



ВЛИЯНИЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ НА СВОЙСТВА ШЛАКА ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ПОД ФЛЮСОМ АН-348А

В. Э. СОКОЛЬСКИЙ, д-р хим. наук, **А. С. РОИК**, канд. техн. наук, **В. П. КАЗИМИРОВ**, д-р хим. наук (Киев. нац. ун-т имени Тараса Шевченко),
И. И. РЯБЦЕВ, **Д. Д. МИЩЕНКО**, **И. А. РЯБЦЕВ**, **А. С. КОТЕЛЬЧУК**, кандидаты техн. наук,
В. С. ТОКАРЕВ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние диоксида циркония на свойства шлака при дуговой наплавке низколегированной порошковой проволокой ПП-Нп-20ХГС под флюсом АН-348А. Установлено, что при наплавке первых слоев диоксид циркония находится в поверхностном, примыкающем к наплавленному металлу, слое шлаковой корки в виде отдельных включений преимущественно моноклинной формы. Образование диоксида циркония приводит к появлению в шлаковой корке значительных микронапряжений и ее растрескиванию, что препятствует химическому соединению корки с наплавленным металлом через промежуточный слой оксидов и улучшает делимость шлаковой корки.

Ключевые слова: дуговая наплавка, наплавка под флюсом, порошковая проволока, диоксид циркония, делимость шлаковой корки, рентгенографические исследования

При дуговой наплавке под флюсом с предварительным подогревом или в несколько слоев на больших площадях температура наплавляемой детали повышается до 400 °С и более, что значительно усложняет удаление шлаковой корки и снижает качество и производительность наплавки [1].

К настоящему времени накоплены обширные экспериментальные данные, связывающие плохую делимость шлаковой корки с химическим соединением шлака с наплавленным металлом через промежуточный слой оксидов на его поверхности [2–5]. Делимость шлаковой корки можно улучшить, изменив окислительный потенциал шлака таким образом, чтобы исключить образование промежуточного слоя оксидов или устранить эпитаксиальное срастание этого слоя с поверхностью шва [4]. Делимость шлаковой корки также зависит от температуры затвердевания шлака [6] и разности коэффициентов термического расширения (КТР) шлаковой корки и наплавленного металла [7].

Известно, что на окислительный потенциал и физико-химические свойства шлака значительное влияние оказывает ZrO_2 [8, 9]. Эксперименты показали, что введение в шихту порошковой проволоки циркониевого концентрата $ZrSiO_4$ улучшает делимость шлаковой корки при дуговой наплавке под флюсом АН-348А [10].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния диоксида циркония на окислительную способность, температуру затвердевания и КТР

шлака. В ней также приведены результаты рентгенографических исследований шлаковой корки при дуговой наплавке низколегированной порошковой проволокой ПП-Нп-20ХГС под флюсом АН-348А, которые проводили с целью выявления причин положительного влияния диоксида циркония на делимость шлаковой корки этого флюса.

Для проведения исследований изготовлены шесть опытных порошковых проволок типа ПП-Нп-20ХГС, которые обеспечивали различное содержание ZrO_2 в шлаке (таблица). Опытными порошковыми проволоками диаметром 2 мм производили непрерывную многослойную наплавку одиночных валиков длиной 150...180 мм на пластины размером 20×50×200 мм. Режим наплавки всех слоев был постоянным: ток 230...250 А; напряжение 24...26 В; скорость наплавки 20 м/ч. При использовании проволок № 1–4 делимость шлаковой корки ухудшалась при наплавке треть-

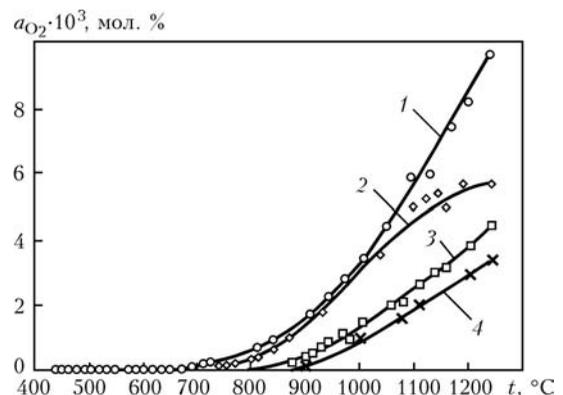


Рис. 1. Активность кислорода в шлаке АН-348А с различным содержанием ZrO_2 : 1 — 3,63; 2 — 1,62; 3 — 0,90 мас. %; 4 — без ZrO_2



его-четвертого слоя. Проволоки № 5 и 6 обеспечивали отличную отделимость шлаковой корки при наплавке пятого слоя, однако по мере перегрева образца она ухудшилась.

Исследовано влияние диоксида циркония на активность кислорода в шлаке, т. е. на окислительную способность шлака (рис. 1), вязкость шлаков (рис. 2), КТР наплавленного металла 20ХГС и шлаковых корок (рис. 3).

Измерение активности кислорода в шлаках осуществляли по методике [11], в основе которой лежит метод измерения ЭДС расплава шлака с помощью кислородного датчика с твердым электролитом из диоксида циркония, стабилизированного иттрием.

Вязкость шлаковых расплавов определяли ротационным вискозиметром, разработанным в ИЭС им. Е. О. Патона [12]. Метод основан на зависимости между вязкостью и моментом закручивания подвешенного в ней рабочего тела при равномерном вращении тигля с жидкостью или самого тела.

Значения КТР целой шлаковой корки, непосредственно снятой с наплавленного валика и наплавленного металла 20ХГС, находили с помощью термомеханического анализатора Du Pont 943.

Как видно из рис. 1, ZrO_2 увеличивает активность кислорода в шлаке, а соответственно и его окислительную способность. В наибольшей степени этот эффект проявляется при содержании ZrO_2 в шлаке более 1,6 мас. %, при этом активность кислорода увеличивается в 1,5...2,0 раза.

Измерение вязкости шлаков (рис. 2) показало, что уже при содержании 0,90 мас. % ZrO_2 увеличиваются вязкость шлака и температура его затвердевания. Значения вязкости имеют тенденцию к росту при увеличении содержания ZrO_2 в шлаке до 3,63 мас. %.

Исследования изменений значений КТР наплавленного металла 20ХГС и шлаковых корок флюса АН-348А при различном содержании ZrO_2 показали, что с увеличением массовой доли ZrO_2 в шлаке разность КТР наплавленного металла и шлаковых корок возрастает и сохраняется практически во всем диапазоне температур, вплоть до температуры размягчения шлака (рис. 3).

Были проведены рентгенографические исследования шихты одной из опытных порошковых проволок ПП-Нп-20ХГС (проволока № 5, таблица), флюса АН-348А и материала поверхностного слоя его шлаковых корок со стороны наплавленного металла после наплавки этой проволокой. Уточнение экспериментальных данных осуществлялось с помощью программы PowderCell (PCW), которая свободно распространяется в сети Интернет [13, 14].

Рентгенограмма минеральной составляющей шихты опытной порошковой проволоки ПП-Нп-

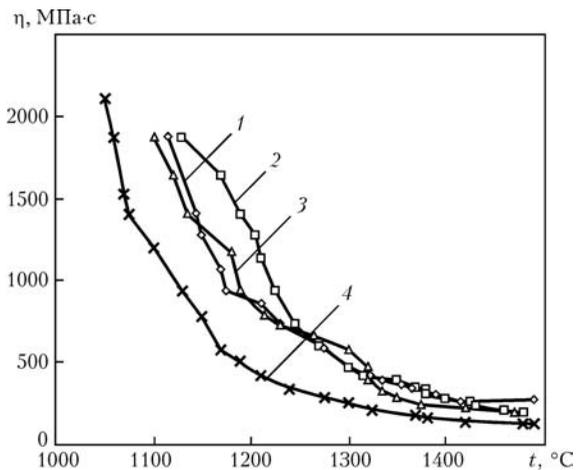


Рис. 2. Вязкость η шлака АН-348А с различным содержанием ZrO_2 : 1 — 0,90; 2 — 1,62; 3 — 3,63 мас. %; 4 — без ZrO_2

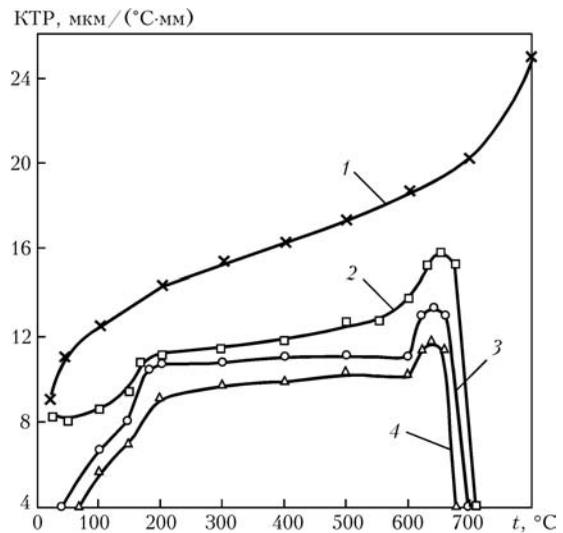


Рис. 3. КТР наплавленного металла 20ХГС (1) и шлаковых корок собственно флюса АН-348А (2) и с добавками в него 0,90 % (3) и 3,63 % (4) ZrO_2

Результаты химического анализа шлаковой корки и металла, наплавленного под флюсом АН-348А опытными порошковыми проволоками типа 20ХГС с диоксидом циркония в шихте

№ п/п	Опытная порошковая проволока	Содержание ZrO_2 в шлаковой корке, мас. %	Содержание химических элементов в наплавленном металле, мас. %				
			C	Si	Mn	Cr	Zr
1	ПП-Оп-1	—	0,09	0,32	1,15	0,56	—
2	ПП-Оп-2	0,21	0,14	0,33	1,20	0,60	0,03
3	ПП-Оп-3	0,63	0,11	0,29	1,18	0,69	0,02
4	ПП-Оп-4	0,90	0,10	0,33	1,20	0,68	0,03
5	ПП-Оп-5	1,62	0,12	0,25	1,19	0,46	0,03
6	ПП-Оп-6	3,63	0,13	0,40	1,25	0,59	0,04

20ХГС, содержащей циркониевый концентрат, полностью согласуется с рентгенограммой чистого циркониевого концентрата, который иденти-



I, отн. ед.

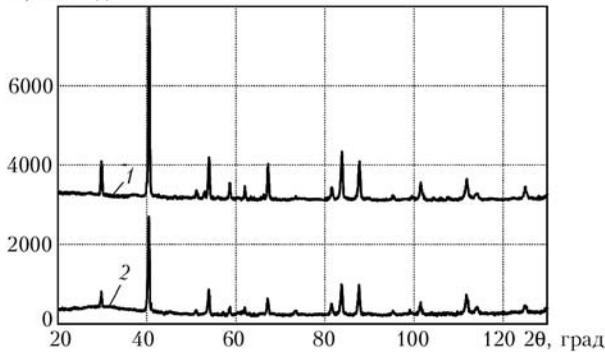


Рис. 4. Рентгенограммы циркониевого концентрата (1) и минеральной составляющей шихты опытной порошковой проволоки ПП-Оп-2 (2), полученные при CuK_α -излучении

фицируется как ZrSiO_4 , т. е. в процессе производства проволоки никаких превращений в нем не происходит (рис. 4).

Материал для рентгенографического исследования поверхностного слоя шлаковой корки соскабливали специальным алмазным инструментом. Рентгенограммы образцов, взятых из более глубоких слоев корки, свидетельствуют об уменьшении интенсивности *I* дифракционных максимумов с увеличением толщины шлаковой корки. Интенсивность дифракционных линий слабо отличается от фона в районе половины толщины корки. Слабые кристаллические пики в интервале $20 \dots 25^\circ$ по углу рассеяния рентгеновских лучей 2θ наблюдались как на первой, так и на второй кривой с практически одинаковой интенсивностью.

Исследования материала поверхностного слоя шлаковой корки флюса АН-348А (CuK_α -излучение на воздухе при комнатной температуре) после наплавки первого слоя с хорошей отделимостью шлаковой корки и наплавки пятого слоя при ухудшении отделимости шлаковой корки показали, что в первом случае на рентгенограмме присутствуют интенсивные кристаллические пики (рис. 5, кривая 3), а во втором — кристаллические пики на рентгенограмме мало отличаются от фона

I, отн. ед.

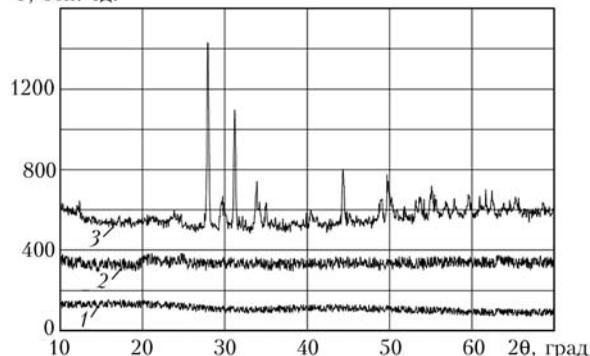


Рис. 5. Рентгенограммы (CuK_α -излучение) флюса АН-348А (1) и шлака, полученного после наплавки под этим флюсом с плохой (2) и хорошей (3) отделимостью шлаковой корки

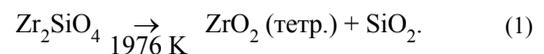
(рис. 5, кривая 2). На рентгенограмме самого флюса АН-348А кристаллические пики полностью отсутствуют (рис. 5, кривая 1).

В образце шлаковой корки после наплавки первого слоя имеются кристаллические фазы, которые не соответствуют возможным компонентам флюса АН-348А и их комбинациям. Они идентифицируются как смесь моноклинного, тетрагонального и орторомбического диоксидов циркония (рис. 5, кривая 3). Кубический ZrO_2 с решеткой типа CaF_2 не обнаруживается. Таким образом, при однослойной наплавке диоксид циркония не вступает ни в какие соединения с другими компонентами шлака АН-348А и находится в шлаковой корке в виде отдельных включений трех различных модификаций.

В образце шлаковой корки после наплавки пятого слоя (рис. 5, кривая 2) кристаллические включения диоксида циркония не фиксируются. Это свидетельствует о том, что его свободные включения отсутствуют.

Согласно диаграмме состояния в системе $\text{ZrO}_2\text{--SiO}_2$ присутствует одно соединение — циркон ZrSiO_4 . По данным ранних исследований, температура его плавления составляет не менее 2700 К, однако более поздние эксперименты показали, что циркон разлагается в твердой фазе при 1949 К, и предположение, что он плавится с образованием двух типов расплавов, является неоправданным [15].

Результаты наших исследований показали, что ZrSiO_4 во время сварки (наплавки) разлагается на диоксиды циркония и кремния:



Об этом свидетельствует наличие ZrSiO_4 до процесса наплавки в немагнитной составляющей сварочной проволоки (рис. 4, кривая 2) и полное его отсутствие в поверхностном слое после наплавки (рис. 5). Поскольку из продуктов распада циркона идентифицируются только различные модификации ZrO_2 , то следует предположить, что кремнезем частично расплавился и растворился в расплавленном шлаке, а ZrO_2 не растворился и возможно даже не расплавился в шлаковом расплаве. О возможности только частичного растворения SiO_2 свидетельствуют слабые кристаллические пики в $20 \dots 25^\circ$ по 2θ , которые можно с определенной степенью осторожности соотнести с аморфной кремнеземной фазой в начальной стадии кристаллизации. Косвенным подтверждением растворения SiO_2 является тот факт, что при $T > 800 \text{ К}$

$$K_c > K_p, \quad (2)$$

где K_c , K_p — константы соответственно скорости образования циркона и его разложения.



Таким образом, константа синтеза циркона больше скорости его разложения. Однако подробное рассмотрение условий термического разложения показало, что оно наблюдается только при удалении кремнезема из сферы реакции [15], в данном случае при растворении в шлаковом расплаве.

Кристаллический ZrO_2 в чистом виде при нормальном давлении во всем температурном интервале присутствует в трех модификациях: моноклинной (низкотемпературной), тетрагональной и кубической (стабильной при высоких температурах). Диоксид циркония примерно до 1273 К имеет моноклинную решетку. Плотность моноклинного ZrO_2 составляет 5,68 г/см³. При нагреве выше 1273 К начинается бездиффузионное (мартенситного типа) превращение моноклинного диоксида циркония в тетрагональный, которое заканчивается при температуре около 1450 К. Тетрагональная модификация существует до 2645 К с последующим переходом в гранецентрированную кубическую модификацию. Плавление кубического ZrO_2 происходит при 2673 К [15]. При большом давлении и высокой температуре образуется орторомбический диоксид циркония [15].

В случае охлаждения происходит гистерезис превращения ZrO_2 . Моноклинная форма появляется при 1240 К, а тетрагональная исчезает при 1023 К. Интервал превращения ZrO_2 уменьшается с повышением его чистоты [15]. Переход моноклинного (устойчивого) ZrO_2 в тетрагональную модификацию, и наоборот, сопровождается изменением объема ZrO_2 на 7 %, что приводит к растрескиванию материала из ZrO_2 . Еще большее изменение объема наблюдается при переходе орторомбической модификации в моноклинную. Для предотвращения растрескивания стабилизируют ZrO_2 при температуре от 1973 К до плавления путем введения оксидов CaO, MgO, V₂O₅. И хотя CaO и MgO являются компонентами сварочного флюса АН-348А, насыщение ZrO_2 стабилизирующими добавками за счет флюса маловероятно, поскольку необходимо дозированное количество добавок и довольно продолжительное время отжига, что практически невозможно осуществить в течение сварочного процесса.

Для уточнения рентгенограмм шлака, полученного после наплавки порошковой проволокой ПП-Нп-20ХГС под флюсом АН-348А (рис. 5, кривая 3), с помощью программы PCW из экспериментальных кривых вычитали фон, а затем уточняли профиль экспериментальной рентгенограммы суммой теоретических кривых, рассчитанных для предполагаемых модификаций ZrO_2 (метод Ритвелда) [13, 14]. Расчетные кривые с учетом объемной доли каждой модификации ZrO_2 представлены на рис. 6. В качестве основных уточняемых величин использованы параметры элементарной

ячейки и объемная доля кристаллических фаз в образце. Установлено, что кристаллическая фаза в основном состоит (88,1 об. %) из моноклинного диоксида циркония с параметрами ячейки $a = 5,18 (5,17) \text{ \AA}$, $b = 5,24 (5,23) \text{ \AA}$, $c = 5,341 (5,360) \text{ \AA}$, $\beta = 99,18 (99,25)^\circ$, объемом ячейки 142,6 (143,1) \AA^3 , рентгенографической плотностью — 5,74 (5,72) г/см³ (здесь и далее в скобках приведены параметры элементарной ячейки исходной фазы до уточнения по программе PCW). Тетрагональный ZrO_2 (9,27 об. %) имеет параметры решетки $a = 3,63 (3,63) \text{ \AA}$, $c = 5,19 (5,20) \text{ \AA}$, объем ячейки 68,4 (68,4) \AA^3 , рентгенографическую плотность 5,99 (5,99) г/см³. Орторомбический ZrO_2 (2,66 об. %) имеет параметры решетки $a = 5,64 (5,59) \text{ \AA}$, $b = 6,43 (6,48) \text{ \AA}$, $c = 3,33 (3,33) \text{ \AA}$, объем ячейки 120,9 (120,8) \AA^3 , рентгенографическую плотность 6,77 (6,77) г/см³.

Как видно из приведенных данных, ввиду скоротечности процесса сварки переход тетрагональной формы в моноклинную полностью не завершается и на границе металл–шлак концентрируется кристаллический ZrO_2 в виде моноклинной фазы (основная), а также небольших количеств тетрагональной и, возможно, орторомбической фаз. На первый взгляд, присутствие орторомбической фазы, которая может быть получена только при высокой температуре и давлении, маловероятно. Однако небольшие по размерам включения кристаллического ZrO_2 в матрице основной фазы шлаковой корки могут испытывать значительные усилия на сжатие, превышающие давление в $40 \cdot 10^3$ МПа, при которых образуется орторомбическая фаза. Ограниченный объем уже твердой

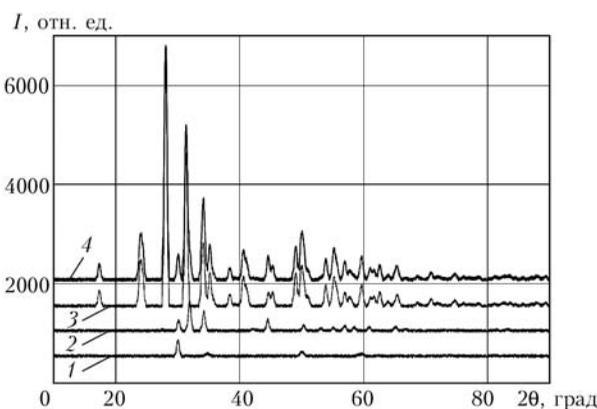


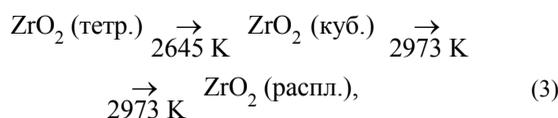
Рис. 6. Теоретические рентгенограммы различных модификаций ZrO_2 с учетом их объемной доли: 1 — орторомбический диоксид циркония; 2 — тетрагональный диоксид циркония; 3 — моноклинный диоксид циркония; 4 — уточненная по PCW суммарная теоретическая рентгенограмма образца с хорошей отделимостью шлаковой корки (рис. 5, кривая 3), полученная аддитивным сложением рентгенограмм 1–3



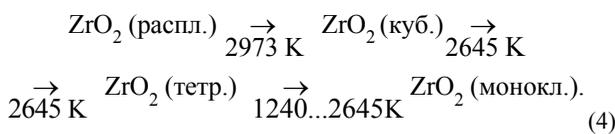
шлаковой полости, где было расположено точечное включение тетрагональной фазы ZrO_2 , препятствует образованию менее плотной моноклинной фазы, поэтому усиливается вероятность формирования небольшой объемной доли орторомбической фазы, наиболее плотной из всех кристаллических модификаций ZrO_2 .

Таким образом, согласно диаграмме состояния после разложения циркониевого концентрата при достаточно высокой температуре в зоне дуги могут протекать следующие фазовые превращения с участием ZrO_2 :

при нагреве

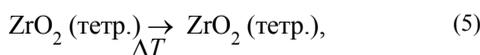


при охлаждении



Расплавленная капля вместе с минеральными добавками проходит наиболее высокотемпературную зону дуги за доли секунды. Даже если температура дуги значительно превышает 2973 К, каждый фазовый переход должен сопровождаться структурными перестройками и энергетическими затратами, которые требуют определенного времени на передислокацию атомов при образовании новой кристаллической фазы или на разрушение дальнего порядка при плавлении, т. е. происходит полная реализация нескольких фазовых переходов, которые включают плавление, кристаллизацию и несколько стадий перекристаллизации, за такой относительно малый промежуток времени маловероятно.

Ограничения по времени при проходе расплавленной капли проволоки зоны дуги препятствуют образованию кубического ZrO_2 и плавлению ZrO_2 . Возможно, при этом ZrO_2 перегревается выше температуры образования циркона (1976 К) на ΔT , но структурные перестройки произойти не успевают, т. е. в процессе нагрева фазовых переходов не наблюдается



а затем происходит цикл охлаждения



При попадании капли в зону контакта с расплавленным металлом сварочной ванны диоксид циркония оказывается на ее поверхности и всту-

пает в контакт с расплавленным шлаком. Это приводит к тому, что содержание ZrO_2 в зоне контакта металл–шлак будет выше, чем в общем объеме расплавленного шлака. Из-за относительно небольшой объемной доли шлаковой фазы в матрице образуются точечные включения диоксида циркония. В случае охлаждения при температуре 1240...1023 К (когда шлак уже затвердел) тетрагональная форма ZrO_2 в основном переходит в стабильную при низкой температуре моноклинную форму, имеющую минимальную плотность и максимальный объем из всех модификаций ZrO_2 . Увеличение его объема при фазовом переходе (6) приводит к значительным микронапряжениям внутри шлаковой корки, особенно на границе металл–шлак, поскольку на этом участке содержится диоксида циркония максимально. В результате шлаковая корка на границе шлак–металл растрескивается, что улучшает ее отделимость.

При многослойной наплавке без перерывов на охлаждение изделия основной металл сильно перегревается. В результате возрастает время пребывания шлака при высокой температуре и компоненты шлака интенсивнее и в течение более продолжительного времени взаимодействуют друг с другом. При этом ZrO_2 не выделяется в шлаковой корке в виде отдельных включений, а формирует с другими компонентами шлака сложные системы оксидов с другим типом химических связей и другими фазовыми превращениями, которые не приводят к изменению объемов при охлаждении. Поэтому при значительном повышении температуры наплавляемого изделия положительное влияние ZrO_2 на отделимость шлаковой корки флюса АН-348А будет снижаться.

Выводы

1. Введение ZrO_2 в шихту порошковой проволоки типа 20ХГС способствует тому, что при наплавке этой проволокой под флюсом АН-348А увеличиваются окислительная способность шлака, разность КТР наплавленного металла и шлаковой корки и температура затвердевания последней.

2. С помощью рентгенографических исследований шлаковой корки флюса АН-348А установлено, что во время наплавки находящийся в шихте порошковой проволоки циркон разлагается на диоксиды по реакции $ZrSiO_4 \rightarrow ZrO_2 + SiO_2$. При наплавке первых слоев в случае относительно невысокой температуры наплавляемого изделия ZrO_2 находится в поверхностном слое шлаковой корки, примыкающем к наплавленному металлу в виде отдельных включений преимущественно моноклинной формы. При многослойной наплавке без перерывов на охлаждение диоксид циркония плавится и образует с другими компонентами шлака сложные системы оксидов.



3. Образование ZrO_2 моноклинной формы, имеющего максимальный объем, приводит к появлению в шлаковой корке значительных микронапряжений и ее растрескиванию. Кроме того, с ростом содержания ZrO_2 увеличивается разность КТР шлаковой корки и наплавленного металла. Все это улучшает отделимость шлаковой корки флюса АН-348А с увеличением содержания в ней ZrO_2 . При непрерывной многослойной наплавке свободных включений ZrO_2 не образуется и положительное влияние ZrO_2 на отделимость шлаковой корки флюса АН348А снижается.

1. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Metallurgizdat, 1961. — 422 с.
2. Подгаецкий В. В. Некоторые особенности металлургических процессов при сварке стали под флюсом: Дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1952. — 220 с.
3. Механизм сцепления шлаковой корки с поверхностью шва / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, В. И. Карманов и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 5. — С. 5–9.
4. Походня И. К., Карманов В. И., Войткевич В. Г. Исследование особенностей механизма сцепления шлаковой корки с металлом шва, легированного титаном и ванадием // Там же. — 1976. — № 6. — С. 1–4.
5. Кинетика образования промежуточного слоя между металлом шва и шлаковой коркой / И. К. Походня, Л. И. Демченко, И. Р. Явдошин и др. // Там же. — 1977. — № 2. — С. 1–4.
6. Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г. Сварочные шлаки. — Киев: Наук. думка, 1988. — 248 с.

7. К вопросу о влиянии температурного коэффициента линейного расширения на отделимость шлаковой корки / О. С. Волобуев, Н. Н. Потапов, Ю. С. Волобуев и др. // Свароч. пр-во. — 1989. — № 8. — С. 37–39.
8. Бобриков Ю. В., Потапов Н. Н., Старченко Е. Г. Особенности окисления металла двуокисью циркония при наплавке под флюсом // Там же. — 1983. — № 9. — С. 6–7.
9. Потапов Н. Н. Окисление металлов при сварке плавлением. — М.: Машиностроение, 1985. — 216 с.
10. Рябцев И. И. Улучшение отделимости шлаковой корки при повышенных температурах при дуговой наплавке под флюсом порошковыми проволоками // Зварювання та суміжні технології: Матеріали III Наук.-техн. конф. молодих вчених, м. Київ, 25–27 травн. 2005 р. — К.: ІЕЗ ім. С. О. Патона, 2005. — С. 59–60.
11. Методика измерения активности и парциального давления кислорода во флюсах / Т. П. Бондаренко, С. Т. Римский, А. В. Залевский и др. // Сварочные материалы для механизированной дуговой сварки сталей. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1991. — С. 57–61.
12. А. с. 667867 СССР, МПК G 01 №11/14. Ротационный вискозиметр / В. Н. Колисник, С. А. Шоно, И. А. Сагинов. — Оpubл. 15.06.79; Бюл. № 22.
13. Rietveld H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures // J. Appl. Cryst. — 1969. — № 2. — P. 65–71.
14. Ковба Л. М. Рентгенография в неорганической химии: Учеб. пособие. — М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1991. — 256 с.
15. Бережной А. С. Многокомпонентные системы окислов. — Киев: Наук. думка, 1970. — 456 с.

Influence of zirconia on slag properties in arc surfacing with low-alloyed flux-cored wire PP-Np-20KhGS using AN-348A flux was investigated. It is established that at surfacing of the first layers, zirconium dioxide is in the surface layer of the slag crust adjacent to the deposited metal in the form of individual inclusions of predominantly monoclinic shape. Formation of zirconium dioxide leads to appearance of the considerable microstresses in the slag crust and its cracking, thus preventing chemical bonding of the crust and deposited metal through an intermediate layer of oxides and improving the slag crust separability.

Поступила в редакцию 05.11.2007

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Решением Президиума ВАК Российской Федерации от 4 июля 2008 г. журнал «Автоматическая сварка» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.