

УДК 669.018:620.178.167.001.5

**Воробьев В. В., Малинов В. Л.**

## **СПЛАВЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НАПЛАВКИ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УРАВНИТЕЛЬНЫХ КЛАПАНОВ**

Уравнительные клапана доменных печей предназначены для выравнивания давления при загрузке шихтовых материалов. Они работают при температуре 300–450 °С и подвергаются воздействию абразивных частиц шихтовых материалов, ускоряемых потоком газов доменной печи (при давлении до ~ 0,37 МПа). Срок эксплуатации клапанов в основном определяется состоянием контактных поверхностей сопрягающихся деталей – седла и тарели (крышки). С целью увеличения срока эксплуатации контактные поверхности наплавляют износостойкими сплавами [1–3].

Наиболее широко применяется автоматическая дуговая наплавка, обеспечивающая производительность 10–30 кг/ч. В качестве электродных материалов используются те же материалы, что и для наплавки контактных поверхностей конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей. Это обусловлено в первую очередь схожими условиями эксплуатации.

Электродные материалы по типу наплавленного металла можно разбить на три основные группы:

- сплавы на основе железа типа высоколегированных сталей и чугунов;
- сплавы на основе никеля, упрочняемые карбидами хрома;
- композиционные материалы на основе медного сплава и карбидов вольфрама.

Целью данной работы является обзор наплавочных материалов, применяемых для наплавки контактных поверхностей уравнительных клапанов доменных печей, а также рассмотреть различные варианты легирования наплавленного металла, стойкого к газоабразивному воздействию.

Электродные материалы для наплавки сплавов на основе железа имеют оболочку из малоуглеродистой стали и сердечник, состоящий из смеси порошков легирующих компонентов. Основными типами наплавочных сплавов являются теплостойкие стали (3Х2В8, Х10В14, Х12В2Ф), высокохромистые заэвтектические чугуны (типа «Сормайт-1»), а также чугуны, дополнительно легированные В, Ni, V, W, Mo, Nb и др.

Среди материалов, применяемых для наплавки теплостойких сталей, наиболее широко используется порошковая проволока ПП-3Х2В8. При этом возможна наплавка без трещин, являющихся очагами разрушения (при соблюдении ряда технологических мер, включая предварительный подогрев до температур 300–500 °С). Наплавленный металл технологичен при механической обработке, поскольку может обрабатываться не только шлифованием, но и резанием. Основным недостатком является недостаточная эксплуатационная стойкость. Так, по сравнению со сплавом «Сормайт-1», газоабразивная износостойкость металла наплавленного ПП-3Х2В8 меньше в 1,5–2 раза [2].

В условиях газоабразивного изнашивания трещины в наплавленном слое могут являться очагами разрушения и «продувов». Авторами работы [3] установлено, что для контактных поверхностей, наплавленных ПЛ-АН 101, величина раскрытия трещин, имеющих направление 0–30 град. по отношению к газовому потоку, не должна превышать 0,05 мм, а для трещин под углами более 30 град. – 0,1 мм.

Величина раскрытия трещин и их направление определяются технологией наплавки. Наименьшая величина раскрытия трещин (~ 0,05 мм) достигается при способе «двухдуговой широкослойной» наплавки [3]. Однако при этом направление газового потока совпадает с осью наплавленных валиков. Вдоль оси валиков возможно образование цепочек пор и рыхлот,

соответственно это негативно сказывается на эксплуатационной стойкости деталей. Более целесообразно использовать способ наплавки по «кольцу», но в металле, наплавленном ПЛ-АН 101 этой технологии, образуется сетка трещин с большим раскрытием (до 0,8 мм).

Опыт промышленного использования деталей, наплавленных сплавами типа «Сормайт-1», показал, что срок их эксплуатации является нестабильным и варьируется в широких пределах.

Было определено, что для повышения газообразивной износостойкости требуется одновременно обеспечить в наплавленном металле содержание упрочняющей карбидной фазы не менее 30–35 % и малую величину раскрытия трещин. Для этого необходима повышенная пластичность матрицы наплавочного сплава. Это было реализовано при создании наплавочных материалов на основе никелевой матрицы армированной карбидами [4, 5].

Первыми из материалов такого типа были электроды для ручной дуговой наплавки ГК-10 и ГК-15, которые изготавливались спеканием шихты, содержащей порошок карбида хрома  $\text{Cr}_2\text{C}_3$ , никеля и других компонентов. В дальнейшем были разработаны наплавочные материалы для механизированной наплавки сплавов  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$  - порошковые проволока ПП-АН 110 и лента ПЛ-АН 111.

В настоящее время ПЛ-АН 111 (500X40H40C2PЦ) широко применяется для наплавки контактных поверхностей деталей засыпных аппаратов. Относительная износостойкость металла, наплавленного этой лентой, составляет  $\epsilon = 1,3\text{--}1,4$  [6]. Микротвердость матрицы HV 650–700. Содержание карбидов (HV 1530–1850) составляет 40–50 %. Склонность наплавленного металла к образованию трещин – умеренная, твердость HRC 48–55.

Для наплавки контактных поверхностей уравнильных клапанов и засыпных аппаратов доменных печей на ОАО «Азовмаш» используется способ наплавки порошковой лентой ПЛ-АН 111 по «кольцу», что исключает совпадение оси валиков и направления газового потока. При этом максимальная величина раскрытия трещин не превышает 0,1 мм. Наплавленный металл более технологичен при механической обработке, чем полученный при использовании ПЛ-АН 101, поскольку возможна его обработка резанием.

Недостатком наплавочных материалов на основе никеля является склонность к образованию рыхлот [7]. Эти материалы весьма дороги из-за использования дефицитного в Украине никеля для оболочки.

Наряду со способом дуговой наплавки контактных поверхностей уравнильных клапанов на ряде предприятий нашел применение способ «печной наплавки», заключающийся в пропитке карбидов вольфрама жидким матричным сплавом при температуре 1150 °С. Получаемый при этом композиционный материал «релит-мельхиор», представляет собой колотые литые карбиды  $\text{W}_2\text{C} + \text{WC}$  размером 0,5–2 мм, связанные матрицей из дисперсионно-твердеющего сплава МНМц 60–20–20 (20 % Ni, 20 % Mn, Cu – остальное).

Преимуществом этого способа наплавки является то, что крупные карбиды вольфрама не растворяются – их исходные размеры и свойства сохраняются. При этом позитивно сказывается «теневой эффект» крупных карбидов. Относительная износостойкость «релит-мельхиора» составляет  $e = 2\text{--}3$  [6]. При печной наплавке трещины в наплавленном слое отсутствуют. Значительная толщина наплавки (~ 10 мм) позволяет выполнить до 3 ремонтных перешлифовок, что еще более увеличивает общий срок эксплуатации.

При печной наплавке обеспечить отсутствие дефектов в наплавленном слое удается не во всех случаях. Это происходит из-за неравномерной пропитки карбидного материала, а также плохого сцепления с основой и отслоений. В процессе механической обработки возникают сколы, выкрашивания. Учитывая высокую стоимость применяемых материалов, длительный высокотемпературный термический цикл, приводящий к большому расходу энергоносителей, этот способ в настоящее время практически не применяется.

С целью снижения себестоимости и ресурсосбережения были созданы электродные материалы для механизированной дуговой наплавки сплава типа «релит-мельхиор». Авторами работы [8] представлены данные по разработке порошковой ленты, состоящей из медной оболочки (М0 или М1) и сердечника из порошков релита, никеля и марганца, а также небольшого количества технологических добавок. При использовании уплотнения шихты роликами с ее последующей досыпкой был достигнут коэффициент заполнения 75 %. В процессе наплавки этой лентой часть шихты просыпается в сварочную ванну. При этом карбидная фаза не расплавляется, и ее содержание составляет 35–40 %. Относительная износостойкость наплавленного слоя составляет  $e = 1,5–2,0$  [8].

Недостатком при использовании этой порошковой ленты является неравномерность распределения карбидной фазы по сечению наплавленного слоя. Из-за более высокой плотности релита карбидные частицы тонут в сварочной ванне. При этом донная часть наплавленного валика насыщена карбидной фазой, а приповерхностная – нет.

Применение наплавочных материалов с использованием релита ограничено из-за их высокой стоимости. Попытки применения взамен релита менее дорогих компонентов, например, карбида титана [9], не получили широкого промышленного применения.

Благодаря хорошему сочетанию эксплуатационных и технологических свойств на протяжении уже более 20 лет и в настоящее время для наплавки контактных поверхностей наиболее широко используется ПЛ-АН 111. Неоднократно проводились исследовательские работы с целью замены ее на более экономичный материал на основе железа. Предпосылкой этому явились данные о позитивном влиянии на свойства высокохромистых чугунов дополнительного легирования. В ряде работ были получены обнадеживающие результаты.

Установлено, что повышение газообразивной износостойкости наплавленного металла обеспечивается при легировании его бором в количестве 3–5 %. Для наплавки контактных поверхностей уравнительных клапанов нашла применение порошковая проволока ПП-АН 170 (ПП-Нп 80X20P3T). Относительная износостойкость металла, наплавленного при ее использовании,  $e = 1,0–1,2$ . Микротвердость матрицы HV 950–1000. Содержание упрочняющей карбоборидной фазы (HV 1750–1900) до 40 %. Склонность наплавленного металла к образованию трещин – повышенная, твердость HRC 58–64. При легировании бором (3–5 %) сильно снижаются пластические свойства, что приводит к увеличению количества трещин, величины их раскрытия и отколам. Механическая обработка вследствие высокой твердости и хрупкости наплавленного слоя затруднена.

Авторами работы [10] разработан сплав системы Fe–C–Cr–B–V с пониженным содержанием бора (1,8–2,2 % В) и дополнительно легированный ванадием (1,5–2 % V). Такой наплавленный металл обладает несколько более высокой пластичностью. Испытания металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-260X14P2Ф2НЗ, показали, что его износостойкость в 1,5–1,8 раза выше, чем при использовании ПП-АН 170. Однако, эта электродная проволока также не нашла широкого применения из-за недостаточной трещиностойкости наплавленного слоя.

Разработанная на основании этого порошковая проволока ПП-Нп 350X10Б8Т2 прошла опытно-промышленное опробование в условиях заводов «Криворожсталь» и Донецкого металлургического завода. Относительная износостойкость наплавленного ее металла  $e = 1,16–1,24$ . Твердость матрицы HV 750–800. Карбидная фаза (HV 1570–1830) составляет 30–35 %. Склонность наплавленного металла к образованию трещин – повышенная. Величина раскрытия трещин 0,2–0,7. Твердость HRC 56–58. Недостатками этой проволоки являются большое раскрытие трещин в наплавленном слое и технологичность при механической обработке более низкая, чем при использовании ПЛ-АН 111.

В 80-е годы XX века с целью замены ПЛ-АН 111 проводились опытные наплавки порошковыми лентами ПЛ-АН 179 (ПЛ-Нп 500X22Б7М7В2Ф), а затем ПЛ-АН 179Н [6].

При использовании этих порошковых лент наплавленный металл имеет структуру заэвтектического чугуна, упрочненного специальными карбидами Nb, Mo, W, V. Относительная износостойкость ПЛ-АН 179 и ПЛ-АН 179Н, соответственно,  $e = 1,6$  и  $e = 1,5$ . Опытное промышленное опробование показало, что металл, наплавленный ПЛ-АН 179, является очень хрупким. Трещины на поверхности контактного пояса образовали сетку с размером ячеек  $30 \times 60$  мм и раскрытием до 1,0 мм.

С учетом этого была разработана порошковая лента ПЛ-АН 179Н с более низким содержанием углерода и дополнительного легирования 3–4 % никелем. В условиях ОАО «Азовмаш» этой лентой была выполнена наплавка контактной поверхности конуса засыпного аппарата доменной печи  $\varnothing 5,4$  м. Наплавка выполнялась «двухдуговым широкослойным» способом в два слоя. Толщина наплавленного слоя 9,5–9,8 мм. После шлифования были выявлены трещины вдоль контактного пояса протяженностью 1,5–2 м и раскрытием до 0,5 мм. Кроме того, шлифование наплавленного слоя оказалось очень трудоемким из-за его высокой твердости 58–64 HRC. По результатам опытных работ от использования ПЛ-АН 179Н были вынуждены отказаться.

На ряде металлургических комбинатов Украины проводилось опытно-промышленное опробование порошковой проволоки Ledurit–76, выпускаемой «Böhler Thyssen, Австрия». Относительная износостойкость наплавленного металла  $e = 1,45$ –1,5. Микротвердость матрицы HV 800–900. Карбидная фаза (HV 1570–1950) составляет 40–50 %. Склонность наплавленного металла к образованию трещин – повышенная, твердость HRC 65–68. По результатам промышленного опробования МК «Криворожсталь», «Азовсталь», «им. Ильича» было показано, что эксплуатационная стойкость деталей, ранее наплаваемых ПП-АН 170 (ПП-Нп 80X20P3T), при использовании Ledurit–76 повысилась в 2–2,5 раза.

На ОАО «Азовмаш» порошковая проволока Ledurit–76 применялась для опытной наплавки контактной поверхности малого конуса доменной печи. По результатам опытных работ определено, что Ledurit–76 обладает хорошими сварочно-технологическими свойствами. Недостатком применения этого наплавочного материала является трудность механической обработки, ее трудоемкость возросла в  $\sim 2$  раза. В процессе шлифования величина раскрытия трещин увеличилась с 0,1–0,3 мм после наплавки до 0,5 мм. Имелись отколы пластин наплавленного слоя.

На основании накопленного опыта могут быть сформулированы следующие принципы разработки наплавочного материала на железной основе взамен ПЛ-АН 111.

Необходимо одновременно обеспечить повышение трещиностойкости и газообразивной износостойкости наплавленного металла по сравнению со сплавами типа «Сормайт-1». Это может быть достигнуто за счет легирования сильными карбидообразующими элементами (V, Nb, W, Mo, Ti). Карбидная фаза в таких сплавах имеет повышенную твердость и более благоприятную форму. При этом обеспечивается как повышение износостойкости, так и модифицирование наплавленного металла.

В структуре наплавленного металла необходимо избегать образования хрупкого мартенсита, используя легирование аустенитообразующими элементами (Ni, Cu, Mn).

Твердость наплавленного металла должна быть относительно невысокой HRC 48–54.

При большей твердости металл хрупок, процесс шлифования затрудняется. Происходит «разбивание» краев трещин, имеющих в наплавленном металле.

Для дополнительного повышения износостойкости может использоваться эффект дисперсионного твердения наплавленного металла в процессе термической обработки (отжига), обычно используемой для снятия напряжений после наплавки, а также в процессе эксплуатации.

Наибольшая газообразивная износостойкость металла, наплавленного ПЛ-11, достигается после отпуска 600–650 °C (HRC  $\geq 50$ ). Относительная износостойкость составляет  $e = 1,4$ –1,5 и не уступает ПЛ-АН 111.

Порошковая лента ПЛ-11 была успешно опробована при наплавке контактных поверхностей уравнильных клапанов доменной печи. При этом качество и технологичность наплавленного слоя полностью удовлетворяли предъявляемым требованиям.

В дальнейшем опытные работы по внедрению этой порошковой ленты не выполнялись, так как из-за экономического кризиса 90-х годов XX века выпуск порошковых лент на «Азовмаше» был прекращен и не возобновлялся.

Представляется целесообразным продолжить дальнейшую разработку порошковых лент на железной основе, обеспечивающих получение наплавленного металла с аустенитной матрицей, армированной специальными карбидами и способного к дисперсионному твердению, в том числе в процессе эксплуатации.

## ВЫВОДЫ

1. При наплавке контактных поверхностей уравнильных клапанов доменных печей широко применяется порошковая лента ПЛ-АН 111, хорошо зарекомендовавшая себя благодаря сочетанию высоких эксплуатационных и технологических свойств. ПЛ-АН 111 является дорогой так, как при ее изготовлении используется оболочка из никелевой ленты, что делает актуальным разработку наплавочного материала на железной основе для ее замены. При его создании следует ориентироваться на сплавы типа высокохромистых чугунов легированные сильными карбидообразующими элементами (V, Nb, W, Mo). За счет этого может быть достигнуто одновременное увеличение износостойкости и модифицирование наплавленного металла.

3. Для обеспечения технологичности необходимо легирование наплавленного металла аустенитообразующими элементами (Ni, Cu, Mn), что предотвращает образование в структуре хрупкого мартенсита.

4. Реализация эффекта дисперсионного твердения в процессе термической обработки (отжига), применяемой для снятия напряжений после наплавки, позволяет обеспечить дополнительное повышение эксплуатационной стойкости деталей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожик Д. А. Изготовление и эксплуатация загрузочных устройств доменных печей / Д. А. Сторожик, В. М. Гребенник, М. А. Тылкин. – М. : Металлургия, 1973. – 319 с.
2. Кащенко Ф. Д. Эксплуатация наплавленных больших конусов засыпных аппаратов доменных печей / Ф. Д. Кащенко, В. Я. Андреев // Автоматическая сварка. – 1967. – № 5. – С. 67–70.
3. Юзвенко Ю. А. Влияние трещин на газо-абразивный износ наплавленного металла / Ю. А. Юзвенко, В. П. Шимановский // Автоматическая сварка. – 1971. – № 2. – С. 61–62.
4. Шеенко И. Н. Современные наплавочные материалы на основе тугоплавких соединений / И. Н. Шеенко, В. Д. Орешкин, Ю. Д. Репкинко. – К. : Наук. думка, 1970. – 238 с.
5. Юзвенко Ю. А. Сплавы на основе карбидов хрома для механизированной наплавки / Ю. А. Юзвенко, М. А. Пащенко // Автоматическая сварка. – 1969. – № 3 – С. 24–29.
6. Опыт применения наплавки на предприятиях черной металлургии Украины / С. Я. Шахтер, В. В. Пьянкой, Ю. И. Лазаренко, В. Е. Косошикова // Наплавка. Опыт и эффективность применения. – Киев : ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1985. – С. 9–13.
7. Шимановский В. П. Материалы и оборудование для наплавки конусов и чаш доменных печей / В. П. Шимановский, А. П. Ворончук, С. М. Звездин // Оборудование и материалы для наплавки. – Киев : ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1990. – С. 72–73.
8. Механизированная электродуговая наплавка высокоизносостойкими композиционными сплавами / В. А. Муратов, Л. С. Малинов, В. В. Чигарев и др. // Сварочное производство. – 1974. – № 5. – С. 39–40.
9. Присно И. Г. Разработка износостойких наплавочных композиционных сплавов с наполнителем на основе карбида титана / И. Г. Присно, И. Я. Дзыкович, Г. К. Козина // Автоматическая сварка. – 1987. – № 3. – С. 47–50.
10. Попов С. Н. Наплавочные материалы системы Fe-C-Cr-V для защиты деталей, работающих в условиях интенсивного газоабразивного и абразивного изнашивания / С. Н. Попов, А. А. Митяев // Повышение надежности и долговечности деталей машин и конструкций. – Киев : УМКВО, 1988. – С. 8–11.