

Из расчетов объемов и энтальпий продуктов сгорания, а также теплового баланса водогрейного теплогенератора следует, что при топливно-воздушно-кислородном режиме сжигания газообразного топлива точка росы не превышает 70 °С, т.е. нижнего предела расчетного температурного графика тепловых сетей и водогрейных котлов, что полностью исключает низкотемпературную коррозию поверхностей нагрева. Кроме того, при температуре уходящих дымовых газов 100 °С коэффициент полезного действия теплогенератора при топливно-воздушно-кислородном режиме сжигания топлива на 1,05 % больше, чем при топливно-воздушном режиме, что экономит топливо. Как видно из рисунка 4, разница в КПД при топливно-воздушном и топливно-кислородном режимах при температуре уходящих газов 100 °С составляет 2 %, а при температуре 250 °С – 7 %.

*УДК 621.762*

**Д.А. ОЛЕШКЕВИЧ  
(ИНСТИТУТ СВАРКИ И  
ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НАНБ)**

### **ИЗУЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ**

Совершенствование специальных износостойких сплавов, повышение их технико-экономических показателей по-прежнему является актуальной проблемой, привлекающей пристальное внимание исследователей [1]. Существующая ситуация настоятельно требует создания отечественных высокоэффективных наплавочных электродов. Разработка подобных многокомпонентных сплавов является сложной задачей со многими неизвестными. Решение задачи по повышению абразивной износостойкости наплавленного металла возможно как путем изучения основных физико-химических взаимодействий основных легирующих элементов с использованием

аналитических и физико-химических методов, так и путем синтеза специальных комплексных материалов и сплавов для электродных покрытий, позволяющих обеспечивать необходимые механические свойства наплавленного слоя.

Как известно, при электродуговой наплавке структурное состояние сплава определяется его химическим составом, режимом наплавки и условиями кристаллизации сварочной ванны, условиями охлаждения после затвердевания сформированного наплавленного слоя и режимами его термической обработки. Наряду с состоянием карбидной фазы свойства износостойких сталей и сплавов определяются составом и строением матрицы (основы) этих материалов [1]. Наплавочные материалы, применяемые для работы в условиях абразивного изнашивания, после процесса наплавки представляют собой обычно высокоуглеродистые легированные стали и сплавы. Структура наплавленного металла такими материалами состоит из карбидной фазы и матрицы (основы) различного строения. Матрица может быть аустенитной, мартенситной, ферритной и может состоять из их сочетания.

Введение дополнительных легирующих компонентов в состав электродного покрытия открывает широкие перспективы создания наплавочных сплавов [2]. Одним из перспективных вариантов получения специальных соединений типа  $Fe-Me_1-Me_2$ , используемых для получения специальных компонентов электродных покрытий, является технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Полученные методом СВС соединения обладают хорошо сформированными структурами. Как правило, эти соединения имеют однородный химический состав, что очень важно для быстротечных металлургических процессов в сварочной дуге. Существенным преимуществом осуществления синтеза из исходных компонентов в режиме горения по методу СВС является высокая скорость протекания процесса, что обеспечивает высокую чистоту конечных продуктов [3].

Целью работы являлось аналитическое и экспериментальное исследование процессов легирования и фазообразования наплавленного слоя электродами, содержащими в своем покрытии синтезированные лигатуры типа  $Fe-Me-C-B$ , полученные методом СВС.

Аналитические исследования осуществлялись с применением специализированной программы расчета термодинамических рав-

новесий MTData (Великобритания) [4]. Расчеты выполнялись применительно к борсодержащим системам типа  $B_4C$ , Fe-Cr-B, Fe-Cr-B-C, Fe-Cr-Ti-B, Fe-Cr-Ti-B-C и др. Ниже приведены расчеты и анализ процессов образования комплексных соединений на примере системы типа Fe-Me (Cr, Ni)-B-C.

В качестве объектов исследования были выбраны комплексные ферросплавы, содержащие такие легирующие элементы, как Cr, B, Ni. Использование этих элементов определяется их ролью при формировании физико-механических свойств наплавленного металла и широким использованием наплавочных материалов в производстве [5, 6]. В стандартных наплавочных материалах в качестве основных компонентов используется феррохром (содержание хрома до 60 %), а также карбид бора и сажистый углерод [7]. В ряде случаев карбид бора заменяется боридом железа с соответствующей корректировкой состава исходного наплавочного материала [4]. Использование никеля необходимо для обеспечения в структуре наплавленного металла аустенита, что, в свою очередь, обеспечивает стойкость к ударным нагрузкам.

Применяемые при исследовании технологии получения комплексных лигатур [5] с привлечением СВС позволили синтезировать комплексные лигатуры типа Fe-Me (Cr, Ni)-B-C с использованием вторичного сырья (отходы чугунной дроби ИЧХ28Н2, нержавеющая стружка, оксид железа СТК 1-7). В определенной степени химический состав таких лигатур определяется составом исходных материалов. Оценка поведения составных компонентов вышеприведенных соединений в температурных условиях дуговой наплавки дает возможность спрогнозировать структурное состояние и, соответственно, свойства наплавленного сплава. Выполнен анализ расчета состава наплавленного сплава, содержащего от 20 до 40 % специальных лигатур (таблицы 1, 2).

Как видно из приведенных данных, в области температур сварки (2000 °С и выше) все легирующие элементы растворяются в расплавленном металле. Образование при температуре кристаллизации специального карбида типа  $M_{23}C_6$  происходит при содержании лигатуры в покрытии электрода свыше 30 %. Такая

закономерность наблюдается для всех составов лигатур, содержащих 3–5 % углерода.

Таблица 1 – Состав лигатуры и содержание элементов в наплавленном металле, мас. %

| Состав лигатуры |      |     |     |      | Содержание<br>в по-<br>крытии | Содержание (расчетное) элементов в наплавленном металле |       |      |      |      |
|-----------------|------|-----|-----|------|-------------------------------|---|-------|------|------|------|
| Fe              | Cr   | C   | B   | Ni   |                               | Fe  | Cr    | C    | B    | Ni   |
| 40,0            | 60,0 | 0,1 | –   | –    | 20                            | 90,39   | 9,60  | 0,01 | –    | –    |
|                 |      |     |     |      | 30                            | 85,59   | 14,40 | 0,01 | –    | –    |
|                 |      |     |     |      | 40                            | 80,79   | 19,20 | 0,01 | –    | –    |
| 35,0            | 60,0 | 5,0 | –   | –    | 20                            | 90,05   | 9,60  | 0,35 | –    | –    |
|                 |      |     |     |      | 30                            | 85,08   | 14,40 | 0,53 | –    | –    |
|                 |      |     |     |      | 40                            | 80,10   | 19,20 | 0,70 | –    | –    |
| 32,0            | 60,0 | 4,0 | –   | –    | 20                            | 89,56   | 9,60  | 0,28 | –    | –    |
|                 |      |     |     |      | 30                            | 84,34   | 14,40 | 0,42 | –    | –    |
|                 |      |     |     |      | 40                            | 79,12   | 19,20 | 0,56 | –    | –    |
| 30,7            | 57,7 | 3,8 | 4,0 | –    | 20                            | 89,21   | 9,23  | 0,27 | 0,76 | –    |
|                 |      |     |     |      | 30                            | 83,82   | 13,85 | 0,40 | 1,14 | –    |
|                 |      |     |     |      | 40                            | 78,42   | 18,46 | 0,53 | 1,52 | –    |
| 70,0            | 18,0 | –   | –   | 10,0 | 20                            | 95,32   | 2,88  | –    | –    | 1,80 |
|                 |      |     |     |      | 30                            | 92,98   | 4,32  | –    | –    | 2,70 |
|                 |      |     |     |      | 40                            | 90,64   | 5,76  | –    | –    | 3,60 |
| 64,1            | 16,7 | 4,0 | 4,0 | 9,3  | 20                            | 94,61   | 2,67  | 0,28 | 0,76 | 1,67 |
|                 |      |     |     |      | 30                            | 91,92   | 4,01  | 0,42 | 1,14 | 2,51 |
|                 |      |     |     |      | 40                            | 89,23   | 5,34  | 0,56 | 1,52 | 3,35 |

При насыщении бором основное количество бора концентрируется в твердом растворе. При среднем содержании бора в лигатуре, достигающем 4 %, в твердом растворе содержится до 0,5 % бора. Кроме того, для лигатуры, полученной путем переработки нержавеющей стружки и высокохромистого сплава (ИЧХ), содержащего 3,8 % углерода, в структуре металла наблюдаются частицы карбида бора в количестве до 1–1,5 %. Образование карбида типа  $M_{23}C_6$  удовлетворительно согласуется с теоретическими предпосылками, согласно которым в железо-хромистых сплавах при содержании хрома свыше 2,5 % появляются карбиды хрома.

Таблица 2 – Расчетный состав наплавленного металла, мас. %

| Состав лигатуры                |                                |         |       | Содержание в покрытии | Температура, °С                | Фазовый состав наплавленного слоя |        |       |       |      |     |       |      |      |
|--------------------------------|--------------------------------|---------|-------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------|-------|-------|------|-----|-------|------|------|
| Fe                             | Cr                             | C       | B     |                       |                                | Фаза                              | Кол-во | Fe    | Cr    | C    |     |       |      |      |
| 40                             | 60,0                           | 0,1     | –     | 20                    | 2000                           | Ж                                 | 1,0    | 90,40 | 9,60  | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       |                       | 1500                           | Тв. р-р                           | 1,0    | 90,40 | 9,60  | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       |                       | 800                            | Тв. р-р                           | 1,0    | 90,40 | 9,60  | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       | 30                    | 2000                           | Ж                                 | 1,0    | 85,60 | 14,40 | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       |                       | 1500                           | Тв. р-р                           | 1,0    | 85,60 | 14,40 | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       |                       | 800                            | Тв. р-р1                          | 0,02   | 81,60 | 18,40 | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       | Тв. р-р2              |                                | 0,98                              | 85,60  | 14,40 | –     |      |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       | 40                    | 2000                           | Ж                                 | 1,0    | 80,80 | 19,20 | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       |                       | 1500                           | Тв. р-р                           | 1,0    | 80,80 | 19,20 | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       |                       | 800                            | Тв. р-р                           | 1,0    | 80,80 | 19,20 | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       | 36,0                  | 60,0                           | 5,0                               | –      | 20    | 2000  | Ж    | 1,0 | 90,10 | 9,60 | 0,34 |
|                                |                                |         |       |                       |                                |                                   |        |       | 1500  | Ж    | 1,0 | 90,10 | 9,60 | 0,34 |
| 800                            | Тв. р-р                        | 0,956   | 92,70 |                       |                                |                                   |        |       | 7,20  | 0,08 |     |       |      |      |
|                                | M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> | 0,049   | 39,60 |                       |                                |                                   |        | 54,6  | 5,0   |      |     |       |      |      |
| 30                             | 2000                           | Ж       | 1,0   |                       |                                |                                   |        | 85,1  | 14,4  | 0,52 |     |       |      |      |
|                                | 1500                           | Ж       | 1,0   |                       |                                |                                   |        | 85,1  | 14,4  | 0,52 |     |       |      |      |
|                                | 800                            | Тв. р-р | 0,913 |                       |                                |                                   |        | 90,1  | 9,9   | 0,06 |     |       |      |      |
| M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> |                                | 0,086   | 32,4  |                       |                                |                                   |        | 62,4  | 5,6   |      |     |       |      |      |
| 64,1                           | 16,7                           | 4,0     | 4,0   |                       |                                |                                   |        | 40    | 1500  | Ж    | 1,0 | –     | –    | –    |
|                                |                                |         |       | 800                   | Тв. р-р1                       | 0,929                             | –      |       | –     | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       |                       | Тв. р-р2                       | 0,009                             | –      |       | –     | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       |                       | M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> | 0,054                             | –      |       | –     | –    |     |       |      |      |
|                                |                                |         |       |                       | B <sub>x</sub> C               | 0,016                             | –      |       | –     | –    |     |       |      |      |

Примечания: 1. Ж – жидкая фаза;  
 2. Тв. р-р – твердый раствор элементов;  
 3. M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> – карбид металла;  
 4. B<sub>x</sub>C – карбид бора

Полученные результаты исследований процессов формирования структуры наплавленного слоя при использовании лигатур типа Fe-Me-C-B (Me-Cr, Ni) показали, что в области температур сварки структура расплавленного металла представляет легированный твердый раствор для всех типов лигатур.

С учетом полученных аналитических данных были определены оптимальные условия образования специальных борсодержащих лигатур для системы Fe-B-C-Cr-Ni и Fe-Cr-C-B и была выполнена серия экспериментов с применением наплавочных электродов. Электроды были изготовлены на лабораторном электродо-обмазочном прессе ПО-0030 с использованием сварочной проволоки марки Св-08 (ГОСТ 2246) диаметром 3,0 мм. В качестве связующего использовалось калиево-натриевое жидкое стекло в соответствии с ТУ 21-23-109 ( $M = 3,0$ ;  $\rho = 1,39 \text{ г/см}^3$ ). Изучали наплавленный сплав, полученный электродами, в составе покрытия которых присутствовали следующие компоненты: FeMn88, FeSi45, графит, ильменитовый концентрат, каолин, мрамор, специальная лигатура (20–25 %). Испытания полученных электродов проводили на пластинах из стали марки Ст3. Величина легирующей добавки в покрытии варьировалась от 20 до 40 %. Наплавочные электроды изготавливали с коэффициентом массы покрытия, равным 100 %. Наплавка разработанными электродами осуществлялась постоянным током прямой полярности, сила тока составляла 140–150 А.

В результате рентгеноструктурного анализа установлено, что в составе наплавленного сплава присутствуют карбиды  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , а также незначительное количество боридов  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Основную часть наплавленного металла составляют карбиды хрома и железа (рисунок 1). Твердость наплавленного слоя, полученного экспериментальными электродами, составляет 48–50 HRC.

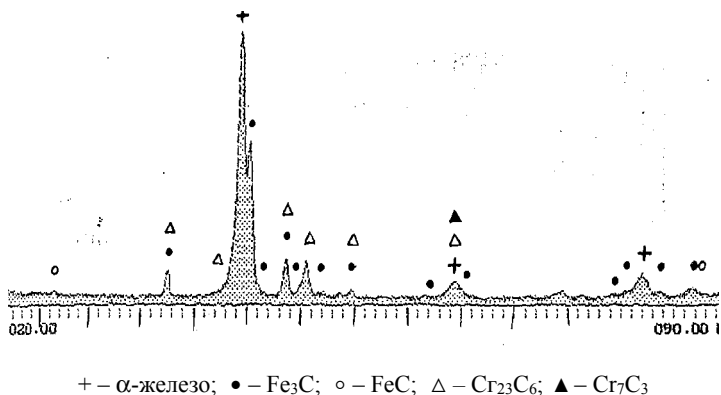


Рисунок 1 – Рентгенограмма наплавленного металла, полученного экспериментальными электродами

Проведенные комплексные исследования на примере лигатуры Fe-Cr-C-B-Ni позволили проанализировать ряд наплавленных слоев различного состава. Изучение (в том числе и аналитическое) свойств таких сплавов позволяет спрогнозировать оптимальное сочетание в наплавленном слое упрочняющих фаз, наметить пути оптимизации их содержания в исходной шихте с целью дальнейшего получения оптимального комплекса эксплуатационных свойств.

## Литература

**1. Восстановление** деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.

**2. Получение** наплавочных материалов с использованием процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Н.Ю. Борд [и др.] // Сварка и родственные технологии: Республ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 6. – Минск, 2004. – С. 29–32.

**3. Боровинская, И.П.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений / И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов // Металлотермические процессы в химии и металлургии: сб. тр. – Новосибирск: Наука, 1971. – С. 58–60

**4. Борд, Н.Ю.** Термодинамические расчеты в практике конструирования и применения сварочных материалов / Н.Ю. Борд, К.Е. Белявин, В.К. Шелег. – Минск: Бел. наука, 2006. – 172 с.

**5. Расчет** фазовых равновесий в многокомпонентных системах / А.И. Казаков [и др.]; под ред. В.Н. Романенко. – М.: Металлургия, 1987. – 136 с.

**6. Применение** ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г.Б. Синярев [и др.]. – М.: Наука, 1982. – 263 с.

**7. Сварочные** материалы для дуговой сварки (справ. пособие): в 2 т. / под ред. Н.Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1993. – Т. 2. – 768 с.

**8. Кинтана, М.И.** Разработка присадочных материалов для сварки / М.И. Кинтана, Д.Дж. Котеки // Сварные конструкции: достиже-

ния и перспективы: сб. докладов на 53-м Ежегодном Конгрессе МИС, Москва, 13 июля 2000 г. – Библиотека «Спецэлектрод». – Вып. 2. – М., 2000. – 202 с.