



# ОТДЕЛИМОСТЬ ШЛАКОВОЙ КОРКИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ (Обзор)

## Ч. 2. ХАРАКТЕР ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА ОТДЕЛИМОСТЬ ШЛАКОВОЙ КОРКИ\*

С. И. МОРАВЕЦКИЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализировано влияние различных частных факторов на отделимость шлаковой корки при автоматической дуговой сварке. Установлено, что флюс, разрабатываемый для автоматической дуговой сварки соединений большой толщины в узкую разделку, должен обеспечивать формирование шлаковой корки, имеющей как можно более низкую прочность и как можно более высокий коэффициент термического линейного расширения. Приведена краткая характеристика существующих экспериментальных методов оценки отделимости шлаковой корки.

*Ключевые слова:* дуговая сварка под флюсом, многопроходная сварка, узкая разделка, легированные стали, шлаковая корка, отделимость, химическое сцепление, фазовый состав шлака, химический состав шлака, окислительный потенциал

Трудность удаления шлаковой корки при сварке толстостенных стыковых соединений легированных сталей в узкую разделку определяется химическим сцеплением шлака с металлом шва и механическим удерживанием корки. Механизм химического сцепления был сформулирован в 1-й части настоящей работы [1].

Механическое удерживание корки на поверхности сварного соединения может иметь место независимо от наличия или отсутствия химического сцепления. В некоторых случаях такие геометрические особенности металлической поверхности, как углубления, могут заполняться жидким шлаком, который при охлаждении застывает, что при удалении корки вызывает ее так называемое механическое заклинивание. Причиной этого могут быть нарушения технологии сварки, которые влекут за собой образование таких дефектов, как несплавления, подрезы, грубая чешуйчатость шва. Однако во многих случаях условия, вызывающие механическое удерживание корки, возникают даже при неуклонном соблюдении технологии сварки из-за разделки кромок. В процессе заполнения кромок свариваемых деталей сближаются (разделка сужается), что обуславливает фиксацию и сжатие шлаковой корки в разделке. Последнее, очевидно, будет иметь место, если сближение кромок превысит значение поперечного сокращения шлаковой корки.

При сварке действует множество частных факторов, которые влияют на полноту реализации обоих механизмов ухудшения отделимости шлаковой корки (как на химическое ее сцепление, так и механическое удерживание). Знание роли и характера влияния указанных факторов на отделимость шлаковой корки весьма важно при разработке флюса для многопроходной сварки в узкую разделку легированных сталей. В связи с этим представляет интерес анализ результатов прикладных исследований влияния наиболее значимых факторов на отделимость шлаковой корки.

Путем изменения параметров режима сварки можно заметно влиять на отделимость шлаковой корки. При сварке низкоуглеродистой стали рост погонной энергии приводит к увеличению времени контактирования размягченного шлака с закристаллизованным металлом шва. При этом толщина оксидной прослойки возрастает, а отделимость шлаковой корки ухудшается. Снижение напряжения на дуге уменьшает количество расплавленного шлака и способствует улучшению отделимости шлаковой корки [2]. Однако технология сварки низколегированных ограниченно свариваемых сталей предполагает изменение параметров режима в достаточно узких пределах, а также наличие сопутствующего подогрева. В связи с этим при сварке данных сталей указанные закономерности не имеют практического значения.

Выявлена корреляция между характером отделимости шлаковой корки, адгезией  $W$  и поверхностным натяжением  $\sigma_{\text{м-ш}}$  на межфазной поверхности металл-шлак [3]. Экспериментально доказано, что ухудшение отделимости шлаковой корки сопровождается уменьшением межфазного натяжения шлака на границе с металлом, что соответствует повышению способности смачивания

\*Начало в журнале «Автоматическая сварка» за 2011 г., № 1.



металла шлаком и интенсификации окислительно-восстановительных процессов на границе металл–шлак [4]. При этом значение адгезии, которое вычисляется по формуле Дюпре, увеличивается

$$W = \sigma_m + \sigma_{ш} - \sigma_{m-ш},$$

где  $\sigma_m$  ( $\sigma_{ш}$ ) — поверхностное натяжение металла (шлака) на границе с внешней средой.

Установлено, что при  $W > 9 \cdot 10^{-3}$  Н/см отделимость шлаковой корки неудовлетворительная независимо от сочетания шлака и наплавленного металла, при  $W < 9 \cdot 10^{-3}$  Н/см она тем лучше, чем меньше значения  $W$ .

О влиянии соотношения коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) шлака  $\alpha_{ш}$  и металла  $\alpha_m$  накоплено немало экспериментальных данных, но выводы, сделанные различными исследователями, противоречивы.

Так, в работах [5, 6] авторы полагают, что наиболее легкое удаление шлаковой корки из разделки обеспечивается при  $\alpha_{ш} > \alpha_m$ . При  $\alpha_{ш} = \alpha_m$  корка не зажата, но следует ожидать некоторого ухудшения ее отделимости. При  $\alpha_{ш} < \alpha_m$  удаление корки из разделки тем сложнее, чем больше разность  $\alpha_m - \alpha_{ш}$ . КТЛР шлаков, как и других оксидных систем, зависит от химического состава и может изменяться в очень широких пределах [5, 6]. Однако существует и противоположное мнение: легкая отделимость шлаковой корки обеспечивается, если  $\alpha_{ш} < \alpha_m$ . Это утверждение можно найти во многих статьях со ссылкой на работу [7], в которой экспериментальным путем определена отделимость шлаковой корки при использовании электродов ВСП-50 нескольких заводов-производителей при ручной наплавке валиков на стальные пластины. В каждом случае среди прочих параметров измеряли коэффициенты теплового объемного расширения (КТОР) шлаковой корки. При этом выявлено, что у электродов с лучшей отделимостью шлаковой корки значение КТОР шлаков меньше, чем у электродов, имеющих худшую отделимость.

Исходя из упрощенного механизма фиксации шлаковой корки в разделке на основе соотношения  $\alpha_{ш}$  и  $\alpha_m$  в работе [6] высказывается сомнение относительно полученных результатов [7]. При этом не принимаются во внимание существенные отличия в методике определения отделимости шлаковой корки авторами работы [7]. Однако рассмотрение совместного охлаждения шлаковой корки и пластины с наплавленным валиком все же позволяет считать правильным вывод из работы [7].

Существует также мнение, что с точки зрения отделимости шлаковой корки важны не соотношения вида  $\alpha_{ш} \geq \alpha_m$  или  $\alpha_{ш} < \alpha_m$ , а абсолютная

разность  $\alpha_{ш} - \alpha_m$ . Отделимость корки при прочих равных условиях тем лучше, чем больше значение  $|\alpha_{ш} - \alpha_m|$ . На основании гипотезы о локальном закреплении шлака авторы работы [8] усматривают такое влияние КТЛР при наличии химического сцепления шлака с металлом, «укорененного» в границы зерен. Увеличение  $|\alpha_{ш} - \alpha_m|$  приводит к росту касательных напряжений на поверхности контакта шлака с металлом при охлаждении, которое способствует разрушению зернограницных связующих «мостиков» между шлаком и металлом.

Довольно основательно изучено полиморфное превращение двухвалентного силиката, реализация которого с положительным результатом апробирована в практике изготовления покрытых электродов [9–11]. Известно, что при охлаждении двухвалентного силиката  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  его высокотемпературная  $\beta$ -модификация, имеющая плотность  $3,10 \dots 3,28$  г/см<sup>3</sup>, превращается в низкотемпературную  $\gamma$ -модификацию плотностью  $2,80 \dots 2,97$  г/см<sup>3</sup>. Превращение не имеет конкретной начальной температуры, в зависимости от условий оно происходит при температуре от 1000 °С до комнатной. Обусловливаемое этим увеличение до 12 % удельного объема шлака и внутренних напряжений в них приводит к самоизмельчению (дикриптации) шлака, что очень благоприятно сказывается на удалении его из разделки.

Исходя из стехиометрического соотношения оксидов в структуре  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  необходимым условием для возникновения в шлаке этого силиката авторы работ [9, 12] считают соотношение мольных долей  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ , близкое к 2, или соотношение массовых долей, близкое к 1,87, или  $\text{CaCO}_3:\text{SiO}_2 = 3,33$ . На практике нижний предел соотношения  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ , при котором рентгеноструктурным анализом в шлаке обнаруживается  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  и наблюдается улучшение отделимости шлаковой корки, может составлять до 0,5.

В работе [13] описано полиморфное превращение при  $T = 800 \dots 650$  °С в шлаках системы  $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , которое сопровождается увеличением удельного объема без дикриптации шлака. В этом случае полиморфное превращение при отделимости шлаковой корки играет отрицательную роль.

Добавка 15 мас. %  $\text{ZrO}_2$  к оксидно-фторидной шлаковой системе позволяет значительно улучшить отделимость шлаковой корки при сварке самозащитными порошковыми проволоками [14]. Диоксид циркония, кроме цирконата кальция  $\text{CaO} \cdot \text{ZrO}_2$ , образует в шлаке самостоятельную кристаллическую фазу  $\text{ZrO}_2$ . При охлаждении происходит ряд полиморфных превращений  $\text{ZrO}_2$  с заметным изменением удельного объема новообразованных фаз, что положительно влияет на отделимость шлаковой корки.



Таким образом, полиморфные превращения фаз шлаков, сопровождаемые изменением удельного объема, могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на отделимость шлаковой корки.

Важным фактором отделимости шлаковой корки является ее прочность. Из рассмотренных выше закономерностей вытекает, что ее роль не однозначна, а зависит от вида сварного соединения и наличия химического сцепления шлака с металлом. Низкая механическая прочность шлака способствует более легкому удалению шлаковой корки, зажатой в разделке при наличии и отсутствии химического сцепления, а также с поверхности наплавленного на пластину валика при отсутствии химического сцепления. Высокая механическая прочность шлаковой корки, как считают авторы работы [8], способствует более легкому ее удалению с поверхности наплавленного валика при наличии химического сцепления.

Факторами прочности многофазных систем, частично закристаллизованных или преимущественно кристаллических шлаков, являются соотношения долей кристаллической и аморфной составляющих [2], а также вид и размеры кристаллов. Следует ожидать, что снижению прочности шлаковой корки в первую очередь будут способствовать те явления, которые приводят к появлению в ней структурных напряжений и микродефектов: анизотропия теплового расширения кристаллов, разность КТЛР стеклофазы и сопряженных с ней кристаллов и отдельных кристаллов между собой, склонность кристаллов к полиморфным превращениям с изменением их удельного объема и др. На прочность шлаковой корки заметное влияние оказывает также степень ее компактности [15]. Образовавшаяся в материале сферическая пора является концентратором механического напряжения тем более сильным, чем меньше ее радиус. Подсчитано, что 10%-я пористость уменьшает прочность материала приблизительно вдвое по сравнению со сплошным материалом [16].

Отделимость шлаковой корки является довольно сложным процессом, характер которого обусловлен множеством явлений физико-химической и физико-механической природы. В связи с этим для изучения проблем отделимости шлаковой корки широко применяют общие физические методы исследований. Например, при исследовании шлаков на предмет структурно-размерного соответствия его с металлом шва и его оксидами необходимо в общем случае определить химический состав металла, идентифицировать кристаллические фазы металла, его оксидов и шлаков, определить тип и параметры их кристаллической решетки. Для этих целей применяют методы химического, спектрального, рентгеноструктурного и микрорентгено-спектрального анализа. Фазо-

вый (минералогический) состав шлаков исследуют также методами кристаллооптического анализа и петрографии. Для установления наличия и температуры прохождения в шлаках полиморфных превращений с изменением их удельного объема и определения КТЛР шлаков применяют дилатометрические методы.

Как отмечено выше, прочность шлаковой корки является важным фактором с точки зрения влияния на ее отделимость. Прогнозировать прочность шлаковой корки можно исходя из результатов идентификации фаз шлаков, однако больший интерес представляет ее непосредственная количественная оценка. С этой целью реализуется методика определения прочности шлаковой корки [14].

Методы прямого экспериментального определения отделимости шлаковой корки имеют следующую последовательность: реализация (имитация) исследуемого варианта сварки с участием металлической и шлаковой фаз; процедура удаления шлаковой корки путем силовых действий на нее в форме физического эксперимента с одновременным измерением параметров и результатов этих действий или в форме технологической пробы с констатацией качественных признаков. С помощью этих методов можно определять непосредственно отделимость шлаковой корки как результат аддитивного влияния совокупности факторов, характерных для выбранного технологического варианта сварки.

В силу распространенности в сварочном производстве ручного способа удаления шлаковой корки первые представления о характере отделимости шлаковой корки имели, без сомнения, органолептическое происхождение, и это свойство шлаков представлялось специалистами как качественное. Качественный (балльно-ранговый) метод оценки отделимости шлаковой корки при сварке заключается в том, что исполнитель операции по ее удалению формирует свое мнение об отделимости шлаковой корки исходя из результатов своих непосредственных действий. Определение отделимости на качественном уровне предпочтительно для производства, поскольку оно не требует много времени и специальных средств. Этот метод также используется очень часто в научно-технических работах [1, 2, 6, 12–15, 17].

При решении проблем отделимости шлаковой корки на научно-техническом уровне желательна возможность ее количественного выражения. Один из первых таких методов [18] заключается в том, что с применением исследуемых сварочных материалов выполняется сварка в V-образную канавку на пластине из исследуемого основного металла. После охлаждения образца до комнатной температуры путем трехточечного его изгиба статическим усилием постепенно увеличивают угол между кромками канавки до тех пор, пока шлак



не отделится. Мерой отделимости шлаковой корки авторами работы [18] принят угол  $\gamma$  изгиба пластины, равный увеличению угла между кромками V-образной канавки, при котором шлак отделяется.

Позднее были предложены методы, в которых критерием отделимости шлаковой корки является работа разнообразных динамических нагрузок, передаваемых сварному соединению или шлаковой корке для ее удаления с единицы поверхности металла. Отделимость шлаковой корки в этом случае имеет размерность джоуль на метр квадратный или метр квадратный на джоуль.

Такой метод впервые был предложен И. Н. Ворновицким с сотрудниками [19, 20] и затем получил распространение в практике исследований [9, 21, 22]. Согласно этому методу экспериментальный образец с наплавкой в V-образной канавке и неудаленным шлаком устанавливался на опоры маятникового копра. По тыльной плоскости образца наносили удар подвешенным на маятнике грузом, который двигался под действием силы тяготения. Путем изменения массы и высоты подъема груза дозируют энергию  $E$ , которая в результате удара передавалась экспериментальному образцу в целом. Измеряя площадь  $F$  металла шва, освободившуюся от шлака в результате ударного воздействия, вычисляли отношение  $E/F$ .

В основу метода, изложенного в работе [23], положен принцип удаления корки силой инерции. По этому методу остановка образца, движущегося с некоторой скоростью  $v$ , вследствие ударного столкновения с неподвижным упором вызывает удаление шлака массой  $M$  с некоторой поверхности точечной наплавки площадью  $S$  под действием сил инерции шлака. Деление его кинетической энергии, накопленной перед остановкой, на площадь  $S$  дает значение удельной работы отделимости шлаковой корки. Недостатком метода является то, что получение образца не связано с реальной технологией сварки. В связи с этим требуется изучение вопроса о влиянии условий наплавки на отделимость шлаковой корки, поскольку это свойство может зависеть, в частности, от тепловложения, времени существования шлаковой ванны и др. [1].

Общий недостаток методов определения отделимости шлаковой корки [20, 23], а также метода определения прочности шлаковой корки [5] заключается в необходимости установления наименьшего значения энергии силового действия, достаточного для получения запланированного результата эксперимента. Корректное определение наименьшего значения энергии указанными методами возможно только путем многократного повторения эксперимента, при котором энергия силового воздействия постепенно изменяется в то время, как другие факторы остаются неизменными. Это связано с необходимостью получения нес-

кольких номинально одинаковых экспериментальных образцов, что повышает трудо- и материалоемкость исследований.

Следовательно, разработку новых методов количественного определения отделимости шлаковой корки (как и усовершенствование существующих) следует признать актуальной задачей для специалистов в области сварки.

## Выводы

1. При сварке легированных сталей возможности улучшения отделимости шлаковой корки за счет варьирования параметров режима сварки ограничены.

2. Для улучшения отделимости шлаковой корки состав сварочного флюса для сварки толстолистовых стыков из легированных сталей следует подбирать таким, чтобы обеспечивать получение шлаковой корки, имеющей как можно более высокий КТЛР и как можно более низкую прочность.

3. Изменение прочности шлаковой корки и улучшение ее отделимости возможно за счет целенаправленного влияния на особенности ее микро- и макроструктуры, в частности, благодаря наличию фаз, склонных к полиморфным превращениям, что приводит к саморассыпанию шлака.

4. Большинство методов прямого экспериментального определения отделимости шлаковой корки имеет повышенную трудо- и материалоемкость, что препятствует их широкому применению. Сохраняется актуальность разработки методов количественного определения отделимости шлаковой корки при сварке. В настоящее время наиболее распространен качественный метод ее оценки по валиковой пробе.

1. Моравецкий С. И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке. Ч. 1: Механизм химического сцепления шлака с металлом шва // Автомат. сварка. — 2011. — № 1. — С. 32–36.
2. Об отделимости шлаковой корки при автоматической сварке под флюсом / Д. М. Рабкин, Ю. Н. Готальский, Е. С. Куделя, В. В. Подгаецкий // Там же. — 1950. — № 3. — С. 10–27.
3. Якобаивили С. Б. Межфазное натяжение сварочных флюсов и его влияние на отделимость шлаковой корки // Там же. — 1962. — № 9. — С. 37–39.
4. Якобаивили С. Б. Поверхностные свойства сварочных флюсов и шлаков. — Киев: Техніка, 1970. — 208 с.
5. Подгаецкий В. В. Механическое удерживание шлака на шве при автоматической сварке // Автомат. сварка. — 1950. — № 6. — С. 30–40.
6. Ворновицкий И. Н., Медведев А. З., Черкасский А. Л. О влиянии коэффициента теплового расширения шлака на его отделимость от металла шва // Свароч. пр-во. — 1973. — № 3. — С. 35–37.
7. Гринберг Н. А., Рогова Е. М. Факторы, влияющие на отделимость шлаковой корки от шва // Там же. — 1960. — № 11. — С. 18–20.
8. К вопросу о влиянии температурного коэффициента линейного расширения на отделимость шлаковой корки / О. С. Волобуев, Н. Н. Потапов, Ю. С. Волобуев, А. В. Ершов // Там же. — 1989. — № 8. — С. 37–39.



9. Походня И. К., Карманов В. И., Упырь В. Н. Отделимость шлаковой корки электродов с основным покрытием // Автомат. сварка. — 1980. — № 11. — С. 33–34.
10. Ворновицкий И. Н., Савельев В. Г., Сидлин З. А. Реализация силикатного распада в сварочных шлаках // Свароч. пр-во. — 1997. — № 5. — С. 11–12.
11. Ворновицкий И. Н., Савельев В. Г. Особенности изготовления электродов с саморассыпающимся шлаком // Там же. — 2001. — № 5. — С. 46–49.
12. Особенности разработки флюса для сварки в узкую разделку / Б. И. Лазарев, М. М. Тимофеев, Н. Н. Потапов, С. А. Курланов // Там же. — 1979. — № 5. — С. 21–23.
13. Development of the narrow gap submerged arc welding process — NSA process / Yukio Hirai, Masaaki Tokuhisa, Itaru Yamashita et al. // Kawasaki Steel Techn. Rep. — 1982. — № 5. — P. 81–93.
14. Мойсов Л. П., Митряшин Л. Л., Бурyleв Б. П. Исследование фазового состава оксидно-фторидных шлаков и их отделимости от металла // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 1990. — Вып. 24. — С. 82–85.
15. Wittung L. Some physical and chemical properties of welding slags and their influence on slag detachability // Weld pool chemistry and metallurgy: Intern. conf., London, Apr. 15–17, 1980. — London, 1980. — Vol. 1. — P. 83–92.
16. Павлушкин Н. М. Основы технологии ситаллов. — М.: Стройиздат, 1972. — 360 с.
17. Отделимость шлаковой корки от аустенитного металла шва / И. В. Павлов, А. А. Косенко, В. И. Гуревич, А. Ю. Мышкин // Свароч. пр-во. — 1986. — № 7. — С. 37–38.
18. А. с. 407686 СССР, МКИ<sup>1</sup> В 23 К 29/00. Способ оценки отделимости шлакового покрытия / В. Н. Липодаев, В. А. Бойко, Ю. Н. Каховский, Л. С. Захаров. — Опубл. 10.12.73; Бюл. № 47.
19. А. с. 407685 СССР, МКИ<sup>1</sup> В 23 К 29/00. Способ оценки отделимости шлакового покрытия от поверхности металла сварного шва / И. Н. Ворновицкий, А. З. Медведев, А. Л. Черкасский. — Опубл. 10.12.73; Бюл. № 47.
20. Ворновицкий И. Н., Малашинок В. А., Черкасский А. Л. Методика количественной оценки отделимости шлака // Свароч. пр-во. — 1975. — № 2. — С. 47–48.
21. Шоно С. А., Кассов Д. С., Карпенко В. М. Оценка шлаковых систем порошковой проволоки по отделимости шлаковой корки // Автомат. сварка. — 1976. — № 3. — С. 22–24.
22. Гринь А. Г., Бозуцкий А. А. Методика оценки отделимости шлаковой корки // Там же. — 1996. — № 3. — С. 58–59.
23. Методика количественной оценки отделимости шлаков / С. А. Курланов, Н. Н. Потапов, А. В. Баженов и др. // Свароч. пр-во. — 1986. — № 7. — С. 39–40.

Influence of various separate factors on slag crust separation in automatic arc welding was analyzed. It is established that the flux developed for narrow-gap automatic arc welding of thick metal joints should ensure formation of slag crust with as low as possible strength and as high as possible coefficient of thermal linear expansion. Brief characteristic of the currently available methods of experimental evaluation of slag crust separation is given.

Поступила в редакцию 07.04.2010

## QUATTROJET™ — ИННОВАЦИОННАЯ КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНАЯ ГОРЕЛКА

ЭСАБ представляет QUATTROJET™ — кислородно-топливную систему резки совершенно нового типа, позволяющую сделать этот процесс еще более экономичным и продолжить путь к полной автоматизации



Снабженная автоматическим контролем пламени новая кислородно-топливная горелка распознает любое потенциальное нарушение процесса резки и автоматически останавливает подачу газа. Таким образом, в отличие от традиционных систем машина для резки не требует постоянного контроля оператора, так как любая утечка топливного газа и кислорода эффективно предотвращается. Устройство контроля пламени реагирует на любые дефекты в обрабатываемом материале и на любые неисправности режущего инструмента.

Эта контрольная система повышает безопасность операторов и рабочих, окружающей среды и машин, улучшая также качество автоматической резки.

Для того чтобы обеспечить правильное расстояние между режущим соплом и заготовкой, в QUATTROJET встроено устройство, определяющее высоту. Таким образом, нет необходимости устанавливать дополнительный датчик отдельно на горелке.

Обычные системы контроля такие, как кольца, очень быстро изнашиваются и нуждаются в регулярной замене. Компактная кислородно-топливная горелка QUATTROJET имеет и другие функции — внутреннюю систему воспламенения, защищенную от грязи и повреждения, и устройство для быстрой замены сопла без использования инструментов.

