

# ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕРДЕЧНИКОВ САМОЗАЩИТНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК НА СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

**А.С. КОТЕЛЬЧУК**

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича (Боженко), 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе проведено сопоставление эффективности газовой защиты расплавленного металла при сварке самозащитными порошковыми проволоками карбонатно-флюоритного типа с учетом свойств их сердечников, исследованных термоаналитическими методами. Показано, что для улучшения надежности газовой защиты при сварке такими порошковыми проволоками важно не просто обеспечить генерацию большого объема защитных газов при термодеструкции сердечника проволоки, но и управлять этим процессом, обеспечивая достаточное газовыделение на всех этапах нагрева и плавления порошковой проволоки. Используя данные дифференциальной сканирующей калориметрии шихты порошковых проволок карбонатно-флюоритного типа, содержащих карбонат лития, выполнена оценка затрат тепла на нагрев и плавление порошкового сердечника, сопровождающиеся развитием энергозатратных процессов термической деструкции компонентов сердечника. Предлагается ограничивать содержание карбонатов в проволоке на уровне 1...2 % массы, что позволяет сохранить на приемлемом уровне показатели, характеризующие устойчивость процесса сварки, и при этом обеспечить достаточную газовую защиту металла и хорошую отделимость шлаковой корки. Управление ходом термохимических реакций в сердечнике достигается за счет подбора нужного его состава с обеспечением благоприятного плавления порошковой проволоки и переноса электродного металла в сварочную ванну. Библиогр. 5, табл. 3, рис. 5.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, порошковая проволока, стабильность плавления и переноса металла, комплексный термический анализ, теплофизические свойства, сварочно-технологические характеристики

Порошковые проволоки для электродуговой сварки объединяют преимущества двух процессов: сварки проволокой сплошного сечения в защитных газах и ручной дуговой сварки покрытыми электродами. Порошковые проволоки в своем составе, как правило, содержат компоненты для легирования и раскисления металла сварного шва, газо- и шлакообразующие компоненты, которые обеспечивают защиту расплавленного металла, его рафинирование и требуемый химический состав металла шва, а также легкоионизирующиеся добавки, стабилизирующие дуговой разряд, для гарантирования высокой производительности процесса [1, 2].

Сварочно-технологические свойства порошковых проволок определяют возможности их применения для сварки различных металлоконструкций в разнообразных условиях, например, при сварке на открытых площадках при воздействии ветра (или неконтролируемых воздушных потоков). Эти свойства, в свою очередь, определяются преимущественно составом наполнителя (сердечника) порошковых проволок. Построение композиции сердечника порошковой проволоки позволяет управлять процессами переноса расплавленного электродного металла и защиты от воздействия окружающей атмосферы

(что важно, в частности, при использовании самозащитных порошковых проволок), а также формирования металла шва и обеспечения его требуемых свойств.

Самозащитные порошковые проволоки представляют собой сварочный материал, применение которого не требует подачи защитного газа (например, при выполнении сварочно-монтажных работ, где подача защитного газа затруднена). Защищает переносимого расплавленного электродного металла и сварочной ванны от вредного взаимодействия с кислородом и азотом окружающего воздуха, которое может привести к пористости и ухудшению механических свойств металла сварного шва, в самозащитных порошковых проволоках карбонатно-флюоритного типа реализована за счет термохимических реакций разложения карбонатов и фтор-силикатов, входящих в состав сердечника таких проволок, с образованием защитной атмосферы.

**Таблица 1. Состав газообразующей композиции порошковых проволок**

Газообразующие компоненты	Содержание компонентов, мас. %							
	в проволоке				в сердечнике			
	КФ1	КФ2	КФ3	КФ4	КФ1	КФ2	КФ3	КФ4
CaCO <sub>3</sub>	2,8	2,6	3,7	3,9	16,1	16,2	22,4	21,2
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2,1	1,6	–	1,5	12,1	9,9	–	8,1
Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	–	1,2	2,1	2,3	–	7,5	12,8	12,5

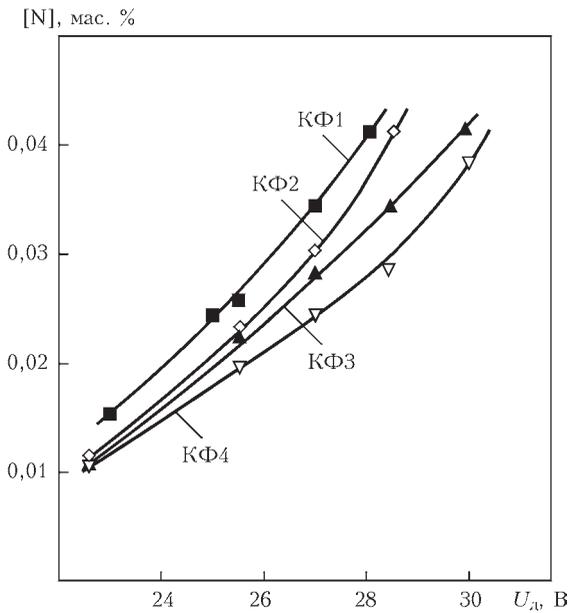


Рис. 1. Влияние напряжения дуги на содержание азота в металле, наплавленном порошковыми проволоками карбонатно-флюоритного типа

При сварке в монтажных условиях, где зона сварки неизбежно подвержена влиянию неконтролируемых воздушных потоков, достаточно остро стоит вопрос надежности защиты расплавленного металла. В этом случае эффективность защиты на практике принято оценивать по возможности удлинения дуги  $\Delta U_d$  [2, 3]:

$$\Delta U_d = U_d^{\max} - U_d^{\min}, \quad (1)$$

где  $U_d^{\min}$  — минимальное напряжение дуги, при котором возможна сварка для заданного значения сварочного тока (скорости подачи электродной проволоки), а  $U_d^{\max}$  — максимальное напряжение дуги, при котором удастся получать сплошные швы, т. е. швы, в которых отсутствуют поры, вызванные пересыщением металла азотом.

Используя методику, изложенную в работе [3], провели оценку стойкости формируемой газовой

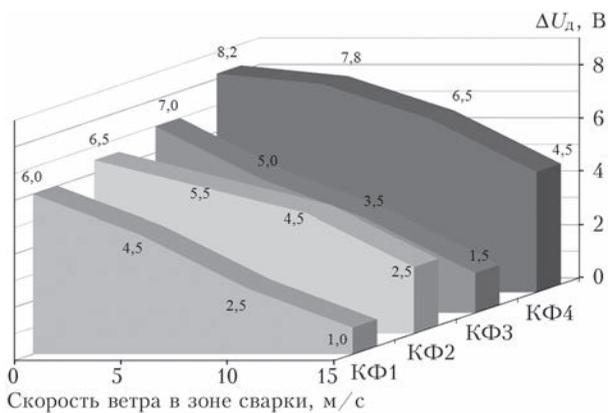


Рис. 2. Возможность удлинения дуги  $\Delta U_d = U_d^{\max} - U_d^{\min}$  при сварке самозащитными порошковыми проволоками карбонатно-флюоритного типа под воздействием ветрового потока

защиты при сварке самозащитными порошковыми проволоками карбонатно-флюоритного типа диаметром 2,2 мм к воздействию ветра в зоне сварки. Составы газообразующей части сердечников проволок приведены в табл. 1. В качестве шлакообразующих компонентов в сердечник проволок также вводили флюорит ( $\text{CaF}_2$ ), рутил ( $\text{TiO}_2$ ), перовскит ( $\text{CaTiO}_3$ ), волластонит ( $\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$ ) и глинозем ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Наплавку контрольных валиков на пластины низколегированной стали проводили при значении сварочного тока на уровне 280 А. Все четыре проволоки продемонстрировали хорошие защитные свойства при сварке под воздействием ветрового потока в зоне горения дуги со скоростью до 5 м/с. Однако ухудшение эффективности формируемой ими газовой защиты расплавленного металла (уменьшение допустимого удлинения дуги) при увеличении скорости ветра выше 5 м/с у порошковых проволок КФ1 и КФ3 заметнее, чем у проволок КФ2 и КФ4. Газовый анализ образцов, вырезанных из центральной части шестислойных наплавов, показал, что с увеличением скорости ветра в зоне сварки содержание азота в наплавленном металле повышается, причем темп нарастания содержания азота сопоставим с темпом сужения диапазона рабочих напряжений на дуге (рис. 1 и 2).

Объяснение этому можно найти, исследуя теплофизические свойства моделей сердечников этих проволок при динамическом нагреве до температур порядка 1500 °С, используя методы комплексного термического анализа, включающие термогравиметрический, дифференциальный термогравиметрический анализы и дифференциальную сканирующую калориметрию, а также масс-спектроскопию выделяющихся газов [4].

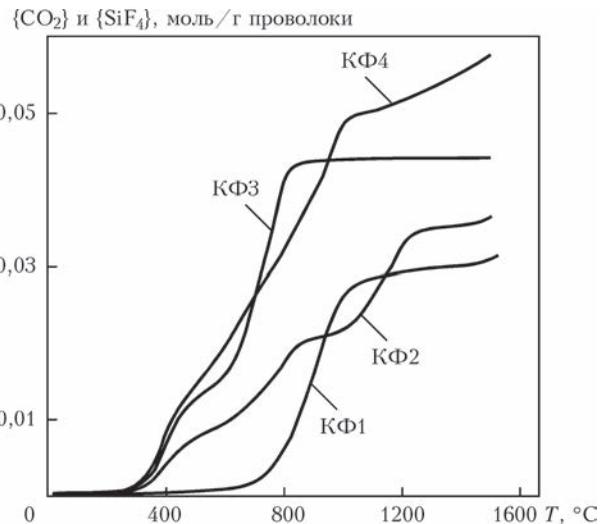


Рис. 3. Суммарное количество защитных газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SiF}_4$ ), выделяющихся из сердечников порошковых проволок карбонатно-флюоритного типа, при непрерывном нагреве со скоростью 10 °С/мин 1 г порошковой проволоки

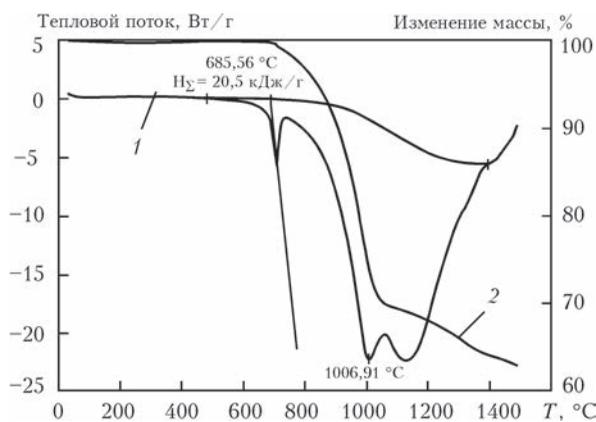


Рис. 4. Термический анализ модельной шихты порошковой проволоки, содержащей  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , методами дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии (1 — тепловой поток; 2 — изменение массы)

Такие исследования были проведены с использованием совмещенного термоанализатора TGA/DSC Q600 STD (фирмы «TA Instruments», США) и масс-спектрометра VG ProLab (фирмы «Thermo Scientific Fisher», Великобритания). Перед проведением исследований были выполнены в соответствии с требованиями инструкций все необходимые калибровки термоанализатора: по температуре, тепловому потоку и сигналу массы во всем исследуемом интервале температур. Исследования проводили в потоке воздуха со скоростью 50 мл/мин при линейной скорости нагрева  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Масса образцов во всех экспериментах составляла около 20 мг. Для исследований использовали керамические тигли (изготовленные из оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

При термической деструкции материалов сердечника выделяются газы, различные по молекулярной массе (в частности,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ), поэтому данные термогравиметрического анализа не отражают в полной мере объемы выделяющихся защитных газов. Поскольку один моль любого газа при идентичных условиях (давлении и температуре) занимает один и тот же объем, то, по-видимому, целесообразно оценивать формирование газовой защиты при термической деструкции компонентов сердечника порошковой проволоки в мольных количествах. При расчетах мольного количества защитных газов учитывались составы проволок. Данные температурных зависимо-

стей образования мольных количеств защитных газов, отнесенных к массе проволоки, представлены на рис. 3. Эти данные могут подтвердить, что защитные свойства композиции порошковой проволоки при сварке в отсутствие внешнего влияния воздушных потоков на зону сварки напрямую зависят от объемов защитных газов, образующихся при нагреве и плавлении сердечника. Так, лучшие характеристики из четырех рассматриваемых проволок обеспечивает композиция проволоки КФ4, худшие — КФ1. Но этот подход не может объяснить разницу в защитных характеристиках композиции проволок КФ3 и КФ2 при сварке под воздействием воздушных потоков. При скорости воздушного потока выше 5 м/с проволока КФ2 характеризуется более устойчивой защитой к воздействию ветрового потока, чем КФ3, хотя объем защитных газов, образующихся при нагреве и плавлении сердечника проволоки КФ3 выше, чем КФ2. Процесс образования защитной атмосферы при нагреве шихты проволоки КФ3 происходит в сравнительно узком температурном интервале. Учитывая квазистационарность распределения температур при нагреве порошковой проволоки на вылете, это приводит к сужению размеров зоны генерации газов на вылете порошковой проволоки. Основная масса защитных газов для сердечника проволоки КФ1 (более 75 мас. %) выделяется в интервале температур от 600 до 800  $^\circ\text{C}$  и весь процесс газообразования завершается еще до достижения 900  $^\circ\text{C}$ . Для шихты проволоки КФ2 характерно более равномерное выделение защитных газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{SiF}_4$ ) в температурном интервале от 400 до 1400  $^\circ\text{C}$ , что обуславливается использованием смеси карбонатов и большей долей плавней в шихте. До образования в шихтовой композиции расплава карбонат натрия способствует началу реакции диссоциации карбоната кальция, а после образования расплава — тормозит выделение защитных газов (см. рис. 3).

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что для обеспечения высокой эффективности газовой защиты при сварке самозащитными порошковыми проволоками важно не только обеспечить генерацию большого объема защитных газов, но и управлять процессами газо-

Таблица 2. Статистические характеристики процесса сварки опытными самозащитными порошковыми проволоками

Содержание карбоната лития в проволоке, мас. %	Напряжение дуги			Сварочный ток			Среднее значение времени коротких замыканий, мкс	Частота коротких замыканий, $\text{с}^{-1}$
	Среднее значение, В	Стандартное отклонение, В	Коэффициент вариации	Среднее значение, А	Стандартное отклонение, А	Коэффициент вариации		
0	23,1	2,3	0,10	289,1	28,0	0,10	112,5	4
1	21,8	1,6	0,07	296,4	24,9	0,08	159,7	15
2	22,9	2,4	0,10	283,0	36,0	0,15	225,0	26
3	22,0	3,8	0,17	294,5	49,4	0,17	532,0	75

выделения для создания защитной атмосферы на всех этапах нагрева и плавления порошковой проволоки, переноса электродного металла и формирования сварочной ванны.

Затраты тепла на нагрев и плавление порошкового сердечника могут существенным образом влиять на сварочно-технологические свойства порошковой проволоки [1]. Оценку таких затрат можно провести, используя данные дифференциальной сканирующей калориметрии на примере шихт порошковых проволок карбонатно-флюоритного типа, содержащих карбонат лития (рис. 4). При нагреве модельной шихты порошковой проволоки тепло расходуется на плавление и термическую диссоциацию  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , приводящую к образованию  $\text{Li}_2\text{O}$  в шлаковой фазе и выделение в газовую фазу  $\text{CO}_2$ . При этом суммарный затратный тепловой эффект ( $H_\Sigma$ , см. рис. 3) может достигать 20,5 кДж/г модельного сердечника. Эти данные позволяют оценить тепловой баланс при нагреве и плавлении порошковой проволоки, сердечник которой содержит карбонат лития. Так, например, при сварке порошковой проволокой диаметром 1,6 мм, содержащей 1 мас. %  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , на режиме  $U_d$  примерно 24 В и  $I_{св}$  около 250 А ( $v_{п.п.}$  около 3,5 м/мин.) до 2,4 % подведенной энергии будет расходоваться на нагрев, плавление и термическую диссоциацию компонентов сердечника проволоки, что приводит к заметному ухудшению сварочно-технологических свойств — понижению стабильности горения дуги, повышенному разбрызгиванию электродного металла.

Оценку сварочно-технологических свойств самозащитных порошковых проволок с различным содержанием карбоната лития в сердечнике проводили на примере проволоки трубчатой конструкции диаметром 1,6 мм. При этом сварку вели на постоянном токе прямой полярности. Результаты статистической обработки значений сварочного тока и напряжения дуговой сварки этими порошковыми проволоками, полученные с помощью системы, использующей скоростные аналого-цифровые преобразователи, для мониторинга и обработки электрических сигналов дуговой сварки с частотой 50 кГц [5], приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Таблица 3. Показатели технологических свойств порошковых проволок, содержащих различное количество карбонатов в сердечнике

Содержание карбоната лития в проволоке, мас. %	Напряжение дуги, В	Сварочный ток, А	Потери на разбрызгивание, %	Отделимость шлаковой корки, баллы	Наличие дефектов
0	19...22	220...270	5,1	3	Нет
	23...26	250...300	4,8	3	Поры
1	19...22	220...250	5,2	5	Нет
	23...26	250...300	4,9	5	Нет
2	19...22	250...300	7,2	5	—
	23...27	310...350	6,9	5	—
3	18...22	240...290	11,3	4	—
	22...24	300...350	9,3	4	—

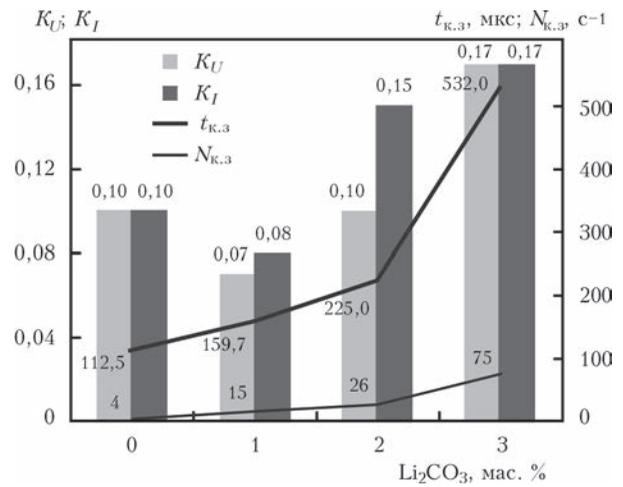


Рис. 5. Коэффициенты вариации напряжения дуги  $K_U$  и сварочного тока  $K_I$ , среднее время  $t_{к.з}$  и частота коротких замыканий  $N_{к.з}$  при сварке опытными самозащитными порошковыми проволоками в зависимости от содержания карбоната лития в сердечнике проволоки

Полученные данные показывают, что содержание карбоната лития в сердечнике проволоки не оказывает существенного влияния на технологические характеристики процесса при его содержании до 2 % массы проволоки. Превышение этого значения ведет к повышению разбрызгивания электродного металла (см. табл. 3).

В общем случае, введение карбонатов способствует улучшению отделимости шлака по краям металла шва. Это улучшение объясняется влиянием оксидов, образующихся при разложении карбонатов, на гомогенизацию шлака. Увеличение содержания карбонатов в сердечнике проволоки выше 2 мас. % улучшает газовую защиту несущественным образом, однако при этом приводит к заметным изменениям химического состава металла шва — несколько снижается содержание раскисляющих и легирующих элементов в металле шва, а содержание кислорода повышается. Таким образом, можно сделать вывод, что содержание карбонатов в проволоке целесообразно ограничить на уровне 1...2 % от ее массы, что позволяет сохранить на приемлемом уровне показатели, характеризующие устойчивость процесса сварки, и при этом обеспечить эффективную газо-

вую защиту металла и хорошую отделимость шлаковой корки.

В заключение следует отметить, что исследования физико-химических свойств порошковых материалов и их смесей, которые моделируют сердечники порошковых проволок, проводимые методами комплексного термического анализа (дифференциального термического, термогравиметрического, дифференциального термогравиметрического анализа и сканирующей калориметрии), а также методом масс-спектропии газовой фазы при динамическом нагревании до температуры плавления стали, показали, что процесс нагревания смесей порошковых материалов, которые содержат газо- и шлакообразующие компоненты вместе с металлическими порошками сопровождается протеканием реакций диссоциации с газовыделением, окислением и плавлением смесей и образованием первичного расплава металлической и шлаковой фаз. Образование шлакового расплава еще на стадии нагрева порошкового сердечника до плавления оболочки проволоки и выделение газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SiF}_4$ ) способствует улучшению защитных функций порошковых проволок при сварке без дополнительной защиты. Тепловые эффекты термических реакций, которые сопровождают процесс нагревания, протекают одновременно (эндотермические процессы деструкции, плавление и экзотермические окисления и образования ком-

плексных соединений). Управление этими реакциями за счет изменения состава смеси позволяет регулировать скорость плавления сердечника, способствует формированию благоприятных характеристик плавления порошковой проволоки и переноса электродного металла в сварочную ванну.

В качестве компонентов порошковой проволоки, которые снижают температуру начала оплавления сердечника, целесообразно использовать металлические порошки на основе алюминия и его сплавов, неметаллические шлако- и газообразующие компоненты типа карбонатов, оксидов и фторидов щелочных металлов.

1. *Widger D.* Tubular cored wire welding // *New developments in advanced welding* / Ed. Dr. Nasir Ahmed. – Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2005. – P. 21–39.
2. *Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие газов с металлами* / И.К. Походня, И.Р. Явдошин, В.И. Швачко и др. // Под ред. И.К. Походни. – Киев: Наук. думка, 2004. – 444 с.
3. *Shlepakov V.N., Suprun S.A., Kotelchuk A.S.* Estimating of the characteristics of flux-cored wire welding under the wind flow effect // *Welding under extreme conditions. Proc. of Intern. conf., Helsinki, Finland, 4–5 Sept., 1989.* – Oxford, New York: Pergamon Press, 1990. – P. 171–179.
4. *Шлепаков В.Н., Котельчук А.С.* Исследование термических характеристик смесей дисперсных материалов методами динамического термического анализа // *Автомат. сварка.* – 2011. – № 12. – С. 16–19.
5. *Arc welding process statistical analysis. Methodical approaches, analysis conceptions, experiences. Manual-guide* / V. Ponomarev, O. Al-Erhayem, R.L. Apps, B. Lindberg. – DTU-Helsingor, Denmark: JOM-Institute, 1997. – 158 p.

Поступила в редакцию 29.10.2015



Ассоциация «Электрод»

ООО Промышленная  
компания «ХОБЭКС электрод»



при поддержке

Российского научно-технического сварочного общества и Общества сварщиков Украины

## **IX Международная конференция «Дуговая сварка. Материалы и качество»**

*Посвящается 50-летию Первой всесоюзной конференции  
по сварочным материалам (1966 г.)  
и 25-летию создания ассоциации «Электрод» (1990 г.).*

31 мая – 3 июня 2016 г.

г. Волгоград

### Тематика конференции

- Совершенствование дуговых процессов сварки
- Разработка инновационных сварочных материалов
- Технологии производства материалов и подготовка кадров
- Качество и конкурентоспособность материалов

<http://association-electrode.com>; тел./факс: (+38044) 200 63 02.

E-mail: [office@association-electrode.com](mailto:office@association-electrode.com)

Информационная поддержка: журнал «Автоматическая сварка»