

Модифицированную пробу Теккен [151] собирают из двух пластин с зазором 2 мм, прихватывают между собой и затем сваривают с двух сторон связующими швами длиной 60 мм. Контрольный шов сваривают на выбранных режимах после полного остывания образца. В начале и в конце контрольного шва оставляют незаваренные участки длиной 2—3 мм. Кратер должен быть заварен. Минимальная толщина листа для сварки указанной пробы составляет 12 мм. Каждый опыт производится не менее чем на трех образцах.

Холодные трещины образуются в корне контрольного шва и распространяются по шву или околошовной зоне. В кратере иногда образуются горячие трещины. Трещины выявляют через 48 ч после сварки внешним осмотром поверхности шва, затем шов разрезают перпендикулярно к оси на темплеты для макрошлифов, по которым определяют размеры трещин в поперечном сечении шва. Степень разрушения определяется как отношение суммарной длины разрушенного участка к общей длине контрольного шва. Степень разрушения определяют на поверхности сварного соединения, в корне шва и поперечном сечении (рис. 39). Многочисленными наблюдениями установлено, что если при оптимальных условиях суммарная протяженность трещин

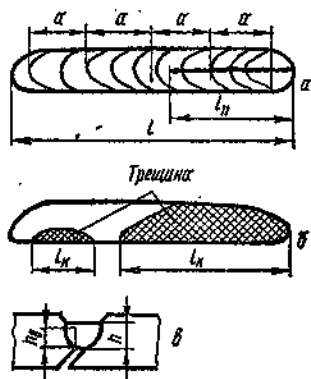


Рис. 39. Схема определения степени разрушения контрольного шва при использовании пробы Теккен и Лихайского университета:

а — на поверхности валика  $C_{\text{н}} = \frac{\Sigma I_{\text{н}}}{I} 100\%$ ; б — в корне шва  $C_{\text{к}} = \frac{\Sigma I_{\text{к}}}{I} 100\%$ ; в — по высоте валика  $C_{\text{в}} = \frac{h_{\text{в}}}{h} 100\%$

Эквивалент углерода  $C_{\text{экв}}$  и параметр  $P_c$  для исследуемых марок сталей приведены в табл. 21. Из этой таблицы видно, что по эквиваленту углерода (параметру  $P_c$ ) указанные стали склонны к образованию холодных трещин. Максимальные значения  $C_{\text{экв}}$  ( $P_c$ ) имеют стали с повышенным содержанием углерода, которые в действительности имеют более низкую стойкость к образованию холодных трещин. Однако ограничиться только подсчетом  $C_{\text{экв}}$  или  $P_c$  не

в корне шва или прилегающей зоне, превышает 50% общей длины шва, то при тех же условиях гарантируется отсутствие трещин в реальных сварных соединениях из низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Кроме пробы Теккен, имитирующей стыковое соединение, сваривали образцы крестовых пробы. Исследования проводили по методике [151]. Химический состав сталей, используемых для исследования стойкости против образования холодных трещин, приведен в табл. 20. Исследования проводили в такой последовательности: определяли эквивалент углерода и максимальную твердость в околошовной зоне, затем сваривали технологические пробы, указанные выше.

Таблица 20. Химический состав основного металла, %

Марка стали	Толщина, мм	C	Mn	Si	V	Cu	Cr
16Г2АФ	40	0,15	1,65	0,53	0,14	—	—
15Г2АФДпс	14	0,16	1,43	0,05	0,15	0,37	—
	32	0,18	1,60	0,08	0,14	0,34	—
Сталь 45	14	0,45	0,80	0,30	—	—	—
	30	0,49	0,60	0,28	—	—	—
38ХС	20	0,36	0,42	1,07	—	—	1,28

содержанием углерода, которые в действительности имеют более низкую стойкость к образованию холодных трещин. Однако ограничиться только подсчетом  $C_{\text{экв}}$  или  $P_c$  не

следует, так как при этом не учитываются скорость охлаждения, напряженное состояние, качество сварочных материалов и др.

Дополнительные данные о сопротивляемости сварного соединения образованию холодных трещин можно получить, измерив твердость металла в околошовной зоне. По мнению ряда авторов [106, 175], холодные трещины в реальных конструкциях не возникают, если твердость в околошовной зоне не превышает 350 НВ.

Таблица 21. Эквивалент углерода исследуемых сталей

Марка стали	Толщина, мм	$C_{\text{экв}}, \%$		$P_c, \%$		
		по формуле МИС	по формуле Д. Сеферяна	$[H]_{\text{диф}} = 6 \text{ см}^2/100 \text{ г}$ (ручная сварка УОНИ 13/45)	$[H]_{\text{диф}} = 4 \text{ см}^2/100 \text{ г}$ (сварка в $\text{CO}_2$ )	$[H]_{\text{диф}} = 1,8 \text{ см}^2/100 \text{ г}$ (сварка в смеси $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ )
16Г2АФ	40	0,46	0,40	0,41	0,38	0,34
15Г2АФДпс	14	0,45	0,35	0,39	0,36	0,32
	32	0,50	0,42	0,40	0,37	0,33
Сталь 45	14	0,58	0,58	0,61	0,58	0,54
	30	0,61	0,64	0,67	0,64	0,60
38ХС	20	0,69	0,605	0,61	0,58	0,54

Исследования показали, что твердость в околошовной зоне при сварке стали 16Г2АФ и 15Г2АФДпс в углекислом газе и смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволокой диаметром 2,0 мм превышает 350 НВ. Это значит, что при сварке указанных сталей могут возникать трещины в околошовной зоне, поэтому сварку необходимо производить в определенном диапазоне режимов с погонной энергией не менее 16 кДж/см для металлов толщиной более 20 мм.

При сварке стали 45 и 38ХС на режимах, характерных для полуавтоматической сварки, твердость в околошовной зоне может достигать 450—500 НВ. Эти стали склонны к образованию холодных трещин и для их предупреждения необходимо применять специальные технологические приемы сварки.

Ограничиваться лишь замером твердости металла в околошовной зоне для определения стойкости против образования холодных трещин не следует, так как при этом не учитывается ни количество водорода, ни уровень возникающих напряжений. Как показали наши исследования, можно допустить более высокую твердость металла околошовной

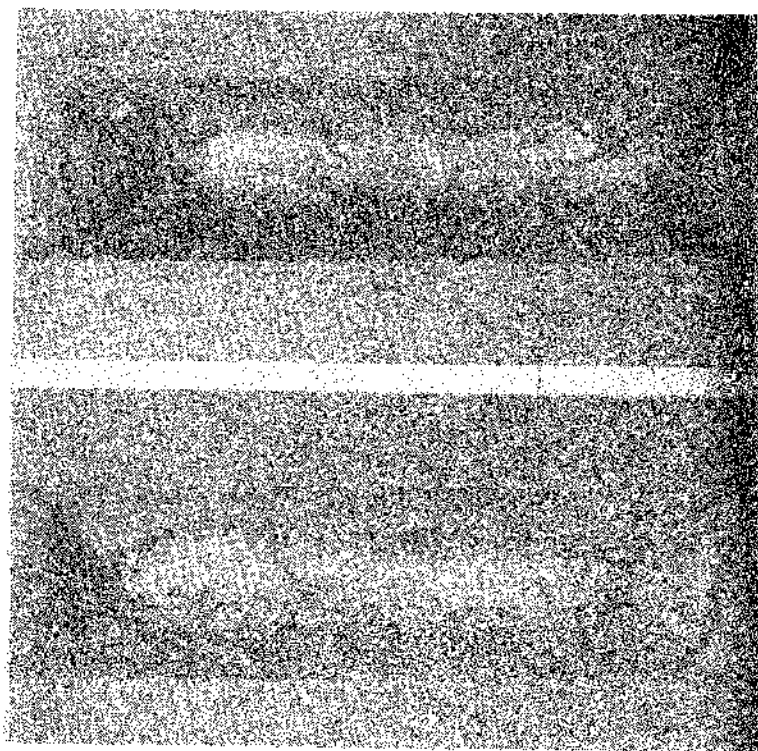


Рис. 40. Внешний вид контрольного шва при сварке пробы Теккен:  
а —  $\text{CO}_2$ ,  $L = 20$  мм; б —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $L = 60$  мм.

зоны без опасности возникновения трещин, если обеспечить низкий уровень водорода в металле шва.

Сравнительные испытания стойкости против образования холодных трещин при сварке в углекислом газе и смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  сталей 16Г2АФ толщиной 40 мм и 15Г2АФДпс толщиной 14 и 32 мм проводили с помощью пробы Теккен. Сварку образцов производили полуавтоматом А-537. Источник питания — выпрямитель ВС-600. Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм на токе 280—300 А.

Для каждой толщины, марки стали и способа сварки было сварено по три-четыре образца. Внешний вид образцов после сварки и выдержки в течение 48 ч представлен на рис. 40. Трещины в швах образовались спустя несколько минут после сварки. Макроструктуры показаны на рис. 41.

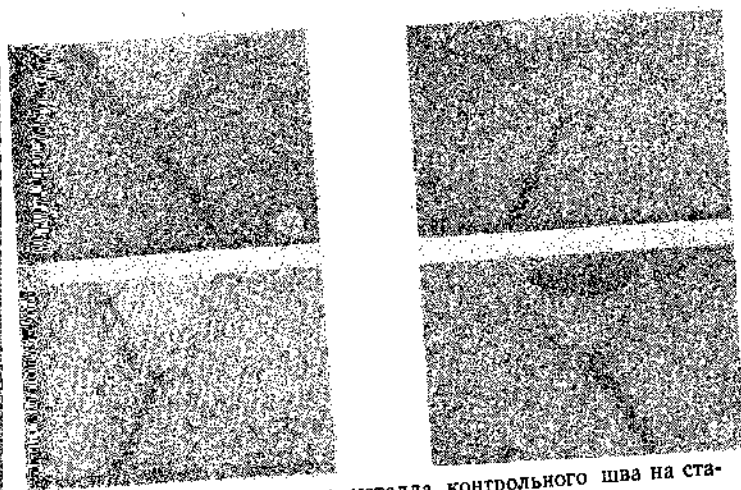


Рис. 41. Макроструктура металла контрольного шва на ста-  
ли 16Г2АФ (а, б) и 15Г2АФДпс (в, г):  
а, в —  $\text{CO}_2$ ,  $L = 20$  мм; б, г —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $L = 60$  мм.

Результаты внешнего осмотра поверхности валиков, макрошлифов и подсчет степени разрушения представлены в табл. 22.

Исследование макро- и микроструктуры показали, что трещины образуются в корне шва и располагаются как в шве

Таблица 22. Степень разрушения образцов пробы Теккен

Марка стали	Толщина, мм	Защитный газ	L, мм	Степень разрушения шва, %		
				на поверхности	в корне	по высоте
16Г2АФ	40	$\text{CO}_2$	20	$\frac{56-81}{72}$	100	95
			60	$\frac{6,2-8,7}{7,0}$	$\frac{0-75}{45}$	$\frac{0-42}{26}$
15Г2АФДпс	14	$\text{CO}_2$	20	0	$\frac{50-100}{78}$	$\frac{5-72}{28,5}$
			60	0	$\frac{0-15}{3,2}$	$\frac{0-12}{1,0}$
15Г2АФДпс	32	$\text{CO}_2$	20	$\frac{23,4-80}{35}$	100	$\frac{91-98}{96}$
			60	$\frac{4,1-20}{16}$	$\frac{25-100}{45}$	$\frac{11-77}{44}$

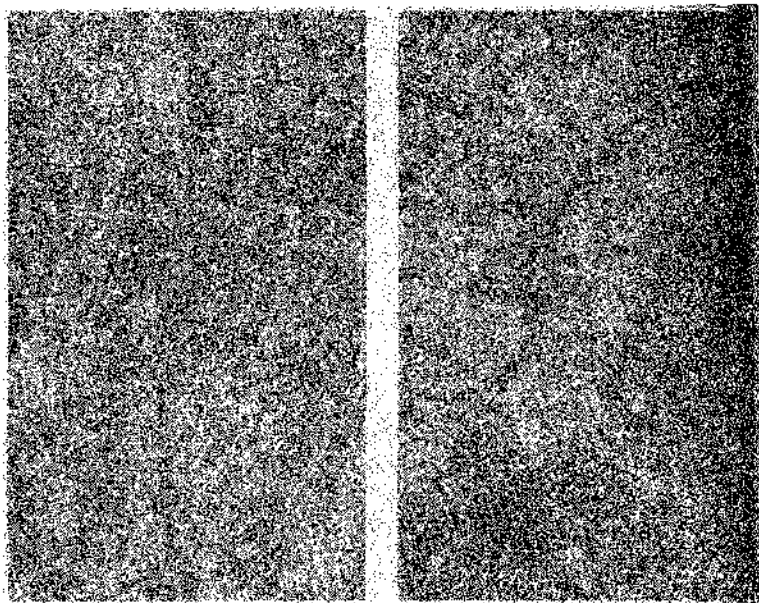


Рис. 42. Микроструктура металла контрольного шва:  
а — трещина в шве; б — трещины в околошовной зоне.  $\times 63$ .

(рис. 42, а), так и в зоне крупного зерна (рис. 42, б). Трещина в околошовной зоне может проходить как по границам, так и по телу зерна. В металле шва трещина проходит чаще всего по ферритной прослойке, но может и пересекать ее. Трещина часто проходит через неметаллические включения.

Зона крупного зерна, в которой могут образоваться холодные трещины, имеет структуру с дисперсным эвтектоидом сорбитного типа, ориентированным по кристаллографическим плоскостям. Твердость металла в этой зоне составляет 350—360 НВ. Микроструктура зоны термического влияния на стали 16Г2АФ и 15Г2АФДпс одинакова.

При сварке в углекислом газе и смеси его с кислородом металл шва имеет литую феррито-перлитную структуру, однако при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  количество феррита несколько увеличивается. Твердость металла шва 240—260 НВ. Из табл. 22 видно, что стойкость против образования трещин при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  выше, чем при сварке в углекислом газе.

Поскольку для сравнительных исследований стойкости против образования холодных трещин образцы вырезали

из одного листа, степень закаливаемости и напряженное состояние при сварке пробы Теккен практически одинаковы. Изначит, более высокую стойкость сварного соединения против образования холодных трещин при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  можно объяснить прежде всего более низким содержанием водорода в металле шва и околошовной зоне. Определенное влияние оказывает и меньшая скорость охлаждения, чем при сварке в углекислом газе.

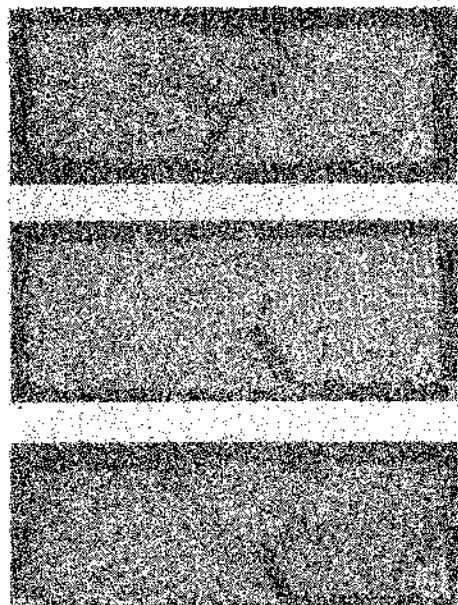
Таблица 23. Режимы сварки и степень разрушения контрольных швов

Сварочные материалы	I, А	$v_{\text{ср}}$ , м/ч	Степень разрушения шва, %		
			на поверхности	в корне	по высоте
н-08Г2С $t_s = 2,0$ мм $\text{CO}_2$	150	8,0	0	16—30 25	10—22 18
	230—260	14,5	0—85 47	100	16—80 53
	320—330	21,0	60—81 76	100	100
н-08Г2С $t_s = 2,0$ мм 10% $\text{CO}_2 + 30\%$ $\text{O}_2$	130—150	8,0	0	0	0
	250—260	18,0	0	25—100 62	8—12 10
	350	24,0	34—50 42	100	100
УОНИ 13/55	150	6,5	54—81 71	100	100
	210	11,0	100	100	100

Влияние режимов сварки на стойкость сварного соединения против образования холодных трещин изучали с помощью пробы Теккен. Пластины для изготовления образцов вырезали из низкокремнистой стали типа 15Г2АФД толщиной 14 мм. Химический состав основного металла, %: С 0,18; Мн 1,8; Si 0,08; V 0,19; Cu 0,20; Ni 0,08; Cr 0,1. Эквивалент углерода, подсчитанный по формуле (4.2), равен 0,55%. Сварочные материалы, режимы сварки и результаты проверки контрольных швов пробы Теккен показаны в табл. 23. Макроструктуру металла контрольных швов иллюстрирует рис. 43.

Из табл. 23 и рис. 43 видно, что наибольшую стойкость имеют швы, сваренные в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , наименьшую —

при ручной сварке электродами УОНИ 13/55. Необходимо отметить, что при сварке вручную трещины зарождаются не только в корне шва, но и в околошовной зоне (рис. 43, а). При сварке в углекислом газе наблюдается промежуточное положение. Такое распределение способов сварки по стойкости против образования холодных трещин хорошо согласуется с содержанием водорода в металле шва. При сварке вручную электродами УОНИ 13/55 в шве наблюдается бо-



льшее количество водорода, чем при сварке в углекислом газе или смеси его с кислородом, несмотря на то, что электроды перед сваркой прокалялись в печи при температуре 350—380°С в течение 2 ч.

Из той же таблицы видно, что на стойкость против образования холодных трещин большое влияние оказывает спо-

Рис. 43. Макроструктура контрольного шва при сварке:

а — вручную электродами УОНИ 13/55; б —  $\text{CO}_2$ ; в —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

содержание водорода в металле шва. С увеличением тока и скорости сварки увеличивается скорость охлаждения, а значит, и количество мартенсита, что резко снижает сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин.

Дополнительные результаты о стойкости сварных соединений против образования холодных трещин были получены при сварке крестовых проб из низкокремнистой стали типа 15Г2АФД толщиной 14 мм. Химический состав металла указан в табл. 20. Сварку выполняли полуавтоматом А-537 проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм в углекислом газе и смеси 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$ , а также вручную электродами УОНИ-13/55 и АНО-4 диаметром 4,0 мм. Швы сваривались в последовательности, указанной в работе [151]. Каждый последующий валик выполнялся после полного остыва-

ния предыдущего до комнатной температуры. Осмотр поверхности контрольных швов производили непосредственно после сварки, а также через 24 и 48 ч. При осмотре трещин в шве и околошовной зоне не были обнаружены. Затем презали темплеты, изготавливали макрошлифы и контролировали наличие трещин с помощью бинокля с семикратным увеличением. Внешним осмотром макрошлифов трещины не выявлены.

Металлографическими исследованиями установлено, что при использовании электродов с рутил-карбонатным покрытием в околошовной зоне наблюдаются микротрещины. Образование микротрещин связано с большим содержанием диффузионного водорода в шве при использовании электродов АНО-4. Как показали опыты, крестовая проба мало пригодна для оценки стойкости низколегированных сталей против образования холодных трещин. Проведенные исследования подтвердили, что сварные соединения, выполненные в смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$ , обладают более высокой стойкостью против образования холодных трещин, чем при сварке в углекислом газе и вручную электродами низководородистого типа. Причиной повышения стойкости является низкое содержание водорода и снижение скорости охлаждения. Это значит, что имеется возможность сваривать в смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$  низколегированные стали повышенной прочности и допускать существенно более высокую твердость в зоне термического влияния, не опасаясь образования холодных трещин.



## ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

Сварка плавящимся электродом в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  применяется при полуавтоматическом и автоматическом процессах, как и сварка в углекислом газе. Сочетание смеси углекислого газа и кислорода с активированной проволокой сплошного сечения позволяет значительно стабилизировать процесс сварки расщепленным электродом диаметром 2—3 мм, улучшить формирование швов и снизить разбрызгивание.

При полуавтоматической сварке этот способ используется для выполнения швов во всех пространственных положениях при изготовлении конструкций из углеродистых и низколегированных сталей в цеховых условиях. При сварке на открытых площадках необходимо применять защитные устройства, предупреждающие сдувание защитной среды и обеспечивающие получение качественных сварных соединений.

Рациональной областью применения сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электродной проволоки диаметром 1,6—2,0 мм является выполнение в нижнем положении стыковых и угловых соединений, где требуется большой объем наплавленного металла. Процесс отличается высокой производительностью. Сварка проволоками диаметром 1,4 мм и ниже выполняется во всех пространственных положениях.

### 1. Общие положения

Технология сварки выбирается в зависимости от марки стали и требований, предъявляемых к сварным соединениям. Учитывая широкую номенклатуру применяемых марок углеродистых и низколегированных сталей и разнообразие требований, зависящих от типа и назна-

чения изделия, нельзя однозначно описать технологический процесс сварки. Необходимо только отметить, что разработанная технология сварки конкретного изделия должна обеспечить получение соединений, отличающихся достаточной работоспособностью при минимальной трудоемкости.

Несущая способность и экономичность сварной конструкции весьма существенно зависит от точности подготовки деталей к сварке, их чистоты и качества сборки. Небрежное выполнение подготовительных и сборочных работ приводит к резкому возрастанию вероятности образования дефектов в сварных соединениях.

Конструкционные элементы подготовки кромок, типы сварных швов и их размеры при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  должны соответствовать ГОСТ 14771—76.

Основной металл до сборки в местах сварки должен быть очищен от ржавчины, масла, влаги, рыхлого слоя окислы и других загрязнений. Особенно тщательно необходимо зачищать места сварки при изготовлении ответственных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей и сталей с повышенным содержанием углерода, так как большинство загрязнений является источниками водорода и может вызвать образование пор и трещин. Целесообразно очищать и прилегающие к кромкам участки шириной 20—30 мм, что позволяет получить более плавный переход к основному металлу и повышенную прочность при переменных нагрузках.

Сборка под сварку должна обеспечивать возможность качественной сварки. Для этого необходимо выдерживать заданный зазор между соединяемыми деталями и зафиксировать их в нужном положении так, чтобы их взаимное расположение не нарушалось в процессе сварки и кантовки. В массовом и крупносерийном производстве для сборки деталей и сварки узлов применяются специальные сборочно-сварочные приспособления. В единичном производстве скрепление деталей осуществляется с помощью струбцин, клиньев, стяжных уголков, а в подавляющем большинстве случаев — короткими отрезками швов — прихватками длиной 20—120 мм. Расстояние между прихватками составляет 200—800 мм. В ряде случаев (при сварке труб) прихватки заменяют сплошным швом небольшого сечения. Прихватки выполняются вручную качественными электродами, полуавтоматом в углекислом газе или смеси его с кислородом. Рекомендуется выполнять их со стороны,



обратной наложению первого рабочего шва или сл. Прихватки перед сваркой дожны быть тщательно ош. Прихватки с дефектами должны удаляться и первариваться.

При разработке технологии сварки большое внима. необходимо уделять правильному выбору сварочных м. териалов, обеспечивающих получение плотных беспор. тых швов с высокой технологической и эксплуатацион. прочностью.

Как показали исследования, для сварки углеродист. и низколегированных сталей обычной и повышенной пр. ности ( $\sigma_s \leq 450$  МПа) в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с обычным и у. личенным вылетом необходимо применять проволоки мар. Св-08Г2С по ГОСТ 2246—70 и Св-08Г2СЦ (с цирконие. по ТУ 14-4-791—76 (ТУ 14-287-19—78). При свар. с увеличенным вылетом в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  предпочтитель. но применять проволоку марки Св-08Г2СЦ, которая обеспе. чивает низкий уровень разбрызгивания и привариваемост. брызг. Сварку среднеуглеродистых низколегированных ста. лей типа 33ХС, 38ХС, 40Х и др. следует выполнять про. волоками марок Св-08ГСМТ, Св-08ХГСМФА, Св-08ХЗГ2СМ. обеспечивающими получение металла шва высокой пр. ности.

Сварочные материалы (электродная проволока, угл. кислый газ и кислород) должны соответствовать требо. ваниям действующих стандартов и ТУ. Электродная про. волока должна иметь чистую и гладкую поверхность бе. окалины, ржавчины, масла и других загрязнений, нару. шающих электрический контакт и снижающих стабил. ность процесса сварки, что приводит к увеличению разбрыз. гивания. При наличии указанных загрязнений проволоку. предварительно следует очистить.

Решающее влияние на качество сварного соединения. оказывает режим сварки, т. е. совокупность основных ха. рактеристик (параметров) сварочного процесса. Основными. параметрами режима сварки плавящимся электродом в. смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  являются диаметр электродной проволоки. полярность, величина тока, напряжение на дуге, скорость. подачи электродной проволоки, скорость сварки, длина. вылета электродной проволоки, наклон и колебания элек. трода, состав и расход защитного газа. Режим сварки. определяет форму и размеры шва, ширину зоны термич. еского влияния, скорость охлаждения металла шва и. околошовной зоны, долю участия основного и электродног.

металла в шве, производительность процесса. При выборе. режимов сварки необходимо стремиться получить требу. емое качество сварных соединений при максимальной. производительности и минимальной стоимости процесса.

При выборе диаметра электродной проволоки прежде. всего руководствуются толщиной металла и положением. шва в пространстве. Полуавтоматическая сварка в смеси.  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  производится проволоками следующих диамет. ров: 0,8—1,4 мм — с обычным вылетом во всех простран. ственных положениях; 1,2—2,0 мм — с увеличенным вы.

Таблица 24. Зависимость величины тока и напряжения от диаметра. проволоки и пространственного положения

d <sub>э</sub> , мм	Нижнее		Вертикальное		Потолочное	
	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В
0,8	50—110	15—18	50—100	15—17	50—100	14—16
1,0	50—180	17—22	50—160	18—20	60—110	15—18
1,2	120—250	19—26	110—220	19—22	110—170	17—20
1,4	140—300	19—28	120—220	19—22	120—180	18—21
1,6	150—350	20—30	—	—	—	—
2,0	200—500	25—35	—	—	—	—

летом в нижнем положении, а также в горизонтальном. положении стыковых швов с разделкой кромок. Сварка. в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  выполняется на постоянном токе обрат. ной полярности.

Для каждого диаметра электродной проволоки су. ществует диапазон тока и напряжения на дуге, в котором. обеспечивается устойчивость процесса сварки и удовлет. ворительное формирование шва. Рекомендуемые диапазо. ны тока и напряжения на дуге в зависимости от диаметра. проволоки и положения шва в пространстве при сварке. в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с обычным вылетом электрода приве. дены в табл. 24. При сварке с увеличенным вылетом ди. апазон тока при определенной величине вылета приведен. в табл. 10.

Для сварки плавящимся электродом в защитных газах. наиболее часто применяются механизмы подачи проволоки с. постоянной скоростью. Величина тока в таких системах ре. гулируется скоростью подачи проволоки. Величина тока. в зависимости от скорости подачи проволоки, диаметра. и вылета электрода, а также номинальное напряжение. на дуге, при котором обеспечивается удовлетворительное

формирование и минимальное разбрызгивание для данной величины тока, приведены в табл. 25. Данные, приведенные в таблице, получены при использовании стандартных источников питания ВС-300, ВС-600 и механизмов

Таблица 25. Зависимость параметров режима сварки от скорости подачи проволоки

L, мм	v <sub>п</sub> , м/ч	d <sub>0</sub> = 1,6 мм			d <sub>0</sub> = 2,0 мм		
		I, А	U, В		I, А	U, В	
			холостого хода	на дуге *		холостого хода	на дуге *
20	81	100	27	23—24	150	30	24—25
	104	120	28	24—25	180	32	24—25
	137	140	30	25—26	230	34	26—27
	172	170	31	25—26	290	39	29—30
	215	210	33	26—27	360	43	31—32
	283	260	34	26—27	430	48	32—33
	363	300	37	27—28	490	49	33—34
	453	350	40	29—30	540	52	34—35
	598	420	46	32—33	620	54	35—36
40	81	80	34	27—28	130	33	28—29
	104	100	34	27—28	160	34	28—29
	137	120	35	28—29	180	36	29—30
	172	150	36	29—30	230	41	32—34
	215	180	37	30—31	280	42	33—34
	283	210	39	31—32	340	44	34—35
	363	260	40	32—33	380	48	34—35
	453	290	42	32—33	460	50	35—36
	598	360	43	33—34	520	52	35—36
60	81	60	34	29—30	110	34	29—30
	104	80	35	29—30	130	35	29—30
	137	100	36	30—31	170	37	30—31
	172	130	38	31—32	200	38	31—32
	215	150	39	32—33	240	40	32—33
	283	190	40	32—33	290	41	33—34
	363	220	41	33—34	340	44	35—36
	453	250	42	34—35	400	48	36—37
	598	310	45	35—36	470	53	37—38

\* Суммарное напряжение на дуге и вылете.

подачи полуавтомата А-537 или ПДГ-508. Из табл. 25 видно, что с увеличением вылета при одной и той же скорости подачи проволоки ток уменьшается. Для компенсации падения напряжения на вылете необходимо увеличить на 2—7 В напряжение холостого хода, о чем было сказано выше.

Скорость сварки плавящимся электродом обычно находится в пределах 15—80 м/ч, ее выбирают с учетом качества формирования и производительности процесса. С увеличением вылета скорость сварки увеличивается, даже если величина тока остается постоянной. Сварку металла большой толщины лучше выполнять на большей скорости более узкими валиками. При малой скорости сварки размеры сварочной ванны увеличиваются. Ухудшается газовая защита расплавленного металла вследствие появ-

Таблица 26. Зависимость длины вылета и расхода защитной смеси от диаметра проволоки

d <sub>0</sub> , мм	L, мм	Расстояние от сопла до свариваемого металла, мм	Расход смеси, л/мин
0,8—1,0	8—11	7—10	5—10
1,2	8—15	8—15	8—12
1,4	8—20	8—18	8—16
1,6	15—22	14—20	12—18
2,0	16—28	15—25	15—20

ления интенсивных конвективных потоков воздуха, в шве могут возникать поры.

Влияние длины вылета электрода на параметры режима сварки и выбор оптимальной величины вылета описано в главе второй. В случае применения проволоки диаметром 1,6—2,0 мм с величиной вылета до 40 и 60 мм соответственно дополнительного направления проволоки не требуется. Она обладает достаточной жесткостью, и процесс сварки протекает стабильно.

Как при сварке с обычным вылетом электрода, так и с увеличенным вылетом для обеспечения надежной защиты расплавленного металла газом расстояние от торца сопла горелки до свариваемого металла остается постоянным. Рекомендуемая величина обычного вылета, а также расстояние от сопла горелки до изделия для обычного и увеличенного вылетов электрода в зависимости от диаметра проволоки приведены в табл. 26.

Сварку плавящимся электродом в защитных газах можно выполнять как вертикально расположенным электродом, так и с наклоном его углом вперед и углом назад. Полуавтоматическая сварка плавящимся электродом обычно выполняется с колебаниями конца электрода.

Оптимальный состав смеси для сварки углеродистых и низколегированных сталей приведен выше. Расход смеси зависит от диаметра проволоки, типа соединения и взаимного расположения деталей, наличия сносящих потоков воздуха, конструкции сопла и др. Расход защитного газа при сварке в цеховых условиях приведен в табл. 26. Наименьшее количество газовой смеси расходуется при сварке угловых швов в положении «в лодочку», наибольшее — при наружных угловых соединениях и соединениях с отбортовкой кромок. В последнем случае для улучшения газовой защиты расход смеси рекомендуется увеличить на 10% по сравнению с данными, приведенными в табл. 26.

## 2. Влияние режима сварки на форму и размеры швов

При сварке плавящимся электродом в защитных газах форма шва в основном определяется режимом сварки, а также положением шва в пространстве, теплофизическими свойствами металла и др. Зависимость геометрических параметров шва от условий и режима сварки связано с изменением интенсивности теплового и силового воздействия на основной металл.

Ниже рассмотрено влияние параметров режима на форму шва и его размеры при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . Все опыты проводили при наплавке валиков на пластины, так как известно, что размеры и форма шва не зависят от типа шва [112]. Линейные параметры измеряли с помощью инструментального микроскопа на пяти — восьми поперечных шлифах и определяли среднюю величину соответствующего параметра. При исследовании влияния одного из параметров режима на форму шва все остальные оставались постоянными.

**Диаметр электродной проволоки.** С уменьшением диаметра проволоки при прочих равных условиях увеличивается глубина проплавления, ширина шва остается практически одинаковой. Уменьшается коэффициент формы проплавления. Высота усиления увеличивается, шов имеет менее плавный переход к основному металлу. Уменьшение диаметра проволоки при одинаковом токе приводит к увеличению плотности тока в электроде и снижению подвижности столба дуги. Увеличивается концентрация потока газов и паров металла. Следствием этого является

увеличение удельного силового воздействия дуги и соответственно увеличение глубины проплавления.

**Величина и полярность тока.** Влияние тока на ширину шва и глубину проплавления изучали при сварке в углекислом газе и смеси его с кислородом электродной проволокой с обычным и увеличенным вылетом. Во всех случаях, как обычно, повышение тока вызывает увеличение глубины проплавления и ширины шва (рис. 44). Коэффициент формы проплавления уменьшается, увеличивается доля основного металла в металле шва, что неблагоприятно сказывается на стойкости швов против образования горячих трещин.

Влияние полярности на размеры шва исследовали при наплавке валиков проволокой Св-08Г2СЦ. Наплавку производили в  $\text{CO}_2$  и смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с обычным и увеличенным вылетом электрода. Результаты исследования приведены в табл. 27.

Таблица 27. Влияние полярности тока на размеры швов

Защитный газ	L, мм	Полярность тока	$v_{\text{п}}$ , м/ч	I, А	Размеры шва					
					B, мм	H, мм	h, мм	B/H	$F_{\text{в}}$ , мм <sup>2</sup>	$F_{\text{о}}$ , мм <sup>2</sup>
$\text{CO}_2$	20	Обратная	278	460	18,0	8,0	4,0	2,2	40	78
		Прямая	278	330	17,0	3,5	4,2	4,8	42	40
		»	380	450	18,0	7,0	4,0	3,5	48	71
	60	Обратная	453	450	18,0	8,2	5,0	2,2	68	75
		Прямая	453	410	18,0	4,2	5,0	4,3	62	42
		»	500	440	19,0	6,0	5,0	3,8	69	54
70% $\text{CO}_2$ + 30% $\text{O}_2$	20	Обратная	278	450	18,0	7,0	3,0	2,6	41	72
		Прямая	278	330	17,5	4,0	3,0	4,4	38	41
		»	380	460	19,0	7,0	4,0	2,7	49	69
	60	Обратная	453	460	18,0	6,8	4,2	2,0	56	82
		Прямая	453	410	19,0	4,0	4,5	4,7	56	47
		»	500	450	20,0	5,0	4,8	4,0	59	55

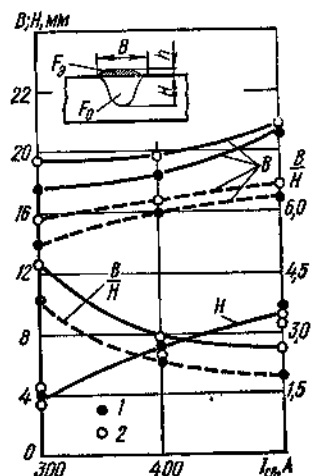


Рис. 44. Зависимость размеров шва от тока при сварке проволокой диаметром 2,0 мм: 1 —  $\text{CO}_2$ ; 2 — 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$ ; сплошные кривые —  $L = 60$  мм; штриховые —  $L = 20$  мм.

Из таблицы видно, что при сварке на одной и той же скорости подачи проволоки переход с обратной полярности на прямую вызывает снижение тока на 11—30% в зависимости от вылета. При этом уменьшается глубина проплавления и ширина шва. Наблюдаемое уменьшение тока, а значит, и глубина проплавления тем больше, чем меньше вылет.

Влияние полярности на форму шва объясняется различным количеством тепла, выделяющегося на аноде и катод. При сварке с увеличенным вылетом электрода часть энергии расходуется на подогрев электрода и доля энергии, выделяющейся в дуге, снижается. В этом случае изменение полярности меньше сказывается на глубине проплавления.

Рис. 45. Зависимость размеров шва от напряжения на дуге при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  ( $d_s = 2,0$  мм;  $L = 60$  мм).

Рациональной областью применения сварки на прямой полярности является наплавка высокоуглеродистых сталей, так как при этом уменьшается переход углерода в металл шва и повышается стойкость против образования трещин. Однако при сварке на прямой полярности снижается стабильность процесса и увеличивается разбрызгивание.

**Напряжение на дуге.** С увеличением напряжения на дуге ширина шва увеличивается, глубина проплавления и усиления шва практически не изменяется (рис. 45). Однако напряжение на дуге сильно сказывается на разбрызгивании. Поэтому при полуавтоматической сварке в углекислом газе и смеси его с кислородом с обычным и увеличенным вылетом электрода ширину шва обычно регулируют путем колебания конца электрода, как и при ручной сварке покрытыми электродами.

**Скорость сварки.** Рис. 46 иллюстрирует влияние скорости перемещения дуги при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электрода. Из рисунка следует, что увеличение скорости сварки значительно снижает глубину проплавления вследствие уменьшения величины погонной энергии. Ширина шва и высота усиления также уменьшаются. Однако при скорости сварки 15—

30 м/ч, характерной для полуавтоматической сварки, глубина проплавления изменяется незначительно.

**Длина вылета электродной проволоки.** Проведенные нами исследования показали, что длина вылета электрода значительно влияет на режим сварки и плавление металла. Влияние длины вылета электрода на размеры швов при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  исследовали для двух вариантов: при постоянной скорости подачи проволоки и при неизменном значении сварочного тока.

При ступенчатом увеличении вылета и неизменной скорости подачи проволоки, как было сказано выше, увеличивается температура подогрева электрода и снижается величина тока. Как видно из рис. 47, а, увеличение вылета электрода, независимо от диаметра проволоки при постоянной скорости ее подачи, приводит к уменьшению проплавления основного металла. Характер изме-

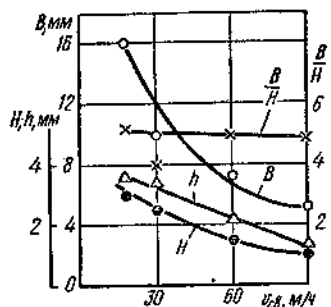


Рис. 46. Зависимость геометрических параметров шва от скорости сварки ( $d_s = 2,0$  мм;  $I_{св} = 220-240$  А).

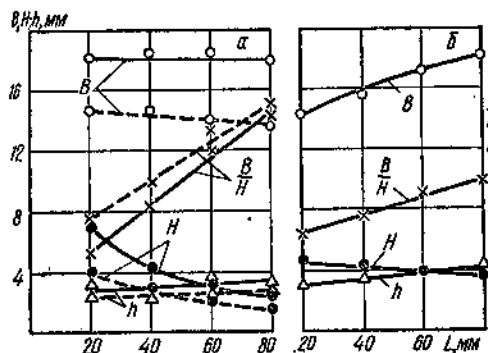


Рис. 47. Зависимость размеров шва от длины вылета при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ : а — постоянная скорость подачи проволоки (сплошные кривые —  $d_s = 2,0$  мм;  $v_{п} = 240$  м/ч; пунктирные —  $d_s = 1,6$  мм;  $v_{п} = 300$  м/ч); б — постоянный ток ( $I_{св} = 300$  А).

нения глубины проплавления от длины вылета совпадает с характером изменения тока от этой же величины.

Изменение длины вылета проволоки практически не влияет на ширину шва и высоту усиления при условии сохранения постоянной длины дуги. Как показали исследования [86], это справедливо и для проволоки большого диаметра. При данном варианте удлинения вылета коэффициент формы проплавления  $B/H$  значительно возрастает.

тает. Уменьшается площадь проплавления основного металла при неизменной площади наплавленного электродного металла (рис. 48, а) и снижается доля основного металла в шве. Это положительно сказывается при сварке сталей с повышенным содержанием углерода и легирующих элементов, когда переход их из основного металла в шов может вызвать образование трещин. Снижение глубины проплавления при сварке с увеличенным

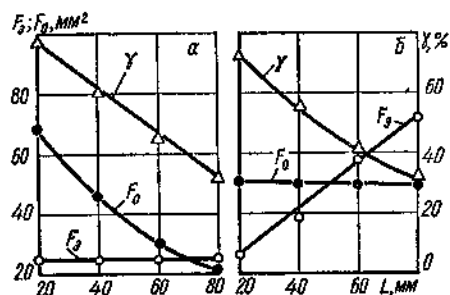


Рис. 48. Зависимость площади проплавления  $F_0$ , накладки  $F_g$  и доли участия основного металла в шве  $\gamma$  от величины вылета:  
а — постоянная скорость подачи ( $v = 240$  м/ч); б — постоянный ток ( $I_{св} = 300$  А).

вылетом способствует предотвращению прожогов и в этом случае можно сваривать тонкий металл проволокой большего диаметра.

При увеличении вылета электрода и неизменной величины тока скорость подачи электродной проволоки возрастает. В этом случае влияние вылета на геометрические размеры швов представлены на рис. 47, б и 48, б. Из приведенных кривых следует, что ширина шва и высота усиления увеличиваются вследствие увеличения количества расплавленного электродного металла. Глубина провара практически не изменяется, что объясняется одинаковым давлением дуги на металл, пропорциональным току и не зависящим от длины вылета электрода. Характерно, что в этом случае ( $I_{св} = \text{const}$ ) при сварке в углекислом газе швы имеют резкий переход к основному металлу, который является сильным концентратором напряжений и отрицательно сказывается на работоспособности сварного соединения особенно при знакопеременных нагрузках. Добавка кислорода к углекислому газу обеспечивает плавность перехода шва к основному металлу.

Увеличение вылета электрода при неизменной величине тока, как и при постоянной скорости подачи проволоки снижает долю основного металла в шве, что уменьшает возможность появления горячих трещин при сварке сталей.

**Наклон электрода.** Влияние наклона электрода на размеры шва приведено в табл. 28. Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм в смеси 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$  с обычным и увеличенным вылетами электрода при токе 250 А. Угол наклона электрода составлял 45° к

Таблица 28. Зависимость параметров шва при сварке в смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$  от длины вылета и наклона электрода

Положение электрода при сварке	$L$ , мм	$U_d$ , В	$v_{\text{п}}$ , м/ч	Размеры шва			
				$B$ , мм	$H$ , мм	$h$ , мм	$B/H$
Вертикальное Углом вперед Углом назад	80	32—33	278	13,5	2,4	3,0	5,5
				13,1	2,2	3,1	6,0
				10,5	2,9	3,8	3,6
Вертикальное Углом вперед Углом назад	20	33	147	11,1	3,4	2,3	3,3
				11,9	3,2	1,6	3,7
				9,4	3,5	2,1	2,7

плоскости шва. Из таблицы видно, что изменение глубины проплавления и ширины шва в зависимости от угла наклона электрода при сварке с удлиненным вылетом подчинено тем же закономерностям, что и при обычном вылете и вызвано причинами, описанными в работе [52].

Таблица 29. Размеры шва при наплавке валика проволокой диаметром 1,2 мм

Содержание $\text{O}_2$ , %	Размеры шва, мм, при наплавке валика на токе, А					
	200			300		
	$B$	$H$	$h$	$B$	$H$	$h$
0	10,5	2,6	2,5	13,7	4,7	3,4
15	11,0	2,9	2,3	—	—	—
30	11,8	3,2	2,4	14,9	4,9	2,5

Полуавтоматическую сварку в углекислом газе и смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$  обычно выполняют с поперечными колебаниями электрода. В зависимости от амплитуды колебаний изменяется ширина шва и высота усиления.

**Состав и расход защитного газа.** Состав защитного газа влияет на технологические характеристики процесса, форму проплавления и размеры швов. Влияние добавки кислорода к углекислому газу на размеры шва представлено в табл. 29 и на рис. 49. Из таблицы и рисунка видно, что с увеличением содержания кислорода в смеси при одном и том

не вылете, а также при увеличении длины вылета при одном и том же содержании кислорода ширина шва увеличивается. Эта зависимость характерна для всех диаметров электрода.

Добавка кислорода к углекислому газу практически не изменяет глубину проплавления для проволок диаметром

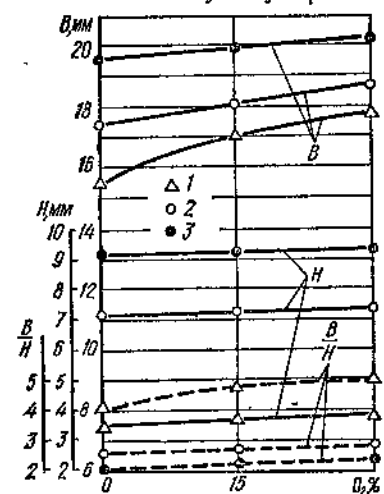


Рис. 49. Зависимость размеров швов от содержания кислорода в смеси при сварке проволокой диаметром 2,0 мм:

1 —  $I_{св} = 300$  А; 2 —  $I_{св} = 400$  А; 3 —  $I_{св} = 500$  А.

выделившегося при протекании окислительно-восстановительных реакций, составляет больший процент по отношению ко всему количеству тепла, затраченному на плавление металла, чем при сварке на больших токах. Расход газа в обычно применяемых пределах не влияет на параметры шва и технологические характеристики процесса. При значительном увеличении расхода ширина шва уменьшается и растет высота усиления, что объясняется охлаждающим действием газа.

Проведенные исследования позволили установить влияние основных параметров режима сварки на размеры шва. Сравнивая полученные результаты с результатами, приведенными в работе [61], можно сделать вывод, что характер влияния тока, напряжения, скорости сварки и

других параметров режима на размеры шва практически не зависят от того, выполняется сварка в углекислом газе или в смеси  $CO_2 + O_2$ .

Для проволок диаметром 1,6—2,0 мм. Для проволок диаметром 1,2 мм глубина проплавления при сварке в смеси  $CO_2 + O_2$  несколько увеличивается по сравнению со сваркой в чистом углекислом газе. Коэффициент формы шва увеличивается с повышением содержания кислорода в смеси. Улучшаются условия дегазации металла ванны, повышается стойкость против образования горячих трещин.

Необходимо отметить, что с уменьшением тока ширина шва при добавке кислорода к углекислому газу растет более интенсивно (см. рис. 49). Это связано, на наш взгляд, с тем, что при сварке на малых токах количество тепла,

### 3. Техника сварки соединений различных типов

Техника сварки в смеси  $CO_2 + O_2$  практически не отличается от техники сварки в углекислом газе.

Стыковые соединения металла толщиной до 3—4 мм сваривают электродной проволокой Св-08Г2С или

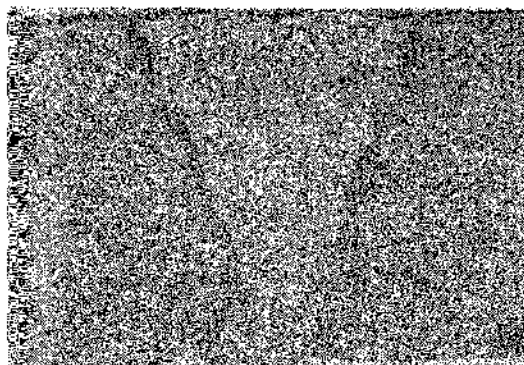


Рис. 50. Макрофотография многослойного шва на стали толщиной 60 мм.

Св-08Г2СЦ диаметром не более 1,4 мм. Выполняют сварку односторонним швом без разделки кромок на весу, а при необходимости полного провара используются различные подкладки: стальная остающаяся, медная, флюсовая, флюсомедная и др. Сварка на флюсовой и флюсомедной подкладке, при которой расплавленный металл контактирует с флюсом, не влияет отрицательно на свойства шва, а в зависимости от состава флюса может привести к его легированию. То же самое относится ко всем первым (корневым) швам сталей различных толщин, сварка которых производится на флюсовой или флюсомедной подкладке.

В зависимости от толщины металла и зазора сварку выполняют без поперечных колебаний электрода или с поперечными колебаниями небольшой амплитуды.

Стыковые соединения металла толщиной 4—12 мм сваривают двухсторонним швом без разделки кромок. Для металла толщиной до 20 мм применяют V-образную разделку кромок и сварку выполняют за 2—3 перехода. V-образная разделка проще в изготовлении, чем X-об-

разная, рекомендуемая для металла толщиной свыше 20 мм, и поэтому ею часто пользуются при сварке стали значительно большей толщины.

При многослойной сварке стыковых соединений первый слой выполняют при возвратно-поступательном движении электрода без поперечных колебаний. Второй и последующие слои выполняют с поперечными колебаниями электрода. Сварку всех слоев рекомендуется выполнять на одном режиме.

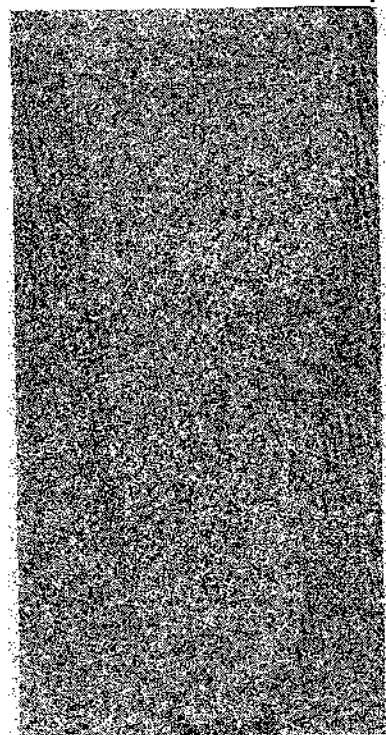


Рис. 51. Макрошлиф многослойного шва на стали толщиной 130 мм.

Шов сварен за 12 проходов со средней скоростью 12 м/ч и производительностью более 13 кг/ч.

На рис. 51 приведен макрошлиф шва с U-образной разделкой (со скосом кромок  $15^\circ$ ), выполненный на стали толщиной 130 мм. В отличие от предыдущего случая техникой сварки предусматривалось наложение каждого слоя с поперечными колебаниями по всей ширине зазора. Для обеспечения надежного провара из-за большого отвода тепла при сварке толстого металла у каждой кромки электрод задерживался дополнительно 1—2 с. Сварка выполня-

лась полуавтоматом электродной проволокой диаметром 2,0 мм с вылетом 60 мм на указанном выше режиме. Формирование металла хорошее.

Сварку многослойных стыковых угловых соединений, а также однослойных соединений металла толщиной более 4 мм в нижнем положении наиболее рационально выполнять проволокой диаметром 1,6—2,0 мм с увеличенным вылетом электрода в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

Стыковые соединения сваривают с наклоном электрода. Угол наклона может изменяться от  $5^\circ$  до  $25^\circ$  к вертикали. Сварку производят справа налево («углом вперед»), или слева направо («углом назад»). В последнем случае глубина провара в сравнении со сваркой «углом вперед» увеличивается на 25—30%.

При многослойной сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  каждый последующий валик накладывается без зачистки шлака с поверхности шва. Зачистка шва от шлака при сварке на токе около 400 А необходима лишь после сварки пятого-шестого слоя.

Угловые швы сваривают с наклоном электрода поперек соединения на  $30^\circ$ — $45^\circ$  к стене вертикальным электродом или «углом вперед», а также вертикальным электродом в положении «в лодочку». Техника сварки угловых соединений в положении «в лодочку» аналогична технике сварки стыковых соединений с разделкой кромок.

Сварка угловых швов «в лодочку» в различных пространственных положениях — вертикальном, потолочном, на наклонной плоскости в смеси углекислого газа и кислорода, как и в углекислом газе, выполняется электродной проволокой диаметром не более 1,2 мм.

На рис. 52 показан шов и положение держателя при сварке в вертикальном положении «снизу вверх». Сварка производилась в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  на токе 150 А и напряжении дуги 22 В. Формирование шва хорошее. Рис. 53

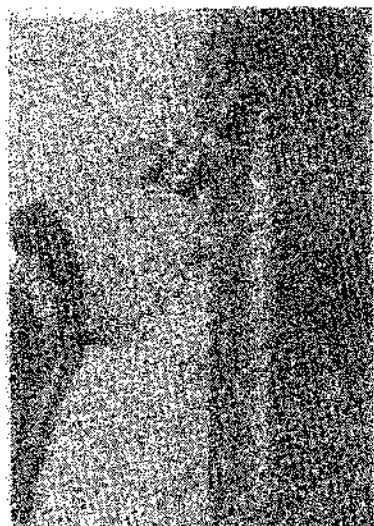


Рис. 52. Сварка углового шва «снизу вверх».



иллюстрирует положение держателя и шов, сваренный в потолочном положении на токе 140 А и напряжении 20 В. Сварка выполнялась «в лодочку». Формирование шва вполне удовлетворительное. Для повышения производительности сварку вертикальных швов можно выполнять в направлении «сверху вниз». Электрод устанавливается под углом 105—110° к вертикали и сварка производится «углом назад» (рис. 54). При этом давлением дуги под-

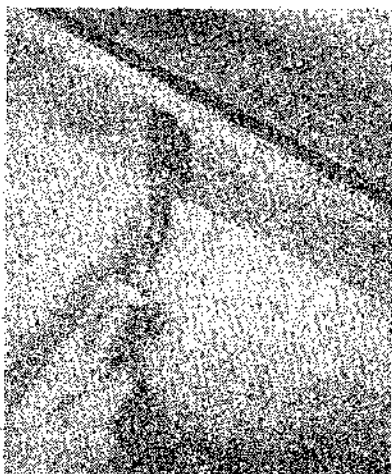


Рис. 53. Сварка углового шва в потолочном положении.

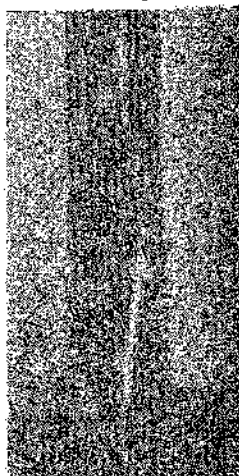


Рис. 54. Сварка углового шва «сверху вниз».

держивается расплавленный металл и обеспечивается его формирование. Скорость перемещения электрода (скорость сварки) зависит от формирования и скорости кристаллизации ванны.

В табл. 30 приведены режимы сварки тавровых швов в вертикальном положении для металла толщиной 2—6 мм. При сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  и для сравнения в углекислом газе во всех случаях обеспечивается хорошее формирование швов. При использовании смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  переход от шва к основному металлу более плавный, шов имеет вогнутую поверхность, а скорость сварки повышается в среднем на 30—35%.

Катеты шва при сварке «сверху вниз» как в углекислом газе, так и в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  не превышают 5—6 мм. Увеличить катет не удастся из-за стекания металла. Техника выполнения швов при сварке «сверху вниз» проще,

чем «снизу вверх», и в этом случае квалификация сварщика может быть ниже. При сварке «в угол» тавровых соединений без разделки кромок за один проход рекомендуется выполнять швы с катетом не более 8 мм. Швы с большим катетом должны выполняться в несколько проходов.

Таблица 30. Сварка тавровых швов «сверху вниз»

Толщина металла, мм	Защитный газ	I, А	U <sub>д</sub> , В	v <sub>св</sub> , м/ч
2+2	$\text{CO}_2$	150—160	19	33
2+2	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	150—160	19	44
3+3	$\text{CO}_2$	220	22—23	38
3+3	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	220	22—23	46
4+4	$\text{CO}_2$	250—260	23—24	37
4+4	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	250—260	23—24	50
5+5	$\text{CO}_2$	250—260	24	30
5+5	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	250—260	24	42
6+6	$\text{CO}_2$	250—260	23—24	25
6+6	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	250—260	23—24	33

При сварке тавровых соединений, расположенных под углом к горизонтальной плоскости, проволокой диаметром 2 мм с вылетом 60 мм в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  на токе 300—320 А и напряжении дуги 35—36 В нормальное формирование обеспечивается в случае сварки «на подъем» при угле наклона, не превышающем 8°, и «на спуск» — 12°.

Положение электрода при сварке «на подъем» — «углом вперед», при сварке «на спуск» — «углом назад». В обоих случаях дуга как бы поддерживает расплавленный металл, препятствуя его стеканию. При увеличении угла наклона изделия в первом случае формируется выпуклый шов, во втором формируется вогнутый шов и наблюдается сильное разбрызгивание металла.

На стали толщиной 8—12 мм при сварке на наклонной плоскости выполняются швы с катетом до 8 мм. С увеличением толщины свариваемого металла вследствие большого отвода тепла для получения нормального формирования швов — при сварке как «на спуск», так и «на подъем» углы наклона изделий должны быть уменьшены.

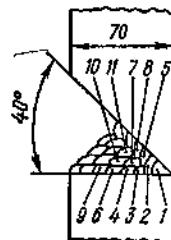


Рис. 55. Порядок наложения швов при сварке горизонтального шва.

СОСТАВ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА  
СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

При монтаже различных конструкций из металла толщиной 30—100 мм во многих случаях необходимо соединение горизонтальными швами. Техника сварки таких швов сложна, поэтому чаще всего они выполняются электродами с фтористо-кальциевым покрытием вручную. Это трудоемкий и малопроизводительный процесс. Повысить производительность можно, применив комбинированный способ, а именно заварить 70—80% объема разделки полуавтоматической сваркой, а оставшийся объем и облицовочные швы выполнить электродами вручную. В качестве примера приведем сварку металла из стали 09Г2С толщиной 70 мм. Разделка кромок и порядок наложения швов показан на рис. 55.

Сварка выполнялась полуавтоматом в смеси углекислого газа и кислорода электродной проволокой диаметром 2,0 мм с вылетом 60 мм на токе 360 А и напряжении на дуге 34—35 В. При этом производительность составляла 9 кг/ч. Таким способом было заварено примерно три четверти объема разделки, после чего формирование швов ухудшилось из-за стекания металла и сварка продолжалась электродами марки УОНИ 13/45.

При сварке кольцевых швов, когда изделие вращается вокруг горизонтальной оси, смещение электрода с зенита в сторону, обратную вращению, при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  всегда меньше, чем в углекислом газе.

Способ сварки и применяемые сварочные материалы должны обеспечить бездефектные швы, обладающие достаточной прочностью, высокой пластичностью и стойкостью против хрупкого разрушения, обеспечить надежную и долговечную работу конструкции в заданных условиях эксплуатации. Выбор марок сталей для исследований осуществляли исходя из объема или перспективности их применения. Использовали стали, идущие на изготовление конструкций, предназначенных для работы в условиях умеренных и низких температур следующих классов и групп прочности: низкоуглеродистые с  $\sigma_t \leq \leq 300$  МПа — ВСт.3, 20Л; низкоуглеродистые низколегированные с  $\sigma_t = 300 \div 450$  МПа — 09Г2, 09Г2С, 16ГС, 10ХСНД, 15Г2АФДпс, 16Г2АФ; стали с повышенным содержанием углерода — 45, 38ХС.

В процессе разработки технологии сварки сталей указанных марок в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  определяли состав и механические свойства металла шва, стойкость его против хрупкого разрушения, прочность и пластичность сварного соединения и конструкционную прочность. Проводили также металлографические исследования металла шва и зоны термического влияния. Во всех случаях состав и свойства швов, сваренных в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , сопоставляли со свойствами швов при сварке в углекислом газе — одним из наиболее широко применяемых в промышленности способов сварки. Почти тридцатилетний опыт применения сварки в углекислом газе убедительно подтверждает надежность и прочность конструкций, выполненных этим способом.

Ниже приведены результаты исследований состава и свойств металла швов на углеродистых и низколегирован-

ных сталях при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволоками сплошного сечения с обычным и увеличенным вылетом электрода.

### 1. Химический состав металла швов на низкоуглеродистых и низколегированных сталях

Ряд исследователей изучали влияние длины вылета и состава защитного газа на содержание легирующих элементов в металле швов на низкоуглеродистых и низколегированных сталях [7, 9, 10, 13, 15].

В табл. 31 приведен химический состав основного металла, электродной проволоки и швов, выполненных с различной величиной вылета электрода и в разной защитной среде. Образцы для определения состава металла швов вырезали из стыкового соединения пластин толщиной 14 мм с V-образной разделкой кромок. Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм на токе

Таблица 31. Химический состав основного металла и металла швов, %

Металл	Защитный газ	L, мм	C	Mn	Si	S	P
Сталь ВСт.3сп	—	—	0,18	0,65	0,20	0,027	0,025
Проволока Св-08Г2С	—	—	0,10	1,85	0,73	0,031	0,020
Шов	70% $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$	80	0,07	0,95	0,42	0,022	0,018
»	То же	20	0,05	0,70	0,23	0,020	0,017
»	$\text{CO}_2$	80	0,06	1,26	0,54	0,020	0,016
»	То же	20	0,05	0,60	0,15	0,021	0,018

400—450 А. Из табл. 31 и работы [7] видно, что при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  легирующие элементы выгорают более интенсивно. С увеличением вылета электрода выгорание элементов уменьшается.

Влияние состава смеси и марки проволоки на содержание легирующих элементов в швах при сварке сталей с нитридным упрочнением показано в табл. 32. Сварку выполняли проволоками Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм на токе 400 А. Сваривали пластины с V-образной разделкой кромок из стали 15Г2АФДпс толщиной 14 мм и 16Г2АФ толщиной 20 мм. Сварку производили постоянным

Таблица 32. Химический состав применяемых материалов и металла швов, %

Марка проволоки и основного металла	Защитный газ	L, мм	C	Mn	Si	V	Ca	S	P	N <sub>2</sub>
Сталь 15Г2АФДпс Св-08Г2С	—	20	0,150	1,41	0,05	0,17	0,37	0,031	0,015	0,015
	$\text{CO}_2$	20	0,114	1,15	0,27	0,07	0,28	0,024	0,017	0,015
Св-08Г2СЦ	85% $\text{CO}_2 + 15\% \text{O}_2$	60	0,110	1,22	0,22	0,07	0,28	0,020	0,014	0,022
	70% $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$	60	0,107	1,16	0,18	0,07	0,23	0,018	0,017	0,021
Сталь 16Г2АФ Св-08Г2С	—	20	0,160	1,60	0,58	0,15	—	0,032	0,015	0,027
	$\text{CO}_2$	20	0,090	1,10	0,47	0,06	—	0,022	0,018	0,025
Св-08Г2СЦ	70% $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$	60	0,080	1,05	0,40	0,06	—	0,018	0,018	0,026
	$\text{CO}_2$	20	0,120	1,20	0,49	0,06	—	0,019	0,019	0,021
Св-08Г2С	70% $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$	60	0,110	1,03	0,40	0,06	—	0,019	0,018	0,021
	—	—	0,110	1,92	0,79	—	—	0,021	0,020	—
Св-08Г2СЦ	—	—	0,094	1,89	0,80	—	—	0,017	0,015	—

Примечание. Содержание циркония в проволоке Св-08Г2СЦ составляет 0,09%.

током обратной полярности. Расход защитного газа составил 12—15 л/мин.

Из табл. 31 и 32 видно, что с увеличением содержания кислорода в смеси уменьшается содержание углерода, марганца и кремния в шве, т. е. элементов, обладающих

Таблица 33. Химический состав металла многослойного шва, %

Место вырезки образцов из шва	C	Mn	Si	S	P
Верх	0,074	0,95	0,29	0,019	0,021
Середина	0,087	0,95	0,29	0,020	—
Корень	0,087	1,30	0,43	0,019	0,021

большим сродством к кислороду. Введение в проволоку циркония несколько снижает выгорание легирующих элементов. Практически не замечено влияние состава смеси и вылета на содержание серы и фосфора в металле шва.

Химический состав металла шва при многослойной сварке пластины толщиной 60 мм из стали 09Г2С приведен в табл. 33. Сварку выполняли в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм с вылетом равным 60 мм.

Таблица 34. Химический состав металла швов при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , %

Марка стали	C	Mn	Si
ВСт.Зсп	0,05—0,11	0,7—1,10	0,22—0,42
09Г2	0,07—0,10	0,8—1,23	0,30—0,48
09Г2С	0,07—0,10	0,8—1,40	0,30—0,65
16ГС	0,08—0,11	0,7—1,30	0,40—0,70
10ХСНД	0,08—0,11	0,9—1,10	0,50—0,70
15Г2АФДпс	0,07—0,11	0,9—1,30	0,18—0,48
16Г2АФ	0,08—0,12	1,0—1,45	0,40—0,62

Режим полуавтоматической сварки:  $I_{\text{св}} = 420 \text{ А}$ ;  $U_{\text{д}} = 38 \text{ В}$ ;  $v_{\text{ш}} = 453 \text{ м/ч}$ . Несколько большее содержание марганца и кремния в корне шва связано с переходом этих элементов из основного металла.

Результаты обработки данных многочисленных анализов химического состава позволили определить пределы содержания углерода, марганца и кремния в металле швов на различных сталях, выполненных в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$

проволоками Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 1,6—2,0 мм. Эти результаты приведены в табл. 34. Из таблицы следует, что основной металл определенным образом влияет на химический состав металла шва.

## 2. Свойства сварного соединения из углеродистых и низколегированных сталей

**Механические свойства металла швов.** Механические свойства металла швов на низкоуглеродистых и низколегированных сталях приведены в табл. 35. Швы выполнялись электродной проволокой Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм с вылетом 20 и 60 мм в углекислом газе и в смеси 70%  $\text{CO}_2 + 30\%$   $\text{O}_2$  (в таблице  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ).

Из табл. 35 следует, что механические свойства металла швов, выполненных в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом, не ниже минимальных показателей свойств основного металла по соответствующим стандартам. При этом прочность швов на 30—50 МПа ниже, а пластичность на несколько процентов выше, чем при сварке в углекислом газе. При сварке стали марки ВСт.Зсп увеличение вылета электрода приводит к повышению прочности металла, что связано с увеличением доли более легированного электродного металла в шве.

Влияние состава смеси на механические свойства металла шва на стали 16Г2АФ представлено на рис. 56. С увеличением содержания кислорода в смеси прочность снижается, а пластические свойства несколько повышаются. Это связано с большим выгоранием углерода и кремния.

Влияние режимов сварки изучали при сварке стали 15Г2АФДпс толщиной 14 мм в смеси 85%  $\text{CO}_2 + 15\%$   $\text{O}_2$  проволокой Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм с вылетом 60 мм. Механические свойства металла швов при сварке на различных токах приведены в табл. 36. Из таблицы видно, что механические свойства практически одинаковы при сварке на токах 300—500 А.

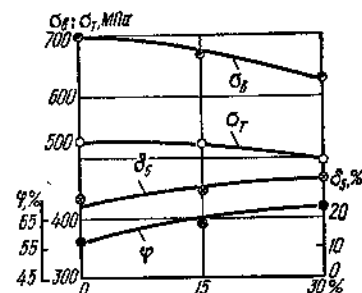


Рис. 56. Зависимость свойств металла шва от содержания кислорода в смеси (сталь 16Г2АФ).

Таблица 35. Механические свойства металла швов

Марка стали	Марка проволоки	Защитный газ	L, мм	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
ВСт. 3сп	Св-08Г2С	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	20	360—410 320—390	510—560 480—540	27—35 32—35	51—68 55—66
				400—420 350—410	570—580 450—550	28—36 32—36	59—69 66—69
20Л 09Г2 09Г2С 16ГС 10ХСНД	Св-08Г2С	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	60	290—320 370—470 360—470 400—490 410—510	470—490 490—550 490—600 510—620 560—650	30—36 26—31 29—34 22—27 28—31	54—67 68—74 60—69 60—62 58—66
				420—490 410—460 470—480	570—640 520—600 590—620	23—26 30—35 28—30	50—64 62—66 65—69
15Г2АФДпс	Св-08Г2С Св-08Г2С Св-08Г2СЦ	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	60	520—650 480—530 610—650 500—540	630—720 600—640 650—710 610—650	22—23 26—29 22—23 21—26	51—59 60—66 53—64 59—62
				420—490 410—460 470—480	570—640 520—600 590—620	23—26 30—35 28—30	50—64 62—66 65—69

Примечание. Для стали 20Л приведены значения механических свойств металла шва после отжига.

Таблица 36. Зависимость механических свойств шва от сварочного тока

$I_{\text{св}}$ , А	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
300	498—505 503	606—613 608	23,0—26,3 24,6	54,6—63,3 60,4
400	505—523 516	639—650 642	25,0—25,7 25,2	57,8—62,0 59,2
500	470—519 495	643—650 646	23,4—26,7 24,5	55,6—62,0 58,2

Таблица 37. Зависимость механических свойств шва от места вырезки образца

Место вырезки образца из шва	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Верх	417	537	28,3	59,9
Середина	425	524	29,6	70,1
Корень	477	597	24,0	59,9

Результаты испытаний стандартных круглых образцов на растяжение, вырезанных из разных частей многослойного шва на стали 09Г2С толщиной 60 мм, приведены в табл. 37. Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм с вылетом 60 мм в смеси 70%  $\text{CO}_2 + 30\%$   $\text{O}_2$ . В таблице приведены средние значения испытаний трех образцов.

Прочность металла шва на стали ВСт.3 и 16Г2АФ при переменных нагрузках иллюстрируется рис. 57. Испытывались круглые образцы при знакопеременном изгибе с вращением вокруг продольной оси (симметричный цикл нагружения). Как видно из рис. 57, усталостная прочность металла шва, выполненного в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , выше, чем при сварке в углекислом газе. Сварку

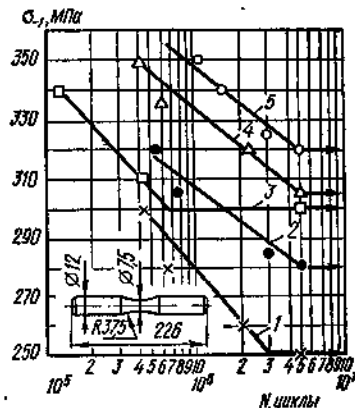


Рис. 57. Образец для испытаний и кривые усталости металла шва на стали ВСт.3 (1, 2) и 16Г2АФ (3, 4, 5):  
1, 2 —  $\text{CO}_2$ ; 4 — 85%  $\text{CO}_2 + 15\%$   $\text{O}_2$ ;  
3, 5 — 70%  $\text{CO}_2 + 30\%$   $\text{O}_2$ .

выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм с обильным (в углекислом газе) и увеличенным (в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ) вылетом электрода.

**Стойкость металла шва против хрупкого разрушения**  
Многие металлы, пластичные при комнатной и повышенной температурах, разрушаются хрупко при низких температурах. Это в первую очередь касается низкоуглеродистых и низколегированных сталей — самого распространенного конструкционного материала. В зависимости от химического состава, наличия дефектов, скорости приложения нагрузки, толщины металла при определенной температуре может произойти хрупкое разрушение сварной конструкции.

Многочисленные анализы причин разрушения металлических конструкций показали, что одной из главнейших причин, способствующих разрушению, является понижение температуры окружающего воздуха. Хрупкие разрушения наблюдаются в сварных узлах кранов, экскаваторов, химической аппаратуре, трубопроводах, емкостях, строительных сооружениях и других конструкциях, работающих в условиях естественных отрицательных температур. Правильный выбор материала, способа сварки для изготовления конструкций, работающих при низких температурах, является особенно важной задачей, так как в настоящее время идет интенсивное освоение районов Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока, где длительное время удерживается отрицательная температура, нередко достигающая  $-40^\circ\text{C}$ , а иногда  $-50^\circ\text{C}$  и ниже.

Процесс разрушения состоит из двух стадий — зарождения трещины и ее распространения [117]. Первая стадия неизбежно связана с пластической деформацией. Распространение трещины может происходить в принципе без пластической деформации. Практическим критерием хрупкости является малая величина пластической деформации при разрушении, которая близка к значению предельной упругой деформации. Кроме того, хрупкое разрушение развивается с большой скоростью и поэтому представляет наибольшую опасность с инженерной точки зрения.

После достижения трещинами определенных критических размеров (что зависит от свойств материала, величины и формы тела и условий нагружения) процесс переходит в заключительный самоускоряющийся период и разрушение может произойти без дополнительной нагрузки.

Существуют различные методы определения стойкости металла против хрупкого разрушения. Наиболее часто при-

меняют надрезанные образцы, которые испытывают на ударный изгиб. При этом испытывают серию образцов при разных температурах и определяют температуру перехода от пластичного разрушения к хрупкому. Есть несколько критериев для практического определения температуры хладноломкости, характеризующей склонность к хрупкому разрушению.

1. По величине ударной вязкости: температура, при которой наблюдается ударная вязкость определенной вели-

Таблица 38. Ударная вязкость металла шва

Марка стали	Защитный газ	Место вырезки образца	$a_k$ , Дж/см <sup>2</sup> , при температуре испытания, °C			
			+20	-20	-40	-60
ВСт. 3сп	$\text{CO}_2$	По оси шва	135—155	90—95	75—85	24—29
09Г2 09Г2С	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	То же	152—162	90—152	95—119	51—100
	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	» »	88—176	82—155	42—146	—
	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	Верхний слой	101—124	66—87	52—53	—
16ГС	То же	Нижний слой	105—156	71—120	43—102	—
		По оси шва	122—142	95—99	14—24	—
10ХСНД	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	То же	120—139	90—144	80—100	30—35
	$\text{CO}_2 + \text{O}_2$	» »	85—87	75—80	65—71	35—51

Примечание. Приведены минимальные и максимальные значения ударной вязкости при сварке проволокой Св-08Г2С диаметром 1,6—2,0 мм на токе 300—400 А. Состав смеси 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$ .

ны (30 Дж/см<sup>2</sup> — для образцов с надрезом по Менаже; 20—25 Дж/см<sup>2</sup> — для образцов с надрезом по Шарпи); температура, при которой максимальное значение ударной вязкости уменьшилось в два раза [121].

2. По виду излома: температура, при которой появляются первые участки хрупкого кристаллического разрушения; температура, при которой 50% площади излома занято кристаллическими участками; температура, при которой излом становится полностью кристаллическим.

Однако было бы неправильным признать какой-либо критерий перехода универсальным. Показательность того или иного критерия перехода в хрупкое состояние может определяться только степенью корреляции между результатами лабораторных определений и частотой выхода из строя деталей из данного материала на практике.

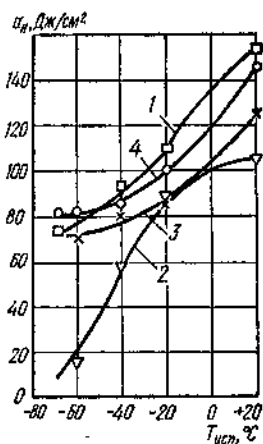


Рис. 58. Зависимость ударной вязкости металла шва на стали 16Г2АФ (1) и 15Г2АФДпс (2—4) от температуры испытаний при сварке проволокой Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм:

1 — 70% CO<sub>2</sub> + 30% O<sub>2</sub>; 2 — CO<sub>2</sub>; 3 — 85% CO<sub>2</sub> + 15% O<sub>2</sub>; 4 — 70% CO<sub>2</sub> + 30% O<sub>2</sub>.

надрезом при различной температуре испытаний, приведены в табл. 38 и на рис. 58. Из таблицы и рисунка видно, что с увеличением содержания кислорода в смеси до 30% ударная вязкость при низких температурах увеличивается, снижается критическая температура хладноломкости.

Анализ влияния содержания кислорода в металле швов на стали 15Г2АФДпс, выполненных проволокой марки Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 мм (табл. 39), не выявил четкой зависимости между значениями ударной вязкости (см. рис. 58) и содержанием кислорода в швах.

Ускоренное охлаждение и пластические деформации при сварке, правка конструкций из углеродистых и низколегированных сталей и связанное с этими процессами старение

Несмотря на относительную простоту и широкое распространение испытание надрезанных образцов обладает тем недостатком, что на основании таких испытаний нельзя предвидеть реальную температуру, при которой может произойти хрупкое разрушение материала при работе его в определенной конструкции. Тем не менее ударные испытания имеют большое значение для качественного сравнения сталей. На основании температуры порога хладноломкости можно сказать, что при прочих равных условиях стали с более низкой температурой порога хладноломкости лучше. Кроме того, по ударной вязкости можно судить об изменениях в материале и определить влияние старения на склонность материала к хрупкому разрушению.

Значение ударной вязкости металла швов, определяемой на стандартных образцах с полукруглым

Таблица 39. Содержание кислорода в швах на стали 15Г2АФДпс

Защитный газ	L, мм	Содержание O <sub>2</sub> , %
CO <sub>2</sub>	20	0,0567
85% CO <sub>2</sub> + 15% O <sub>2</sub>	60	0,0509
70% CO <sub>2</sub> + 30% O <sub>2</sub>	60	0,0665

увеличивают прочность и твердость, но одновременно резко снижают ударную вязкость и повышают порог хладноломкости. По этой причине старение отрицательно влияет на эксплуатационные и технологические свойства сталей. Для оценки этого влияния определяют ударную вязкость после механического старения. Результаты таких испытаний по стандартной методике (растяжение 10%, нагрев 250° С) на образцах с полукруглым надрезом, сваренных электродной

Таблица 40. Ударная вязкость металла швов после механического старения

Марка стали	Защитный газ	L, мм	α <sub>u</sub> , Дж/см²
И.т. Зсп	CO <sub>2</sub>	20	28—57 40
	70% CO <sub>2</sub> + 30% O <sub>2</sub>	20	50—52 51
16Г2АФДпс	CO <sub>2</sub>	20	50—62 57
	70% CO <sub>2</sub> + 30% O <sub>2</sub>	60	61—92 74
16Г2АФ	CO <sub>2</sub>	20	29—50 43
	70% CO <sub>2</sub> + 30% O <sub>2</sub>	60	45—56 51

проволокой Св-08Г2С, приведены в табл. 40. Из таблицы видно, что металл шва обладает достаточной вязкостью после старения.

Величина ударной вязкости металла как мера стойкости против хрупкого разрушения является величиной интегральной и не дает возможности проследить за поведением металла на отдельных стадиях разрушения. Поэтому в последнее время разработан ряд методов испытаний образцов на статический и ударный изгиб с определением энергии, необходимой для зарождения и распространения трещины: И. Отани, Б. А. Дроздовского, Я. Б. Фридмана [117], испытания на ударный изгиб с записью диаграммы усилие — время и др.

В зависимости от условий эксплуатации надежность работы конструкций определяют величиной энергии, затраченной либо на зарождение трещины, либо на ее развитие.



Работа развития трещины в меньшей мере зависит от геометрии надреза и лучше характеризует стойкость металла к хрупкому разрушению, чем суммарная работа. К тому же в реальных сварных швах всегда существуют трещины, подобные дефекты, которые в процессе работы могут развиваться в микротрещины.

Были испытаны образцы на ударный изгиб с разделением ударной вязкости на составляющие сравнительно простым методом [16, 17]. Сущность метода заключается в том, что стандартные образцы с надрезом по Менаже испытывают на ударный изгиб при различных температурах с тем же регистрированием процесса ударного нагружения и записью диаграммы усилие — время. Ударные испытания проводили на копре МК-30, на молоте которого был закреплен промочный тензодатчик. Запись диаграммы осуществляли на осциллографом Н-102 с помощью универсальной тензостанции УТС-1-ВТ-12. Устройство было откалибровано статическим методом.

Полученная осциллограмма разделяется на две части: прямой, перпендикулярной к оси абсцисс и проходящей через максимальное значение ординаты. Первая часть связана с процессом упругой и пластической деформации образца до момента появления трещины, вторая — характеризует изменение усилия в процессе развития этой трещины.

Затраты энергии на зарождение и распространение трещины с учетом упругой энергии системы образцов — машины подсчитывали по формулам, приведенным в работах [16, 17, 38]. Учитывая площадь нетто поперечного сечения образца, определяли составляющие ударной вязкости  $a_z$  и  $a_p$ , связанные с процессом зарождения и распространения трещины.

Описанный метод определения составляющих ударной вязкости имеет то преимущество, что дает больше информации о свойствах материала по сравнению с другими методами. При осциллографировании можно найти максимальное усилие при разрушении, время развития трещины, а следовательно, скорость ее развития. Определение ударной вязкости и ее составляющих  $a_z$  и  $a_p$  по этому методу производится на одном и том же образце, что повышает точность определения.

Были проведены исследования хрупкой прочности в диапазоне температур от  $+20$  до  $-60^\circ\text{C}$  и определены ударная вязкость и ее составляющие  $a_z$ ,  $a_p$ , максимальные усилия при разрушении  $P$  для металла шва, выполненного на

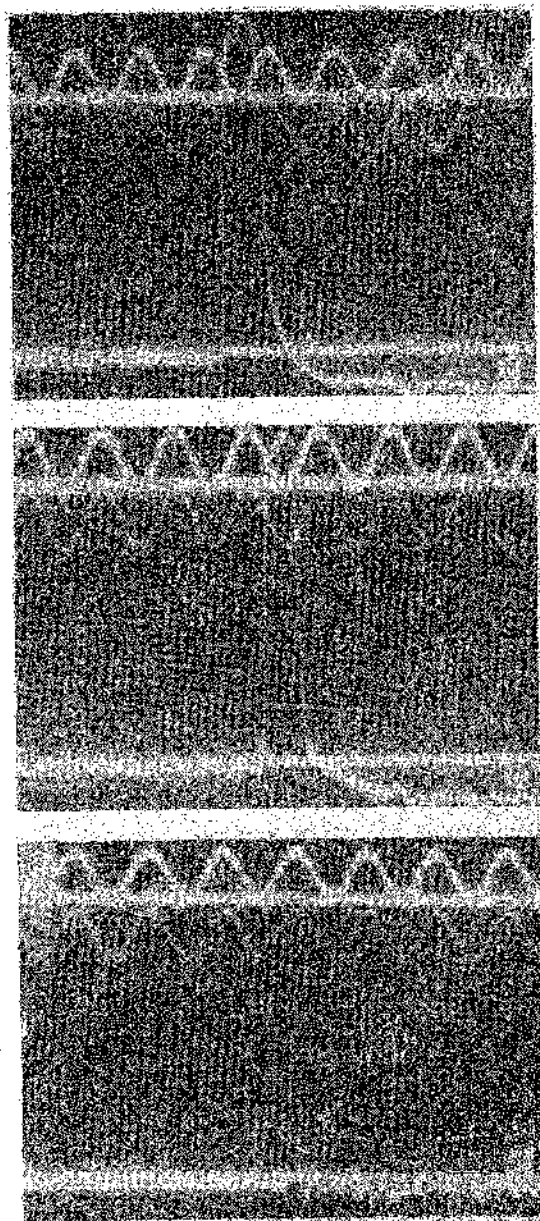


Рис. 59. Типичная осциллограмма усилие — время при различных температурах испытаний на ударный изгиб: а, б —  $+20^\circ\text{C}$ ; в —  $-60^\circ\text{C}$ .

стали 16Г2АФ и 15Г2АФДпс. Толщина и химический состав металла представлены в табл. 41.

Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм постоянным током обратной полярности в углекислом газе и смеси 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$ . Ток 360—380 А. Были сварены стыковые соединения с V-образной разделкой кромок.

Типичные осциллограммы усилие — время при испытании образцов на ударный изгиб при различных температурах показаны на рис. 59. Видно, что при положительной темпе-

Таблица 41. Химический состав основного металла, %

Марка стали	Толщина, мм	C	Mn	Si	Cu	V	S	P	N <sub>a</sub>
16Г2АФ	20	0,183	1,70	0,53	—	0,14	0,025	0,013	0,001
15Г2АФДпс	25	0,175	1,60	0,08	0,34	0,15	0,032	0,015	0,016

ратуре нагрузка растет плавно до максимума, затем спадает до нуля. В отдельных случаях наблюдается перегиб сразу же за прямолинейным участком на восходящей ветви диаграммы (этап зарождения трещины), который становится все более заметным при более низких температурах. Иногда перегиб переходит в площадку, похожую на площадку текучести на диаграмме напряжение — деформация при растяжении. При температуре  $-60^\circ\text{C}$  и ниже диаграмма принимает вид треугольника. Резкого падения нагрузки на диаграмме не наблюдается, хотя скорость падения нагрузки с уменьшением температуры испытания растет и при  $-60^\circ\text{C}$  разрушение начинается до перегиба (до предела текучести).

Зависимость значений составляющих ударной вязкости  $a_2$  и  $a_p$  от температуры испытания для металла шва на стали 16Г2АФ и 15Г2АФДпс представлена на рис. 60. Видно, что при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электрода значение  $a_2$  металла шва выше, чем при сварке в углекислом газе. Важнее всего то, что и затраты энергии на распространение трещины в первом случае выше, чем при сварке в углекислом газе. Это значит, что при наличии в сварном шве трещиноподобных дефектов (подрезов, несплавлений) опасность разрушения шва, выполненного в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , меньше, чем при сварке в углекислом газе.

Максимальная разрушающая нагрузка повышается с понижением температуры испытаний (рис. 61).

Как испытания на ударный изгиб, так и определение работы зарождения и развития трещины служит для качественного сравнения марок сталей, способов сварки или сварочных материалов. Полученные при таких испытаниях характеристики не могут быть использованы для расчетов надежности конструкции. На основании многочисленных теоретических и экспериментальных работ по изучению хрупкости материалов в начале 1960-х годов сформулированы основы линейной механики разрушения и появилась возможность ее практического использования. Для оценки сопротивления металла распространению трещин в условиях статического деформирования были предложены два взаимосвязанных критерия: коэффициент интенсивности напряжений у вершины трещины  $K$ ; энергия увеличения трещины на единицу длины  $G$ .

Начало нестабильного разрушения означает, что коэффициент  $K$  достиг критического значения и он обозначается символом  $K_c$ . Критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_c$  характеризует интенсивность местных растягивающих напряжений, необходимых для распространения трещины, и позволяет вычислить напряжения для роста трещины.

Разработанные в Англии и США методы определения  $K_c$  и  $(K_{Ic})$  введены в соответствующие стандарты для оценки качества сталей, однако эти методы весьма трудоемки, особенно в случае определения вязкости пластичных металлов

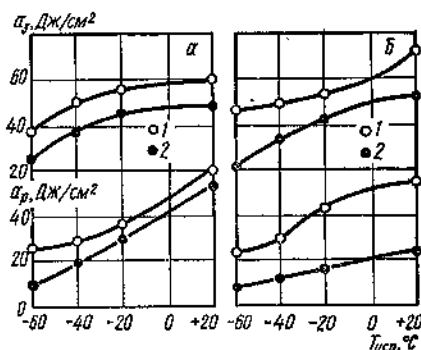


Рис. 60. Зависимость составляющих ударной вязкости  $a_2$  и  $a_p$  от температуры испытаний:

$a$  — сталь 15Г2АФДпс;  $б$  — сталь 16Г2АФ; 1 — 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$ ; 2 —  $\text{CO}_2$ .

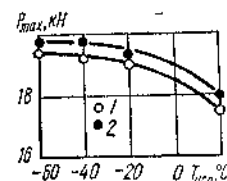


Рис. 61. Зависимость максимальной разрушающей нагрузки от температуры испытаний при испытании образцов на стали 16Г2АФ на ударный изгиб: 1 — 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$ ; 2 —  $\text{CO}_2$ .

и сплавов (низкоуглеродистой и низколегированной стали, алюминиевых сплавов и т. п.). Для таких материалов при встречающихся на практике толщинах, условиях нагружения и температурах эксплуатации в процессе нагружения наблюдаются значительные пластические деформации у концы трещины. В этом случае критерии линейной механики разрушения  $K_c$  неприменимы. Для того чтобы избежать возникновения пластических деформаций у вершины трещины, используют образцы больших толщин, что не всегда возможно.

Трудности, возникающие при оценке хрупкости материалов сравнительно низкой прочности, привели к разработке нового критерия — величине раскрытия трещины  $\delta$  (английский термин crack opening displacement — COD). Эта концепция была выдвинута Уэллсом [62]. Она гласит, что конец очень острой, например, усталостной трещины, вследствие пластического течения затупляется, а берега трещины перемещаются, оставаясь параллельными. Когда расстояние между берегами достигает критического значения, материал у вершины трещины разрушается и трещина распространяется дальше. Это критическое значение величины раскрытия трещины  $\delta_c$  считается константой материала при заданных условиях (температуре, скорости деформации, толщине элемента), характеризующей его стойкость против крупного разрушения. Такой метод назван методом COD. Преимущество этого метода заключается в том, что критическое раскрытие трещины можно определять на образцах малых диаметров.

Были проведены исследования с использованием метода COD по определению стойкости против хрупкого разрушения металла шва, выполненного в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  [128]. Методика определения критического раскрытия трещины предусматривает испытание призматического образца с трещиной. Образец подвергают статическому изгибу при непрерывном измерении раскрытия трещины до момента ее подрастания. Методика определения  $\delta_c$  описана в работах [62, 144].

Образцы квадратного сечения вырезали из стыкового соединения из стали 16Г2АФ и 15Г2АФДпс толщиной 16 и 14 мм соответственно. Пластины сваривали проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм с обычным вылетом (20 мм) в углекислом газе и с увеличенным вылетом (60 мм) в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  на токе 300 А. Толщина образцов равнялась толщине основного металла. Форма и размеры образцов приведены на рис. 62, а.

Образцы изготавливали со снятым усилением. Надрез осуществляли в два этапа: на фрезерном станке — шириной 1,0 мм, затем тонкой ножовкой вручную делали пропил радиусом в вершине, примерно равным 0,1 мм. После выполнения надреза на резонансном вибраторе инициировали трещину усталости. Общая длина имитируемого дефекта (надрез и трещина усталости) должна составлять 60—70% толщины образца. При таком отношении  $l/b$  геометрические размеры образцов перестают влиять на результаты испытаний.

Испытание проводили на прессе усилием 40 кН. Для определения величины раскрытия трещины на образце устанавливали датчик в сжатом состоянии. В процессе нагружения образца трещина раскрывалась, пластинки скобы разгибались. Сигнал моста тензодатчиков записывался на двухкоординатном самопишущем приборе. Этот сигнал характеризовал величину раскрытия трещины.

Усилие на образец передается через ножи. На плоских гранях ножей наклеивали такие же датчики сопротивления, как и на скобе. Тарировку сигнала с нагружающего устройства и датчика производили перед каждой серией испытаний. Схема устройства для испытаний представлена на рис. 62, б.

Так как при испытаниях измеряют не критическое раскрытие трещины у ее вершины, а величину  $V_c$ , то существуют специальные формулы для пересчета и определения  $\delta_c$ . Результаты испытаний приведены в табл. 42. Из таблицы видно, что для металла шва, выполненного в смеси

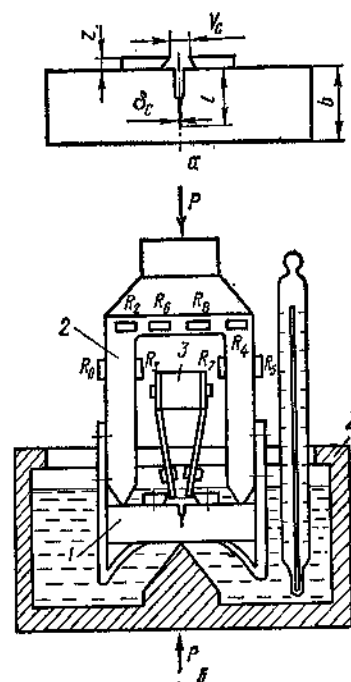


Рис. 62. Образец для определения критического раскрытия трещины (а) и схема устройства для испытаний (б): 1 — образец; 2 — нагружающее устройство; 3 — измерительная скоба; 4 — анвилы в охлаждающей жидкости.

$\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , величина критического раскрытия трещины больше, чем при сварке в углекислом газе.

По величине критического раскрытия трещины можно определить максимальный размер допустимого дефекта в металле шва, который не вызовет снижение несущей способности конструкции. Зависимость размера дефекта  $a_{\max}$  от величины  $\delta_c$  в общем виде выражается формулой

$$a_{\max} = c \frac{\delta_c}{e}, \quad (6.1)$$

Таблица 42. Величина  $\delta_c$  для металла шва

Марка стали	Защитный газ	$P_{\max}$ , кН	$V_c$ , мм	$\delta_c$ , мм
16Г2АФ	$\text{CO}_2$  70% $\text{CO}_2$ + + 30% $\text{O}_2$	4,8—5,5	0,38—0,54	0,024—0,034
		5,1	0,43	0,027
		5,0—6,6	0,46—0,6	0,030—0,038
15Г2АФДпс	$\text{CO}_2$	5,7	0,54	0,035
		7,4—9,4	0,67—0,81	0,038—0,046
	70% $\text{CO}_2$ + + 30% $\text{O}_2$	8,7	0,72	0,041
		7,8—8,4	0,80—1,30	0,045—0,072
		8,0	1,03	0,059

где  $c$  — коэффициент, зависящий от толщины и прочности металла, размеров конструкции и др.;  $e$  — деформации, соответствующие пределу пластичности.

Проведенные исследования по определению ударной вязкости и ее составляющих  $a_s$  и  $a_p$ , а также критического раскрытия трещины позволили установить, что металл шва, выполненный в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , имеет более высокую стойкость против хрупкого разрушения, чем при сварке в углекислом газе.

Повышение стойкости металла шва, выполненного в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , против хрупкого разрушения можно объяснить лишь металлургическими и технологическими особенностями этого процесса сварки, так как и образцы, и условия их испытаний были идентичны.

Известно, что стойкость металла против хрупкого разрушения зависит не только от условий эксплуатации (температуры, скорости деформации, напряженного состояния), но и от химического состава, степени раскисленности и дегазации, теплового воздействия на металл, наличия или отсутствия концентраторов напряжений.

Ряд легирующих элементов снижает сопротивляемость металла хрупкому разрушению. К ним относятся прежде всего углерод и кремний. Если любое увеличение содержания углерода повышает температуру хладноломкости, то при содержании кремния до 0,4% его влияние положительно и только с увеличением содержания кремния более 0,4% стойкость металла против хрупкого разрушения снижается. Так как при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  содержание углерода и кремния несколько снижается, наблюдается повышение стойкости против хрупкого разрушения.

Значительное влияние на вязкость металла оказывает способ и степень раскисленности. Показателем эффективности раскисления считается общее содержание кислорода в шве. Однако многочисленные испытания образцов на ударный изгиб и определение содержания кислорода в шве не выявили четкого влияния содержания кислорода (до 0,08%) на ударную вязкость. Поэтому можно предположить, что основное влияние на ударную вязкость металла шва оказывают состав, форма и размеры неметаллических включений, в составе которых находится практически весь кислород. Крупные остроугольные неметаллические включения или включения в виде пленки по границам зерен отрицательно сказываются на стойкости против хрупкого разрушения.

При сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  в шве наблюдаются округлые дисперсные окисные включения, равномерно расположенные по всему сечению шва. Такие включения не снижают стойкости металла шва против хрупкого разрушения. Добавка кислорода к углекислому газу влияет на микроструктуру металла шва, что также способствует повышению стойкости против хрупкого разрушения.

**Свойства и конструкционная прочность сварных соединений.** Для определения прочности металла шва и сварного соединения испытывали плоские образцы на растяжение. Образцы вырезали из стыковых соединений пластин из разных марок сталей, сваренных в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  и для сравнения с образцами, сваренными в углекислом газе. Испытания показали, что практически во всех случаях разрушение происходит по основному металлу вне зоны термического влияния.

Угол загиба образцов, вырезанных из стыкового шва, составляет  $180^\circ$ , трещины на металле не образуются даже при сплющивании образца. Данные, полученные в работе [30], о том, что при сварке в смеси 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$  не удается получить требуемый угол загиба, по-видимому,

обусловлены наличием дефектов в швах либо другими причинами, а не является свойством швов. Большое количество опытов, проведенных нами, а также производственный опыт подтверждают пластичность швов, выполненных в смеси 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$  и загиб образцов до 180° (рис. 63).

Ударная вязкость металла зоны термического влияния при расположении вершины надреза образцов на заданном расстоянии от границы сплавления приведена в табл. 43. Сварку выполняли проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм на токе 280—300 А. Из таблицы видно, что при сварке

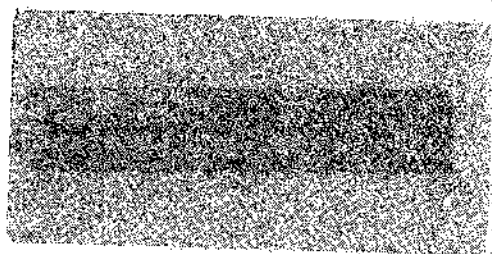


Рис. 63. Сварной образец после испытания на загиб до сплющивания (сталь 09Г2С, проволока Св-08Г2С,  $L = 60$  мм).

на режимах с одинаковой погонной энергией ударная вязкость металла зоны термического влияния практически не зависит от состава защитного газа.

Для оценки влияния способа защиты дуги и величины вылета электрода на хладноломкость сварного соединения использовался образец, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР [5]. Этот жестко закрепленный образец, в котором при сварке создаются значительные сварочные напряжения, позволяет также оценить степень чувствительности сварных соединений к хрупкому разрушению.

Сварку образцов выполняли в смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$  с обычным (20 мм) и увеличенным (60 мм) вылетом электродной проволоки диаметром 2,0 мм. Для сравнения наплавляли валик в углекислом газе той же проволокой с обычным вылетом электрода. Режим сварки подбирали так, чтобы размеры швов были одинаковыми. Надрезы во всех случаях попадали в зону термического влияния на расстоянии 2,0—2,5 мм от границы шва.

В результате испытаний было установлено, что при температуре +20° С все образцы выдержали без разрушения три — пять ударов. При температуре испытаний —10, —15 и —30° С в образцах возникала трещина после нескольких ударов независимо от способа сварки. Таким образом, можно считать, что соединения, выполненные в углекислом газе

Таблица 43. Ударная вязкость металла шва и зоны термического влияния, Дж/см<sup>2</sup>

Марка стали	Защитный газ	Расположение вершины надреза	$\alpha_n$ при температуре испытаний, °С		
			+20	—40	—60
12АФДпс	70% $\text{CO}_2$ + 30% $\text{O}_2$	По оси шва	96—106 101	46—57 49	40—42 41
		По границе сплавления	—	47—62 54	37—46 41
		На расстоянии от границы сплавления 1 мм	—	47—54 50	38—50 43
		То же 2 мм	—	56—69 62	48—55 48
		То же 3 мм	—	65—70 67	42—47 46
		Основной металл	109—120 113	95—105 101	72—92 82
	$\text{CO}_2$	По оси шва	75—77 76	46—50 48	14—22 18
		По границе сплавления	—	40—56 48	35—42 39
		На расстоянии от границы сплавления 1 мм	—	62—71 66	36—48 40
		То же 2 мм	—	69—76 72	59—69 64
		То же 3 мм	—	67—76 71	57—62 59
		Основной металл	109—120 113	95—105 101	72—92 82
09Г2	70% $\text{CO}_2$ + 30% $\text{O}_2$	По границе сплавления	91—179 128	—	—
ВСт. 3сп		То же	82—172 117	—	—

и смеси  $\text{CO}_2$  +  $\text{O}_2$ , обладают практически одинаковой стойкостью против хрупкого разрушения.

Конструкционная прочность при различных видах нагружения является наиболее достоверной оценкой работоспособности сварных соединений, выполненных теми или иными методами или сварочными материалами. Испытания производят на специальных образцах, имитирующих реальные конструкции.

Одной из важных характеристик сварных соединений является их поведение при двухосном напряженном состоянии. Пластины из стали ВСт. 3сп размером  $200 \times 200 \times 6$  мм со стыковым швом посередине, выполненным в углекислом газе и смеси его с кислородом с обычным и увеличенным

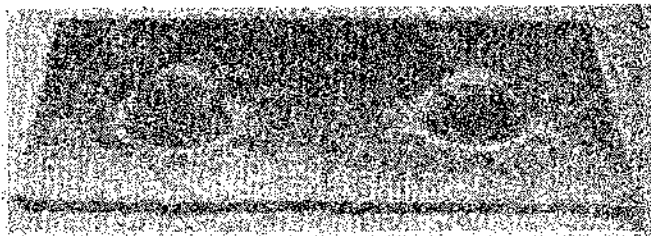


Рис. 64. Характер разрушения образцов при двухосном нагружении в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  при  $+20^\circ\text{C}$  (слева) и при  $-20^\circ\text{C}$  (справа).

вылетом, а также под флюсом, закрепляют в специальном приспособлении. Со стороны корня шва вдавливают стальную шар на прессе с усилием 1 кН. Верхняя поверхность

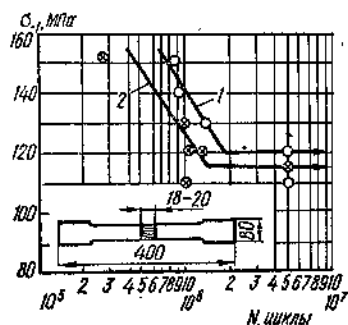


Рис. 65. Образец для испытаний и кривые усталостной прочности сварных соединений: 1 —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ; 2 —  $\text{CO}_2$ .

разрушения. Результаты испытаний представлены на рис. 65. Сварные соединения, выполненные в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм, во всем диапазоне нагрузок имеют более высокую усталостную прочность, чем при сварке в углекислом газе.

Испытания на одиночный удар проводили на специальных образцах в виде тавровых балочек, имитирующих

такие сварные соединения. Испытывались нахлесточные швы при приварке накладок к стенке тавра. Удары наносились на копре с энергией 2,25 кДж. Критерием являлось количество ударов до разрушения.

Результаты опытов сведены в табл. 44. Из таблицы видно, что ударная прочность образцов, сваренных в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм, выше, чем при сварке в углекислом газе. Проведенные испытания позволили установить, что сварные соединения,

Таблица 44. Результаты испытаний на одиночный удар

Способ сварки	Количество ударов до разрушения при температуре испытаний, $^\circ\text{C}$	
	-40	-60
Полуавтоматическая в смеси 70% $\text{CO}_2 + 30\%$ $\text{O}_2$ проволокой $d_s = 2$ мм, $L = 60$ мм	11—14 13	8—10 9
Полуавтоматическая в углекислом газе проволокой $d_s = 2$ мм, $L = 20$ мм	10—12 11	7—9 8

выполненные в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , обладают высокими прочностными и служебными свойствами и не уступают соединениям, выполненным в углекислом газе.

**Структура металла сварного соединения.** Металлографические исследования проводились на шлифах, вырезанных из стыковых соединений на стали 15Г2АФДис и 16Г2АФ. Исследовали структуру металла шва, околошовной зоны и основного металла, твердость характерных участков сварного соединения.

В работе [51] установлено, что структура металла околошовной зоны и швов на низколегированных сталях без термообработки представляет собой смесь продуктов феррито-перлитного, бейнитного и мартенситного превращений. Однако при травлении шлифа спиртовым раствором азотной кислоты продукты мартенситного превращения не выявляются. Провести дифференциацию структурных составляющих затруднительно. Поэтому для выявления составляющих микроструктуры металла сварного соединения производили травление в горячем растворе пикрата натрия. При таком травлении мартенсит окрашивается в черный цвет, перлит в серый, а феррит остается светлым.

На рис. 66 представлена микроструктура металла шва на стали 16Г2АФ при травлении шлифа в горячем растворе



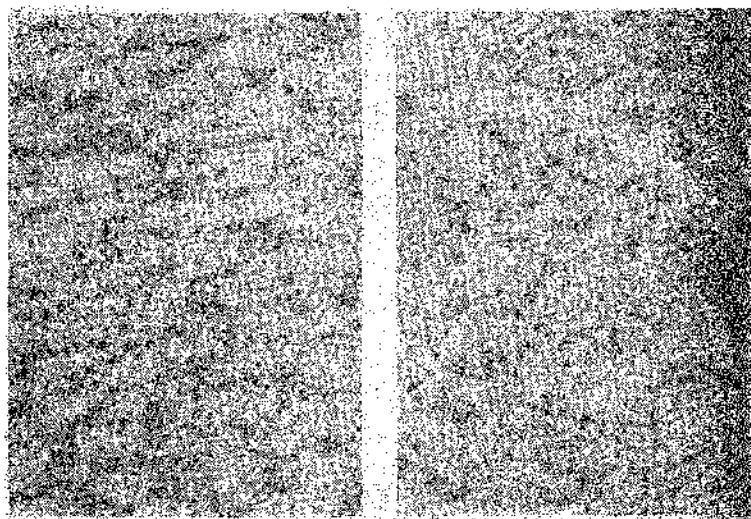


Рис. 66. Микроструктура металла шва ( $\times 150$ ) при сварке в углекислом газе (а) и в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  (б), травление в горячем растворе пикрата натрия.

пикрата натрия. Исследуя структуру металла при травлении шлифа азотной кислотой, можно сделать вывод, что металл шва имеет феррито-перлитную структуру (рис. 6.). Травление этих же шлифов в горячем растворе пикрата натрия позволило установить, что помимо феррита и перлита в швах имеется небольшое количество мартенсита (см. рис. 66). При этом швы, сваренные в углекислом газе,

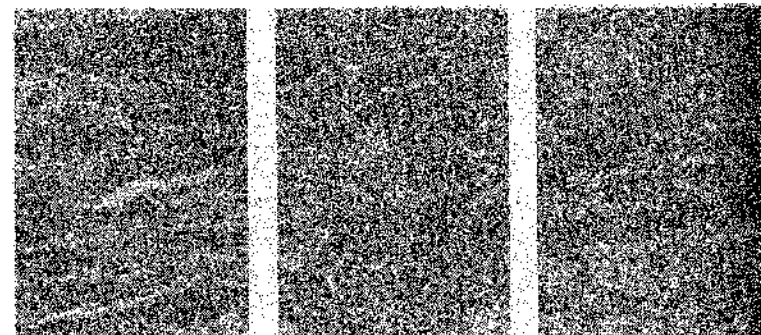


Рис. 67. Влияние состава защитного газа на микроструктуру металла шва ( $\times 100$ ):

а —  $\text{CO}_2$ ; б — 85%  $\text{CO}_2 + 15\% \text{O}_2$ ; в — 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$ .

содержат несколько большее количество мартенсита, чем при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . Интересно отметить, что мартенсит в швах при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  располагается равномерно по сечению, а при сварке в углекислом газе наблюдаются участки, обогащенные мартенситом. Эти участки преимущественно располагаются по границам зерен, что неблагоприятно сказывается на пластичности и вязкости металла.

Кислород влияет и на характер выделения феррита. Добавка кислорода в защитную смесь позволяет получить швы с более дезориентированной структурой, с большим количеством феррита. Если при сварке в углекислом газе часто наблюдаются тонкие без ответвлений ферритные участки (см. рис. 67, а), то при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  количество феррита несколько увеличивается, ферритные участки более равномерно перемещиваются с перлитными (см. рис. 67, б, в). Твердость металла шва составляет 200—220 НВ. Уменьшение количества мартенсита при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  связано со снижением скорости охлаждения и уменьшением содержания углерода в шве.

В околошовной зоне на сталях 16Г2АФ и 15Г2АФДп большого роста зерен не наблюдается, что связано с благоприятным воздействием карбонитридов ванадия. Структура околошовной зоны на участке крупного зерна представляет собой сорбит, по границам зерен видна цементитная сетка. Твердость металла околошовной зоны зависит от режимов сварки и для исследуемых сталей изменяется в пределах 290—400 НВ.

### 3. Свойства сварных соединений, выполненных проволокой диаметром 2,0 мм, для конструкций в северном исполнении

Для конструкций, работающих в условиях низких температур, предъявляются особые требования к качеству и свойствам металла шва и прежде всего к стойкости против хрупкого разрушения. Это связано с тем, что понижение температуры является одной из главных причин перехода пластичных в обычных условиях материалов в хрупкое состояние и неоднократно вызывало катастрофическое разрушение сварных конструкций.

Многолетний опыт применения ручной сварки электродами с фтористо-кальциевым покрытием типа Э42А и Э50А и полуавтоматической сварки в углекислом газе проволокой



Св-08Г2С диаметром 0,8—1,2 мм показал их пригодность для изготовления ответственных конструкций. Швы, выполненные с применением указанных сварочных материалов, отличаются высокой пластичностью и вязкостью. Поэтому в соответствии с ГОСТ 14892—69 эти способы сварки и сварочные материалы рекомендуется применять для изготовления конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, предназначенных для эксплуатации в условиях низких температур (северное исполнение).

Полуавтоматическая сварка проволоками малых диаметров в углекислом газе, как и ручная дуговая сварка, отличается низкой производительностью. Электродная проволока диаметром 0,8—1,2 мм значительно дороже проволоки диаметром 1,6—2,0 мм. Для качественного выполнения швов электродами с фтористо-кальциевым покрытием требуются сварщики высокой квалификации. В то же время подготовка сварщиков-ручников значительно сложнее и занимает больше времени, чем подготовка сварщиков-полуавтоматчиков.

В связи с освоением районов Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока резко увеличился объем производства конструкций в северном исполнении. Это, а также острый дефицит сварщиков высокой квалификации, необходимых для изготовления таких конструкций, требует изыскания новых, более производительных способов сварки. Одним из них является полуавтоматическая сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволоками диаметром 1,6—2,0 мм с увеличенным вылетом электрода. Как показали проведенные исследования, этот способ сварки отличается высокой производительностью и стойкостью против хрупкого разрушения. Однако его применение невозможно без сопоставления свойств сварных соединений, выполненных в одинаковых условиях: проволокой Св-08Г2С диаметром 1,6—2,0 мм в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  и проволокой той же марки диаметром 1,2 мм в  $\text{CO}_2$ , а также электродами с фтористо-кальциевым покрытием.

Исследуемые процессы сравнивали по стойкости швов против образования пор и кристаллизационных трещин, механическим свойствам и конструкционной прочности. Исследования проводили на образцах из низкоуглеродистой стали ВСт. 3сп и низколегированной 09Г2, широко применяющихся для изготовления сварных конструкций.

Стойкость швов против образования пор определяли по методике, описанной в работе [12]. Сварку вручную выполняли электродами УОНИ 13/45 диаметром 5,0 мм на токе 260—270 А, полуавтоматическую — проволокой Св-08Г2С

диаметром 1,2 мм на токе 250 А и диаметром 2,0 мм с вылетом 40 мм на режимах  $I_{\text{св}} = 320—350$  А;  $U_d = 31—32$  В.

При содержании ржавчины до 1,5 г на 100 мм шва поры не образуются. С увеличением количества ржавчины до 1,6 г в металле швов появляются внутренние, а при сварке проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в углекислом газе и наружные поры. Дальнейшее увеличение количества ржавчины до 1,7 г приводит к появлению наружных пор, расположенных по оси шва, выполненного проволокой диаметром 2,0 мм в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  и вручную электродами УОНИ 13/45. Таким образом, стойкость металла швов против образования пор для сравниваемых способов сварки практически одинакова.

Стойкость швов против образования горячих трещин изучали на тавровых образцах из стали толщиной 12 мм с повышенным содержанием углерода (0,28%). Сварка выполнялась вручную электродами УОНИ 13/45 диаметром 5,0 мм, а также полуавтоматом электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм на увеличенном вылете в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  и для сравнения в углекислом газе проволокой диаметром 1,2 мм на токе 280—300 А. Было сварено по пять-шесть образцов в каждой серии опытов. После остывания образцы разрушали под копром. Трещины в швах ни в одном из образцов не наблюдались. При ручной и полуавтоматической сварке в углекислом газе проволокой диаметром 1,2 мм в незаваренных кратерах наблюдались трещины и надрывы длиной 8—10 мм.

При определении стойкости металла швов против образования горячих трещин методом статического изгиба в процессе сварки критическая скорость деформации швов, выполненных в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , составляла 22,4 мм/мин, а выполненных вручную электродами УОНИ 13/45 — 18,2 мм/мин.

Таким образом, швы, выполненные проволокой Св-08Г2С диаметром 2,0 мм в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , обладают большей стойкостью против образования горячих трещин, чем швы, выполненные вручную электродами УОНИ 13/45 или полуавтоматом проволокой диаметром 1,2 мм в углекислом газе.

Химический состав металла швов при сварке сравниваемыми способами приведен в табл. 45, а механические свойства — в табл. 46.

Из данных этих таблиц видно, что металл швов, выполненных в смеси 70%  $\text{CO}_2 + 30\%$   $\text{O}_2$  проволокой Св-08Г2С

Таблица 45. Химический состав металла швов на стали ВСт.Зсп.

Способ сварки	C	Mn	Si	S	P
Полуавтоматическая в смеси 70%CO <sub>2</sub> + 30%O <sub>2</sub> проволокой диаметром 2,0 мм	0,06	1,10	0,32	0,017	0,011
Полуавтоматическая в углекислом газе проволокой диаметром 1,2 мм	0,09	1,04	0,35	0,022	0,011
Ручная электродами УОНИ 13/45	0,05	0,60	0,20	0,018	0,010

диаметром 2,0 мм, имеет хорошие пластические свойства (на уровне металла швов, выполненных электродами с фтористым кальциевым покрытием). Прочностные свойства всех сравниваемых способов сварки отвечают требованиям, предъявляемым к швам на низкоуглеродистых и низколегированных сталях.

Для определения стойкости металла шва против хрупкого разрушения испытывали образцы с полукруглым надрезом на ударный изгиб. Образцы вырезали из стыкового соединения с многослойным швом. Надрез находился в слое сваренном последним. Результаты испытаний приведены на рис. 68. Из рисунка видно, что во всех случаях ударная вязкость металла шва высокая, при сварке в смеси CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> порог хладноломкости ниже -70° С.

Таблица 46. Механические свойства металла швов

Марка стали	Способ сварки	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
ВСт.Зсп	Полуавтоматическая в смеси CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> проволокой диаметром 2,0 мм	388	512	32,0	67,8
	Полуавтоматическая в углекислом газе проволокой диаметром 1,2 мм	422	543	29,0	66,4
	Ручная электродами УОНИ 13/45	334	465	32,0	70,0
09Г2	Полуавтоматическая в смеси CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> проволокой диаметром 2,0 мм	422	531	27,8	71,6
	Ручная электродами УОНИ 13/45	372	519	28,4	69,3

Примечание. В таблице приведены средние значения, полученные при испытании трех — пяти образцов.

Проводились металлографические исследования металла стыкового соединения на шлифах, вырезанных из стыковых швов на стали Ст. 3 толщиной 20 мм, содержащей 0,19% С. При сварке в смеси CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> шов гладкий с плавным переходом к основному металлу.

С целью выявления неметаллических включений исследовались микроструктура металла шва при 500- и 1000-кратном увеличении. В швах, сваренных электродами УОНИ 13/45 и в смеси CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> проволокой с увеличенным вылетом, наблюдаются крупные округлой формы силикатные включения железа и марганца, а также — кварцевого стекла. Средние размеры включений в швах, сваренных электродами УОНИ 13/45 — 8 мкм, а выполненных в смеси газов — 1 мкм, т. е. в два-три раза меньше. Количество сложных силикатных стекол и кремнезема в швах, сваренных вручную электродами УОНИ 13/45 и в смеси газов с увеличенным вылетом, практически одинаково.

При сварке вручную и полуавтоматом в смеси CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> структура швов идентичная. В верхнем слое многослойного шва наблюдается литая столбчатая феррито-перлитная структура. Нижние слои, подвергшиеся термическому влиянию в результате наложения последующих слоев, имеют мелкокристаллическую дезориентированную структуру. Твердость металла шва, сваренного электродами УОНИ 13/45, равна 122—131 НВ, а сваренного полуавтоматом в смеси CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> — 151—172 НВ.

**Свойства соединений при переменных нагрузках.** Испытания на усталость проводились при знакопеременном изгибе цилиндрических образцов. Образцы вырезали поперек шва из стыкового соединения толщиной 14 мм. Испытывали гладкие образцы и с надрезом. При испытании последних можно получить относительные данные о степени чувствительности металла шва к концентраторам напряжений (рис. 69). Проведенные исследования показали, что предел выносливости гладких образцов, сваренных проволокой Св-08Г2С

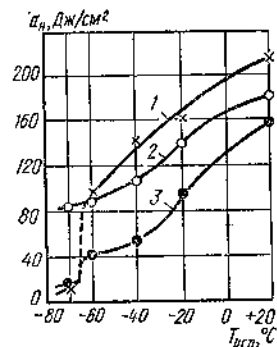


Рис. 68. Зависимость ударной вязкости металла шва от температуры испытаний:

1 — УОНИ 13/45,  $d_3 = 5,0$  мм  
2 — 70%CO<sub>2</sub> + 30%O<sub>2</sub>, проволока Св-08Г2С,  $d_3 = 2,0$  мм,  $L = 60$  мм, 3 — CO<sub>2</sub>, проволока Св-08Г2С,  $d_3 = 1,2$  мм

в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , выше, чем при сварке вручную и в углекислом газе. Усталостная прочность образцов с надрезом, сваренных в смеси углекислого газа и кислорода, практически такая же, как и при сварке электродами УОНИ 13/45.

**Конструкционная прочность.** Была изучена конструкционная прочность соединений, сваренных электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в  $\text{CO}_2$ , диаметром 2,0 мм с вылетом 60 мм в смеси 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$  и вручную электродами УОНИ 13/45. Исследования проводились при

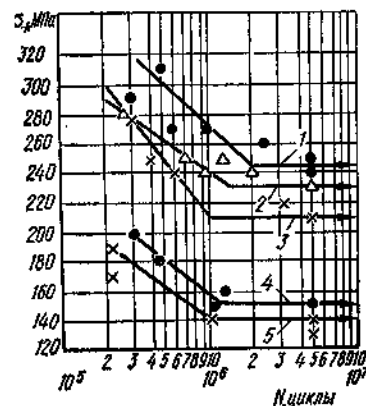


Рис. 69. Кривые усталостной прочности металла шва при знакопеременном изгибе:

1, 4 —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $d_s = 2,0$  мм; 2 —  $\text{CO}_2$ ,  $d_s = 1,2$  мм; 3, 5 — УОНИ 13/45,  $d_s = 5,0$  мм; 1—3 — гладкие образцы; 4, 5 — образцы с надрезом.

Вибрационные испытания сварных соединений проводились на машине конструкции Афанасьева. Образцы изгибали плоскому изгибу до полного разрушения. Результаты испытаний приведены на рис. 70. Из рисунка видно, что усталостная прочность сварных соединений, выполненных в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволокой диаметром 2,0 мм с увеличением вылета, практически такая же, как и при сварке углекислом газе проволокой диаметром 1,2 мм и вручную электродами УОНИ 13/45.

При испытании образцов с усилением шва усталостная прочность практически для всех способов сварки одинакова, если швы качественные и имеют одинаковую конфигурацию [179].

вибрационных, повторных ударных нагружениях и одиночном ударе.

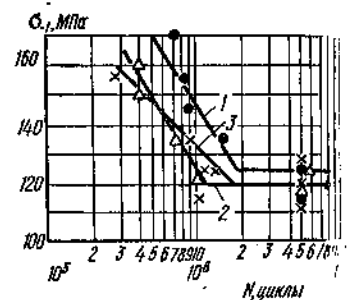


Рис. 70. Кривые усталостной прочности плоских образцов при симметричном цикле нагружения:

1 —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $d_s = 2,0$  мм; 2 —  $\text{CO}_2$ ,  $d_s = 1,2$  мм; 3 — УОНИ 13/45,  $d_s = 5,0$  мм.

Были проведены испытания при повторной ударной нагрузке образцов, сваренных проволокой диаметром 2,0 мм в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , диаметром 1,2 мм в углекислом газе и вручную электродами УОНИ 13/45. Прочность образцов при повторно-ударных нагрузках характеризуется обычно

Таблица 47. Результаты испытаний на повторный удар

Способ сварки	Количество ударов до разрушения тыс., при энергии удара, кДж		
	1,8	2,0	2,25
Полуавтоматическая в смеси $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ проволокой диаметром 2,0 мм	1930,0	1359,0	177,2
Полуавтоматическая в углекислом газе проволокой диаметром 1,2 мм	1783,2	1241,0	159,6
Вручную электродами УОНИ 13/45	1871,5	1186,6	167,4

либо ударным пределом выносливости, определяющим наибольшую энергию удара, которая не вызывает разрушения при заданном числе циклов, либо долговечностью, т. е. количеством ударов до разрушения образцов при заданной постоянной энергии. Испытания проводились на копре

Таблица 48. Результаты испытаний на одиночный удар

Энергия удара, кДж	Температура испытаний, °С	Среднее количество ударов до разрушения		
		$\text{CO}_2 + \text{O}_2$ проволока диаметром 2,0 мм	$\text{CO}_2$ проволока диаметром 1,2 мм	УОНИ 13/45
1,5	—40	12	12	12
1,5	—60	11	10	12
2,25	—60	10	8	9

(СВО-150, масса молота 7 кг, частота нагружений 225 ударов в минуту. Число ударов регистрировалось специальным счетчиком, количество ударов до разрушения образцов приложено в табл. 47.

Сварные соединения, выполненные полуавтоматической сваркой в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , обладают большей долговечностью при повторно-ударном нагружении, чем при сварке углекислом газе и вручную электродами УОНИ 13/45.

Испытания на одиночный удар специальных балочек проводились на копре с энергией удара 1,5 и 2,25 кДж.

Испытания проводили при положительной и отрицательной температурах. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Видно, что все образцы выдерживают примерно одинаковое количество ударов. Следовательно, сварные соединения, выполненные в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , отличаются такой же стойкостью против ударных нагрузок, как и соединенные сваренные УОНИ 13/45 и в  $\text{CO}_2$ , диаметром 1,2 мм.

Проведенный комплекс исследований позволил установить, что сварные соединения, выполненные полуавтоматической сваркой в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволокой диаметром 2,0 мм, не уступают соединениям, сваренным в  $\text{CO}_2$  проволокой диаметром 1,2 мм и вручную электродами с фтористым кальциевым покрытием. Исследуемый способ сварки рекомендуется для изготовления ответственных конструкций работающих в условиях низких температур. В процессе проектирования и изготовления необходимо выполнять требования, изложенные в Приложении 3 к ГОСТ 14892—47.

#### 4. Свойства сварных соединений сталей с повышенным содержанием углерода

Большую группу сварных конструкций составляют детали машин. Они изготавливаются из проката с использованием отдельных поковок и отливок, а также непосредственно из отливок либо поковок. Применение сварных деталей вместо литых или кованных дает большой экономический эффект прежде всего благодаря снижению массы изделия и припусков на механическую обработку.

Характерной особенностью деталей машин является применение широкой номенклатуры марок сталей. Наиболее нагруженные части деталей изготавливаются из сталей с повышенным содержанием углерода (45, 40Х, 50Г, 38Х и др.) и подвергаются термической обработке, что придает им значительную прочность, твердость и износостойкость. Менее нагруженные части изготавливаются из низкоуглеродистых сталей марок Ст. 3, 15, 20 и др.

Сварка сталей с повышенным содержанием углерода связана со значительными трудностями. Они обладают низкой стойкостью против образования горячих трещин, склонны к образованию малопластичных структур в шве и околошовной зоне, а также к возникновению холодных трещин. Трудно получить шов, равнопрочный основному металлу.

Как было указано выше, швы, выполненные в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , обладают высокой стойкостью против образования трещин как в шве, так и в околошовной зоне. Поэтому для изготовления конструкций из сталей с повышенным содержанием углерода рационально использовать этот способ сварки. Свойства сварных соединений из таких сталей при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  практически не изучены.

Для определения механических свойств сваривались стыковые соединения из сталей марок 45 и 38ХС толщиной

Таблица 49. Химический состав проволок и основного металла, %

Марка стали и проволоки	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Zr	S	P
Сталь 45	0,450	0,80	0,30	0,08	—	—	—	0,029	0,014
38ХС	0,360	0,42	1,07	1,28	—	—	—	0,017	0,022
Св-08Г2С	0,110	1,92	0,79	—	—	—	—	0,021	0,020
Св-08Г2СЦ	0,094	1,89	0,80	—	—	—	0,09	0,014	0,015
Св-08ХГСМФА	0,088	1,25	0,86	0,95	0,56	0,34	—	0,019	0,024
Св-08Х3Г2СМ	0,075	1,92	0,58	2,14	0,37	—	—	0,022	0,018

12 мм. Разделка кромок под сварку V-образная, односторонняя, с углом раскрытия 60°.

Для сварки стали 45 применяли следующие сварочные материалы: проволоку Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 1,6 мм и смесь 70%  $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$ . Для сравнения сварку выполняли в углекислом газе и вручную электродами УОНИ 13/55 диаметром 5,0 мм. Эти электроды рекомендуются при изготовлении конструкций из углеродистых сталей.

При сварке сталей типа 38ХС указанные сварочные материалы не обеспечивают достаточного уровня механических свойств. Поэтому для их сварки необходимо применять комплекснолегированные проволоки с карбидообразующими и упрочняющими феррит элементами и с достаточным количеством раскислителей. Такими являются электродные проволоки марок Св-08ГСМТ, Св-08ХГСМФА, Св-08Х3Г2СМ по ГОСТ 2246—70. Стали с повышенным содержанием углерода следует сваривать многослойными швами, проволокой диаметром 1,2 мм на умеренных режимах, чтобы исключить перегрев металла зоны термического влияния и рост зерна в этой зоне. Для ручной дуговой сварки сталей типа 38ХС необходимо использовать электроды НИАТ-3М. Химический состав основного металла и электродных проволок приведен в табл. 49.

Таблица 50. Химический состав и механические свойства металла швов на стали 45

Сварочные материалы	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	I, A, по- лярность	Темпе- ратура пред- варительного подогре- ва, °C	Термо- обра- ботка после свар- ки *	Содержание элементов, %			Механические свойства			
					C	Mn	Si	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	$\sigma_{\text{с}}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Са-08Г2СЦ, L = 40 мм, CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	283	200, обратная	Без подог- рева	I II III I	0,174	0,94	0,38	399—416 407	586—587 586	22,6—26,7 26,6	55,6—59,9 57,7
								343—360 351	537—561 544	31,4—31,7 31,6	57,8—64,0 60,9
								389—431 410	558—597 578	28,0—28,3 26,6	66,0—67,9 66,9
								378—382 385	526—567 541	24,6—24,7 24,6	59,9—60,0 59,9
25-08Г2С, L = 40 мм, CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	453	300, обратная	200	IV	0,189	1,0	0,41	356—405 376	567—558 575	26,0—28,0 25,5	59,9—60,0 59,9
								399—410 404	543—550 546	27,0—27,1 27,0	57,8—59,9 58,8
								338—345 342	515—516 515	26,6—29,3 27,9	66,0—66,1 57,8
								353—370 361	540—543 541	25,3—26,0 25,7	62,0—62,1 62,0
угле- кислый газ УОНИ 13/55	—	200, обратная	200	IV	0,184	0,91	0,27	403—419 410	549—560 554	26,7—35,0 30,8	61,0—64,9 63,0

\* I — без термической обработки, охлаждение на воздухе; II — отпуском, охлаждение в песке, нагревом до 200° С.

Сварку в защитных газах выполняли полуавтоматами А-537 и А-547 в зависимости от диаметра проволоки. Из сваренных стыков вырезали образцы для испытаний металла шва и сварного соединения на растяжение, ударный и статический изгиб, а также для спектрального анализа и металлографических исследований. В проведенных исследованиях изучали влияние термической обработки до и после сварки, сварочных материалов и режимов сварки на механические свойства металла шва. Химический состав и механические свойства металла шва, режимы сварки и сварочные материалы приведены в табл. 50.

Термическую обработку образцов проводили в электропечи. Режим термообработки:

закалка — нагрев до 820—850°С; выдержка 1 ч; охлаждение в воде;

отпуск — нагрев до 600—620° С; выдержка 1 ч; охлаждение на воздухе.

Из табл. 50 видно, что при сварке стали 45 проволокой Св-08Г2СЦ диаметром 1,6 мм в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  временное сопротивление разрыву металла шва составляет примерно 0,9 $\sigma_s$  основного металла. Указанные сварочные материалы обеспечивают получение швов с высокими пластическими свойствами, более высокими, чем у основного металла. Свойства металла шва при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  практически не уступают свойствам металла шва, выполненного вручную электродами УОНИ 13/55. При сварке стали 45 без подогрева прочностные свойства металла шва примерно на 10% выше, чем при сварке с подогревом до 200°С, так как в первом случае скорость охлаждения выше, чем во втором.

Отпуск после сварки приводит к повышению пластических и снижению прочностных свойств металла. Механические свойства металла шва при сварке с подогревом без последующего отпуска практически не уступают механическим свойствам шва при сварке без подогрева с последующим отпуском. Улучшение металла шва путем закалки и отпуска повышает его прочностные свойства при высоком уровне пластических.

С увеличением тока растет глубина проплавления и соответственно переход углерода в шов. Это приводит к повышению прочности металла шва. Добавка кислорода к углекислому газу способствует выгоранию углерода и легирующих элементов. Снижение содержания углерода и кремния благоприятно сказывается на стойкости металла против образования кристаллизационных трещин, пластич-

ность шва повышается, но прочностные свойства несколько снижаются.

Замедленное охлаждение после сварки в нагретом песке несколько снижает предел текучести и повышает относительное удлинение металла шва по сравнению с охлаждением на воздухе.

Испытания на ударный изгиб проводили на стандартных образцах с надрезом по Менаже. Значения ударной вязкости металла с надрезом по оси шва и границе сплавления приведены в табл. 51.

Ударная вязкость металла шва значительно выше требований, предъявляемых к основному металлу согласно ГОСТ 1050—74. Испытания на ударный изгиб металла околошовной зоны (при расположении надреза на границе сплавления) показали, что его вязкость при механизированных способах сварки удовлетворяет требованиям, предъявляемым к основному металлу. При ручной дуговой сварке наблюдается снижение ударной вязкости металла зоны термического влияния. После закалки и отпуска металл шва и околошовной зоны имеет примерно одинаковую ударную вязкость. С увеличением погонной энергии вязкость металла шва падает. Особенно снижается ударная вязкость при расположении надреза на границе сплавления. В околошовной зоне наблюдается значительный разброс значений ударной вязкости при больших погонных энергиях, что можно объяснить укрупнением зерна и нестабильностью свойств грубозернистого металла.

Сварку образцов из стали 38ХС проводили с предварительным подогревом до 200°С. Часть образцов после сварки подвергали термической обработке: отпуску и закалке с отпуском. Предварительный подогрев осуществляли газовой горелкой. Температуру подогрева контролировали с помощью термокарандашей. Термическую обработку образцов до и после сварки осуществляли в электропечи. Режим термообработки:

закалка — нагрев до 900°С, выдержка в печи 30 мин, охлаждение в масле;

отпуск — нагрев до 630°С, выдержка 30 мин, охлаждение в масле.

Сварку образцов выполняли проволокой Св-08ХГСМФА и Св-08ХЗГ2СМ диаметром 1,2 мм в смеси углекислого газа и кислорода (70% CO<sub>2</sub> + 30% O<sub>2</sub>) на токе 200—220 А. Для сравнения часть образцов сваривали вручную электродами НИАТ-3М диаметром 4—5 мм.

Таблица 51. Ударная вязкость металла швов на стали 45

Марка проволоки	L, мм	I, А, полярность	Защитный газ	Температура предварительного подогрева, °С	Термообработка после сварки *	a <sub>н</sub> при -20°С, Дж/см <sup>2</sup>	
						надрез по оси шва	надрез по границе сплавления
Св-08Г2СЦ d <sub>з</sub> = 1,6	40	200, обратная	70% CO <sub>2</sub> + 30% O <sub>2</sub>	Без подогрева	I	111—116	52—77
						113	65
						115—139	84—85
						131	84
						118—146	87—111
						132	99
						120—122	74—110
						120	92
						111—130	79—81
						123	80
Св-08Г2С d <sub>з</sub> = 1,6 Св-08Г2С d <sub>з</sub> = 1,6 УОНИ 13/55	40	300, обратная	То же	200	IV	110—122	44—84
						107	70
						62—122	42—81
						106	56
						113—119	90—102
						116	96
						100—130	72—82
						114	77
						115—143	32—62
						133	47
40	20	200, обратная	CO <sub>2</sub>	200	IV	114	77
—	—	200, обратная	—	200	IV	115—143	32—62

\* I — без термической обработки, охлаждение на воздухе; II — отпуск; III — закалка и отпуск; IV — без термической обработки, охлаждение в песке, нагретом до 200°С.

Химический состав металла шва приведен в табл. 52, а механические свойства — в табл. 53.

Из табл. 53 следует, что при сварке в смеси углекислого газа и кислорода механические свойства металла шва на стали 38ХС находятся на уровне свойств основного металла после улучшения. Пластические свойства металла шва при полуавтоматической сварке проволоками диаметром 1,2 мм выше, чем при сварке вручную. Отпуск сварного соединения несколько снижает прочность металла

Таблица 52. Химический состав металла швов на стали 38ХС, %

Марка проволоки или электрода	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
Св-08ХГСМФА	0,128	0,70	0,75	1,67	0,55	0,2	0,014	0,016
Св-08ХЗГ2СМ	0,131	0,51	1,05	1,75	0,37	0,01	0,020	0,019
НИАТ-3М	0,182	0,78	1,27	0,99	0,38	0,08	0,009	0,018

шва и повышает его пластичность. Ударную вязкость металла шва определяли на образцах с полукруглым надрезом (табл. 54). Были также проведены испытания сварного соединения на статическое растяжение и загиб (табл. 55). Временное сопротивление разрыву образцов из сварного соединения составляет примерно 0,9  $\delta_b$  основного металла. Угол загиба во всех случаях не превышает 90°, в то время как угол загиба образцов, вырезанных из основного металла, составляет всего 12—14°.

Проведенные исследования показали, что сварные соединения из сталей с повышенным содержанием углерода (45, 38ХС) при сварке в смеси углекислого газа и кислорода обладают высокими пластическими и вязкими свойствами и не уступают соединениям, выполненным вручную электродами основного типа, широко применяемыми для изготовления конструкций из этих сталей.

При сварке сталей с повышенным содержанием углерода резко возрастает опасность образования в сварном соединении как горячих, так и холодных трещин. Для предупреждения возникновения трещин применяют ряд технологических приемов и прежде всего предварительный подогрев. При этом уменьшается скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны. Это способствует получению более вязкого металла с меньшей твердостью. Одновременно снижается уровень остаточных напряжений и отдалается

Таблица 53. Механические свойства металла швов на стали 38ХС

Марка проволоки или электрода	Термообработка после сварки	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Св-08ХГСМФА	Без обработки	798—813 802	1001—1003 1002	15,0—19,0 17,0	38,6—46,2 42,4
	Отпуск	708—741 723	901—958 934	18,4—20,6 19,5	39,7—48,0 44,6
	Закалка + отпуск	847—860 853	946—950 948	15,0—15,2 15,0	48,6—49,0 48,7
Св-08ХЗГ2СМ	Без обработки	707—841 774	905—995 950	10,0—16,7 13,3	46,2—46,4 46,3
	Отпуск	704—720 712	891—923 907	11,8—18,0 16,4	50,4—50,8 50,6
	Закалка + отпуск	702—720 711	875—886 881	15,0—16,0 15,5	55,6—57,8 56,7
НИАТ-3М	Без обработки	777—813 795	1031—1078 1054	14,3—14,4 14,3	38,6—39,0 38,8
	Отпуск	708—740 724	913—968 941	17,6—18,0 17,8	41,4—42,9 42,1
	Закалка + отпуск	1023—1068 1045	1090—1112 1101	12,3—13,3 12,8	43,7—48,6 46,1



Таблица 54. Ударная вязкость металла швов на стали 38ХС

Марка проволоки или электрода	Термообработка после сварки	$\alpha_n$ , Дж/см <sup>2</sup> , при температуре испытаний, °С	
		+20	-40
Св-08ХГСМФА	Без обработки	59—62 60	50—56 52
	Закалка + отпуск	55—57 57	26—32 28
Св-08ХЗГ2СМ	Без обработки	42—57 52	37—50 39
	Закалка + отпуск	50—76 62	60—62 60
НИАТ-ЗМ	Без обработки	67—72 69	17—37 27

время их возникновения, облегчается диффузия и удаление водорода.

Температура предварительного подогрева зависит от химического состава, толщины и конструкции деталей, сварочных материалов и других факторов. Единой методики определения температуры подогрева не существует. В зависимости от типа соединения, эквивалента углерода, толщины металла и диаметра электрода температура предварительного подогрева может изменяться от 100 до 600°С [184]. Сварку узлов из стали 50ХН вручную электродами УОНИ 13/55 рекомендуют выполнять с предварительным

Таблица 55. Временное сопротивление разрыву и угол загиба сварного соединения из стали 38ХС

Марка проволоки или электрода	$\sigma_B$ , МПа		Угол загиба, град	
	Без термообработки	Закалка + отпуск	Без термообработки	Закалка + отпуск
Св-08ХГСМФА	925—958 938	934—963 942	19—30 25	29—66 48
Св-08ХЗГ2СМ	830—858 842	825—870 848	19—32 28	74—81 78
НИАТ-ЗМ	970—985 977	946—950 947	13—25 20	37—74 60

подогревом до 300—400°С [104]. При сварке колес из стали 40Х электродами УОНИ 13/55 применяли предварительный подогрев до 200—350°С [32].

Предложен ряд эмпирических формул для подсчета температуры предварительного подогрева. Формулы выведены из условия образования пластических структур в околосшовной зоне и предупреждения возникновения холодных трещин [106, 175]. В результате исследований распределения твердости в зоне термического влияния различных низколегированных сталей Д. Сефериан [106] вывел эмпирическую формулу для определения температуры подогрева:

$$T = 350 \sqrt{C_{\text{экл}} - 0,25}, \quad (6.2)$$

где  $C_{\text{экл}}$  подсчитан по формуле (4.3).

И. Ито и К. Бессю [175] предложили следующую формулу для определения температуры предварительного нагрева:

$$T = 1440P_c - 392, \quad (6.3)$$

где  $P_c$  определяется по формуле (4.6), которая учитывает влияние химического состава, толщины металла и содержания диффузионного водорода.

Предварительный подогрев — простой, но достаточно трудоемкий способ предотвращения появления трещин. Он усложняет технологический процесс, требует дополнительных затрат на нагревательные устройства и энергию, ухудшает условия работы сварщиков и вспомогательных рабочих. Поэтому изыскание способа сварки, позволяющего снизить температуру подогрева или отказаться от него — важная техническая задача.

Исследованиями [14, 180] установлено, что сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  отличается более низким содержанием водорода в металле шва и повышенной стойкостью против образования трещин при сварке низколегированных сталей. Это позволило предположить, что данный способ сварки может быть применен для изготовления конструкций из сталей с повышенным содержанием углерода, причем температура предварительного подогрева для предупреждения образования трещин может быть снижена.

Исследовалась возможность снижения температуры предварительного подогрева при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  узлов из стали марок 45 и 38ХС. Для этого определяли стойкость металла против образования горячих и холодных трещин при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  и для сравнения в

углероде и вручную покрытыми электродами при различных температурах подогрева.

Сталь марок 45 и 38ХС применяется для изготовления сварных деталей машин, где чаще всего встречаются кольцевые швы. Исходя из этого стойкость швов против образования горячих трещин изучали на пробе с круглой вставкой [125]. В центре квадратной пластины имеется отверстие, в которое вставляется диск из той же стали. Диск прихватывали двумя прихватами и обваривали по периметру на выбранных режимах в один проход с одной стороны. После сварки и полного остывания наружным осмотром и с помощью магнитного метода определяли длину образовавшихся трещин на поверхности и в корне шва. Стойкость металла шва против образования горячих трещин оценивали по степени разрушения контрольного шва, т. е. отношением длины трещины к общей длине шва. Сварку выполняли с предварительным подогревом образцов до разной температуры с помощью газокислородной горелки. Применяемые режимы сварки обеспечивали стабильность процесса, удовлетворительное формирование и внешний вид шва. Результаты исследований приведены в табл. 56.

Трещины, которые образуются в швах образцов, сваренных без подогрева, выявляются сразу же после сварки невооруженным глазом. Установлено, что при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  стойкость против образования кристаллизационных трещин на 20—30% выше, чем при сварке в углекислом газе, и на 30—50% выше, чем при сварке вручную покрытыми электродами. Трещины в шве при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  не возникают, если образец подогреть до 200° С. Для предупреждения образования трещин в швах, выполненных вручную, необходим подогрев до 250—300° С. Повышение стойкости против образования горячих трещин при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , по-видимому, можно объяснить более благоприятным составом металла шва, лучшей формой шва, уменьшением сварочных напряжений при сварке и положительным воздействием кислорода на характер расположения сульфидов.

Предварительный подогрев, температура которого подсчитывается по формулам (6.2) и (6.3), назначается для предупреждения образования закалочных структур и холодных трещин в околошовной зоне. Ориентировочная температура подогрева для исследуемых сталей приведена в табл. 57. Химический состав и эквивалент углерода для указанных сталей даны в табл. 20, 21.

Таблица 56. Стойкость швов против образования горячих трещин

Марка стали	Сварочные материалы	I, А	Температура предварительного подогрева, °С	Поверхность шва		Корень шва	
				длина трещины, мм	степень разрушения, %	длина трещины, мм	степень разрушения, %
38ХС	Св-08Х3Г2СМ $d_3 = 1,2 \text{ мм}$ , 70% $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$	220—240	Без подогрева 120 200	144	45	180	58
				147	46	155	50
				7,0 В кратере	2,2 В кратере	0	0
				206	64	280	90
Сталь 45	НИАТ-3М	160—180	Без подогрева 120 200 300	182	56	235	76
				104	32	120	38
				4,5	1,5	0	0
				87	28	103	32
Сталь 45	Св-08Г2СЦ $d_3 = 1,2 \text{ мм}$ , 70% $\text{CO}_2 + 30\% \text{O}_2$	200—250	Без подогрева 200	12	3,8 В кратере	0	0
				110	35	130	40
				132	42	175	56
				12 В кратере	3,8 В кратере	0	0
Сталь 45	Св-08Г2СЦ $d_3 = 1,2 \text{ мм}$ , $\text{CO}_2$	200—250	Без подогрева	110	35	130	40
				132	42	175	56
Сталь 45	УОНИ 13/45	200	Без подогрева 250	132	42	175	56
				12 В кратере	3,8 В кратере	0	0

Как показывает практика, формулы (6.2) и (6.3) дают завышенные результаты, особенно для низколегированных сталей. Опыты показали, что при сварке сталей 16Г2АФ и 15Г2АФДлс в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  холодные трещины не образуются. Установлено также, что сталь 38ХС имеет наименьшую сопротивляемость образованию холодных трещин, однако расчетная температура подогрева для этой стали не превышает температуру подогрева для стали 45.

Положительным в формуле, предложенной И. Ито и К. Бессю, является то, что она дает правильное соотно-

Таблица 57. Расчетная температура подогрева при сварке исследуемых сталей, °С

Марка стали	Толщина, мм	Расчет по формуле		
		Д. Сефернана	И. Ито и К. Бессю	
			сварка вручную	сварка в смеси
16Г2АФ	40	135	290	100
15Г2АФДлс	14	110	260	70
	32	145	275	85
Сталь 45	14	220	570	385
	30	220	660	470
38ХС	20	210	570	385

ние между температурой подогрева низколегированных сталей и сталей с повышенным содержанием углерода резким увеличением этой температуры для последних. Кроме того, эта формула также учитывает содержание водорода в металле шва.

Таким образом, можно сделать вывод, что ограничиваться только определением  $C_{\text{экв}}$  и температуры подогрева по указанным формулам недостаточно. Температуру подогрева необходимо определять на специальных технологических пробах. Для сталей с повышенным содержанием углерода такие исследования были проведены на образцах модифицированной пробы Лихайского университета.

Образец пробы представляет собой пластину с прорезью. Контрольный шов сваривали на выбранных режимах при различной температуре предварительного подогрева. В начале и конце разделки оставляли незаваренный участок длиной 2—3 мм. Кратер должен быть заплавлен. Минимальная толщина листа, из которого изготавливали образцы, должна быть не менее 12 мм. Каждый опыт проводили на

двух-трех образцах. Проба Лихайского университета похожа на модифицированную пробу Теккен, но отличается меньшей жесткостью. Стойкость против образования холодных трещин оценивают так же, как и при использовании пробы Теккен: по степени разрушения контрольного шва (см. рис. 44). Чем меньше степень разрушения контрольного шва, тем выше стойкость против образования холодных трещин.

Сварку образцов производили полуавтоматом в смеси  $\text{O}_2 + \text{O}_2$  и в чистом углекислом газе, а также вручную.

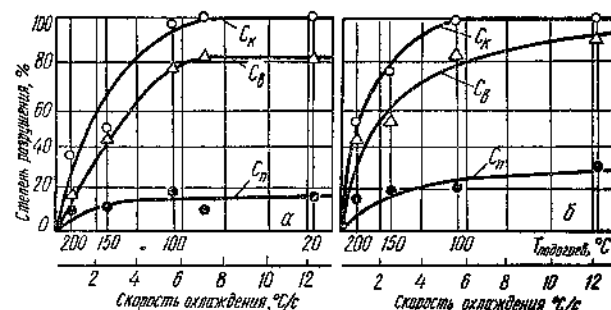


Рис. 71. Степень разрушения контрольного шва в зависимости от скорости охлаждения:  
а —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ; б —  $\text{CO}_2$ .

сварочные материалы, режимы сварки и результаты опытов приведены в табл. 58. В таблице в числителе приведены минимальные и максимальные значения, а в знаменателе — средние из трех-четырех образцов.

Степень разрушения контрольных швов на стали 45 толщиной 30 мм в зависимости от скорости охлаждения в интервале температур мартенситного превращения показана на рис. 71. Из табл. 58 и рисунка видно, что стойкость сварных соединений из стали 45 против образования холодных трещин при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  выше, чем при сварке в углекислом газе. Это позволяет снизить температуру предварительного подогрева примерно на  $100^\circ\text{C}$ . Изменение погонной энергии в пределах 12,5—22,5 кДж/см не обеспечивает отсутствие трещин в образцах без предварительного подогрева.

Из табл. 58 видно, что стойкость швов против образования холодных трещин при полуавтоматической сварке образцов из стали 38ХС в защитных газах значительно выше, чем при сварке вручную. Предварительный подогрев

Таблица 58. Стойкость против образования холодных трещин

Марка стали	Сварочные материалы	I св, А	Температура подогрева, °С	Степень разрушения, %		
				поверхности шва	корня шва	по всей длине
Сталь 45	Св-08Г2СЦ $d_3 = 1,6$ мм, $CO_2$	260—280	Без подогрева	25—28	100	88—90
				27		90
				100	100	79—83
				20		84
				150	0—100	0—75
				19	75	58,5
				200	11—100	2—96
				16	51,5	48,8
				300	0—75	2—40
				10	35	12
				12—17	100	83—91
				15		81
38ХС	Св-08Г2СЦ $d_3 = 1,6$ мм, 70% $CO_2$ + + 30% $O_2$	260—270	Без подогрева	100	100	69—79
				18		78
				150	0—100	0—86
				13	46,5	45
				200	0—63	0—32
				11	38	18
	НИАТ-3М	200—210	Без подогрева	3—15	100	74—90
				9		82
				300—320	То же	100
				220—200	» »	100
				200	100	100
				400	8—19	4—50
				15	35	39
				100	100	100
				7,7—23	0	10—19
				10		12
				25—30	17—40	12—29
38ХС	Св-03Х3Г2СМ $d_3 = 1,2$ мм, 70% $CO_2$ + + 30% $O_2$	200	Без подогрева	28	28	24
				11—14	0	10—15
				13		12
38ХС	Св-08Х3Г2СМ $d_3 = 1,2$ мм, $CO_2$	200	200	25—30	17—40	12—29
				28	28	24
				11—14	0	10—15
38ХС	Св-08Х3Г2СМ $d_3 = 1,2$ мм, $CO_2$	200	400	25—30	17—40	12—29
				28	28	24
				11—14	0	10—15

образцов до 200° С предупреждает образование трещин в шве и околошовной зоне при сварке проволокой диаметром 1,2 мм в смеси  $CO_2 + O_2$  и в углекислом газе, в то время как при сварке вручную электродами НИАТ-3М трещины образуются как в шве, так и в околошовной зоне. Сопротивляе-

Таблица 59. Твердость участков металла сварного соединения из стали 38ХС, НВ

Сварочные материалы	Температура подогрева, °С	Шов	Околошовная зона	Основной металл
Св-08Х3Г2СМ $d_3 = 1,2$ мм, 70% $CO_2$ + + 30% $O_2$	Без подогрева 200	310—336 280—306	412—466 345—418	192—204 201—219
Св-08Х3Г2СМ $d_3 = 1,2$ мм, $CO_2$	200 400	341—358 280—289	362—460 317—325	188—197 193—219
НИАТ-3М	Без подогрева 200	299—353 296—329	460—480 380—447	199—210 185—190

Таблица 60. Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле

Защитный газ	Марка проволоки	$d_3$ , мм	L, мм	[H] <sub>диф.</sub> , см <sup>3</sup> /100 г
$CO_2$	Св-08Г2С	2,0	20	4,8
	То же	1,6	40	3,5
	Св-08Г2СЦ	1,2	12—15	1,8
	То же	1,2	12—15	1,2
	НИАТ-3М	5,0	—	1,0
	То же	5,0	—	5,5

мость сварных соединений образованию холодных трещин при сварке в смеси  $CO_2 + O_2$  выше, чем при сварке в углекислом газе для обеих марок стали.

В табл. 59 приведены значения твердости металла околошовной зоны и шва на стали 38ХС при сварке с подогревом и без него. Из таблицы видно, что твердость околошовной зоны при сварке в смеси  $CO_2 + O_2$  ниже, чем при сварке в углекислом газе и вручную. Это связано с тем, что при сварке в смеси  $CO_2 + O_2$  более интенсивно протекают окислительно-восстановительные реакции с выделением тепла, повышается температура сварочной ванны и длительность ее пребывания в жидком состоянии. Скорость охлаждения металла шва замедляется и твердость уменьшается.

Количество диффузионного водорода при сварке в защитных газах и вручную приведено в табл. 60. Низкое содержание диффузионного водорода и меньшая скорость охлаждения при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  обеспечивают более высокую стойкость против образования холодных трещин.

Как известно, углерод и большинство легирующих элементов повышают закаляемость и, следовательно, снижают стойкость против образования холодных трещин. Стали 45 и 38ХС содержат повышенное количество углерода. С увеличением содержания углерода растет водородная хрупкость мартенсита. При содержании  $\text{C} > 0,3\%$  стали склонны к холодным трещинам даже при низком содержании водорода.

Несмотря на низкое содержание диффузионного водорода в металле шва и меньшую скорость охлаждения околошовной зоны, при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  предотвращать образование холодных трещин в соединениях из сталей 38ХС и 45 без предварительного подогрева не всегда удается. Применение сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  позволяет значительно снизить температуру предварительного подогрева для предотвращения холодных трещин по сравнению со сваркой вручную и в углекислом газе. О возможности снижения температуры предварительного подогрева при использовании порошковой проволоки с низким содержанием диффузионно-подвижного водорода отмечается в статье [148].

### ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ СВАРКИ В СМЕСИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И КИСЛОРОДА

Сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с обычным и удлиненным вылетом электрода применяется взамен ручной сварки покрытыми электродами и вместо полуавтоматической в углекислом газе проволокой сплошного сечения.

Освоение сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с удлиненным вылетом в заводских условиях не связано с изменением технологического процесса изготовления металлоконструкций, машин, станков, вагонов и других изделий. Это позволяет осуществить переход от применявшегося ранее способа сварки к новому в кратчайшие сроки. Если при замене ручной сварки механизированной требуется освоение нового сварочного оборудования и подготовка кадров, то замена полуавтоматической сварки в углекислом газе сваркой в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  сводится практически к замене вида защиты дуги и минимальной переделке держателя. На заводах такая замена осуществляется полностью в течение 3—5 дней.

С применением сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  требования к подготовке поверхности металла и к сборке конструкций сохраняются прежними. Однако сварка в смеси менее чувствительна к ржавому металлу.

Основными преимуществами сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом по сравнению со сваркой в углекислом газе с обычным вылетом являются повышение производительности процесса (в среднем на 25—30 %), сокращение затрат на зачистку швов от брызг, улучшение внешнего вида и качества металлоконструкций.

Посты для сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  состоят из источников питания дуги, сварочных полуавтоматов и автоматов, а также из аппаратуры для смешения углекислого газа и кислорода. Как правило, сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  осуществляется постоянным током обратной полярности. Поэтому

в качестве источников питания дуги можно применять выпрямители и преобразователи. Сварочные выпрямители имеют следующие преимущества перед преобразователями: широкие пределы регулирования сварочного тока, хорошие динамические свойства, высокий КПД, надежны в эксплуатации, проще в обслуживании, работают бесшумно.

Таблица 61. Технические характеристики однопостовых сварочных выпрямителей

Тип выпрямителя	U, В		I, А		КПД	Номинальный режим работы, %	Масса, кг
	максимальное холостого хода	выпрямленное (рабочее)	номинальное значение	предел регулирования			
BC-300	43	19—38	300	30—300	0,71	65	250
ВДГ-302	55	16—38	315	50—315	0,75	60	275
BCЖ-303	50	9—32	315	30—315	0,76	60	300
ВДУ-305	70	16—38	315	50—315	0,70	60	240
BC-500	54,5	20—45	500	50—500	0,75	65	350
ВДУ-504	80	18—50	500	100—500	0,80	60	380
BC-600	55	20—40	600	60—600	0,75	65	490
ВДГ-601	90	18—66	630	100—700	0,82	60	570
BC-1000-1	65	17—48	1000	50—1000	0,75	65	650
BC-1000-2	90	18—65	1000	50—1000	0,75	65	650
ВДУ-1201	100	24—66	1250	300—1250	0,83	100	850
ВДУ-1601	100	26—66	1600	500—1600	0,84	100	950
BCЖ-1600	95	15—65	1600	300—1600	0,85	100	1200

Примечание. Для выпрямителей серии ВДУ указаны пределы регулирования по току и напряжению при использовании жесткой характеристики источника питания.

В табл. 61 приведены технические характеристики выпрямителей, которые применяются в настоящее время, а также могут быть использованы при внедрении полуавтоматической и автоматической сварки в смеси углекислого газа и кислорода.

Выпрямители типа BC (см. таблицу) построены по общей схеме, просты по устройству, надежны в работе. Внешние характеристики выпрямителей серии BC плогопадающие. Опыт внедрения сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  тонкой проволокой (диаметром 1,2—1,4 мм) в нижнем положении показал, что, если процесс вести с увеличенным вылетом электрода, требуется переделка источника BC-300 с целью повышения напряжения холостого хода.

Для модернизации выпрямителя следует внести следующие изменения в схему:

1) заменить селеновые выпрямители кремниевыми вентилями марки ВК-200 (класс не ниже 2), подключить вентили по схеме Ларионова, приведенной в инструкции выпрямителя;

2) к каждой катушке вторичной обмотки трансформатора добавить один виток провода того же сечения.

Модернизированный выпрямитель BC-300 позволяет выполнить сварку на токе 90—320 А при напряжении на дуге 37 В, он практически пригоден для полуавтоматической

Таблица 62. Технические характеристики преобразователей

Тип преобразователя	Номинальный ток при $\text{PR}=60\%$ , А	Пределы регулирования		Номинальная мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Масса, кг
		U, В	I, А			
ПСГ-350 *	350	10—35	50—350	14	2900	400
ПСГ-500	500	16—40	60—500	20	2930	500
ПСГ-500-2	500	20—48	60—500	31	2930	520
ПСУ-300 *	300	10—35	30—300	9	2890	300
ПСУ-500 *	500	15—40	50—500	20	2890	500
ПСУ-500-2	500	20—48	60—500	30	2930	590

сварки проволокой диаметром 1,2—2,0 мм. Промышленное опробование выпрямителя на заводе «Ленинская кузница» показало, что при сварке проволокой диаметром 1,4 мм с вылетом 40 мм при токе 320 А напряжение на дуге составляет 36—37 В. При этом процесс устойчив, формирование швов хорошее.

Для сварки проволокой диаметром 1,6—2,0 мм в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с обычным и увеличенным вылетом электрода кроме выпрямителей BC-500 и BC-600 можно применять выпрямители типа ВДГ и ВДУ, при этом сварку предпочтительнее производить на жесткой характеристике источника питания. При использовании автоматической сварки на повышенных режимах в смеси проволокой диаметром 2,0 мм и более следует применять источники питания с номинальным значением тока 1000 А и более (см. табл. 61). Очень часто оборудование для сварки в защитных газах комплектуется преобразователями ПСУ-300, ПСУ-500 и ПСГ-500. Преобразователь состоит из сварочного генератора и приводного асинхронного электродвигателя, смон-

Таблица 63. Технические характеристики сварочных полуавтоматов

Тип полуавтомата	Диаметр проволоки, мм	Номинальный сварочный ток при ПВ=60%, А	Скорость подачи электрода, м/ч	Способ регулирования скорости подачи	Габариты подающего устройства, мм	Длина шланга, м	Источник сварочного тока
A-547У	0,8—1,4	315	160—640	П/С	350×118×245	1,5; 2,5	ВС-300
A-825	0,8—1,4	315	140—650	П/С	305×175×245	1,5; 2,5	ВС-300
A-1230М	0,8—1,4	315	145—680	П/С	364×290×130	1,5; 2,5	ВДГ-302
ПДГ-305	0,8—1,4	315	120—1200	П	362×284×153	2,5	ВДГ-302
A1197С	1,6—2 (3,2)	500	92—920	С	960×660×560	3,5	ВДУ-504
A1197П	1,6—2 (3,2)	500	92—920	П	550×360×200	3,5	ВДУ-504
A-765	2—3,5	500	72—720	С	760×500×550	3,5	ПСГ-500
ПДГ-508	1,6—2,0	500	105—738	С	445×370×316	3,5	ВДУ-504
A1503П	1,3—2 (3,5)	500	120—760	П	550×360×200	3,5	ВДГ-601

Примечание. П — плавное регулирование скорости подачи проволоки; С — ступенчатое.

тированных в одном корпусе, установленном на колесах. Генератор представляет собой четырехполюсную машину с независимым возбуждением и последовательной подмагничивающей обмоткой, которая обеспечивает получение жестких внешних характеристик. Технические характеристики указанных преобразователей приведены в табл. 62. Эти преобразователи также могут использоваться в качестве источников питания при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

В настоящее время на многих предприятиях для сварки в углекислом газе и смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  используются многопостовые выпрямители. Система многопостовой сварки состоит из сварочных постов, специальных устройств для ограничения сварочного тока (балластных реостатов), распределительной сети и источников питания многопостовых или однопостовых, работающих параллельно.

При многопостовой сварке обычно применяются выпрямители с жесткими внешними характеристиками. Падающая характеристика на каждом посту создается с помощью балластных реостатов. К достоинствам многопостовой системы питания следует отнести меньшую стоимость оборудования, экономию эксплуатационных расходов и производственной площади; система обладает высоким  $\cos \phi$ , малой инерционностью и быстродействием при переходных режимах, возможностью установки источника в отдельном помещении.

Для сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  можно использовать многопостовые источники следующих типов: ВКСМ-1000; ВКСМ-1000-1; ВДГМ-1001; ВДГМ-1601;

ВДГМ-1602; ВДГМ-1602-1; ВДГМ-1602-2. Можно применять также многопостовой выпрямитель ВМГ-5000, обеспечивающий одновременную работу до 30 сварочных постов.

К недостаткам многопостовой системы следует отнести то, что при ремонте источника питания не работают все посты, многопостовые системы имеют низкий КПД, кроме того, все сварочные посты должны работать только на одной поллярности.

Наибольшее распространение в стране получила полуавтоматическая сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . В табл. 63 приведены технические характеристики сварочных полуавтоматов, которые используются для сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  тонкой проволокой

Рис. 72. Полуавтомат А-547 с источником питания ВС-300 для сварки в  $\text{CO}_2$  и смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволокой диаметром 0,8—1,4 мм.





(диаметром 0,8—1,4 мм) и проволокой большего (1,6—2,0 мм) диаметра.

На рис. 72 и 73 приведены полуавтоматы А-547 и ПДГ-508, получившие наибольшую популярность при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . Особый интерес среди новых полуавтоматов представляет полуавтомат А-1750 «Интермигмаг»

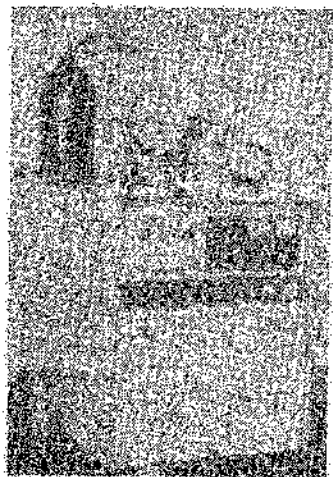


Рис. 73. Полуавтомат ПДГ-508 с выпрямителем ВДУ-504 для сварки в углекислом газе и смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  проволокой диаметром 1,6—2,0 мм.



Рис. 74. Полуавтомат «Интермигмаг» с источником питания ВСЖ-304 для сварки в защитных газах проволокой диаметром 0,8—1,6 мм.

(рис. 74). Он состоит из узлов, разработанных в странах СЭВ. Механизм подачи — изаплан, Болгария; горелки RU 315, RU 400 ЦИС, ГДР, блок управления и источник питания — СССР. Система управления полуавтоматами может переключаться сварщиком для работы по одному из трех циклов:

сварка длинных швов — пуск производится нажатием пусковой кнопки, которая затем может быть отпущена, прекращение сварки — повторным нажатием кнопки;

сварка коротких швов — прихватка — пуск производится нажатием кнопки, прекращение сварки — отпущением;

сварка точками — пуск производится нажатием кнопки, окончание — автоматически через заданное время.

Основными требованиями, предъявляемыми к держателям полуавтоматов для сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электрода, являются повышенная стойкость токопроводящего наконечника против окисления при нагреве; обеспечение направления по шву разогретого вылета электрода; надежная электроизоляция вылета электрода от токоведущих частей держателя.

В последнее время полуавтоматическая сварка электродной проволокой диаметром 2,0 мм в углекислом газе и смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  ведется на повышенных (более 360 м/ч) скоростях подачи. В таких условиях медные токоподводящие наконечники интенсивно изнашиваются. Рациональным в этом случае является применение наконечников из спеченных материалов, например кермета МКВ-10.

Автором работы [123] установлено, что при работе с наконечниками из меди основным видом разрушения (как при гладких, так и при насеченных роликах) является эрозийный износ. Его величина в 1,5—2 раза выше механического износа. Иная картина наблюдается при работе о наконечниками из кермета: при роликах с насечками доминирует механический износ, а при гладких — эрозийный. Склонность медных сплавов к окислению при нагреве, а также возможность механического отслаивания и термического разрушения образующейся окисной пленки в результате движения проволоки создают большие потери металла наконечника. Керметы подвержены эрозии и переносу металла меньше, чем медные сплавы. Это обусловлено высокой твердостью и термическими свойствами вольфрама и карбида вольфрама. Образующиеся на их поверхности окислы легко разрушаются движущейся насеченной проволокой, обеспечивая при этом стабильный скользящий токоподвод. Что касается требований, предъявляемых к направлению увеличенного вылета электрода по шву и его электроизоляции, то им отвечает конструкция приставки, приведенная на рис. 75.

Керамическая жаропрочная направляющая электродной проволоки изготавливается либо из алунда ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + 1\% \text{TiO}_2$ ), либо из ультрафарфора — материалов, обладающих диэлектрическими свойствами и имеющих высокую прочность. Опытно-промышленная проверка этой приставки, проведенная в условиях Южно-Уральского машиностроительного завода и Тульского завода металлоконструкций, показала, что надежная ее работа обеспечивается при скоростях подачи электродной проволоки диаметром

2,0 мм не более 280 м/ч. При увеличении скорости подачи проволоки примерно через 2—3 ч работы полуавтомата нарушалось контактирование проволоки с токопроводящим наконечником (стойкость наконечника при нормальном вы-

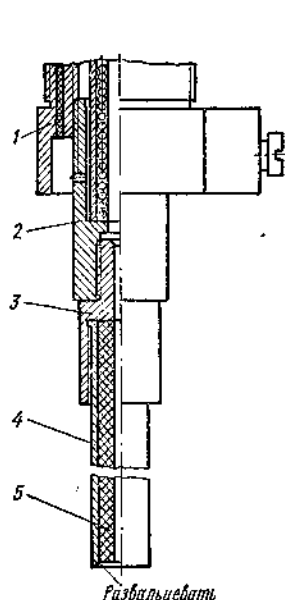


Рис. 75. Схема опытной приставки к держателю для сварки с увеличенным вылетом электрода:

1 — держатель; 2 — рассекающий газ; 3 — токопроводящий наконечник; 4 — удлинитель; 5 — керамическая вставка.

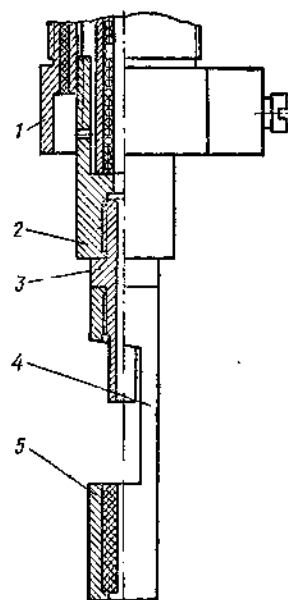


Рис. 76. Схема усовершенствованной приставки к держателю для сварки с увеличенным вылетом:

1—5 — то же, что на рис. 75.

лете для аналогичных условий в среднем составляет 1—3 смены).

Анализ причин нарушения контакта при сварке с указанной приставкой позволил установить, что важнейшей из них является различная сопротивляемость износу керамической направляющей и медного токопроводящего наконечника. Точка контакта в серийных держателях находится в нижней части наконечника. Постоянство точки контакта обеспечивается благодаря пружинящим свойствам самой электродной проволоки. Как видно из рис. 75, керамическая направляющая и наконечник расположены соосно. Так как направляющая практически не истирается

движущейся проволокой и обеспечивает ее выравнивание на участке от наконечника до изделия, то даже небольшой износ наконечника (в его нижней части) приводит к нарушению контакта. Чем выше скорость подачи проволоки, тем быстрее происходит нарушение контакта.

С целью устранения этого дефекта нами была разработана приставка (рис. 76), обеспечивающая надежное контактирование проволоки независимо от скорости ее подачи. По мере срабатывания наконечника удлинитель изгибается и тем самым точка контактирования всегда находится в нижней части наконечника независимо от его износа, а направление проволоки обеспечивается керамической вставкой. Проверка работы приставки в условиях Тульского завода металлоконструкций и Воронежского завода тяжелых механических пресов позволила установить, что срок службы контактного наконечника такой же, как и при сварке с обычным вылетом, а всей приставки — в 1,5—2 раза больше, чем наконечника. Указанная приставка обеспечивает надежную работу при скорости подачи сварочной проволоки диаметром 2,0 мм до 400 м/ч. Недостатком ее является то, что в процессе работы сварщик должен периодически изгибать наконечник для обеспечения контакта, что приводит к некоторому снижению производительности.

При внедрении сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом на заводах «Ждановтяжмаш», Днепропетровский и Рижском вагоностроительных, на которых используется проволока марки Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ диаметром 2,0 и 1,6 мм, была установлена оптимальная длина вылета электрода 60 мм для проволоки диаметром 2,0 мм и 40 мм — для проволоки диаметром 1,6 мм.

При таких вылетах электрода специального устройства для направления проволоки не требуется, так как она имеет достаточную жесткость и процесс сварки протекает стабильно. Модернизация держателя в этом случае сводится только к укорачиванию рассекающего газа по сравнению со стандартным на 10—20 мм, либо к удлинению сопла на 20—40 мм. При этом нужно следить за тем, чтобы проволока располагалась концентрично относительно сопла. Техника манипулирования держателем с удлиненным вылетом при наложении швов аналогична технике сварки с обычным вылетом электрода.

Опыт внедрения автоматической сварки в углекислом газе с нормальным вылетом на повышенных скоростях подачи проволоки показал, что начальное возбуждение дуги

ухудшается. Введение в электросхему подачи сварочной проволоки (двигатель постоянного тока) дополнительного сопротивления, обеспечивающего замедленную подачу проволоки в начале сварки, способствует улучшению зажигания дуги.

При полуавтоматической сварке в углекислом газе с увеличенным вылетом также возникают некоторые трудности первоначального возбуждения дуги [20]. Так как у большинства полуавтоматов (А-537, А-765, А-929, ПДГ-508 и др.) для сварки проволокой диаметром 1,6—2,0 мм двигатели подачи проволоки питаются переменным током, то изменение скорости их вращения в начальный момент сварки представляет определенную сложность.

Эти обстоятельства были учтены при внедрении полуавтоматической сварки с удлиненным вылетом в смеси газов на повышенных скоростях подачи проволоки. На заводах, производивших промышленную проверку и внедрение указанного способа сварки, работают преимущественно полуавтоматы марки А-537 и ПДГ-508 (конструкции ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР). Начало сварки на полуавтомате производится при закорачивании электрода на изделие. При этом автоматически включается подача проволоки. Процесс сварки прекращается при растягивании и обрыве дуги. Для надежного возбуждения дуги при сварке с удлиненным вылетом нами были внесены изменения в электрическую схему полуавтомата типа А-537. На рис. 77 представлены принципиальные электросхемы серийного полуавтомата и схема его после переделки. Как видно из схемы, при нажатии кнопки *К* замыкается цепь катушки *РП*, которая нормально разомкнутыми контактами включает двигатель подачи электродной проволоки. Таким образом, для того чтобы произвести зажигание дуги при сварке держателем с удлиненным вылетом, необходимо вначале закоротить электрод на изделие и при возбуждении дуги нажать кнопку, смонтированную на держателе, которая и осуществит включение двигателя подачи проволоки. В дальнейшем держать кнопку не требуется (в отличие от других схем полуавтоматов), что облегчает манипулирование держателем, особенно при сварке в труднодоступных местах. В схеме предусмотрено также включение газового отсекавателя с помощью токового реле в начале процесса и автоматическое выключение его после обрыва дуги.

Проверка работы схемы в производственных условиях показала, что сварщик средней квалификации сравнитель-

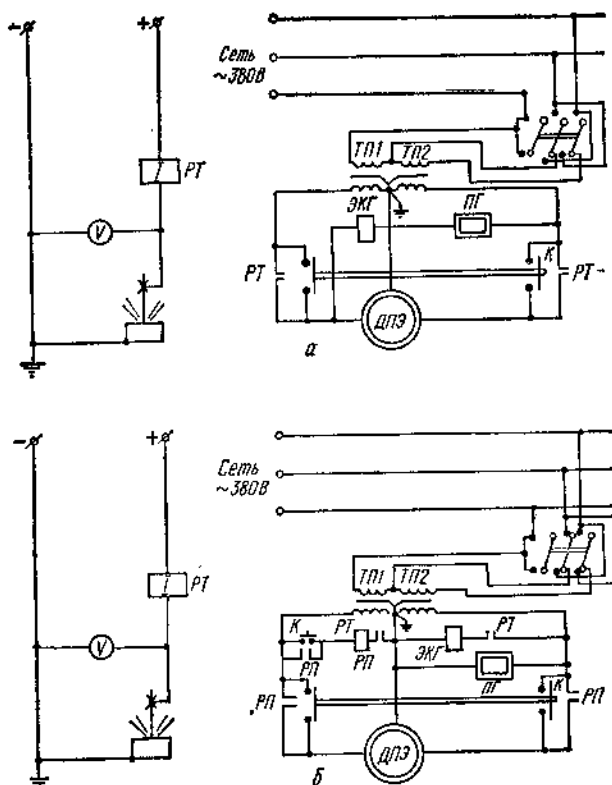


Рис. 77. Принципиальная электрическая схема полуавтомата А-537 до (а) и после (б) переделки для сварки с удлиненным вылетом.

но быстро (за одну-две смены) осваивает технику возбуждения дуги при сварке с удлиненным вылетом электрода.

В оборудовании поста сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  должен входить смеситель газов. Практика показала, что при наличии на предприятии не более 10—12 сварочных постов рационально использовать постовые смесители газов марки УКП-1. В конструкции смесителя предусмотрено его жесткое крепление к подсоединительным штуцерам кислородной магистрали с помощью гайки с трубной резьбой 3/4". Однако на заводах были случаи, когда кислород не подавался в цех по магистрали, а доставлялся в баллонах. По условиям эксплуатации смесителя УКП-1 максимальное давление кислорода на входе не должно превышать

1,5 МПа. Поэтому вначале на кислородный баллон ставится редуктор, а затем через переходник устанавливается смеситель газов.

Для подачи смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  на сварочный пост вначале нужно открыть вентиль на кислородном баллоне или магистрали, установить давление кислорода на входе в смеситель в соответствии с его паспортными данными, а затем обеспечить на входе в смеситель нужное давление углекислоты. Лабораторный и производственный опыт эксплуатации смесителя УКР-1 показал, что его надежная работа обеспечивается при минимальных давлениях задающих газов на входе  $\text{O}_2$  — 0,5 МПа,  $\text{CO}_2$  — 0,07 МПа.

Серийные смесители УКР-1 поставляются потребителям отрегулированными на состав смеси (по объему) 70%  $\text{CO}_2$  и 30%  $\text{O}_2$ , что соответствует таким диаметрам расходных шайб (дюз):  $d_{\text{CO}_2} = 1,3$  мм;  $d_{\text{O}_2} = 0,8$  мм. При освоении процесса сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  для более быстрого овладения техникой сварки рабочим-сварщиком рекомендуется состав смеси 85%  $\text{CO}_2$  + 15%  $\text{O}_2$ . Чтобы получить указанный состав смеси, необходимо изготовить дюзу с отверстием 0,4 мм и установить ее в смесителе взамен кислородной дюзы диаметром 0,8 мм. При правильной эксплуатации и профилактике смесителя УКР-1 срок службы его, как показал опыт, составляет более 10 лет.

Очень часто количество постов полуавтоматической сварки в углекислом газе на предприятиях превышает 10—12. В этом случае переход на сварку в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  должен осуществляться с использованием либо рамповых смесителей газов марки УКР-1, либо установок для смешения  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  марок УСД-1А и УСД-1Б.

Впервые многопостовой смеситель газов УКР-1 был введен на Соколовском заводе металлоконструкций и Днепродзержинском вагоностроительном заводе им. газеты «Правда». Различие этих заводов по снабжению цехов углекислым газом состояло в том, что на Соколовском заводе для централизованного питания углекислым газом использовалась рампа с баллонами, а на Днепродзержинском — изотермическая цистерна. Схема подключения смесителя УКР-1 к газовой магистрали в случае подачи углекислого газа от изотермической емкости или распределительной магистрали приведена на рис. 78.

По паспортным данным при давлении задающих газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ , равном 0,5 МПа или выше, смеситель УКР-1 обеспечивает надежную одновременную работу до 70 свароч-

ных постов. Однако опыт эксплуатации указанного смесителя на Тульском заводе металлоконструкций показал, что возможно надежное питание смесью до 120 сварочных постов без нарушения режима работы смесителя.

Очень часто при освоении сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  у производителей возникает вопрос о возможности

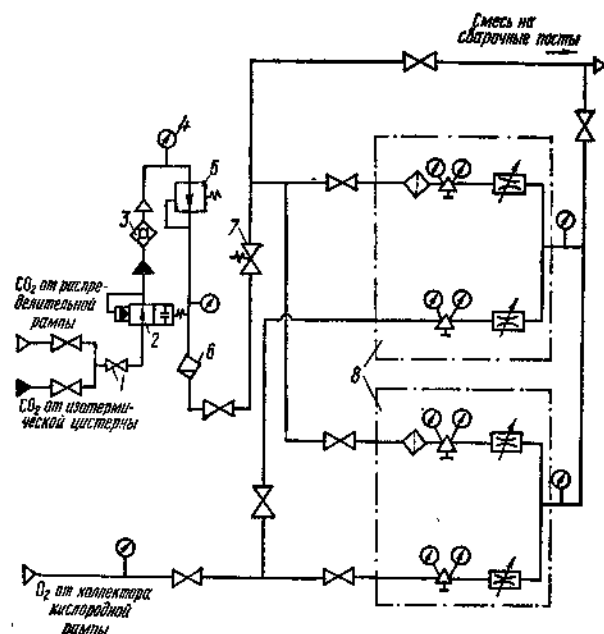


Рис. 78. Схема подключения рампового смесителя УКР-1:

1 — вентиль; 2 — клапан-отсекатель; 3 — газификатор; 4 — манометр; 5 — регулятор давления; 6 — маслялагоотделитель; 7 — предохранительный клапан; 8 — рамповые смесители, соединенные параллельно.

смешивания углекислого газа и кислорода при наличии в углекислом газе маслянистых веществ.

Согласно разъяснениям НПО „Криогенмаш“ наличие в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  (при содержании кислорода не более 30 об.%) маслянистых веществ, попадающих в узел смешения смесителя газов вместе с углекислым газом из газификатора, не является опасным. Кроме того, в комплект рамповых смесителей входят маслялагоотделители. Наиболее удачные конструкции маслялагоотделителей разработаны Калининским (рис. 79, а) и Днепродзержинским (рис. 79, б)

вагоностроительными заводами. В последнем в качестве фильтрующего материала использованы войлок и кокс, расположенные послойно.

Внедрение сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  на Уральском вагоностроительном заводе показало, что если давление углекислого газа ниже 0,3 МПа, смеситель УКР-1 не обеспечивает постоянство состава смеси. Поэтому ВНИИавтоген-

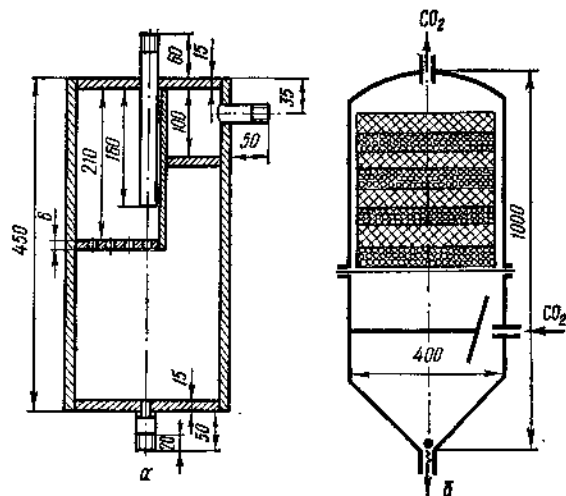


Рис. 79. Маслолагодотделитель конструкции Калининского (а) и Днепродзержинского (б) вагоностроительных заводов.

маш создал установки смешения газов УСД-1А и УСД-1Б. Стабильный состав смеси в этих установках обеспечивается при давлении углекислого газа 0,25 МПа. Первая установка УСД-1А была смонтирована и работает в настоящее время на заводе «Ленинская кузница». Днепродзержинский вагоностроительный завод также использует установку УСД-1А взамен рампового смесителя УКР-1. Это вызвано следующим: контроль состава газовой смеси осуществляется газоанализаторами (типа Арса, ГХП-2М, ВТИ-2), основанными на химическом поглощении газов. Иногда в условиях предприятия трудно осуществить контроль состава смеси из-за отсутствия газоанализаторов или специалистов по их обслуживанию. Этот недостаток был учтен при создании установки УСД-1А, которая снабжена автоматическим газоанализатором с записью состава смеси на

диаграммную бумагу. Установка УСД-1А более совершенна и имеет преимущества перед смесителем УКР-1, однако сложнее в обслуживании.

Еще раз следует подчеркнуть, что внедрение сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  следует начинать с введением в зону дуги небольшого (не более 15%) количества кислорода. Для получения состава смеси 85%  $\text{CO}_2 + 15\% \text{O}_2$  в рамповом смесителе УКР-1 следует изготовить кислородную дюзу с диаметром отверстия 3,2 мм и поставить ее взамен заводской дюзы диаметром 4,7 мм. В установке УСД-1А состав смеси можно изменять плавно, и расход кислорода контролировать по ротаметру, смонтированному на установке.

Анализ работы ряда заводов, изготавливающих металлоконструкции, показал, что основным типом швов (до 80%), выполняемых полуавтоматической сваркой в углекислом газе, являются угловые швы. Повышение производительности сварки угловых швов — весьма актуальная задача. В настоящее время наметились некоторые пути увеличения скорости полуавтоматической сварки в углекислом газе благодаря применению форсированных режимов [34, 63, 107] и проволоки большего диаметра (до 2,5 мм), а также дополнительной присадочной проволоки [54]. Наиболее простым и перспективным является увеличение производительности сварки угловых швов за счет применения удлиненного вылета электрода с защитой дуги смесью  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

Скорость сварки углового шва (при сварке от аппаратов с постоянной скоростью подачи проволоки) может быть представлена зависимостью

$$V_{\text{св}} = \frac{F_{\text{э}} V_{\text{п}}}{F_{\text{ш}}},$$

где  $F_{\text{э}}$  — площадь поперечного сечения электродной проволоки,  $\text{мм}^2$ ;  $F_{\text{ш}}$  — площадь сечения части шва, образовавшейся за счет электродного металла,  $\text{мм}^2$ .

Из этой зависимости видно, что скорость сварки углового шва при неизменных площадях сечений шва и электрода, пропорциональна скорости подачи проволоки. Прочность углового шва зависит от его механических свойств и от величины расчетного параметра, определяющего наименьшее сечение, по которому происходит разрушение шва. Величина расчетного параметра зависит от катета шва и от глубины проплавления основного металла. В главе второй было показано, что глубина провара основного металла

при сварке с различным вылетом электрода на постоянном токе практически не зависит от длины вылета. Поэтому увеличение вылета при  $I_{св} = \text{const}$  приведет вследствие увеличения количества наплавляемого металла к повышению скорости сварки углового шва. С этой целью сваривали угловые швы катетом 6, 8 и 10 мм в смеси 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$ , при неизменной величине тока и различной длине вылета. Сварка производилась аппаратом А-537 с источником

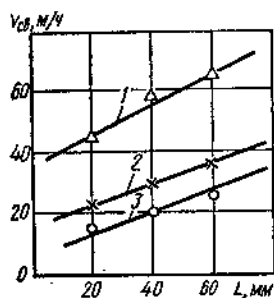


Рис. 80. Зависимость скорости сварки угловых швов от длины вылета проволоки диаметром 2,0 мм: 1 — катет 6 мм; 2 — катет 8 мм; 3 — катет 10 мм

питания ВС-600 электродной проволокой диаметром 2,0 мм, расход смеси 20 л/мин. Режимы сварки следующие:  $I_{св} = 420—430$  А;  $U_d = 32—34$  В. Время сварки фиксировали секундомером и принимали среднее по результатам сварки трех-четырех швов.

ривались «в угол» (положение, отличное от положения «в лодочку»). Во всех случаях процесс сварки был устойчив, формирование швов хорошее.

Максимальная скорость подачи проволоки диаметром 2,0 мм при полуавтоматической сварке в углекислом газе, как показал опыт работы различных заводов, составляет 360—450 м/ч. На подачах 450 м/ч работают наиболее квалифицированные сварщики. Это обусловлено тем, что при указанной скорости подачи (см. табл. 28) и нормальной величине вылета ток достигает значений 530—550 А. Значительное количество наплавляемого металла при больших токах ухудшает формирование шва. Требуется сложная техника манипулирования сварочным держателем для получения бездефектного шва с хорошим формированием.

Проведенные исследования показали, что даже квалифицированный сварщик не может обеспечить удовлетворительного формирования шва при сварке таврового соединения «в угол» в углекислом газе с обычным вылетом электрода и скорости подачи проволоки 600 м/ч.

На рис. 81, а приведен макрошлиф шва, выполненного указанным способом. При той же скорости подачи проволоки формирование шва удовлетворительно (рис. 81, б), если он сварен в смеси 70%  $\text{CO}_2$  + 30%  $\text{O}_2$  и длина вылета составляет 55—60 мм. Формирование улучшилось вследствие снижения критической величины тока. Таким образом, для получения хорошего формирования угловых швов

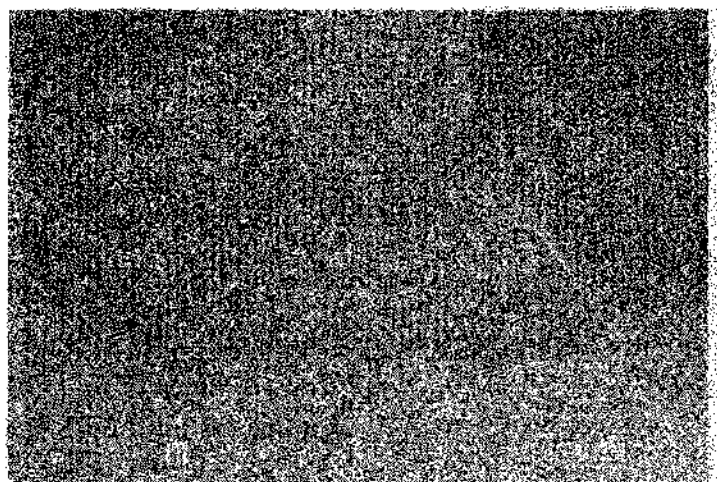


Рис. 81. Макрошлиф угловых швов, выполненных полуавтоматом проволокой диаметром 2,0 мм при скорости подачи 600 м/ч: а —  $\text{CO}_2$ ,  $L = 20$  мм,  $I_{св} = 620$  А,  $U_d = 36$  В; б —  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $L = 60$  мм,  $I_{св} = 470$  А,  $U_d = 36$  В.

при полуавтоматической сварке на больших скоростях подачи проволоки (свыше 450 м/ч) процесс следует вести с удлиненным (60 мм и более) вылетом в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

Сварку в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с нормальным и увеличенным вылетом электродной проволоки диаметром 1,6 мм применяют киевский завод «Стройдормаш» и Рижский вагоностроительный завод. На этих заводах установлены рамповые смесители газов, причем на Рижском заводе фиксируется общий расход смеси и расход углекислого газа специальными дифманометрами типа ДП-712-Р.

Внедрение сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электродной проволоки диаметром 2,0 мм осуществлено также на ряде заводов: «Ждановтяжмаш», Днепро-дзержинском вагоностроительном, Тульском заводе метал-

локонструкций, Карачаровском механическом, Новосибирском заводе электротермического оборудования и многих других.

Одно из основных преимуществ сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  — низкое содержание водорода в швах — позволило использовать этот процесс при сварке высокопрочных сталей бейнитного класса марок 14Х2ГМР и 14ХМНДФР, весьма чувствительных к концентрации водорода в швах.

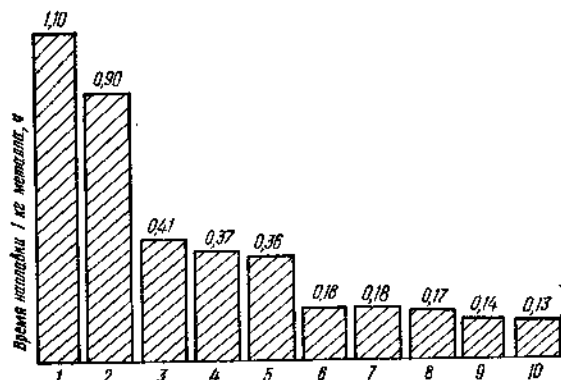


Рис. 82. Время наплавки 1 кг металла при использовании различных сварочных материалов:

1 — УОНИ 13/55,  $d_3 = 5.0$  мм; 2 — АНО-4,  $d_3 = 5.0$  мм; 3 — АНО-1,  $d_3 = 5.0$  мм; 4 — ПП-АН1,  $d_3 = 2.8$  мм; 5 — ПП-АН7,  $d_3 = 2.3$  мм; 6 — ПП-АН3,  $d_3 = 3.0$  мм; 7 — Св-08Г2С,  $d_3 = 2.0$  мм,  $L = 20$  мм,  $\text{CO}_2$ ; 8 — ПП-АН4,  $d_3 = 2.5$  мм,  $\text{CO}_2$ ; 9 — ПП-АН8,  $d_3 = 3.0$  мм,  $\text{CO}_2$ ; 10 — Св-08Г2С,  $d_3 = 2.0$  мм,  $L = 60$  мм,  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

Из стали 14Х2ГМР с пределом текучести свыше 600 МПа сваривались в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  ковши, балки рукоятей экскаваторов ЭКГ-4,6 и другие ответственные конструкции.

Многими предприятиями отмечается, что наибольший эффект по снижению разбрызгивания и повышению устойчивости горения дуги приносит сочетание смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электродной проволоки, легированной цирконием. Проволока марки Св-08Г2СЦ выпускается Одесским сталепрокатным заводом и поставляется потребителям по их заказам в счет фондов на проволоку Св-08Г2С. В настоящее время в стране работает более 15 тысяч постов сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .

Полуавтоматическая сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электродной проволоки является эффек-

тивным средством повышения производительности и качества сварочных работ. На рис. 82 приведена диаграмма [96], иллюстрирующая производительность при сварке различными материалами (коэффициент использования сварочного поста при сварке электродами составляет 0,5, при механизированной сварке — 0,6), дополненная данными по полуавтоматической сварке в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . По диаграмме видно, что наибольшей, практически одинаковой производительностью обладают два процесса — сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  электродной проволокой с увеличенным вылетом и сварка порошковой проволокой в углекислом газе.

Высокую эффективность применения полуавтоматической сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с удлиненным вылетом подтверждают экономические расчеты. Применение указанного способа на одном посту полуавтоматической сварки может дать годовой эффект примерно 800—1000 руб.

При создании новых технологических процессов, в том числе и сварочных, изучаются санитарно-гигиенические условия. Естественно, что при этом стремятся к улучшению условий труда и уменьшению выделения вредных примесей. Совместно с Киевским институтом гигиены труда и профзаболеваний проведены исследования [127] влияния предварительного подогрева электрода (за счет удлинения вылета) на выделение сварочного аэрозоля. Сварка производилась в специальной камере полуавтоматом А-537 с держателем, позволяющим вести процесс с удлиненным вылетом. Применялась проволока Св-08Г2С диаметром 2,0 мм, смеситель газов, источник питания ВС-600. Валовое выделение продуктов сварки изучали при обычном и увеличенном (60—80 мм) вылете электродной проволоки. Результаты сравнивались с данными, полученными при сварке в углекислом газе. Определялось количество выделившейся пыли и окиси углерода.

Установлено, что при сварке в углекислом газе и смеси его с кислородом (70%  $\text{CO}_2 + 30\%$   $\text{O}_2$ ) при обычном вылете электрода на идентичных режимах выделяется практически одинаковое количество пыли и окиси углерода. При увеличении тока выделение пыли значительно возрастает. Так, при сварке проволокой диаметром 2,0 мм и повышении тока с 300 до 450 А ( $v_n = 176 \div 283$  м/ч) независимо от вида защиты дуги пыли выделяется на 60—70% больше. При сварке же с вылетом 60—80 мм указанное увеличение скорости подачи проволоки не приводит к большому



выделению пыли, количество окиси углерода также не изменяется. Сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  на вылете 60 мм ( $v_{\text{п}} = 283 \text{ м/ч}$ ) позволяет снизить выделение пыли на 30—35% по сравнению со сваркой в углекислом газе с обычным вылетом при той же скорости подачи проволоки.

Сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электрода применяется при изготовлении конструкций ответственного назначения.

Внедрение сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  на различных заводах показало ее преимущества перед сваркой в углекислом газе: улучшилось качество швов в результате повышения стойкости против образования пор и трещин, резко снизилась привариваемость брызг к изделию. Сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  электродной проволокой, легированной цирконием, с увеличенным вылетом способствует повышению стабильности горения дуги и производительности сварки. Процесс сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  обеспечивает самое низкое содержание водорода в швах из всех электродугowych способов сварки.

Таким образом, разработана технология сварки углеродистых и низколегированных сталей в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электродной проволоки. Доказана возможность использования при сварке в  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  стандартной проволоки Св-08Г2С. С целью снижения разбрызгивания при сварке, повышения стабильности горения дуги, улучшения санитарно-гигиенических характеристик рекомендуется использование проволоки Св-08Г2СЦ. Благодаря тому, что при использовании смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  в сочетании с увеличенным вылетом электрода диаметром 1,6—2,0 мм улучшаются пластические свойства и особенно показатели ударной вязкости металла шва при отрицательных температурах, разработанная технология сварки получила распространение при изготовлении металлических конструкций ответственного назначения. Технологический прием — увеличение степени подогрева вылета за счет его удлинения повышает производительность сварки в среднем на 25—30%.

Сварка в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  производится на серийно выпускаемой аппаратуре и источниках питания, предназначенных для сварки в углекислом газе. Переход с обычного вылета электрода на увеличенный требует лишь незначительной переделки сварочного держателя.

ВНИИавтогенмаш с участием ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР разработал постовые и рамповые смесители

газов  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ , которые выпускаются Барнаульским аппаратно-механическим заводом. Опыт эксплуатации показал, что разработанная газорегулирующая аппаратура для смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  отличается простотой обслуживания, надежностью и долговечностью в работе.

Проведенные исследования показали, что технология и техника сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  с увеличенным вылетом электродной проволоки, легированной цирконием, может успешно применяться для конструкций, предназначенных к использованию в районах Крайнего Севера.

Внедрение сварки в смеси активных газов на различных предприятиях показало, что годовой экономический эффект на один сварочный пост составляет около 1000 руб.

Авторы надеются, что результаты проведенных исследований послужат основой дальнейшего применения технологии сварки в смеси активных газов, что безусловно даст большой экономический эффект народному хозяйству страны.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов А. И. К вопросу о падении напряжения в приэлектродных областях сварочной дуги.— Автомат. сварка, 1964, № 9, с. 42—46.
2. Акулов А. И. О количестве тепла, приносимого в дугу нагретым в вылете электродом.— Автомат. сварка, 1966, № 5, с. 35—38.
3. А. с. 390 882 (СССР). Устройство для электродуговой сварки / А. Е. Аснис, В. Р. Покладий, Л. М. Гутман и др.— Опул. в Б. И., 1973, № 31.
4. А. с. 536 911 (СССР). Способ дуговой сварки плавлением / В. Е. Платон, В. К. Лебедев, А. Е. Аснис и др.— Опул. в Б. И., 1976, № 44.
5. Аснис А. Е. Оценка стали для сварных конструкций, работающих при низких температурах.— Завод. лаб., 1947, 13, № 9, с. 1100—1105.
6. Аснис А. Е., Гутман Л. М. Новые методы борьбы с порами при наплавке под флюсом.— Автомат. сварка, 1950, № 4, с. 72—78.
7. Аснис А. Е., Фельд Е. К., Покладий В. Р. Сварка стали ВСт3 в смеси углекислого газа и кислорода.— Автомат. сварка, 1969, № 9, с. 69—70.
8. Аснис А. Е., Бернадский В. Н., Богдановский В. А. и др. Защита поверхности сварных конструкций с помощью грунтового покрытия.— Автомат. сварка, 1971, № 1, с. 58—61.
9. Аснис А. Е., Покладий В. Р., Райский Е. Е. Сварка в смеси углекислого газа и кислорода судовых конструкций.— Автомат. сварка, 1971, № 8, с. 41—42.
10. Аснис А. Е., Гутман Л. М., Покладий В. Р. Полуавтоматическая сварка с увеличенным вылетом электрода в смеси углекислого газа и кислорода.— Автомат. сварка, 1972, № 4, с. 75.
11. Аснис А. Е., Гутман Л. М., Покладий В. Р., Иванков Н. Д. Повышение стойкости против пор и трещин при сварке в смеси углекислого газа и кислорода.— Автомат. сварка, 1972, № 10, с. 1—4.
12. Аснис А. Е., Гутман Л. М., Иванков Н. Д., Покладий В. Р. Сопоставление свойств сварных соединений, выполненных проволокой Св-08Г2С в смеси углекислого газа с кислородом и электродами УОНИ 13/45.— Автомат. сварка, 1974, № 4, с. 38—42.
13. Аснис А. Е., Гутман Л. М., Юзюк Я. М. Полуавтоматическая сварка стали 16Г2АФ и 15Г2АФДпс в смеси углекислого газа и кислорода.— Автомат. сварка, 1974, № 8, с. 40—42.
14. Аснис А. Е., Юзюк Я. М. Пути снижения содержания водорода в швах при сварке в активных газах.— Автомат. сварка, 1976, № 4, с. 40—42, 49.
15. Аснис А. Е., Гутман Л. М., Покладий В. Р., Юзюк Я. М. Сварка низкокремнистой стали повышенной прочности типа 15Г2АФД в смеси углекислого газа и кислорода.— В кн.: Свариваемость полуспокойных сталей. Киев: ИЭС АН УССР, 1976, с. 78—87.
16. Бакии О. А., Моношников А. Н. Определение работы деформации при ударе по осциллограмме «усилие — время».— Завод. лаб., 1964, 30, № 9, с. 1122—1123.
17. Бакии О. А., Моношников А. Н., Кукин А. Г. Метод определения составляющих ударной вязкости.— Завод. лаб., 1969, 35, № 5, с. 615—616.
18. Барышев В. М., Блинец А. А. Сварка высокопрочной стали на заводах металлоконструкций.— Монтаж и спец. работы в стр-ве, 1976, № 4, с. 20—21.
19. Безбах Д. К. О кинетике насыщения газами при некоторых способах плавления.— Свароч. пр-во, 1966, № 10, с. 14—16.
20. Бринберг Н. Л., Грудкин Д. А., Добрушин М. С., Сулов В. Н. Интенсификация полуавтоматической сварки в углекислом газе.— Свароч. пр-во, 1966, № 1, с. 21—23.
21. Будник Н. М., Евченко В. М., Белоусов Ю. Г., Мацука В. Х. Особенности переноса металла при сварке активированной проволокой в углекислом газе током прямой полярности.— Свароч. пр-во, 1971, № 7, с. 28—31.
22. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей.— М.: Энергия, 1970.— 552 с.
23. Воропай Н. М., Дегтярев В. Г., Игнатченко П. В. и др. Улучшение сварочно-технологических свойств проволоки Св-08Г2С.— Автомат. сварка, 1976, № 8, с. 61—65.
24. Гапченко М. Н., Футер И. Е. Пористость сварных швов и меры борьбы с ней.— Киев: Гостехиздат УССР, 1953.— 76 с.
25. Дейкун В. К. Статические характеристики и методика расчета газовых редукторов.— ВНИИавтогенмаш; 1965, Вып. 12, с. 68—100.
26. Дятлов В. И. Особенности металлургических процессов при сварке под флюсом.— В кн.: Юбилейный сборник, посвященный Е. О. Платону. Киев: Изд-во АН УССР, 1951, с. 261—268.
27. Ерохин А. А. Кинематика металлургических процессов дуговой сварки.— М.: Машиностроение, 1964.— 256 с.
28. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением.— М.: Машиностроение, 1973.— 448 с.
29. Ерохин А. А. Металлургия сварки.— В кн.: Сварка в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978, т. 1, с. 62—96.
30. Жизняков С. Н., Тималев Л. Н. Влияние кислорода на процесс сварки в смеси  $CO_2 + O_2$ .— Свароч. пр-во, 1977, № 2, с. 25—27.
31. Заруба И. И., Потатьевский А. Г. Особенности процесса сварки тонкой проволокой в среде углекислого газа.— Автомат. сварка, 1958, № 6, с. 32—41.
32. Звягинцев С. К. Сварка сталей 30ХМА и 40Х в крупногабаритных узлах с жестким контуром.— Свароч. пр-во, 1955, № 1, с. 28—31.
33. Ибатуллин Б. Л., Акулов А. И. Технологические особенности сварки плавящимся активированным электродом в углекислом газе.— Свароч. пр-во, 1971, № 5, с. 25—28.
34. Иванников А. Ф., Марков А. Ф. Применение форсированных режимов при полуавтоматической сварке в углекислом газе узлов трактора К-700 и турбин.— Машиностроение и металлургия, 1971, вып. 3, с. 245—253.

35. Касаткин Б. С., Сотченко В. П., Кораб Г. Н. и др. Установка для замедленного разрушения сварных соединений.— Автомат. сварка, 1971, № 3, с. 74—75.
36. Коперсак Н. И., Сливинский А. М., Духно В. М., Каховский Ю. Н. Температурный режим сварочной ванны.— Автомат. сварка, 1973, № 7, с. 1—3.
37. Коттерил П. Водородная хрупкость металлов.— М.: Металлургиздат, 1963.— 117 с.
38. Кукин А. Г., Бакин О. А., Моношников А. Н. Упругая энергия системы «образец — машина» и ее учет при оценке вязкости разрушения сварных соединений.— Сварные конструкции и их пр-во, 1972, № 100, с. 56—58.
39. Кутепов Ю. Н., Кассов Д. Г., Рейдерман Ю. П., Михеев А. Н. Система автоматического регулирования вылета электрода трактора АДПТ-500.— Свароч. пр-во, 1968, № 12, с. 39—40.
40. Лакомский В. И., Вахнин Ю. Н. Влияние влажности углекислого газа на содержание водорода в металле шва.— Автомат. сварка, 1959, № 8, с. 85—89.
41. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Металловедение сварки.— М.: Машгиз, 1954.— 271 с.
42. Лебедев В. К., Медведенко Н. Ф. К исследованию переходных процессов, вызванных переносом металла.— Автомат. сварка, 1967, № 9, с. 25—28.
43. Лебедев В. К., Медведенко Н. Ф. Исследование влияния переходных процессов на разбрызгивание металла при сварке в углекислом газе.— Автомат. сварка, 1968, № 5, с. 11—15.
44. Лейначук Е. И., Подгаецкий В. В. К образованию горячих трещин в наплавленном металле.— Автомат. сварка, 1955, № 1, с. 17—24.
45. Луценко В. Т. Методика приближенного расчета параметров шва при сварке (наплавке) в углекислом газе.— Свароч. пр-во, 1973, № 1, с. 20—22.
46. Лушков Н. Л., Раздуй Ф. И., Шпейсман В. М. Водород в сварных швах и борьба с ним.— Л.: Судпромгиз, 1959.— 56 с.
47. Лубавский К. В. Металлургия сварки стали плавлением.— В кн.: Справочник по сварке. М.: Машгиз, 1960, т. 1, с. 51—138.
48. Мазель А. Г., Бурлакова А. П., Хренов К. К. Исследование сварки малоуглеродистой стали в углекислом газе с введением магнитного флюса.— Свароч. пр-во, 1959, № 8, с. 15—17.
49. Мазель А. Г. Расплавление электрода и проплавление основного металла при дуговой сварке.— Свароч. пр-во, 1960, № 1, с. 13—15.
50. Макара А. М., Касаткин Б. С. Испытание сварных соединений на загиб.— Автомат. сварка, 1950, № 1, с. 3—29.
51. Макара А. М., Грабин В. Ф., Денисенко А. В. и др. О структурных составляющих металла шва из низколегированных сталей.— Автомат. сварка, 1967, № 3, с. 1—6.
52. Медовар Б. И. Автоматическая сварка под флюсом наклонным электродом.— Киев: Изд-во АН УССР, 1947.— 83 с.
53. Медовар Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей.— Киев; Москва: Машгиз, 1958.— 339 с.
54. Михайлов А. Н., Будник Н. М., Кошкареев Б. Т. Повышение эффективности сварки в углекислом газе.— Свароч. пр-во, 1972, № 7, с. 37—39.
55. Мовчан Б. А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах.— Киев: Гостехиздат УССР, 1962.— 340 с.
56. Морозов А. Е. Водород и азот в стали.— М.: Металлургия, 1968.— 283 с.
57. Новожилов Н. М., Суслов В. Н. Сварка плавящимся электродом в углекислом газе.— М.: Машгиз, 1958.— 194 с.
58. Новожилов Н. М. Содержание газов в металле швов при дуговой сварке.— Свароч. пр-во, 1964, № 1, с. 15—17.
59. Новожилов Н. М., Соколова А. М. Количество и состав оксидных включений в металле швов при дуговой сварке.— Свароч. пр-во, 1963, № 8, с. 16—19.
60. Новожилов Н. М., Соколова А. М. Количество и состав сульфидных включений в металле шва при дуговой сварке.— Свароч. пр-во, 1968, № 3, с. 12—16.
61. Новожилов Н. М. Основы металлургии дуговой сварки в газах.— М.: Машиностроение, 1979.— 231 с.
62. Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению.— М.: Мир, 1972.— 439 с.
63. Ногоев Б. П., Мазовко А. П. Сварка в углекислом газе на повышенной плотности тока.— Свароч. пр-во, 1970, № 5, с. 16—18.
64. Остапенко Н. Г. О влиянии сопротивления электрода на величину коэффициента плавления при сварке под флюсом.— Сб. тр. по автомат. сварке под флюсом, 1948, вып. 1, с. 208—217.
65. Островская С. А. Выбор технологии автоматической сварки элементов угловых швов опытного моста.— Тр. по автомат. сварке под флюсом, 1949, № 7, с. 13—29.
66. Пат. 1260 (Япон.). Метод дуговой сварки в защитном газе / Мацумото Исао, Секигучи Харудзиро.— Оpubл. 11.03.59.
67. Пат. 7856 (Япон.). Высокоскоростная дуговая сварка / Нака Такео, Сасаки Хидэо.— Оpubл. 3.06.63.
68. Пат. 29 959 (Япон.). Проволока для сварки открытой дугой с использованием азота и кислорода воздуха / Удо Салаеси, Ниси Такеши, Кукуно Сиро, Нода Ютака.— Оpubл. 23.12.64.
69. Пат. 52—100 339 (Япон.). Процесс дуговой сварки в защитном газе / Мацумото Масаси, Ивата Тесно.— Оpubл. 23.08.77.
70. Патон Б. Е., Макара А. М. Экспериментальное исследование процесса автоматической сварки под слоем флюса.— Киев: Изд-во АН УССР, 1944.— 92 с.
71. Патон Б. Е. Процесс плавления электрода при автоматической сварке под флюсом.— Тр. по автомат. сварке под флюсом, 1949, № 4, с. 22—38.
72. Патон Б. Е., Слуцкая Т. М. Дуговая сварка голый легированной проволокой без защитной среды.— Автомат. сварка, 1962, № 6, с. 1—5.
73. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки.— М.: Машиностроение, 1966.— 359 с.
74. Патон Б. Е., Вороний Н. М. Сварка активированным плавящимся электродом в защитном газе.— Автомат. сварка, 1979, № 1, с. 1—7, 13.
75. Петров А. В. Плавление электродной проволоки при автоматической аргоно-дуговой сварке.— Свароч. пр-во, 1955, № 2, с. 4—6.
76. Петров А. В. Перенос металла в дуге при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов.— Автомат. сварка, 1955, № 2, с. 26—33.
77. Петров А. В. Перенос металла в дуге и проплавление основного металла при сварке в среде защитных газов.— Автомат. сварка, 1957, № 4, с. 19—28.

78. Петров А. В. Защитные газы для дуговой сварки.— Свароч. пр-во, 1957, № 8, с. 6—10.
79. Петров Г. Л. Влияние водорода на свойства сварных соединений низколегированных сталей.— Тр. Ленингр. политехн. ин-та, 1969, № 308, с. 166—172.
80. Петров Г. Л., Тумарев А. С. Теория сварочных процессов.— 2-е изд. перераб.— М.: Высш. школа, 1977.— 392 с.
81. Подгаецкий В. В. К дискуссии о причинах образования горячих трещин в сварных швах.— Автомат. сварка, 1954, № 6, с. 73—76.
82. Подгаецкий В. В. Неметаллические включения в сварных швах.— Москва; Киев: Машгиз, 1962.— 94 с.
83. Подгаецкий В. В. Реакция окисления водорода в атмосфере дуги.— Автомат. сварка, 1968, № 9, с. 7—12.
84. Підгаєцький В. В. Поры, включения і тріщини в зварних швах.— К.: Техніка, 1970.— 236 с.
85. Подгаецкий В. В., Парфессо Г. И., Лейнанук Е. П. Процессы образования сульфидов в металле шва.— Автомат. сварка, 1971, № 1, с. 5—10.
86. Покладий В. Р. Сварка в углекислом газе с увеличенным сопротивлением вылета электродной проволоки.— Автомат. сварка, 1968, № 5, с. 69—70.
87. Понков А. М. К вопросу о причинах разбрызгивания металла при сварке с короткими замыканиями в углекислом газе.— Свароч. пр-во, 1971, № 5, с. 14—15.
88. Потапьевский А. Г. Влияние составляющих режима сварки тонкой проволокой в среде углекислого газа на интенсивность металлургических реакций.— Автомат. сварка, 1958, № 2, с. 53—58.
89. Потапьевский А. Г. Плавление и перенос металла при сварке тонкой проволокой в среде углекислого газа.— Автомат. сварка, 1958, № 7, с. 52—59.
90. Потапьевский А. Г., Мечев В. С., Лаврищев В. Я., Костенюк Н. И. Перенос электродного металла при сварке в углекислом газе.— Автомат. сварка, 1971, № 6, с. 1—4.
91. Потапьевский А. Г., Лаврищев В. Я. Разбрызгивание при сварке в углекислом газе проволокой Св-08Г2С.— Автомат. сварка, 1972, № 8, с. 39—42.
92. Потапьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом.— М.: Машиностроение, 1974.— 240 с.
93. Походня И. К., Фруммин И. И. О температуре сварочной ванны.— Автомат. сварка, 1955, № 5, с. 14—24.
94. Походня И. К., Шлепаков В. Н., Супрун С. А. Пористость швов, выполненных порошковой проволокой основного типа.— Автомат. сварка, 1967, № 7, с. 10—12.
95. Походня И. К. Газы в сварных швах.— М.: Машиностроение, 1972.— 256 с.
96. Походня И. К., Суптель А. М., Шлепаков В. Н. Сварка порошковой проволокой.— Киев: Наук. думка, 1972.— 223 с.
97. Походня И. К., Пальцевич А. П., Швачко В. И., Устинов В. Г. Новый метод определения содержания диффузионного водорода в металле.— Автомат. сварка, 1974, № 3, с. 10—12.
98. Походня И. К., Головкин В. Н. Высокопроизводительная порошковая проволока для сварки в углекислом газе.— Автомат. сварка, 1974, № 7, с. 66—68.
99. Производство стали в основной мартеновской печи. М.: Металлургиздат, 1959.— 708 с.
100. Прохоров Н. Н. Горячие трещины при сварке.— М.: Машгиз, 1952.— 220 с.
101. Рабкин Д. М., Фруммин И. И. Причины образования горячих трещин в сварных швах.— Автомат. сварка, 1950, № 2, с. 8—43.
102. Рыбаков А. А., Лащенко Г. И. Стойкость швов против образования кристаллизационных трещин при дуговой сварке в защитных газах.— Автомат. сварка, 1976, № 1, с. 70.
103. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке.— М.: Машгиз, 1951.— 296 с.
104. Сапиро Л. С. Сварка стали 40ХН.— Свароч. пр-во, 1955, № 4, с. 26—27.
105. Секигучи Х., Масумото И., Като Т., Кондо Х. О температуре расплавленной ванны при сварке в среде  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ .— Нагоя Сен-ке качику кенкюсе кенилю хокону, 1959, № 11, с. 23—25.
106. Сефериан Д. Металлургия сварки.— М.: Машгиз, 1963.— 346 с.
107. Симонов Ю. И., Иванников А. В. Полуавтоматическая сварка в углекислом газе на повышенных режимах.— Технология судостроения, 1966, № 3, с. 18—28.
108. Слуцкая Т. М., Крищенко Л. Ф., Авраменко В. А., Ковалев Ю. А. Электродная проволока для механизированной сварки углеродистых сталей без защитной среды.— Автомат. сварка, 1963, № 8, с. 19—25.
109. Стеренбоген Ю. А., Хрипливый А. А., Гордонный В. Г. Метод оценки сварных соединений замедленному разрушению.— Автомат. сварка, 1978, № 8, с. 66—67.
110. Суслов В. Н. О некоторых особенностях сварки в углекислом газе на прямой полярности.— Свароч. пр-во, 1956, № 12, с. 18—21.
111. Тарин В. Д., Гаген Ю. Г. К вопросу расчета нагрева электрода при сварке.— Свароч. пр-во, 1972, № 2, с. 1—2.
112. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона.— М.: Машиностроение, 1974.— 768 с.
113. Трубило В. И., Савченко В. А., Сотник И. С., Тертышная Н. И. Влияние защитных покрытий на свойства сварных соединений.— Свароч. пр-во, 1973, № 1, с. 25—26.
114. Филиппов С. И., Гончаренко О. М. Поверхностное натяжение и свойства расплавов Fe—O.— Изв. вузов. Сер. Чер. металлургия, 1974, № 9, с. 10—16.
115. Фридлянд Л. А., Тимофеев П. И. Испытание статическим изгибом сварных швов на склонность к образованию трещин.— Автомат. сварка, 1957, № 2, с. 66—69.
116. Фридлянд Л. Н., Кириченко А. М. Сварка переменным током в  $\text{CO}_2$  по слою флюса.— Свароч. пр-во, 1972, № 4, с. 19—20.
117. Фридлянд Л. Н. Механические свойства металлов.— М.: Машиностроение, 1974.— Ч. 1. 427 с.
118. Фруммин И. И., Рабкин Д. М., Гуревич С. М. Вопросы автоматической сварки сталей повышенной прочности.— В кн.: Юбилейный сборник, посвященный Е. О. Патону. Киев: Изд-во АН УССР, 1951, с. 317—339.
119. Фруммин И. И., Походня И. К. Исследование средней температуры сварочной ванны.— Автомат. сварка, 1955, № 4, с. 13—30.
120. Фруммин И. И. Предупреждение пор при сварке и наплавке под флюсом.— Автомат. сварка, 1956, № 6, с. 1—28.
121. Хеккель К. Техническое применение механики разрушения.— М.: Металлургия, 1974.— 64 с.
122. Хренов К. К. Электрическая сварочная дуга.— М.: Машгиз, 1949.— 204 с.

123. Чубуков А. А. Влияние износа токоподводящего наконечника на технологические параметры процесса сварки.— Свароч. пр-во, 1980, № 2, с. 26—27.
124. Шоришоров М. Х. Металловедение сварки стали и титана.— М.: Наука, 1965.— 336 с.
125. Шоришоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И. Испытание металлов на свариваемость.— М.: Металлургия, 1972.— 240 с.
126. Щекин В. А., Дюргеров Н. Г., Небылицын Л. Е., Барылов О. А. О процессе сварки в углекислом газе током прямой полярности.— Свароч. пр-во, 1972, № 5, с. 19—20.
127. Эрман И. И., Покладий В. Р., Мосенкис Ю. Г. Влияние вылета электрода при сварке в смеси углекислого газа и кислорода на выделение аэрозоля.— Автомат. сварка, 1971, № 3, с. 75.
128. Юзькив Я. М. Стойкость металла швов против хрупкого разрушения при сварке в смеси углекислого газа и кислорода.— В кн.: Новые разработки по сварке в активных газах. Киев: Об-во «Знание» УССР, 1978, с. 13—15.
129. Явойский В. И. Теория процессов производства стали.— М.: Металлургия, 1967.— 792 с.
130. Якобашвили С. Б. Межфазное натяжение сварочных флюсов и его влияние на отделимость шлаковой корки.— Автомат. сварка, 1962, № 9, с. 37—39.
131. Якобашвили С. Б. Поверхностные свойства сварочных флюсов и шлаков.— Киев: Техника, 1970.— 208 с.
132. Ackermann F., Scheibner R., Schilling D. Anwendungsmöglichkeiten und Bereitstellung von Mischgasen in der Schweißtechnik.— Schweißtechnik (DDR), 1976, 26, N 2, S. 61—66.
133. Adamiec P., Bułski S., Dziubinski J., Mazur M. Skłonność do pękania polączen ze stali 18G2VA spawanych elektrodami otulonymi i lukiem krytym.— Prz. spaw., 1973, N 11/12, s. 249—255.
134. Armstrong F. Magnetic-flux gas-shielded arc welding in bottle fabrication.— Weld. J., 1962, 41, N 1, p. 30—34.
135. AWS A5.23—76. Specification for bare low-alloy steel electrodes and fluxes for submerged arc welding. Amer. Weld. Soc.
136. Becken O., Müller R. Studie über das Schweißen unter Kohlendioxid mit in der Nahtfuge gelegten Kalkbasischen Elektroden.— Schweiss. und Schneid., 1964, 16, N 7, S. 278—283.
137. Berger H., Thieme G. Untersuchungen zur Verbesserung des EG—Schweißvorganges durch Zugabe von synthetischer Schlacke.— ZIS—Mitt., 1972, 14, N 5, S. 545—557.
138. Blake P. D., Pumphrey W. J. Effect of sampling and analytical factors on the reported hydrogen content of mild steel weld metal.— Brit. Weld. J., 1962, 9, N 11, p. 594—601.
139. Boniszewski T., Watkinson F. Examination of hot tearing in the weld heat affected zone of ferritic steels.— Brit. Weld. J., 1964, 11, N 12, p. 610—619.
140. Boniszewski T. Fine oxide particles in mild steel CO<sub>2</sub> weld metal.— Weld. J., 1972, 51, N 1, p. 193—229.
141. Borland J. C. Generalized theory of super-solidus cracking in welds (and castings).— Brit. Weld. J., 1960, 7, N 8, p. 508—512.
142. Borland J. C. Cracking tests for assessing weldability.— Brit. Weld. J., 1960, 7, N 10, p. 623—637.
143. Brain A. G., Salter G. R. The hydrogen content of CO<sub>2</sub> weld metal.— Brit. Weld. J., 1962, 9, N 1, p. 36—42.
144. Bułnicki S. Spawalność i kruchość stali.— Warszawa: Wyd-wo nauk.-techn., 1975.— 328 s.
145. Carry Howard B. Flux-cored arc welding: Advances and applications in the USA.— Weld. and Metal Fabr., 1970, 38, N 11, p. 458—464.
146. Cashman E. Electrode for spatterfree welding of steel in carbon dioxide.— Weld. J., 1961, 40, N 1, p. 14s—21s.
147. Comment éviter les défauts provenant du soudage automatique.— Mach. mod., 1974, N 786, p. 26—30.
148. Cored wires—recent developments for high quality welding.— F. W. P. J., 1977, 17, N 8, p. 35—36, 39—40, 43—44, 46, 48.
149. Eichhorn F., Boldt R. Untersuchungen zur Porenbildung im Schweißgut aus niedriglegierten Stahldrahtelektroden mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskop und Gaschromatografie.— Schweiss. und Schneid., 1972, 24, N 4, S. 130—133.
150. Falk K. CO<sub>2</sub> für die Schweisstechnik wird reiner.— ZIS—Mitt., 1965, 7, N 8, S. 1138—1145.
151. Granjon H. Information of cracking tests.— Weld. World, 1963, 1, N 2, p. 58—90.
152. Guide to the welding and weldability of C-Mn steels and C-Mn microalloyed steels.— Doc. IIW 382—71.
153. Harrison J. D., Smith G. C. Effect of hydrogen on the behaviour of mild steels bar and weld metal.— Brit. Weld. J., 1967, 14, N 9, p. 394—502.
154. Hebold G. Der Einfluss von Feuchtigkeit im CO<sub>2</sub> beim CO<sub>2</sub>—Schutzgasschweißen.— Schweißtechnik (DDR), 1959, 9, N 9, S. 336—337.
155. Hereth M. Wasserstoff im Schweißgut—Auswirkung und Bestimmung.— Oerlikon Schweissmitt., 1974, 32, N 69, S. 16—21.
156. Hinkel J. E. Long stickout welding: A practical way to increase deposition rates.— Weld. J., 1968, N 11, p. 869—874.
157. Homberg G., Welnitz G. Über die Heissrissigkeit beim Schweißen von Stählen.— Schweiss. und Schneid., 1975, 27, N 3, S. 90—93.
158. Höschel K. Porosität durch Stickstoff, Luft und Wasserstoff beim CO<sub>2</sub>-Schweißen von Baustahl.— Schweißtechnik (DDR), 1970, 20, N 1, S. 20—24.
159. Kaluza P. Oznaczenie zawartości wilgoci w gazach spawalniczych.— Prz. Spaw., 1970, N 5, s. 128—130.
160. Kobayashi T. Non-shielded arc welding of steel.— Brit. Weld. J., 1967, 14, N 3, p. 101—107.
161. Krahl A. Auswirkungen definierte Schutzgasfeuchtigkeiten auf das Schweißverhalten sowie auf Wasserstoffgehalt, Dichte und Abbrand von Stahlschweißgut.— Schweiss. und Schneid., 1970, 22, N 4, S. 169—172.
162. Krahl A. Über die Bedeutung der freien Drahtelektrodenlänge beim Metallschutzgasschweißen.— Schweiss. und Schneid., 1970, 22, N 12, S. 520—523.
163. Morgan-Warran E. J., Jordan M. F. Effect of travel speed on solidification cracking in autogenous tungsten inert gas arc welding of low-alloy steel sheet.— Metals Technol., 1976, 3, N 1, p. 29—39.
164. Muir D. R. A consideration of the factors affecting porosity in self-adjusting metal-arc welds.— Brit. Weld. J., 1957, 4, N 7, p. 354—359.
165. Murray J. D. Welding of high yield point steels.— Weld. and Metal Fabr., 1966, 34, N 8, p. 286—294.
166. Nitterl G. Fine wire CO<sub>2</sub> welding.— Found., Weld., Prod. Eng. J., 1964, 4, N 7, p. 3—10; Discuss. p. 11—15.

167. Пат. 206 256 (Австрия). Schutzgas für das Schweißen mit dem elektrischen Lichtbogen.— Опыбл. 25.11.59.
168. Пат. 556 002 (Бельгия). Procédé de soudage automatique ou semi-automatique à l'arc électrique.— Опыбл. 26.02.60.
169. Пат. 2 932 722 (США). Electric arc welding / A. Lesnewich, E. Cushman.— Опыбл. 12.04.60.
170. Пат. 2932723 (США). Electric arc welding / C. R. Sibley, A. Lesnewich.— Опыбл. 12.04.60.
171. Пат. 3 059 101 (США). Welding electrode / F. R. Gemberg, G. H. Cotter.— Опыбл. 16.10.62.
172. Пат. 116 759 (ЧССР). Způsob obloukového svarování se stekavým přenosem přídavného materiálu.— Опыбл. 15.11.65.
173. Пат. 3 258 842 (США). Gas-shielded arc welding method / Morita Sadayoshi, Nishi Takeshi, Kukuno Tsuguro.— Опыбл. 05.07.66.
174. Пат. 125 902 (ГДР). Schweißdraht für das Metall-Aktivgas-Schweißen.— Опыбл. 01.06.77.
175. Pekniecia zlmne przy spawaniu stali. Dok. MIS—384—71 (IX—748—71).— Prz. spaw., 1973, N 2, s. 39—45.
176. Ruckdeschel W. E. W. Experimental studies to establish the oxidation.— Doc. IIW—XII—B—171—74.
177. Salter G. R., Mitner D. Gas absorption from arc atmospheres.— Brit. Weld. J., 1960, 7, N 2, p. 39—100.
178. Savage W. F., Szekeres F. S. A mechanism for crack formation in HV-80 steel weldments.— Weld. J., 1967, 46, N 2, p. 94s—96s.
179. Sciarski J., Sedek P. Wplyw metod spawania i ciecia tlenem na wytrzymałość zmeczeniowa stali z mikrodotadkiem niobu.— Prz. spaw., 1978, N 11, s. 15—19.
180. Sekiguchi H. Theory and proposal on steel fusion welding and their applications.— Tokyo: The Nikkan Kogyo Shinbun, 1972.— 328 p.
181. Shearer T. W. Welding electrode with built in kinks.— Metal Progr., 1959, 75, N 5, p. 9.
182. Smith A. A. CO<sub>2</sub> shielded consumable electrode arc welding.— Cambridge: Abington, 1970.— 136 p.
183. Stegner D. A., Wu S. M., Braton N. R. Prediction of heat input for welding.— Weld. J., 1967, 46, N 3, p. 122s—128s.
184. Zteidl G. Methoden zur Bestimmung der Vorwärmtemperatur beim Schweißen von Stählen.— Praktiker, 1973, N 6, S. 120—123.
185. Survey of shielding gases for MIG welding.— Doc. IIW XII—B—170—74 (XII—590—74).
186. Szydlak W. Spawalność stali nizekowieglowych.— Prz. spaw., 1972, N 11—12, s. 267—271.
187. Tentative procedure for the determination of hydrogen in mild and low-alloy steel weld metal.— Weld.— World., 1969, 7, N 1, p. 16—27.
188. Toy S. M., Phillips A. Hydrogen emanation and distribution in metals and alloys.— Corrosion, 1970, 26, N 7, p. 200—207.
189. Toy S. M. Flexible tape stops hydrogen in welds.— Weld. Des. and Fabr., 1971, 44, N 8, p. 50, 52.
190. Tuthill R. W. Moisture and its effects in Carbon Dioxide welding of steels.— Weld. J., 1956, N 4, p. 330—333.
191. Werner Gilde, Rosenkranz Herbert. Das <sup>12</sup>Rt-Schweißen unter CO<sub>2</sub>-Schutzgas.— ZIS-Mitt., 1963, 5, N 6, S. 815—823.
192. Wu Tin Ming. Einfluß von Verunreinigungen in Kohlensäure beim Schutzgasschweißen.— Schweiss. und Schneid., 1960, 12, N 8, S. 350—354.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-------------	---

### Глава первая

ЗАЩИТНЫЕ ГАЗЫ И МЕТОДЫ ИХ СМЕШЕНИЯ	5
------------------------------------	---

1. Сварка в углекислом газе и методы ее совершенствования	5
2. Смеси активных газов	10
3. Смесители газов	14

### Глава вторая

ВЛИЯНИЕ ВЫЛЕТА ЭЛЕКТРОДА НА ПЛАВЛЕНИЕ И ПЕРЕНОС МЕТАЛЛА В ДУГЕ	23
--	----

1. Зависимость параметров режима сварки от длины вылета	24
2. Зависимость температурного поля электрода от длины вылета	31
3. Особенности плавления и переноса металла в дуге	37
4. Оптимальный вылет электрода	48

### Глава третья

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ	53
-------------------------------------	----

1. Влияние кислорода на температуру сварочной ванны и ее размеры	54
2. Неметаллические включения в швах	62
3. Содержание водорода в металле шва	67
4. Влияние содержания кислорода и длины вылета электрода на переход легирующих элементов в шов	76

### Глава четвертая

СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРОТИВ ОБРАЗОВАНИЯ ПОР И ТРЕЩИН	83
--	----

1. Стойкость швов против образования пор	83
2. Сопротивляемость швов образованию горячих трещин	90
3. Стойкость сварных соединений против образования холодных трещин	102

## Глава пятая

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ . . . . .	116
1. Общие положения . . . . .	116
2. Влияние режима сварки на форму и размеры швов . . . . .	120
3. Техника сварки соединений различных типов . . . . .	120

## Глава шестая

СОСТАВ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ . . . . .	136
1. Химический состав металла швов на низкоуглеродистых и низколегированных сталях . . . . .	136
2. Свойства сварного соединения из углеродистых и низколегированных сталей . . . . .	139
3. Свойства сварных соединений, выполненных проволокой диаметром 2,0 мм, для конструкций в северном исполнении . . . . .	159
4. Свойства сварных соединений сталей с повышенным содержанием углерода . . . . .	166

## Глава седьмая

ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ СВАРКИ В СМЕСИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И КИСЛОРОДА . . . . .	183
Список литературы . . . . .	204

АРКАДИЙ ЕФИМОВИЧ АСНИС,  
ЛИЯ МИРОНОВНА ГУТМАН,  
НАДИМ РОСТИСЛАВОВИЧ ПОКЛАДИЙ,  
ЯРОСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ ЮЗЬКИВ

## СВАРКА В СМЕСИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ

Утверждено к печати научным советом  
Института электросварки  
им. Е. О. Патона АН УССР

Редактор Н. К. СЫТНИК  
Оформление художника В. М. ФЛАКСА  
Художественный редактор И. В. КОЗИЙ  
Технический редактор С. Г. МАКСИМОВА  
Корректоры С. А. ДОЦЕНКО, Р. С. КОГАН

Информ. бланк № 4446

Сдано в набор 29.07.81. Подп. в печ. 07.01.82.  
Иф. 00003. Формат 84×108/32. Бумага № 1. Лит.  
гарн. Вис. печ. Усл. печ. л. 11,34. Усл. кр.-отт.  
13,02. Уч.-изд. л. 12,87. Тираж 3600 экз. Зак.  
№ 1842 Цена 1 руб. 90 коп.

Издательство «Наукова думка», 252601, Киев,  
ГСП, Репина, 3.

Напечатано с матриц головного предприятия  
республиканского производственного объединения  
«Полиграфкнига» 252058, Киев, Довженко, 3 в  
Киевской книжной типографии научной книги,  
252004, Киев-4, Репина, 4. Зак. 2-43.



**В издательстве «Наукова думка»  
в 1982 г.**

**выйдет в свет книга:**

**ГРАВИН В. Ф. Металловедение сварки плавлением.** 28 л. 4 р. 70 к.  
В книге изложены современные данные по основным вопросам сварочного металловедения сталей различных классов (низкоуглеродистых низко-, средне- и высоколегированных), сплавов на основе никеля, чугунов, алюминия, магния, меди, циркония, тугоплавких металлов и др. Дан анализ фазового состава сварных соединений указанных сталей и сплавов. Описаны общие закономерности образования химической неоднородности и влияния легирующих элементов на особенности структурных превращений и физико-механические свойства металла шва и околошовной зоны. Рассмотрены особенности формирования первичной и вторичной структур и их взаимосвязь с механическими и технологическими свойствами. Изложены теория и практика термической обработки сварных соединений сталей и сплавов.

Для научных и инженерно-технических работников; может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

*Предварительные заказы на эту книгу принимают все магазины книоторгов, магазины «Книга—почтой» и «Академкнига».*

*Просим пользоваться услугами магазинов — опорных пунктов издательства: Дома книги — магазина № 200 (340048, Донецк-48, ул. Артема, 147 а), магазина «Книжный мир» (310003, Харьков-3, пл. Советской Украины, 2/2), магазинца научно-технической книги № 19 (290006, Львов-6, пл. Рынок, 10), магазина «Техническая книга» (270001, Одесса-1, ул. Ленина, 17) и магазина издательства «Наукова думка» (252001, Киев-1, ул. Кирова, 4).*

*Магазины во Львове, Одессе и Киеве высылают книги иностранным заказчикам наложенным платежом.*