



**КОБЕРНИК**  
Николай Владимирович  
кандидат технических  
наук, доцент



**ТРЕТЬЯКОВ**  
Евгений Сергеевич  
инженер



**ЧЕРНЫШОВ**  
Георгий Георгиевич  
доктор технических наук,  
профессор  
кафедры «Технологии  
сварки и диагностики»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
e-mail:  
koberniknv@yandex.ru

## Сварка неплавящимся электродом труб малого диаметра из углеродистых и низколегированных сталей с применением комбинированной защиты

*Н.В. Коберник, Е.С. Третьяков, Г.Г. Чернышов*

*Исследованы преимущества сварки неплавящимся электродом с применением комбинированной защиты на примере труб малого диаметра из углеродистых и низколегированных сталей. Показана перспективность данного способа, а также некоторые промежуточные результаты экспериментов.*

**Ключевые слова:** сварка неплавящимся электродом, сварка неплавящимся электродом с комбинированной защитой, сварка неповоротных стыков труб, жидкотекучесть металла, обжатие сварочной дуги, двухгазовая защита.

## Gas tungsten arc welding of carbon and low-alloy steels small diameter pipes with combined protection

*N. V. Kobernik, E. S. Tretyakov, G. G. Chernyshov*

*The benefits of gas tungsten arc welding with combined protection have been investigated by the example of carbon and low-alloy steels small-diameter pipes. The prospects of this method, as well as some intermediate results of the experiments are shown.*

**Keywords:** tungsten inert gas welding, gas tungsten arc welding with combined protection, welding of pipelines, metal fluidity, arc reduction, dual-gas protection.

**В** настоящее время остро стоит вопрос автоматизации сварки труб малого диаметра ( $DN (D_v) = 20\text{--}200$ ) из углеродистых и низколегированных сталей с толщиной стенки 2...14 мм, широко применяемых в трубопроводах обвязки для компрессорных станций, электростанций, ЖКХ и т. д. Согласно научно-технической документации сварку таких трубопроводов выполняют следующими способами: ручной дуговой сваркой штучными покрытыми электродами, сваркой газовым пламенем, ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, а также комбинированными технологиями. Однако для сварки такого рода трубопроводов наиболее целесообразно применять автоматическую аргонодуговую сварку неплавящимся электродом (ААД), которая может существенно повысить стабильность и качество выполняемых соединений. Автоматическая аргонодуговая сварка не-

плавящимся электродом труб из аустенитных сталей подробно рассмотрена в различных работах [1–3], а технологии сварки этим способом углеродистых и низколегированных сталей уделено меньшее внимание [2].

Одной из главных особенностей углеродистых и низколегированных сталей является их низкая раскисленность. Отечественные нормативы не требуют в сертификатах указания реального содержания газов и примесей, поэтому остаточный кислород сохраняется даже в стали с маркировкой «сп». Автоматическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом стали с остаточным содержанием оксида углерода СО и связанного в оксид FeO кислорода является серьезной проблемой ввиду выделения газов из сварочной ванны, называемого «кипение» [2], что приводит к разбрызгиванию расплавленного металла, который попадает на неплавящийся вольфрамовый электрод (рис. 1, а) и на поверхность основного металла (рис. 1, б). Это обуславливает появление пор и неудовлетворительное качество сварки. Решением данных проблем является дополнительное раскисление металла сварочной ванны, которое можно реализовать несколькими способами [2]:

- оптимальный состав сварочной проволоки;
- использование флюс-паст;
- изменение состава газовой среды.

Раскисление за счет сварочной проволоки — наиболее распространенный способ борьбы с «кипением» сварочной ванны и предотвращения порообразования. При этом в проволоку вводят легирующие компоненты, такие как марганец

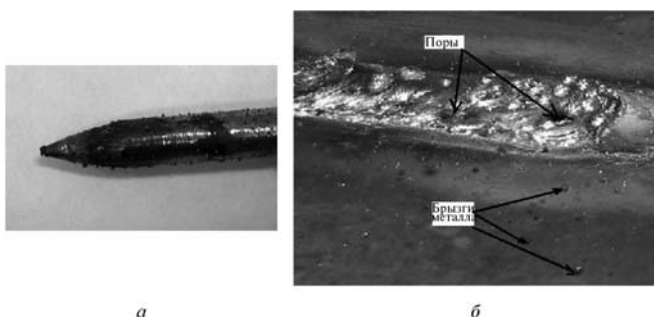


Рис. 1. Внешний вид поверхности дефектного вольфрамового электрода (а) и сварного шва, выполненного аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом (б) [2]

и кремний, которые связывают кислород в оксиды MnO и SiO<sub>2</sub>. Однако такой способ раскисления требует применения присадочной проволоки при сварке всех слоев шва.

Использование флюс-паст имеет большое преимущество — увеличение производительности за счет возможности сварки больших толщин за один проход. В то же время возможности равномерного нанесения паст на кромки в монтажных условиях ограничены, и отклонения существенно влияют на стабильность процесса сварки.

Применение различных составов защитной газовой среды при сварке неплавящимся электродом возможно с помощью комбинированной защиты, о которой недостаточно информации в открытой печати. В предлагаемой статье показаны возможности реализации и перспективы развития данного способа сварки.

**Особенности применения активных защитных газов при сварке неплавящимся электродом.** Особенности применения активных защитных газов при сварке неплавящимся электродом, являются:

- повышение смачивания и жидкотекучести металла;
- повышение энергетических характеристик дуги.

*Повышение смачивания и жидкотекучести металла.* Смачивание — поверхностное явление, заключающееся во взаимодействии жидкости с поверхностью твердого тела или другой жидкости. Степень смачивания характеризуется краевым углом смачивания и жидкотекучестью. Краевой угол смачивания — угол, образованный касательными плоскостями к межфазным поверхностям, ограничивающим смачивающую жидкость, с вершиной, лежащей на границе раздела трех фаз. Жидкотекучесть — способность материала в расплавленном состоянии течь и заполнять поверхности перед затвердеванием [4].

Согласно уравнению Юнга:

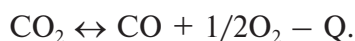
$$\cos \alpha = (\sigma_{ж-т} - \sigma_{г-т}) / \sigma_{ж-г}$$

где  $\alpha$  — краевой угол смачивания, град;  $\sigma_{ж-т}$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела фаз «жидкость — твердое

тело», Н/м;  $\sigma_{г-г}$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела фаз «газ — твердое тело», Н/м;  $\sigma_{ж-г}$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела фаз «жидкость — газ», Н/м.

Из уравнения следует, что снижение  $\sigma_{ж-г}$  ведет к увеличению значения  $\cos\alpha$ , что означает уменьшение краевого угла смачивания  $\alpha$ .

Использование углекислого газа при комбинированной защите обуславливает его диссоциацию в дуге по реакции



Наличие кислорода в защитной среде при сварке сплавов на основе железа приводит к снижению  $\sigma_{ж-г}$  [5]. Таким образом, применение комбинированной защиты с использованием активных газов (таких как углекислый газ) при сварке углеродистых и низколегированных сталей обеспечивает уменьшение поверхностного натяжения жидкой ванны и изменение краевого угла (рис. 2).

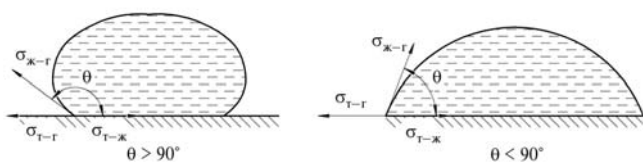


Рис. 2. Изменение краевого угла при  $\theta > 90^\circ$  и  $\theta < 90^\circ$

В углеродистых и низколегированных сталях поверхностное натяжение падает с ростом температуры. В сварочной ванне оно максимально на самых холодных участках (у ее краев), а минимально — на самых горячих (в центре ванны). В результате этого возникает течение металла от центра ванны к периферии — таким образом система стремится уменьшить свою поверхностную энергию за счет перераспределения жидкого металла. В работах [5, 6] показано, что кислород создает положительную температурную зависимость поверхностного натяжения от температуры. В результате этого возникают потоки, направленные от периферии к центру ванны. Эти потоки транспортируют тепло, и такой характер течения приводит к получению сравнительно узкого и глубокого шва. Характер течения жидкого металла при

сварке сталей с низким содержанием  $\text{O}_2$  и сталей с высоким содержанием  $\text{O}_2$  показан на рис. 3. Таким образом, применение комбинированной защиты может привести к увеличению глубины проплавления.

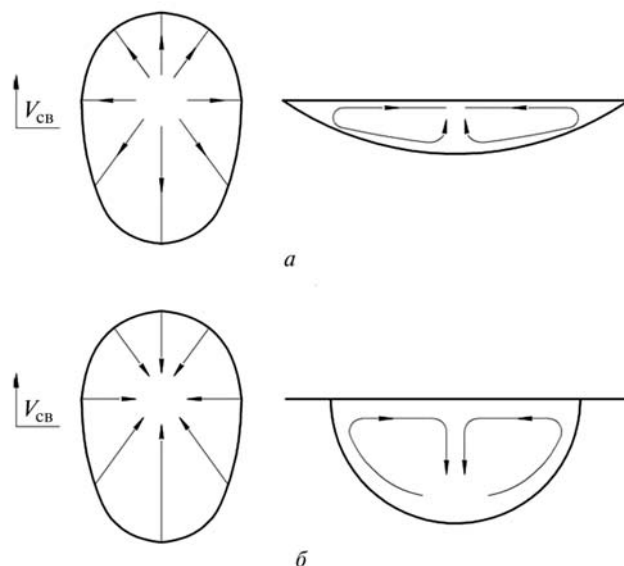


Рис. 3. Характер течения жидкого металла в сварочной ванне:

- а — сталь с низким содержанием  $\text{O}_2$ ;
- б — сталь с высоким содержанием  $\text{O}_2$

**Повышение энергетических характеристик дуги.** В работе [7] проведены исследования сварки неплавящимся электродом в среде чистого Ar и в смеси Ar+CO<sub>2</sub> с концентрацией CO<sub>2</sub> 2%...10%. На рисунке 4 показано влияние концентрации CO<sub>2</sub> на мощность и КПД дуги. На рисунке видно, что с увеличением концентрации CO<sub>2</sub> мощность и КПД сварочной дуги повышаются. Кроме того, в работе [7] показано, что увеличение концентрации CO<sub>2</sub> ведет к большей концентрации дуги. Повышение концентрации дуги обеспечивает рост глубины проплавления (рис. 5).

Таким образом, применение смеси газов Ar+CO<sub>2</sub> при сварке неплавящимся электродом обеспечивает повышение энергетических характеристик дуги и изменению геометрических размеров проплавления.

Однако при использовании активных защитных газов при сварке неплавящимся электродом увеличивается износ вольфрамового

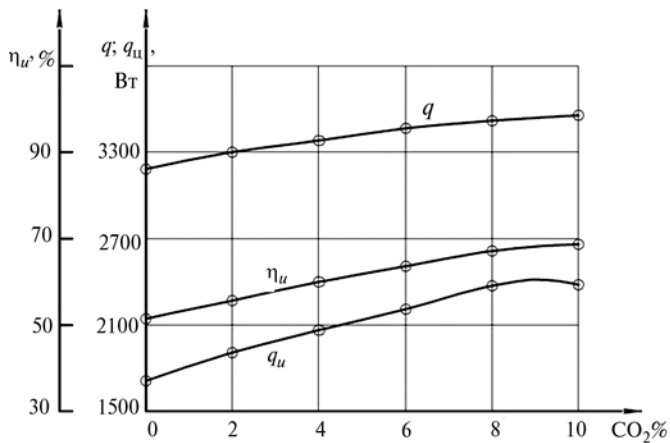


Рис. 4. Влияние концентрации CO<sub>2</sub> на тепловые характеристики дуги:

$q$  — полная мощность дуги;  $q_u$  — эффективная мощность дуги;

$\eta_u$  — эффективный КПД дуги ( $I_{св} = 250$  А,  $l_d = 1$  мм,  $v_{св} = 30$  м/ч)

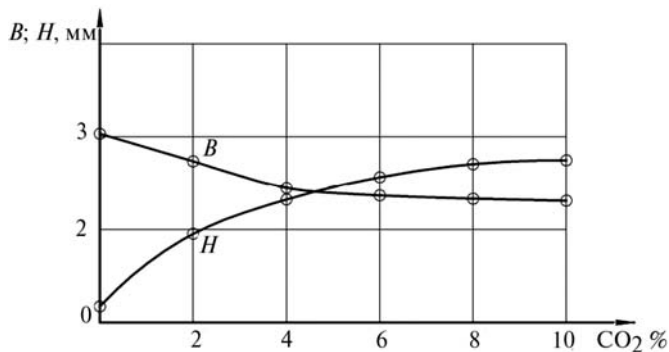


Рис. 5. Влияние концентрации CO<sub>2</sub> на глубину  $H$  и ширину проплавления  $B$  ( $I_{св} = 200$  А,  $l_d = 1$  мм,  $v_{св} = 30$  м/ч)

электрода. Устранить указанный недостаток можно за счет применения комбинированной защиты, где наряду с инертным газом (Ar) подается активный газ (CO<sub>2</sub> или смеси на базе аргона). При этом инертный газ защищает вольфрамовый электрод, а активный защитный подается через второе сопло (рис. 6).

Применение комбинированной защиты при сварке неплавящимся электродом может обеспечить отсутствие окисления электрода с сохранением указанных преимуществ использования активных газов.

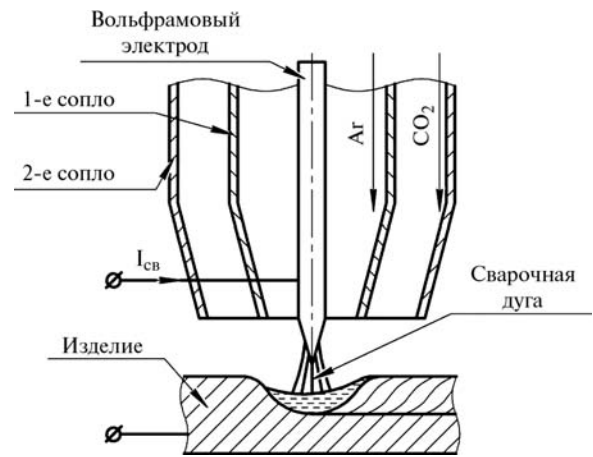


Рис. 6. Схема процесса сварки неплавящимся электродом

**Методика проведения эксперимента.** Сварку трубопроводов в монтажных условиях проводят в неповоротном положении на проход. При этом формирование шва происходит в различных пространственных положениях. Влияние комбинированной защиты в различных пространственных положениях на формирование сварного шва неоднозначно. Для оценки этого влияния были проведены экспериментальные исследования в четырех основных пространственных положениях сварки (рис. 7).

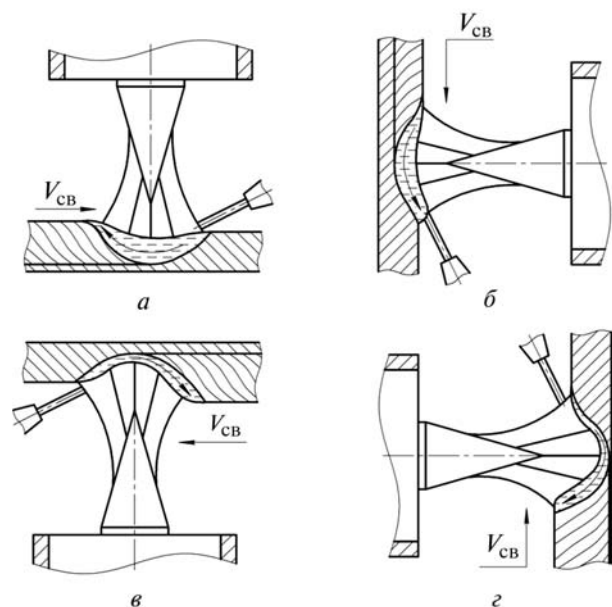


Рис. 7. Поведение сварочной ванны при сварке неплавящимся электродом в различных положениях:

$a$  — в нижнем;  $б$  — в вертикальном «на спуск»;

$в$  — в потолочном;  $г$  — в вертикальном «на подъем»



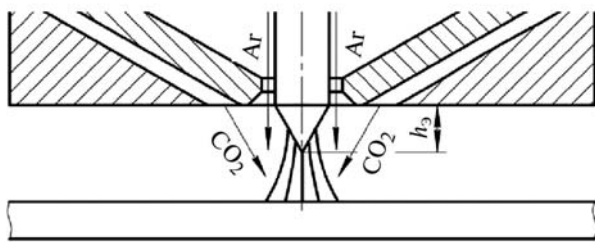


Рис. 8. Схема горелки для сварки неплавящимся электродом с комбинированной защитой

Процесс осуществляли от источника постоянного тока на прямой полярности в аргоне и углекислом газе высших сортов. Схема горелки для комбинированной защиты представлена на рис. 8. В качестве присадочного материала использовали проволоку сплошного сечения Ø1 мм марки Св-08Г2С.

В первой серии экспериментов определяли влияние углекислого газа на дугу в условиях комбинированной защиты. Дуга горела на медном водоохлаждаемом аноде. В качестве первого газа использован аргон с расходом 5 л/мин, в качестве второго — углекислый газ с расходами во второе сопло 0,5 и 10 л/мин. Для выявления влияния расхода углекислого газа вели фотосъемку процесса.

Вторую серию экспериментов проводили с целью определения влияния комбинированной защиты на формирование сварного шва в различных пространственных положениях. При этом наплавку валиков на трубы 89х4 выполняли в четырех пространственных положениях при одинаковых параметрах режима, но с различными расходами газов (таблица). После наплавки из полученных образцов были изготовлены макрошлифы, которые затем были протравлены раствором азотной кислоты в спирте.

**Результаты эксперимента.** Фотографии дуг при различном расходе углекислого газа показаны на рис. 9. Видно, что при увеличении расхода углекислого газа из второго сопла происходит сужение столба дуги и уменьшение анодного пятна. Кроме того, визуально заметно изменение интенсивности спектра излучения в сторону увеличения яркости свечения. Такое поведение дуги может свидетельствовать о некотором увеличении концентрации энергии.

Параметры эксперимента

Номер эксперимента	Положение			
	нижнее	вертикальное «на спуск»	потолочное	вертикальное «на подъем»
1	10 л/мин Ar	10 л/мин Ar	10 л/мин Ar	10 л/мин Ar
2	5 л/мин Ar + 5 л/мин CO <sub>2</sub>	5 л/мин Ar + 5 л/мин CO <sub>2</sub>	5 л/мин Ar + 5 л/мин CO <sub>2</sub>	5 л/мин Ar + 5 л/мин CO <sub>2</sub>
3	10 л/мин Ar + 10 л/мин CO <sub>2</sub>	10 л/мин Ar + 10 л/мин CO <sub>2</sub>	10 л/мин Ar + 10 л/мин CO <sub>2</sub>	10 л/мин Ar + 10 л/мин CO <sub>2</sub>
$I_{св} = 140 \text{ А}, V_{св} = 15 \text{ м/ч}, V_{пп} = 60 \text{ м/ч}, l_{д} = 4 \text{ мм},$ $h_3 = 1 \text{ мм}$				

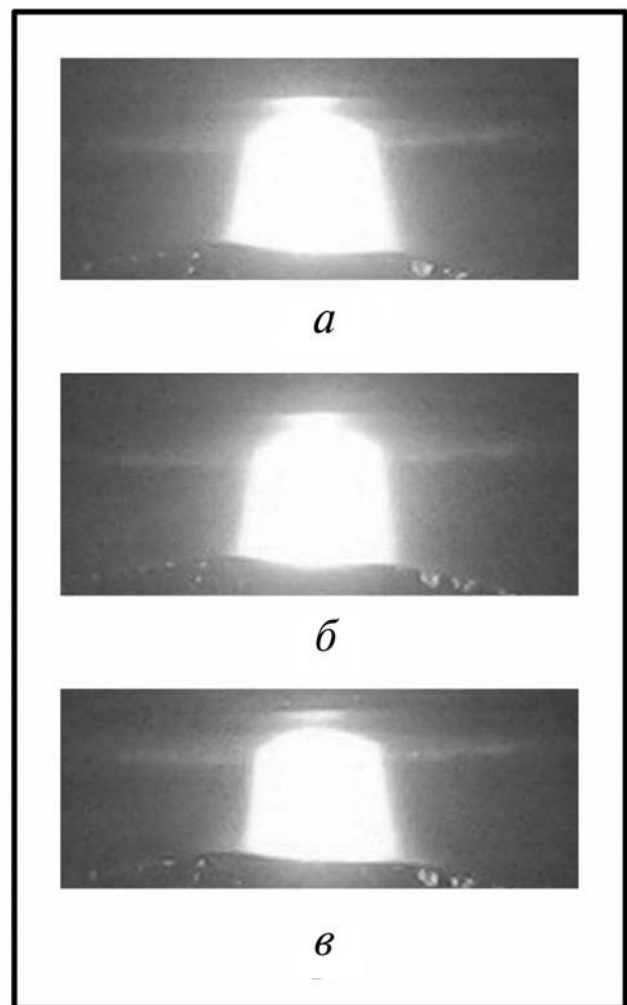


Рис. 9. Дуга, горящая в среде Ar, с подачей во второе сопло:

а — 0 л/мин CO<sub>2</sub>; б — 5 л/мин CO<sub>2</sub>; в — 10 л/мин CO<sub>2</sub>

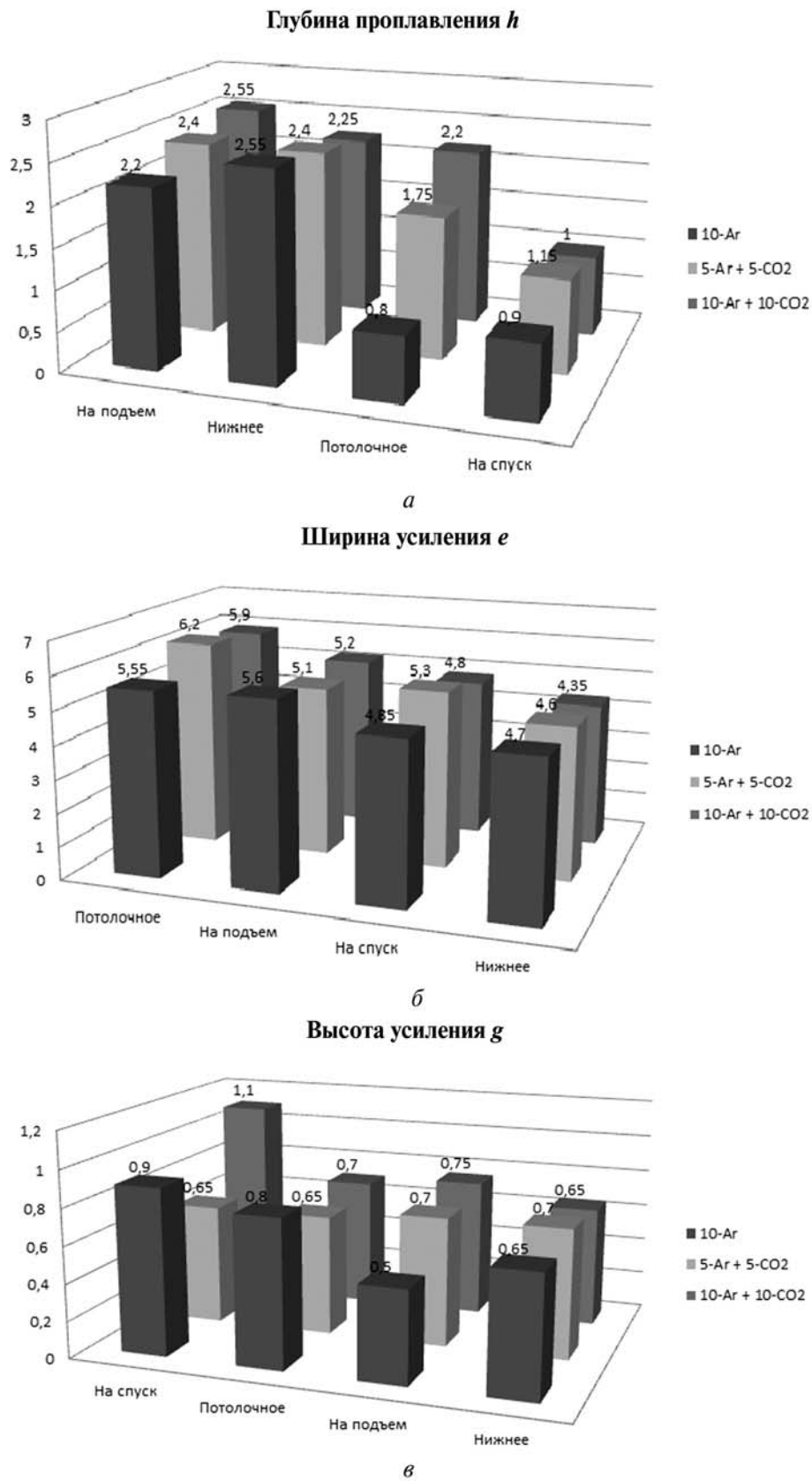


Рис. 10. Геометрические размеры валиков, наплавленных в различных пространственных положениях и при разных сочетаниях газов, при сварке с комбинированной защитой:

*a* — глубина проплавления ( $h$ ); *б* — ширина усиления ( $e$ ); *в* — высота усиления ( $g$ )

В результате второй серии экспериментов были определены геометрические параметры сварного шва, которые сведены в диаграммы и представлены на рис. 10.

Анализ полученных результатов, показал, что применение комбинированной защиты оказывает влияние на формирование сварного шва. Очевидно, что изменение пространственного положения при комбинированной защите оказывает меньшее влияние на глубину проплавления, чем при сварке вольфрамовым электродом в среде аргона. При этом заметна тенденция к увеличению глубины проплавления с ростом расхода углекислого газа. Однако в вертикальном положении «на спуск» наблюдается резкое уменьшение глубины проплавления, сопоставимое с тем, что имеет место при сварке в чистом аргоне. Следует отметить влияние комбинации газов на формирование шва в различных пространственных положениях.

В вертикальном положении «на подъем» с ростом объема углекислого газа наблюдается увеличение глубины проплавления и высоты усиления и, соответственно, уменьшение ширины усиления. Это связано с повышением жидкотекучести металла и, как следствие, уменьшением жидкой прослойки под дугой.

В нижнем положении с изменением соотношения аргона и углекислого газа наблюдается незначительное изменение всех трех геометрических параметров швов, но заметно некоторое уменьшение глубины проплавления. Это связано, по-видимому, с подтеканием металла сварочной ванны под дугу (см. рис. 7), вызванным увеличением жидкотекучести металла.

В вертикальном положении «на спуск» глубина проплавления изменяется незначительно. Здесь, как и при сварке в среде аргона, основное значение имеет большая величина жидкой прослойки, обусловленная перемещением металла ванны под дугу. При комбинированной защите прослойка увеличивается с повышением жидкотекучести, но это не обеспечивает снижения проплавления, так как нивелируется повышением энергетических характеристик дуги, поэтому глубина проплавления при всех экспериментах приблизительно одинаковая.

В потолочном положении с повышением концентрации  $\text{CO}_2$  наблюдается значительное увеличение глубины проплавления при незначительных изменениях высоты усиления и ши-

рины усиления. Это связано, по-видимому, с ростом энергетических характеристик дуги и более интенсивного оттока жидкого металла в хвостовую часть сварочной ванны вследствие повышения его жидкотекучести.

## Выводы

Проведенные исследования показали, что применение комбинированной защиты по опробованной схеме, приводит к сужению столба дуги и уменьшению анодного пятна, что может вызвать увеличение силового воздействия дуги на расплавленный металл сварочной ванны.

Применение комбинированной защиты оказывает влияние на формирование сварного шва, при этом заметна тенденция к увеличению глубины проплавления с ростом расхода углекислого газа.

Изменение пространственного положения при комбинированной защите оказывает меньшее влияние на глубину проплавления, чем при классическом процессе сварки вольфрамовым электродом в среде аргона. Однако в вертикальном положении «на спуск» наблюдается резкое уменьшение глубины проплавления, сопоставимое с тем, которое происходит при сварке в чистом аргоне.

## Литература

1. Труды НИКИМТ. Сварка в атомной промышленности и энергетике Т. 1 / Под общ. ред. д-ра техн. наук Л.Н. Щавелева, ред.-сост. канд. техн. наук А.А. Куркумели. М.: ИздАТ, 2002, 400 с.
2. Шипилов А.В. Особенности автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом трубопроводов обвязки компрессорных станций // Сварка и диагностика. 2010. № 4. С. 42—47.
3. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка, основные положения ПНАЭ Г-7—009—89: Нормативный документ. М.: НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 2000.
4. Интернет—ресурс. Википедия — свободная энциклопедия. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Заглавная\\_страница](http://ru.wikipedia.org/wiki/Заглавная_страница)
5. Heiple C.R., Roper J.R. Mechanism for minor elements effect on GTA fusion geometry // Weld. J. 1982. Vol. 61. N. 4. P. 97—102.
6. Mills K.C., Keene B.J. Factors affecting variable weld penetration // Int. Materials Review. 1990. Vol. 35. N 4. P. 185—216.
7. Кулищенко Б.А., Еремен Е.Н. Влияние углекислого газа на некоторые технологические свойства дуги при сварке неплавящимся электродом // Сварочное производство. 1978. № 2. С. 38—39.

Статья поступила в редакцию 21.06.2012