



## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ СВОЙСТВ СВАРОЧНЫХ ПОРШКОВЫХ ПРОВОЛОК\*

В. Н. ШЛЕПАКОВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показана актуальность совершенствования методов прогнозирования и оценки свойств сварочных материалов для дальнейшего прогресса в использовании механизированных и автоматизированных процессов сварки.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, сварочные материалы, порошковые проволоки, эффективность использования, методы исследования, прогнозирование и оценка свойств

Повышение эффективности, качественных и экологических показателей сварочных технологий вызывает необходимость ужесточения требований к сварочным материалам. Использование известных положений металлургии и технологии дуговой сварки плавлением может служить основной, но недостаточной базой для комплексного решения задач сварочного производства.

За последние два десятилетия развитие сварки порошковой проволокой привело к созданию новых типов этого электродного материала и специализированных технологий с их использованием [1–3], что способствовало расширению областей и объемов применения способа и повышению его конкурентоспособности по сравнению с другими технологиями. Решение задач совершенствования способа потребовало создания и использования современных подходов к прогнозированию свойств, аналитических методов и экспериментальных процедур, обеспечивающих получение количественных данных и зависимостей, корригирующих с достигаемыми результатами.

**Процессы, сопровождающие плавление порошковой проволоки.** При сварке порошковой проволокой ток преимущественно протекает по оболочке, поэтому его плотность и производительность плавления выше, чем при использовании проволок сплошного сечения равного диаметра. Учитывая высокую скорость плавления, нагрев и плавление сердечника происходят преимущественно в результате теплопередачи с торца оплавленной проволоки и в меньшей степени от оболочки. При этом доля тепла, поступающего в сердечник от оболочки, возрастает с увеличением величины вылета [4]. Специфические условия плавления порошкового сердечника определяют влияние его состава на характеристики плавления проволоки, перенос электродного металла, состав и свойства газовой и шлаковой фаз, взаимодействующих с расплав-

ленным металлом. Для прогнозирования указанных процессов в ИЭС им. Е. О. Патона успешно используется комплексный термический анализ компонентов и порошковых смесей — моделей сердечника проволок.

Исследована кинетика процессов термодеструкции карбонатов, фторидов, органических материалов, процессов образования расплавов, окисления металлических порошков, испарения влаги, что позволило создать банк данных физико-химических свойств материалов сердечника при непрерывном нагреве. Существенным шагом в развитии представлений о реально протекающем процессе явилась разработка и реализации методики прогнозирования развития реакций при реальных скоростях нагрева и плавления проволоки, достигающих  $10^4 \dots 10^6$  К/мин. Программа расчета базируется на использовании данных динамического термогравиметрического анализа с различной скоростью нагрева, позволяющих получить сведения об энергии активации реакций, механизме и последовательности протекающих процессов. Расчеты с использованием ЭВМ позволили построить кинетические диаграммы степени развития реакций диссоциации карбонатов и фторидов, играющих существенную роль в металлургических процессах [5].

В результате комплексного термоанализа порошковых смесей (моделей сердечника проволок) установлены закономерности развития реакций между компонентами и влияние состава смеси на кинетику процессов, протекающих при нагреве и плавлении. Изучение процессов окисления порошка железа и ферросплавов показало, что скорости окисления невелики и влияние газовой выделения при диссоциации карбонатов на этот процесс незначительно. На кинетику газовой выделения существенно влияет состав смеси, что дает возможность регулировать процессы образования углекислого газа и летучих фторидов при плавлении проволоки [6].

Исследование кинетики испарения влаги из материалов сердечника показало, что нагрев на вылете проволоки позволяет удалить лишь некоторую часть паров воды. Поэтому необходимы дополнительные металлургические и технологические меры для снижения содержания водорода в металле. Волоочильная смазка, находящаяся на поверхности проволоки, служит не только источником поступления водорода в атмосферу дуги, но

\* По материалам доклада, заслушанного на III Международной конференции по сварочным материалам стран СНГ (г. Днепропетровск, 1–4 июня 2004 г.).



и одним из источников выделения сварочного аэрозоля. Термодеструкция волоочильной смазки протекает в несколько стадий со скоростью, которая не обеспечивает ее полное выгорание при нагреве на вылете.

Результаты исследований свойств материалов сердечника и порошковых смесей позволяют прогнозировать состав газовой и шлаковой фаз, вступающих во взаимодействие с расплавленным металлом, и характеристики плавления проволоки.

#### **Реакции расплавленного металла с газами.**

При дуговой сварке плавлением на процессы поглощения металлом газов (кислорода, азота, водорода) влияет большое количество факторов, что существенно осложняет анализ их влияния на газонасыщенность металла сварного шва. Особенности плавления порошковой проволоки, обусловленные расположением порошковых материалов внутри металлической оболочки и развитием реакций при нагреве и плавлении порошкового композита, требуют неперемного учета особых условий взаимодействия металла с газами. В условиях установившегося сварочного процесса допустимо принимать термодинамические параметры (распределение температур, концентраций и давления), близкие к состоянию динамического равновесия в пределах зоны плавления. При этих условиях поглощение газа может быть описано гладкой кинетической функцией градиентной системы [7]. Определение функции по интегральному значению через градиент концентраций возможно при принятии схемы контакта фаз. Для условий сварки порошковой проволокой с учетом существования стадий капли электродного металла и металла сварочной ванны целесообразно процесс взаимодействия металла с газами рассматривать как двухстадийный с общей газовой фазой. На стадии ванны протекает типичное для способов сварки плавлением разбавление электродного металла оплаиваемой частью основного. В то же время на стадии капли, кроме непрерывного обновления металла капли оплаиваемой обложкой, протекает разбавление металлическими порошками. Шлаковая фаза на стадии капли в значительной степени гетерогенная в результате непрерывного оплавления твердых частиц неметаллических составляющих сердечника и протекания реакций взаимодействия и термодеструкции веществ. При моделировании поглощения газов в металле расчеты удобно проводить с использованием масс в мольных долях, что позволяет избежать ошибок при пересчетах на объемные или массовые проценты и обеспечивает сквозной анализ двухстадийного процесса.

В качестве базовых положений, сформулированных в ходе расчетов, можно выделить следующие. С позиций снижения поглощения газов в металле следует обеспечивать постоянство соотношения масс металла в мольных долях и газа при изменении скорости плавления проволоки и свойств шлаковой фазы, образующейся при плавлении сердечника. Поглощение металлом газов из атмосферы дуги при мелкокапельном переносе более активное. На стадии ванны закономерности

поглощения металлом газов совпадают с установленными для сварки покрытыми электродами и проволоками сплошного сечения в защитных газах. Поглощение газов металлом на стадии капли при сварке порошковой проволокой находится в существенной зависимости от свойств сердечника и условий плавления, включая параметры сварки. Это в наибольшей степени проявляется при сварке самозащитной порошковой проволокой, при создании композиций, из которых особое внимание уделяется, например, принятию мер металлургического характера для снижения содержания газов (использование нитридообразующих элементов в сочетании с активными раскислителями, комплексных фторидов, комбинаций карбонатов и т. п.).

**Свойства порошковых проволок.** Учитываются обычно три основные группы свойств сварочных порошковых проволок: сварочно-технологические (оперативные), санитарно-гигиенические, а также состав и свойства металла шва (сварного соединения). Соответствующие требования сформулированы в национальных и международных стандартах, в частности ГОСТ 26271-91, AWS/SFA A5.20 и A5.29, евроstandarte EN 758 и др. В стандарты включаются только те технические требования, которые могут быть проверены изготовителем, потребителем и независимой специализированной экспертизой с достаточной степенью объективности.

Из группы сварочно-технологических свойств в стандарты включены преимущественно требования технологического качества (отсутствие пор, трещин, шлаковых включений), которые могут быть проверены методами неразрушающего контроля, осмотром и разрушением технологических проб. В ряде стандартов присутствуют факультативные требования по оперативным свойствам, так как отсутствуют общепринятые методики.

Необходимость достижения высоких сварочно-технологических свойств существенно возрастает в связи с обострением конкуренции на рынке сварочных материалов. В то же время можно выделить работы по исследованию стабильности горения дуги и методам оценки на основе статистического анализа [8], а также по оценке влияния металлургических факторов, в частности поверхностного натяжения и вязкости шлаков, на сварочно-технологические свойства при сварке порошковой проволокой в различных пространственных положениях [9].

Особое внимание сегодня следует уделять проблеме обеспечения наиболее безопасных санитарно-гигиенических условий сварки. Требования по этой группе свойств определены в соответствующем разделе ГОСТ 26271-91 и Санитарных нормах по сварке. Методики оценки санитарно-гигиенических свойств в основном имеют специализированные организации. Имеющиеся публикации освещают вопросы влияния различных факторов преимущественно на выделение твердой фазы сварочного аэрозоля, а также на использование современных средств вентиляции и индивидуальной защиты при дуговой сварке. Нерешенность ряда проблем улучшения санитарно-гигиенических



свойств при электродуговой сварке плавлением может стать одним из наиболее сдерживающих факторов применения технологии.

Требования к составу и свойствам металла шва и сварного соединения наиболее полно сформулированы в стандартах на сварочные порошковые проволоки. Методики определения свойств стандартизированы, за исключением анализа содержания диффузионного водорода в металле шва. Приоритетное положение занимает методика хромографического анализа. Недостатка в публикациях по проблеме водорода нет. Актуальность проблемы снижения содержания водорода в металле диктуется постоянным увеличением объема применения высокопрочных сталей [10], при сварке которых достижение низких и ультранизких содержаний диффузионного водорода в металле швов существенно снижает вероятность появления холодных трещин.

В современных стандартах на стали указаны требования к механическим свойствам металла шва и сварного соединения (классификация по пределу текучести, определение ударной вязкости на образцах с острым надрезом и т. п.). Несмотря на достаточно большое количество публикаций по вопросам исследования различных аспектов обеспечения выполнения требований к свойствам, системный подход к решению проблем освещен мало. Среди наиболее значимых можно выделить публикации по прогнозированию с использованием нейронных сетей показателей прочности и вязкости сварных соединений сталей [11], а также методам прогнозирования свойств металла шва, учитывающим состав металла, скорость охлаждения, особенности кристаллизации и образования неметаллических включений [12].

Создание, развитие и широкое применение современных методов прогнозирования и оценки

The paper shows the urgency of improvement of the methods of prediction and evaluation of welding consumable properties to achieve further progress in their application in the mechanized and automated welding processes.

свойств сварочных материалов и, в частности, порошковых проволок, позволит ускорить прогресс в развитии механизированных и автоматизированных процессов сварки, повышении качества и долговечности сварных конструкций.

1. *Походня И. К.* Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // Автомат. сварка. — 2003. — № 3. — С. 9–19.
2. *Heuwood J.* Cored wire review // Svetsaren. — 1996. — № 1/2. — Р. 3–5.
3. *Myers D.* Metal cored wires: advantages, disadvantages // Welding J. — 2002. — № 9. — Р. 39–42.
4. *Походня И. К., Сунтель А. М., Шлепаков В. Н.* Сварка порошковой проволокой. — Киев: Наук. думка, 1972. — 210 с.
5. *Шлепаков В. Н., Сунтури С. А., Котельчук А. С.* Кинетика газообразования при сварке порошковой проволокой // Информационные материалы СЭВ. — Киев: Наук. думка, 1986. — Вып. 1. — С. 19–28.
6. *Pokhodnya I. K., Shlepakov V. N.* Welding with flux-cored wire / Ed. B. E. Paton. — Singapore: Harwood Acad. publ., 1995. — Vol. 4. — Pt 4. — 75 p. — (Welding and Surfacing Reviews).
7. *Шлепаков В. Н.* Кинетика процессов взаимодействия металла с газами при сварке порошковой проволокой // Проблемы сварки и специальной электротехнологии: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 168–173.
8. *Шлепаков В. Н., Котельчук А. С., Сунтури С. А.* Идентификация состава порошковых проволок по электрическим сигналам дуговой сварки // Автомат. сварка. — 1999. — № 8. — С. 37–42.
9. *Шлепаков В. Н., Наумейко С. М.* Влияние поверхностного натяжения солеоксидных сварочных шлаков на показатели сварочно-технологических свойств самозащитной порошковой проволоки // Там же. — 2001. — № 11. — С. 24–27.
10. *Патон Б. Е.* Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Там же. — 2003. — № 10/11. — С. 7–13.
11. *Neural network analysis of strength and ductility of welding alloy shipbuilding steels* / E. A. Metzbowler, J. J. De Loach, S. H. Lalam, H. K. D. H. Bhadeshia // Science and Technology of Welding J. — 2001. — 6, № 2. — Р. 116–124.
12. *Прогнозирование свойств металла шва повышенной прочности* / Д. Л. Олсон, Э. Метцбауэр, С. Лиу, И. Д. Парк // Автомат. сварка. — 2003. — № 10/11. — С. 32–39.

Поступила в редакцию 27.12.2004

## ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ШТОКОВ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

*Разработана порошковая проволока ПП-Нп-30Х20МН и технология электродуговой наплавки штоков гидроцилиндров различных механизмов и машин — крепей шахтных проходческих комбайнов, карьерных автосамосвалов и т.д.*

*Штоки гидроцилиндров изготавливают из сталей типа 30Х и для защиты от коррозии их рабочую поверхность хромируют. По предложенной технологии наплавка изношенных штоков может производиться после предварительной механической обработки рабочей поверхности или непосредственно по хромовому гальваническому покрытию.*

*Штоки наплавляются в один слой под флюсом АН-26П. Разработанная порошковая проволока обеспечивает получение наплавленного металла системы легирования Fe-Cr-Ni-Mo, обладающего высокой коррозионной стойкостью в первом наплавленном слое. Шлифовка наплавленной поверхности обеспечивает необходимую чистоту, а высокая коррозионная стойкость наплавленного слоя исключает операцию хромирования. Имеется опыт наплавки штоков диаметром 70 мм и выше.*

**Назначение и область применения.** Наплавка штоков гидроцилиндров.

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 2  
Тел./факс: (380044) 287 63 57