

## МАШИНОСТРОЕНИЕ . МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621. 791

**В. М. Белоконь, канд. техн. наук, доц.**

### КАЧЕСТВО ПРОЦЕССА СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

В статье рассмотрены вопросы, связанные с качеством сварки в защитных газах. Исследовано влияние состава защитной атмосферы, диаметра электродной проволоки, режимов сварки на перенос электродного металла и разбрызгивание. Показано, что сварка в смеси защитных газов имеет преимущества перед сваркой в углекислом газе. Дополнительное введение в защитный газ кислорода увеличивает выгорание углерода в поверхностном слое, снижает силы поверхностного натяжения, измельчает капли электродного металла и улучшает формирование швов. При сварке без коротких замыканий дугового промежутка магнитные методы, проволоки с переменным диаметром и вибрация электрода снижают потери и улучшают перенос металла через дугу.

Качество процесса сварки в среде углекислого газа – устойчивость горения дуги, производительность и разбрызгивание, характер переноса электродного металла и т. д. – исследовано в широком диапазоне режимов применительно к определенным диаметрам проволок [1, 2]. Масштабы применения сварки в углекислом газе в промышленности делают особенно чувствительными те недостатки, которыми она обладает: не всегда удовлетворительный внешний вид швов, в некоторых случаях недостаточная производительность процесса, повышенное разбрызгивание электродного металла. При сварке теряется в среднем 10 % электродного металла. Капли расплавленного металла прилипают или сплавляются со свариваемой деталью, соплом горелки и токосъемником. Попадание крупных брызг в разделку кромок увеличивает возможность появления непроваров и шлаковых включений в металле шва. Возникает необходимость введения дополнительной, трудоемкой непроизводительной операции – зачистки.

Нами проведены сравнительные исследования качественных показателей процесса сварки проволоками диаметрами 1,6–2,5 мм [3].

Установлено, что с увеличением

плотности тока коэффициент расплавления и наплавки увеличивается. Более сложной зависимостью определяется коэффициент потерь.

При плотностях тока значительное количество энергии дуги расходуется на диссоциацию углекислого газа. Дуга сжимается, и анодное пятно не занимает всей поверхности торца электрода. При этом быстрое накопление большого количества тепловой энергии в небольшой по объему активной области приводит к последовательно возникающим тепловым микровзрывам. Это является одной из важных причин, вызывающих блуждание пятна. Причем ввиду того, что накопление энергии зависит от протяженности активной области, падения напряжения в ней, блуждания анодного и катодного пятен происходят с различной скоростью. Возникает тангенциальная по отношению к поверхности сила, действующая в плоскости, перпендикулярной оси электрода, и вызывающая смещение капли от оси электрода и ее отрыв [4]. Подъему капли способствует реактивное давление пара испаряющегося электрода, действие которого возрастает пропорционально квадрату тока. Поэтому при низких плотностях тока капля формируется на боковой поверхности элек-

тока, часто ее перенос происходит вне столба дуги [4]. Наблюдается интенсивное разбрызгивание металла, повышение коэффициента потерь и тем больше, чем больше диаметр проволоки.

По мере увеличения плотности тока увеличивается охват торца электрода активным пятном. Одновременно повышаются силы, отрывающие капли. Перенос металла становится мелкокапельным и при определенной плотности тока потери металла уменьшаются до уровня 7–9 %, улучшается стабильность горения дуги. Наличие некоторого количества мелких брызг рядом со сварным швом вызвано действием тангенциальной и реактивных сил испаряющегося металла, отрывающих и перемещающих часть капли в плоскости, перпендикулярной оси электрода.

Дальнейшее повышение плотности тока увеличивает испарение и угар расплавленного электродного металла, а также содержание окислов в окружающей атмосфере и их налет около шва. Потери металла растут. Удельное испарение металла с активного пятна электрода при сварке в углекислом газе на обратной полярности

тока можно приближенно рассчитать. Для этого используем общее выражение для удельного испарения металла и уравнение, определяющее плотность тока на аноде [5]. После объединения их, приведения к одним единицам измерения и выражения тока дуги через его плотность в электроде получим уравнение (1)

$$g_n = 5,4 \cdot 10^{-12} \cdot D_1 \cdot U_3 \cdot \frac{U_i^{19} \cdot d^{\frac{1}{3}} \cdot a^{\frac{2}{3}} \cdot i_3^{\frac{1}{6}}}{g_{n1} \cdot g_e^{\frac{2}{3}}}, \quad (1)$$

где  $D_1$  – коэффициент пропорциональности,  $D_1 = 3,02 \cdot 10^3$ ;  $U_3$  – эффективное падение напряжения у электрода, В;  $g_e$  – сечение столкновения частиц с электронами,  $g_e = 25 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ;  $g_{n1}$  – скрытая теплота испарения, В·с/г.

По полученному уравнению рассчитаем удельное испарение металла в зависимости от плотности тока и диаметра электрода. Результаты расчета сведем в табл. 1.

Табл. 1. Удельное испарение металла при сварке проволоками диаметром 1,6–2,5 мм

Плотность тока, А/см <sup>2</sup>	Диаметр электрода, мм	Удельное испарение металла, г/(см <sup>2</sup> ·с)
1,90	1,6	3,38
	2,0	3,64
	2,5	3,905
2,00	1,6	3,4
	2,0	3,67
	2,5	3,95
2,10	1,6	3,44
	2,0	3,70
	2,5	3,98
2,20	1,6	3,47
	2,0	3,74
	2,5	4,02

Проведенные расчеты и эксперименты показывают, что потери металла зависят от диаметра электродной проволоки и при малых плотностях тока связаны, в основном, с разбрызгиванием, а при высоких – с испа-

рением и угаром. При оптимальных напряжениях на дуге при одинаковых плотностях тока потери металла могут не определяться диаметром проволоки (рис. 1).

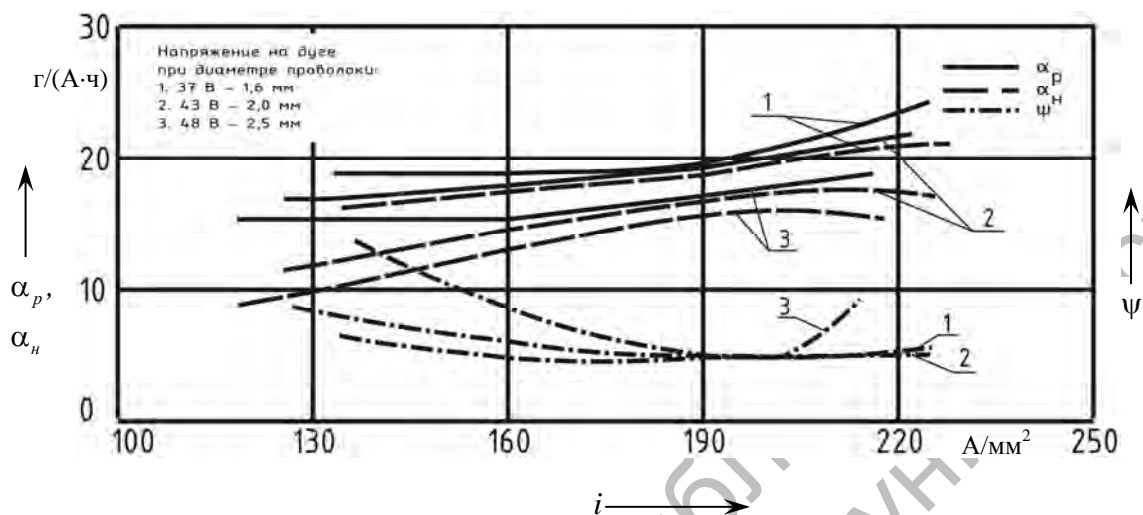


Рис. 1. Влияние плотности тока на производительность процесса сварки:  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ ,  $\psi$  – коэффициенты расплавления, наплавки и потерь соответственно

Исследовано влияние напряжения на дуге на качество сварки. Увеличение напряжения на дуге при постоянной плотности тока вызывает сначала плавное, а затем более резкое снижение коэффициентов расплавления и наплавки (рис. 2). Потери электродного металла на угар и разбрызгивание растут. Такое изменение определяемых коэффициентов объясняется увеличением внешней составляющей дуги в соответствии с жесткой характеристикой источника и возрастающей характеристикой дуги, уменьшением подогрева вылета электродной проволоки, перераспределением теплового баланса в дуге. Изменяется размер капель электродного металла. Результаты скоростной киносъемки показывают, что с ростом напряжения дуги размер капель увеличивается, что ухудшает условия теплопередачи из анодной области к торцу электрода. Коэффициент потерь возрастает, в основном, из-за повышения разбрызгивания.

Стабильность горения дуги зависит от скорости сварки. При малой скорости

сварки устойчивость дуги ухудшается. При увеличении плотности тока и постоянном напряжении длина дуги уменьшается в соответствии со статической характеристикой. Стабильность горения дуги ухудшается. Увеличение скорости сварки сдвигает границу максимальных плотностей тока, допускающих устойчивое горение дуги. Оптимальная скорость при сварке проволоками диаметрами 1,6–2,5 мм составляет 30–70 м/ч. Этим же скоростям соответствует и лучшее формирование шва, хорошая защита сварочной ванны газом. Рекомендуемое соотношение значений тока и напряжения, обеспечивающее хороший внешний вид швов, устойчивое горение дуги, примерно одинаковые потери электродного металла приведены на рис. 3.

Для всех исследованных диаметров проволок диапазон сварочных токов расширяется с увеличением напряжения на дуге.

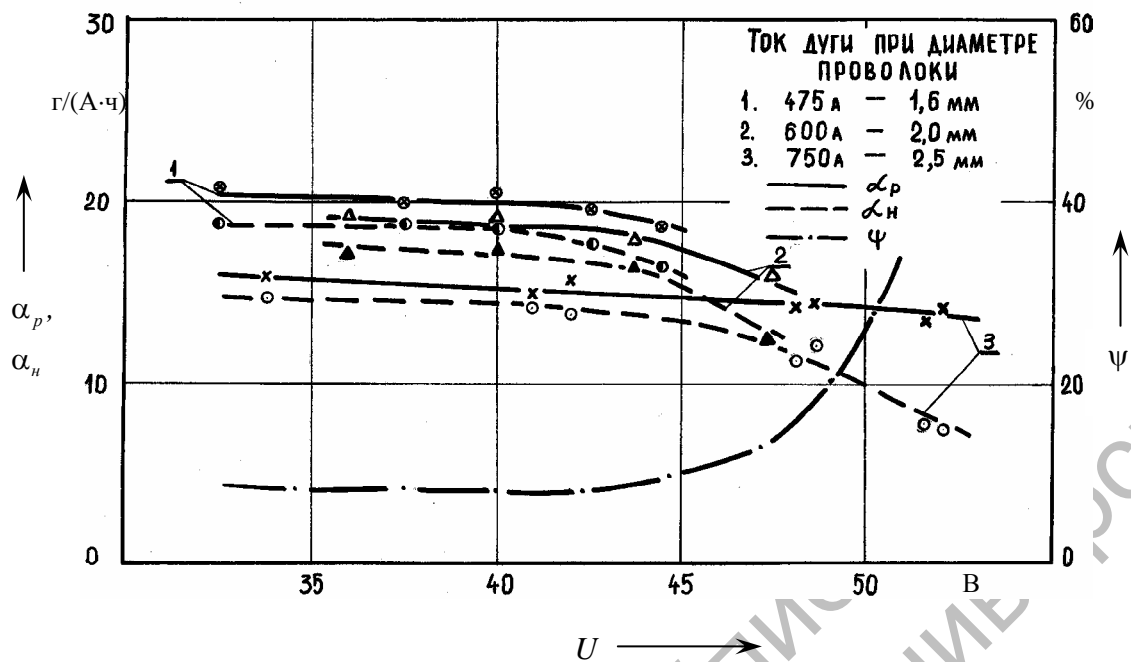


Рис. 2. Влияние напряжения дуги на производительность процесса сварки

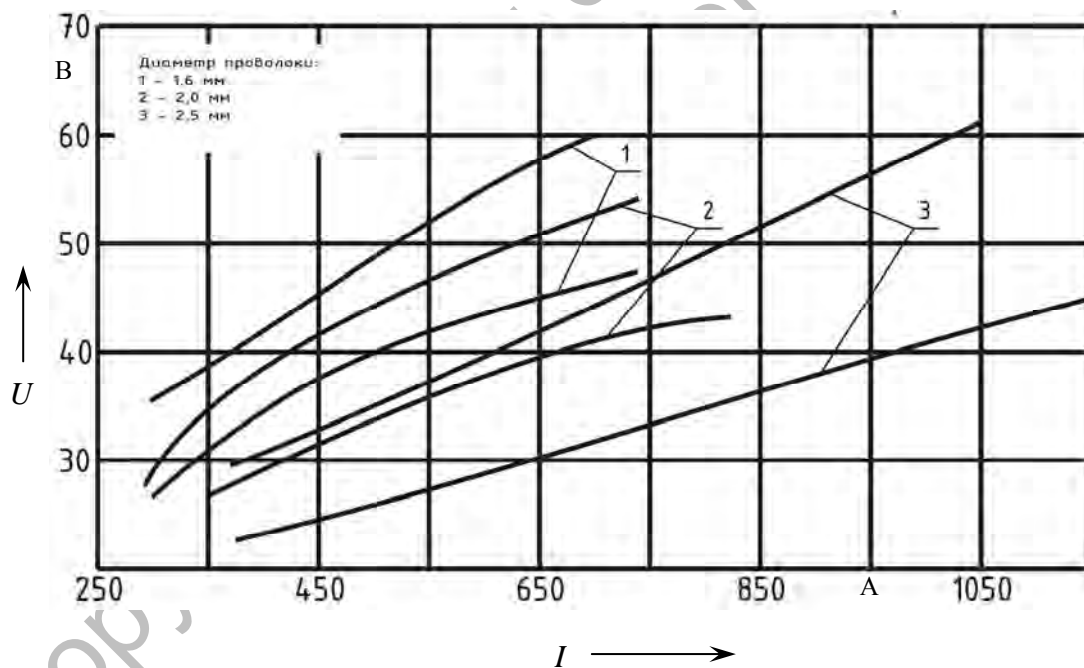


Рис. 3. Области оптимальных режимов сварки проволоками диаметрами 1,6–2,5 мм.

Величина вылета электродной проволоки оказывает существенное влияние на производительность процесса сварки и параметры шва. Увеличение вылета электрода повышает эффективность процесса, спо-

собствует рациональному использованию тепла от нагрева проволоки на вылете. Одновременно уменьшается глубина проплавления. Возникают затруднения и в зажигании дуги – наблюдаются взрывы

и выбросы кусочков проволоки.

Производительность процесса сварки при увеличении вылета может быть повышена в 1,5–3,5 раза по сравнению со сваркой на коротких вылетах.

Применение сварки на повышенных плотностях тока требует заполнения кратера шва металлом. С этой целью в конце сварки изменяли ток, напряжение дуги и скорость сварки. При этом определено, что раздельное плавное уменьшение исследуемых факторов режима не позволяет полностью заварить кратер. Уменьшение напряжения дуги и скорости сварки приводит к уменьшению длины кратера, но увеличению его ширины. Уменьшается глубина кратера с уменьшением скорости подачи сварочной проволоки от номинальной до нуля. Однако и в этом случае конец шва имел ослабленное усиление.

Качественная заварка кратера возможна при переходе в конце сварки на меньшие значения тока, напряжения, скорости сварки. Программное управление режимом сварки позволяет решить эту задачу.

Применительно к полуавтоматической сварке исследовалась возможность заварки кратера с помощью возвратно-эллиптических манипуляций концом электрода. Этот способ позволяет осуществить заварку кратера, но при этом необходимо не допускать растягивания дуги путем отвода держателя от изделия, т. е. в этом случае ухудшается защита расплавленного защитным газом. Решается данная задача применением двухрежимных полуавтоматов или программированием [6]. Проведенные исследования показывают, что изменением основных параметров режима сварки можно получить требуемые производительность процесса и характер переноса электродного металла, а также качественное формирование сварных швов при минимальных потерях.

Характер плавления и переноса электродного металла влияет на интенсивность протекания физических и химических процессов при взаимодействии металлической и газовой фаз. Изменяются технологиче-

ские характеристики – производительность сварки, разбрызгивание, формирование швов и т. д.

Перенос электродного металла в сварочную ванну через газовую среду осуществляется в виде капель и паров. Размер переносимых капель может быть различным и определяется режимом сварки, защитной атмосферой, составом электродного металла и т. д. Уменьшение подвижности сварочной дуги, увеличение охвата дугой поверхности свариваемых деталей и измельчение переноса приводит к более равномерному по объему и более высокому нагреву каплей [7]. Одновременно улучшается предварительный подогрев близлежащих к шву слоев металла, наблюдается более высокая температура поверхности сварочной ванны. Сила поверхностного натяжения снижается. Условия формирования шва улучшаются. Поэтому в большинстве случаев желателен мелкокапельный перенос.

В процессе образования капли на нее действуют силы, препятствующие и способствующие отрыву от торца электрода. Многочисленными исследованиями стран СНГ и зарубежных авторов установлены основные из них.

Сила поверхностного натяжения удерживает каплю на торце электрода в процессе ее формирования и зависит от легирующих элементов, окружающей каплю атмосферы, температуры и т. д.

Основные легирующие элементы проволоки для сварки в среде углекислого газа малоуглеродистых и низколегированных сталей – углерод, кремний, марганец. Кремний в количестве 0,17–0,5 % снижает, а в других – увеличивает поверхностное натяжение. Влияние марганца на поверхностное натяжение выражается кривой с максимумом при 0,8 %. Однако изменение содержания кремния и марганца ограничивается. Их соотношение и количество определяют металлургические процессы, протекающие при сварке, качество сварных швов.

Двойное влияние на величину по-

верхностного натяжения оказывает содержание углерода. Увеличение или уменьшение углерода от 0,20 % снижает поверхностное натяжение. При этом повышение содержания углерода в металле швов приводит к образованию в них горячих трещин, а слишком заниженные – к потере прочностных свойств. Последнее может быть скомпенсировано дополнительным легированием проволоки соответствующими элементами. Следовательно, изменение содержания углерода в проволоке в разумных пределах может изменить характер переноса, разбрызгивания, формирование швов.

В зарубежных и странах СНГ проводились исследования в области разработки новых проволок для сварки в среде углекислого газа за счет дополнительного легирования такими элементами, как титан, никель, молибден, цирконий и др. Это позволяет стабилизировать горение дуги, повысить эксплуатационные характеристики сварных узлов. Такой путь удорожает сварочную проволоку и требует затрат дефицитных материалов.

В работах исследователей проверено влияние предварительного нанесения элементов – активаторов на поверхность сварочной проволоки в виде солей бария, калия, лития и др. Известно, что щелочные и щелочно-земельные металлы обладают способностью заполнять свободные связи на поверхности жидкости, тем самым ослаблять связь поверхностных атомов и молекул между собой. Резко изменяется эмиссия с катода, увеличивается площадь активного пятна, снижается плотность тока. Это уменьшает отталкивающее действие электромагнитной силы, осевая составляющая которой способствует отрыву капли. Обнаруженное повышение температуры капли при этом способствует уменьшению поверхностного натяжения металла и размера капли. Скорость же расплавления электрода снижается. Последнее объясняется тем, что элементы-активаторы снижают работу выхода электронов. Перед катодом образуется электронное облако, которое,

нейтрализуя сталкивающиеся с ним положительные ионы, уменьшает количество тепла, выделяющегося на катоде.

Оказывает влияние на процесс сварки состояние поверхности, способ изготовления проволоки [1].

Существенное влияние на перенос металла через дугу оказывает состав защитного газа. Положительно влияет кислород как активное вещество при сварке в смесях газов. К таким смесям следует отнести смеси: углекислого газа и кислорода, аргона; углекислого газа и кислорода, аргона и углекислого газа, аргона и кислорода.

Изменение состава защитного газа влияет на интенсивность охлаждения дуги, эффективный потенциал ионизации дугового промежутка и его температуру. При сварке на прямой полярности в среде многоатомных газов значительное количество тепла расходуется на диссоциацию. В результате – сжатие дуги, высокая подвижность катодного пятна, не охватывающего всю поверхность торца электрода. Это сказывается на величине и направлении электромагнитных сил, повышении реактивного давления паров, действующих на каплю. Перенос становится беспорядочным, потери металла увеличиваются, ухудшается формирование шва.

Влияет на характер переноса электродного металла и химическое взаимодействие капли с газовой фазой. В литературе рассматривается в основном окисление углерода.

Мнения исследователей о роли окисления углерода противоречивы. Одни считают, что образование пузырьков углекислого газа внутри капель является определяющим фактором в переносе металла, другие отводят этому процессу второстепенную роль [8]. Экспериментально в [9] показано, что: окисление углерода происходит в основном на поверхности капель; реактивное давление окиси углерода вызывает деформирование капли, отталкивание от ванны; увеличивается подвижность капли

на электроде и разбрызгивание металла; масса переходящих капель изменяется незначительно.

Положительное влияние на качество сварки оказывает подача в зону дуги вместе с защитным газом специального флюса, закладывание в разделку перед сваркой металлической крупки, обрезков прутков проволоки, электродов основного типа или подача дополнительной проволоки в зону дуги. При этом изменяется распределение теплового баланса в дуге, повышается производительность, улучшается качество швов.

При данных режимах сварки и конкретной защитной атмосфере перенос металла зависит от вылета электрода и его диаметра [10].

Увеличение вылета электрода позволяет рационально использовать нагрев вылета проходящим током. Теплосодержание капель уменьшается, а размер их, время пребывания на торце электрода и производительность расплавления увеличиваются. Так как повышенное количество электродного металла наплавляется, возможны наплывы, ухудшение формы шва. Это происходит при недостаточном прогреве поверхности свариваемых деталей.

Уменьшение диаметра электродной проволоки увеличивает температуру капель, охват дугой торца электрода, снижает силы, удерживающие капли. Перенос электродного металла измельчается.

При сварке без коротких замыканий для улучшения переноса металла через дугу используются способы искусственного сбрасывания капель с торца электродной проволоки. Для этой цели пригодна вибрация или предложенная ВНИИАВТОГЕНМАШем для сварки пульсирующая подача электродной проволоки.

Уменьшается разбрызгивание и улучшается перенос капель через дугу при применении сечения проволоки с заранее сформированными каплями.

Положительный эффект в отношении переноса и разбрызгивания получен при применении магнитных методов

управления сварочными процессами.

Рассмотренные электрические и неэлектрические способы улучшения процесса сварки в большей или меньшей степени применяются в промышленности. Для более широкого применения требуется учитывать специфику данного производства, форму и конструкцию свариваемых узлов и т. д.

### Выводы

1. Изменением состава защитной атмосферы, диаметра электродной проволоки, режимов сварки можно в определенных пределах воздействовать на качественные показатели процесса сварки: формирование швов, перенос электродного металла и разбрызгивание. Минимальные и примерно равные потери металла наблюдаются в широком диапазоне оптимальных соотношений плотностей тока напряжения на дуге.

2. Сварка в смесях газов имеет преимущества перед сваркой в углекислом газе. Изменение степени диссоциации защитного газа влияет на стабильность горения дуги, ее форму. Дополнительное введение в защитный газ кислорода интенсифицирует выгорание углерода в поверхностном слое, снижает силы поверхностного натяжения, измельчает капли электродного металла и способствует улучшению формирования швов.

3. При сварке без коротких замыканий дугового промежутка применение искусственного сбрасывания капель с торца электрода, вибрации и пульсирующей подачи электродной проволоки, проволоки переменного сечения, магнитных методов позволяет значительно снизить потери металла и улучшить процесс переноса капель через дугу.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. **Новожилов, Н. М.** Основы металлургии дуговой сварки в газах / Н. М. Новожилов. – М. : Машиностроение, 1974. – 231 с.
3. Сварка в углекислом газе проволокой диаметром 2,5 мм / В. М. Белоконь [и др.] / Сварочное производство. – 1974. – № 1. – С. 43–44.
4. **Белоконь, В. М.** Качество сварки плавлением при различных составах защитного газа и сварочной проволоки / В. М. Белоконь // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 4. – С. 62–69.
5. **Лесков, Г. И.** Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.
6. **Потапьевский, А. Г.** Сварка в углекислом газе с программированием режима / А. Г. Потапьевский, В. Я. Лаврищев, М. П. Дайнеко / Автоматическая сварка. – 1972. – № 4. – С. 44–46.
7. **Походня, И. К.** Газы в сварных швах / И. К. Походня. – М. : Машиностроение, 1972. – 256 с.
8. **Мазель, А. Г.** Технологические свойства электросварочной дуги / А. Г. Мазель. – М. : Машиностроение, 1969. – 178 с.
9. **Ерохин, А. А.** Основы сварки плавлением / А. А. Ерохин. – М. : Машиностроение, 1973. – 448 с.
10. **Куликов, В. П.** Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / В. П. Куликов. – Минск : Экоперспектива, 2003. – 412 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 21.12.2008

**V. M. Belokon**  
**The quality of the gas shielding**  
**welding process**

The paper considers the problems connected with the welding quality in shielding gases. The influence of the composition of the protective atmosphere, the diameter of the electrode wire, the welding conditions on the electrode metal transfer and sputtering has been studied. It has been shown that welding in the mixture of shielding gases has some advantages over welding in carbon dioxide. Additional input of oxygen into the shielding gas increases carbon burning in the surface layer, lowers surface tension forces, breaks electrode metal drops and improves weld formation. In welding without short circuits of the arc gap, magnetic methods, wires with changeable diameters and electrode vibrations decrease losses and improve metal transfer across the arc.