



## АГЛОМЕРИРОВАННЫЕ ФЛЮСЫ В ОТЕЧЕСТВЕННОМ СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ (Обзор)

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

Отмечен приоритет СССР в создании агломерированных (керамических) флюсов. Описаны этапы развития исследований по их совершенствованию и расширению областей применения.

*Ключевые слова:* дуговая сварка под флюсом, агломерированные флюсы, приоритет создания, этапы исследований

Агломерированные флюсы представляют собой цементированную связующим веществом или спеканием механическую смесь порошкообразных компонентов, которая изготовлена в виде крупки соответствующей грануляции. Каждая гранула агломерированного флюса, состоящая из прочно соединенных мелких частиц, характеризуется постоянством соотношения всех ингредиентов. Гранулы различного размера близки по удельному весу, что обеспечивает отсутствие сепарации флюса при его использовании. Этим агломерированные флюсы выгодно отличаются от других неплавленных флюсов (механических смесей).

Некоторое сходство в изготовлении гранулированных неплавленных флюсов и керамических изделий (измельчение материалов, формирование совместно со связующим веществом, последующая термическая обработка) послужило основанием для названия этих флюсов в советской научно-технической литературе и нормативной керамическими флюсами [1]. В зарубежной литературе флюсы этого типа называют агломерированными (agglomerated fluxes), а в документах Международного института сварки и ISO они классифицируются как связанные флюсы (bonded fluxes).

Приоритет разработки керамических (агломерированных) флюсов принадлежит Советскому Союзу. Предпосылкой для создания керамических флюсов послужили проведенные еще в 1937 г. в сварочной лаборатории МВТУ им. Н. Э. Баумана опыты по автоматической сварке с подачей в зону горения дуги неплавленного флюса [2]. По предложению К. К. Хренова в этих опытах впервые был использован гранулированный неплавленный флюс, изготовленный из шихты электродного покрытия. Флюс подавали в небольшом количестве и сварку проводили открытой дугой. Эта работа не получила в то время дальнейшего развития, однако, показала технологические преимущества гранулированного флюса по сравнению с порошкообразными флюсами-смесями.

Более глубокие исследования по разработке состава керамических флюсов для сварки погруженной дугой, изучению металлургических и технологических особенностей этого вида сварочных материалов, разработке технологии их изготовления и применения в СССР были начаты в 1948 г. Д. М. Кушнеревым под руководством академика К. К. Хренова на кафедре сварочного производства Киевского политехнического института, а с 1949 г. — в лаборатории электротермии Института строительной механики АН УССР.

В 1951 г. на керамические флюсы было выдано Регистрационное свидетельство Гостехники СССР № 2981-51-8 с приоритетом от 3 февраля 1951 г. на имя К. К. Хренова и Д. М. Кушнера.

Уже в первых работах была показана принципиальная возможность использования в составе керамических флюсов, кроме обычных шлакообразующих компонентов, также ферросплавов, металлов, углеродистых веществ, карбонатов, высших оксидов железа и марганца [3, 4]. В этот же период были определены широкие возможности керамических флюсов в отношении легирования наплавленного металла при использовании низкоуглеродистой электродной проволоки, повышения стойкости сварных швов против образования пор [4].

Следует отметить, что к началу 1950-х годов в СССР уже существовало централизованное промышленное производство плавящихся флюсов, которые нашли широкое применение во многих отраслях промышленности. Однако ассортимент сварочных проволок, выпускаемых в то время отечественной промышленностью, был весьма ограничен и не удовлетворял многим запросам потребителей. Наряду с ограниченными возможностями металлургического воздействия на металл шва плавящиеся флюсы также отличались высокой чувствительностью к наличию влаги или ржавчины на свариваемых кромках. В условиях, когда основным материалом для изготовления сварных металлоконструкций была низкоуглеродистая кипящая или полуспокойная сталь, наличие ржавчины в разделке вызывало пористость сварных швов [5].



Широкие возможности варьирования составом шихты керамических флюсов позволили успешно преодолевать эти проблемы. Кроме того, при введении различных ферросплавов, легирующих металлических добавок, лигатур керамические флюсы благодаря легированию металла швов обеспечивали повышение уровня их прочности, вязкости, твердости и износостойкости [6–9].

Сварка под флюсом была новым высокоэффективным процессом, благодаря которому не только повышалась производительность (в несколько раз), но и гарантировалась высокая воспроизводимость результатов, при этом существенно снижались требования к квалификации рабочих-сварщиков. На начальном этапе развития сварочных флюсов рассматривались как средство для защиты зоны горения дуги от воздействия воздуха и потерь электродного металла, а также для защиты окружающего персонала от излучения дуги.

Полноценная реализация уникальных возможностей нового процесса сварки требовала углубленного изучения, проведения научных исследований. Работы, выполненные в этом направлении, систематизированы в ряде монографий [10–12]. Благодаря реализации фундаментальных положений, изложенных в них, были созданы керамические флюсы, увеличивающие в 2...3 раза стойкость против образования пор [13].

С повышением качества сталей изменились приоритеты в области сварочных материалов. Появилась необходимость в создании флюсов с низким содержанием вредных примесей, высокой рафинирующей способностью, рациональным легированием. В Академии наук СССР были развернуты систематические исследования металлургических особенностей сварки под керамическими флюсами с учетом возросших требований к качеству сварных соединений и расширению номенклатуры свариваемых сталей. В результате этих работ экспериментально установлены коэффициенты перехода легирующих элементов из флюса в наплавленный металл, а также степень влияния параметров режима сварки на переход легирующих элементов, что с достаточной для практических целей точностью позволило рассчитывать состав легирующей части флюсов по заданному составу наплавленного металла. Проведенные исследования показали, что керамические флюсы могут не только легировать наплавленный металл, но и существенно снижать содержание в нем вредных примесей, улучшать структуру путем модифицирования. Эти особенности реализованы, например, при создании флюсов повышенной основности, обеспечивающих минимальное окисление легирующих элементов в сварочной ванне, повышенную стойкость металла швов против образования трещин [14–16].

Освоение отечественной металлургией технологии массового производства низколегированных сталей повышенной и высокой прочности, расширение объемов их использования при изготовлении сварных металлоконструкций вывело на первый план проблему снижения содержания водорода в металле сварных швов. Сформулированные В. И. Дятловым [17] положения о преимущественном развитии при сварке под флюсом металлургических реакций в газовой фазе нашли свое развитие в области разработки флюсов, предназначенных для сварки низколегированных сталей. В результате исследования особенностей протекания металлургических реакций при сварке под керамическими флюсами, систематизированных в диссертационной работе Д. М. Кушнера, установлено, что применение определенного количества карбонатов и высших оксидов железа в шлакообразующей основе флюсов позволяет снизить как парциальное давление водорода в атмосфере горения дуги, так и его содержание в металле швов и околшовоной зоны и, благодаря этому, обеспечить высокую стойкость против образования трещин при сварке сталей больших толщин. На практике данные разработки были реализованы в виде флюсов для сварки хромоникелевых нержавеющей сталей [18]. В ЦНИИТМаш под руководством К. В. Любавского были разработаны бескислородные керамические флюсы типа ФЦК для сварки высоколегированных сталей [19], а в Ждановском металлургическом институте К. В. Багрянским — серия керамических флюсов для наплавки деталей металлургического оборудования [20].

С начала 1960-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона были развернуты систематические исследования по разработке состава керамических флюсов, технологии сварки и наплавки с их применением, а также технологии механизированного промышленного изготовления флюсов этого вида. Результаты исследований в области металлургии сварки под керамическими флюсами [21, 22], обобщенные в диссертационных работах В. Г. Свещинского [23] и В. М. Кирьякова, были реализованы при освоении технологии промышленного производства керамических флюсов на Нижнеднепровском заводе металлоизделий [24].

Появление новых марок низколегированных сталей, обеспечивающих в результате термомеханической обработки временное сопротивление разрыву на уровне не ниже 650 МПа и высокую ударную вязкость при низких климатических температурах, выдвинуло перед разработчиками новую проблему — получение литого металла швов, которые по уровню своих механических свойств не уступали бы основному металлу. Для решения этой задачи потребовалось проведение исследований по изучению возможности управления



структурой металла швов путем варьирования составом сварочного флюса. В результате проведения таких работ в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством профессора И. К. Походни была сформулирована новая концепция построения состава керамических флюсов, в соответствии с которой основное легирование металла шва должно проводиться за счет электродной проволоки (сплошного сечения или порошковой), а на флюс возлагаются функции обеспечения рафинирования, микролегирования и модифицирования металла сварочной ванны. С использованием указанных подходов разработаны керамические флюсы для сварки конструкций из низколегированных сталей в химическом машиностроении, при заводском изготовлении мостовых металлоконструкций [25, 26]. Объемы производства керамических флюсов в СССР в этот период времени достигали 2000 т в год.

Существенное повышение качества проката для изготовления сварных конструкций в последней четверти XX века вызвало необходимость создания сварочных материалов нового поколения, разработанных на базе фундаментальных исследований металлургии дуговых способов сварки, физико-химических процессов в шлаковых и металлических системах, металловедения низколегированных сталей. Сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона выполнен большой объем исследований, направленных на разработку научных подходов к решению проблем формирования оптимальной структуры металла сварных соединений, требуемого уровня показателей формирования металла швов, обеспечения регламентируемых характеристик сварных конструкций низколегированных сталей повышенной и высокой прочности. В результате проведенных работ, обобщенных в диссертационных работах В. В. Головки и С. Д. Устинова, установлено положительное влияние определенных неметаллических включений на зарождение и развитие ферритных составляющих металла швов низколегированных высокопрочных сталей, обеспечивающих повышение как прочности, так и вязкости сварных соединений [27–29]. Агломерированные флюсы, созданные в этот период, нашли применение при сварке в общем и специальном судостроении, при изготовлении стационарных и полупогружных платформ для проведения работ на шельфе Мирового океана [30].

С конца 1990-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона проведены систематические исследования по изучению возможностей влияния сварочного флюса на условия формирования микроструктуры металла швов. Была показана возможность путем управления кислородным потенциалом флюса и легирующей способностью композиции сварочных материалов формировать в составе металла шва неметаллические включения заданного состава и

обеспечивать упрочнение его структуры путем легирования твердого раствора.

В современном материаловедении неметаллические включения рассматриваются как активные центры формирования требуемой микроструктуры, без которых невозможно обеспечить получение сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей с уровнем механических свойств, соответствующих основному металлу. В зарубежной литературе такое направление получило название «оксидная металлургия», а технология получения в металле включений определенного состава, морфологии и распределения по размерам — «инжиниринг включений» [31, 32]. Проведенные термодинамические расчеты, числовое моделирование процессов формирования неметаллических включений как в жидком металле сварочной ванны, так и в области ее твердого состояния, систематизированные в работе [33], позволяют вывести работы по созданию современных отечественных агломерированных флюсов на новый уровень, обеспечивающий их высокую конкурентную способность по сравнению с разработками ведущих мировых производителей сварочных материалов.

Рассмотрение различных по своей металлургии процессов, применяемых для изготовления сварочных флюсов как единого технологического комплекса, позволило предложить новый процесс получения флюса, который объединил такие преимущества плавящихся флюсов, как пониженную склонность к сорбированию атмосферной влаги, высокую стойкость гранул флюса против разрушения в процессе его использования с широкими возможностями влияния на металлургические процессы в зоне горения дуги и сварочной ванне, характерные для агломерированных флюсов [34]. Новая технология предусматривает рафинирование низкосортных сырьевых материалов путем их плавления в газопламенной печи с последующей обработкой в электродуговой печи и использование в качестве шихтовых компонентов в составе агломерированных флюсов. В процессе газопламенной обработки в результате высокой окислительной способности газовой среды достигается существенное снижение содержания серы в шлаке, а особенности металлургических процессов в электродуговой печи позволяют рафинировать расплав по фосфору. В процессе изготовления агломерированного флюса шихтовые материалы, входящие в его состав, не проходят термической обработки, которая позволила бы проводить такое рафинирование, поэтому к их составу предъявляются повышенные требования по содержанию вредных примесей. Использование синтетических шлаков повышенной чистоты в составе агломерированных флюсов расширяет ассортимент высококачественных сырьевых материалов, а также

повышает такие потребительские характеристики флюсов, как стойкость против сорбирования атмосферной влаги и разрушения гранул в процессе использования флюса за счет наличия в их составе плавящихся продуктов. При этом сохраняется присущая агломерированным флюсам возможность гибкого влияния на металлургию сварочных процессов. Внедрение такой технологии изготовления сварочных флюсов в промышленности пока-зало, что отечественные агломерированные флюсы, не уступающие по своим регламентированным показателям зарубежным аналогам, имеют перед ними преимущества в экономичности применения.

1. Хренов К. К. Керамический неплавленный флюс для автоматической сварки // Сборник, посвященный восьмидесятилетию со дня рождения Е. О. Патона. — Киев: Изд-во АН УССР, 1951. — С. 229–234.
2. Назаров С. Т., Чистяков А. Н. Автоматическая дуговая сварка с подачей гранулированного флюса в дугу // Автоген. дело. — 1939. — № 4. — С. 27–30.
3. Хренов К. К., Ярхо В. И. Технология дуговой электросварки. — М.: Машгиз, 1940. — 278 с.
4. Хренов К. К., Кушнерев Д. М. Керамические неплавленные флюсы для автоматической сварки // Автоген. дело. — 1951. — № 6. — С. 1–4.
5. Підгаєцький В. В. Пори, включення і тріщини у зварних швах. Процеси утворення і способи запобігання. — К.: Техніка, 1970. — 236 с.
6. Космачев И. Г. Автоматическая наплавка многолезвийного инструмента. — М., Л.: Машгиз, 1952. — 35 с.
7. Хренов К. К., Кушнерев Д. М. Керамические неплавленные флюсы для автоматической сварки // Новые способы сварки и резки металлов. — Киев: Гостехиздат УССР, 1953. — 31 с.
8. Хренов К. К., Кушнерев Д. М. Керамические флюсы для автоматической дуговой сварки. — Киев: Гостехиздат УССР, 1954. — 106 с.
9. Багрянский К. В. Автоматическая наплавка прокатных валков // Сборник докл. науч.-техн. конф. сварщиков. — М.: Машгиз, 1955.
10. Автоматическая сварка под флюсом / Под ред. Е. О. Патона, В. В. Шеверницкого, Б. И. Медовара. — Киев, М.: Машгиз, 1948. — 344 с.
11. Автоматическая электродуговая сварка / Под ред. Е. О. Патона. — Киев, М.: Машгиз, 1953. — 396 с.
12. Фруммин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Metallurgizdat, 1961. — 421 с.
13. Кушнерев Д. М. О стойкости швов против образования пор, вызываемых ржавчиной при сварке под керамическим флюсом // Автомат. сварка. — 1959. — № 4. — С. 25–27.
14. Хренов К. К., Гапченко М. М., Кушнерев Д. М. Автоматическая сварка хладостойкой стали 12НЗ под керамическим флюсом // Там же. — 1958. — № 12. — С. 19–22.
15. Хренов К. К. и др. Особенности модифицирования титаном сварных швов при автоматической сварке среднеуглеродистой стали // Свароч. пр-во. — 1959. — № 6. — С. 26–28.
16. Кушнерев Д. М., Гребельник М. П. Керамический флюс для автоматической сварки нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т // Там же. — 1960. — № 5. — С. 34–36.
17. Дятлов В. И. Особенности металлургических процессов при сварке под флюсом // Сборник, посвященный восьмидесятилетию со дня рождения Е. О. Патона. — Киев: Изд-во АН УССР, 1951. — С. 261–267.
18. Хренов К. К., Кушнерев Д. М. Керамические флюсы для автоматической дуговой сварки и наплавки. — Киев: Гостехиздат УССР, 1961. — 263 с.
19. Любавский К. В., Львова Е. П. Новые флюсы для дуговой сварки // Свароч. пр-во. — 1958. — № 10.
20. Багрянский К. В. Автоматическая наплавка стальных валков под керамическим флюсом // Там же. — 1955. — № 5. — С. 37–41.
21. Подгаецкий В. В. Реакция окисления водорода в атмосфере дуги // Автомат. сварка. — 1963. — № 9. — С. 7–13.
22. Кушнерев Д. М., Головкин В. В., Патров Б. В. Влияние поверхностных свойств контактирующих фаз на переход легирующих элементов из керамического флюса в наплавляемый металл // Там же. — 1976. — № 2. — С. 20–23.
23. Кушнерев Д. М., Свецинский В. Г. Исследование автоматической сварки высокопрочного чугуна под керамическим флюсом // Там же. — 1963. — № 9. — С. 53–61.
24. Промышленное производство керамических флюсов / Д. М. Кушнерев, В. Г. Свецинский, В. А. Лапченко // Там же. — 1971. — № 4. — С. 66–69.
25. Механические свойства сварных соединений стали 09Г2С, выполненных под керамическим флюсом АНК-47 / Л. Н. Казаков, В. М. Донцов, В. С. Шулепов и др. // Там же. — 1984. — № 3. — С. 38–40.
26. Головкин В. В., Гребенчук В. Г. Свариваемость стали 14ХГНДЦ при различных сочетаниях флюс-проволока // Свароч. пр-во. — 1991. — № 5. — С. 13–15.
27. Оценка окислительной способности керамических флюсов / И. К. Походня, В. В. Головкин, Д. М. Кушнерев, В. И. Швачко // Автомат. сварка. — 1990. — № 2. — С. 45–48.
28. Влияние кислорода на образование структуры игольчатого феррита в низколегированном металле сварных швов / И. К. Походня, В. В. Головкин, А. В. Денисенко, В. Ф. Грабин // Там же. — 1999. — № 2. — С. 3–10.
29. Результаты сравнительных испытаний плавящихся и керамических флюсов, применяемых при сварке стали 12ХН2МДФ / И. К. Походня, Д. М. Кушнерев, С. Д. Устинов и др. // Там же. — 1987. — № 11. — С. 61–64.
30. Головкин В. В. Применение агломерированных флюсов при сварке низколегированных сталей (Обзор) // Там же. — 2004. — № 6. — С. 37–46.
31. Ogibayashi S. Advances in technology of oxide metallurgy // Nippon Steel Techn. Rept. — 1994. — 61, № 4. — P. 70–76.
32. Ma Z. T., Janke D. Oxide metallurgy — its purposes and practical approaches // Acta Met. Sinica. — 1998. — 11, № 2. — P. 79–86.
33. Головкин В. В. Моделирование состава неметаллических включений в металле сварных швов высокопрочных низколегированных сталей // Автомат. сварка. — 2004. — № 5. — С. 3–7.
34. Агломерированные флюсы — новая продукция ОАО «Запорожстеклофлюс» / В. В. Головкин, В. И. Галинич, И. А. Гончаров и др. // Там же. — 2008. — № 10. — С. 41–44.

USSR priority in development of agglomerated (ceramic) fluxes is noted. Stages of development of investigations on their improvement and widening of their application areas are described.

Поступила в редакцию 24.11.2011