

УДК 621.791

©Калин Н.А., Изотова Е.А.

## РАЗРАБОТКА ПРИСАДОЧНЫХ ПРУТКОВ ДЛЯ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

### 1. Постановка проблемы

В последнее время в мировой практике расширяется применение чугунов со специальными свойствами: высокопрочного, ковкого, аустенитно-никелевого, высокохромистого и др. отсюда необходимость изучения процессов их сварки.

В значительной мере качество сварного шва определяется кинетикой его кристаллизации, зависящей не только от скорости охлаждения, состояния жидкого металла и его химического состава, но и от процесса модифицирования. В качестве модификатора при получении чугуна с шаровидным графитом наиболее часто применяют магний. В последнее время наметилась тенденция использования редкоземельных элементов. Магниевого чугуны при одинаковых условиях обладают несколько лучшей жидкотекучестью, чем серые чугуны. Благодаря этому создаются хорошие предпосылки для получения плотного без пор и шлаковых включений наплавленного металла. Однако значительная склонность магниевых чугунов к образованию усадочных раковин и пустот создает дополнительные трудности при его сварке.

Образующаяся при высокопрочной сварке чугуна зона пониженной пластичности значительно усложняет процесс сварки. При сварке высокопрочного чугуна получить сварные соединения, по прочности и пластичности близкие к основному металлу, значительно труднее, чем при сварке серого чугуна, тем более, что магний, вводимый в чугун, увеличивает его склонность к образованию структур отбела.

Равнопрочное сварное соединение на чугуне с шаровидным графитом можно получить лишь в случае однородности по структуре и свойствам основного металла и металла шва.

### 2. Методика исследований

Чугунные прутки по ГОСТ 2671-80 для газовой сварки и изготовления электродов представляют собой чугун эвтектического и заэвтектоидного состава с углеродным эквивалентом 4,3 – 4,8 %, получаемом при меньшем содержании углерода (3,0-3,5 %).

Введение редкоземельных металлов в состав сварочного прутка позволяет получить наплавленный металл с шаровидной (глобулярной) формой графита.

Прутки различных диаметров (6-16 мм) отливали в графитовые кокилы. Металл для присадочных прутков выплавляли в индукционных печах, обеспечивающих высокую температуру перегрева (1400-1580° С) с регулировкой выдержки металла в жидком состоянии не менее 15 мин.

Для сравнения, в качестве присадочного материала при газовой и электродуговой сварке чугуна, использовались прутки диаметром 8-10 мм из чугуна марки А или Б по ГОСТ 2671-80, изготавливаемые способом отливки в специальные металлические формы.

В качестве флюса при газовой сварке использовалась бура техническая по ГОСТ 8429, прокаленная при температуре 300-350 °С в течение 2-х часов.

В качестве легирующей и модифицирующей добавки РЗМ в чугуновых прутках использовали иттрий.

Проверку сварочно-технологических свойств опытных составов прутков проводили при газовой (ацетилено-кислородной) и электродуговой сварке высокопрочного чугуна марки ВЧ45-5.

Чугуновые электроды представляют собой литые чугуновые прутки, покрытые слоем стабилизирующей обмазки, наносимой методом окунания. Электроды используют для горячей ручной дуговой сварки чугуна ванным способом. Использовали прутки диаметром 12-16 мм. Покрытие наносили в один слой с толщиной покрытия на сторону 1,5-2 мм. Электроды просушивали на воздухе в течение 24 час, после чего проводили прокалику при температуре 200-250 °С.

В состав покрытия вводили большое количество графитизаторов, а кремний введен в виде карбида кремния для компенсации угара кремния.

Твердость металла шва и наплавленного металла измеряли на приборе ТК-2, микротвердость замеряли на приборе ПМТ-3. Пробы для химического анализа наплавленного металла отбирали из верхних слоев наплавки в соответствии с ГОСТ 7122-81.

Общий характер микроструктуры сварных швов оценивали с помощью оптического микроскопа МИМ –8М на поперечных микрошлифах размером 15x25x30 мм.

### 3. Результаты исследований

Использование одновременно двух эффективных модификаторов – магния и РЗМ позволило получить полностью шаровидных графит при меньших содержаниях этих модификаторов в составе прутков, чем при отдельном их применении. Это объясняется тем, что действие модификаторов, как правило, суммируется.

Кроме того, РЗМ подавляют действие таких демодификаторов как висмут, свинец, сурьма, титан, мышьяк, олово и присутствующих в виде примеси в чугунах, восстанавливая тем самым шаровидную форму графита, а также способствуют очищению металла от серы и газов, измельчают зерно, повышают механические свойства сварного соединения.

Бор вводится в количестве 0,06-0,15 % в состав сварочного прутка с целью придания ему свойств самофлюсования при электрических способах сварки чугуна, т.е. позволяет использовать прутки для сварки без покрытия или флюса.

Свойство самофлюсования сварочному прутку также придают и активные раскислители и дегазаторы как РЗМ и алюминий, но в меньшей степени, чем бор.

Алюминий является близким по активности к РЗМ, поэтому, находясь в сварочной ванне, он интенсивно соединяется с кислородом, серой, фосфором, унося образовавшиеся интерметаллиды в шлак, сохраняя тем самым РЗМ от значительного выгорания. Оставшаяся часть алюминия (до 0,1 вес. %) идет на образование центров графитизации.

Введение в состав металла прутков хрома в количестве 0,07-0,12 % упрочняет матрицу чугуна, повышая тем самым его механические свойства.

Для металлографического исследования качества наплавленного металла и зон термического влияния были использованы образцы, заваренные газовой сваркой. Исследованием установлено:

1. По макроструктуре на обоих образцах четко проявляется наплавленный металл высотой 9 мм и зоны термовлияния шириной до 10 мм, четкой линии сплавления основного и наплавленного металла не имеется.

2. Структура основного металла в обоих случаях состоит из перлита, шаровидного графита средних размеров и единичных весьма мелких включений цементита. Феррит присутствует в небольшом количестве (до 5 %). Твердость основного металла составляет 217 НВ.

3. Структура наплавленного металла у поверхности шва на глубине до 1,5-2 мм перлитная и небольшими участками аустенита дендритной ориентации. Далее по высоте шва вплоть до линии сплавления в структуре преобладает перлит. Твердость в этой зоне в обоих случаях составляет 229 НВ. Включения феррита и цементита единичны. Графит шаровидный средней величины, несколько мельче, чем в основном металле.

4. В зоне термического влияния на обоих образцах отмечается значительное увеличение количества феррита по сравнению с основным металлом. Твердость в зоне термовлияния обоих образцов составляет 167-197 НВ.

Малые добавки РЗМ в прутке оказывают рафинирующее и модифицирующее воздействие за счет образования дополнительных центров кристаллизации графита.

Как показала практика, применение одного и того же исходного металла прутка в зависимости от способа сварки и режима в одном случае обеспечивает наплавленный металл с шаровидным графитом, а в другом нет. Это происходит из-за различного остаточного содержания модификаторов в наплавленном металле при разных способах сварки.

Исследовали металл, наплавленный в разделку глубиной 30 мм на пластинах (250x150x45 мм) из высокопрочного магниевого чугуна. Во избежание утечки жидкого металла торцы разделки закрывали асбестом.

Наплавку производили различными способами: ацетилено-кислородным пламенем (горелкой с наконечником №6); электрической дугой с графитовым электродом (полярность прямая, сила тока 180-200 А) и плавящимся чугуном электродом (полярность обратная, сила тока 350-380 А).

Химический состав прутка, в %:

3-3,5 С; 3-3,6 Si; 0,4-0,7 Mn; 0,3-0,7 Ni; 0,2-0,5 Mo;  
0,08-0,12 Cr; 0,005-0,08 S; 0,04-0,08 P.

По условиям эксперимента в состав прутков вводили в %: 0,05-0,39 Y либо 0,03-0,4 Mg, либо 0,03-0,1 Mg и 0,03-0,14 Y одновременно.

Перед сваркой пластины подогревали до 500-600 °С, после сварки помещали в песок, нагретый до 400-500 °С, и выдерживали до полного остывания.

Содержание магния в прутках и наплавленном металле определяли спектральным, а иттрия – химическим анализом. Погрешность составляла 5-8 %.

Коефіцієнт переходу модификаторів визначали шляхом порівняння їх вмісту в вихідному матеріалі і в наплавці, а вплив оцінювали за дисперсності графітних включень в матриці і коефіцієнту форми графіта за ГОСТ 3443-87.

Дослідженнями встановлено, що при газовій зварці прутками, модифікованими магнієм, при збільшенні його вмісту до 0,16 % коефіцієнт переходу модификатора з прутка в наплавку практично не змінюється. Далі збільшення вмісту магнію в прутку веде до зниження його переходу в наплавку, при цьому його граничне значення становить 0,1-0,12 %.

При зварці прутками, модифікованими іттриєм, встановлено, що він менше випаровується і вигорає, ніж магній. Коефіцієнт переходу іттрію з прутка в наплавку постійний і становить 0,72-0,75.

Аналіз результатів спільного введення модификаторів показав, що комплексне модифікування забезпечує більш повний перехід іттрію і магнію з прутка в наплавлений метал за порівнянням з окремим модифікуванням. Коефіцієнти переходу іттрію і магнію в цьому випадку становлять 0,85-0,9 і 0,48-0,56 відповідно за порівнянням з газовою, дуговою зваркою графітовим електродом характеризується порівняльно жорстким термічним циклом. Нагрів при цьому прутків до температури 1500-2000 С викликає підвищене випаровування і вигорання модификаторів. Коефіцієнт переходу магнію при зварці прутками, що містять 0,03-0,23 % магнію, становить 0,3. Підвищення вмісту магнію в прутку з 0,23 до 0,4 % веде до зниження коефіцієнта переходу до 0,25.

При модифікуванні прутків іттриєм, коефіцієнт переходу постійний і становить 0,5.

Комплексне модифікування характеризується більш високим переходом іттрію і магнію в наплавлений метал за порівнянням з окремим модифікуванням. При цьому коефіцієнти переходу іттрію і магнію становлять в середньому 0,7 і 0,4 відповідно.

Висока температура при дуговій зварці плавлячим електродом веде до інтенсивного випаровування і вигорання елементів, що входять до складу прутка. Тому при модифікуванні магнієм зафіксовано найнижчий коефіцієнт переходу, рівний 0,15.

Коефіцієнт переходу іттрію при зварці іттрієм, що містять прутками так само невисокий і становить 0,26.

Комплексне модифікування суттєво підвищує перехід модификаторів, особливо іттрію. Коефіцієнт переходу магнію з прутка в наплавку рівний в середньому 0,2, іттрію – 0,5.

При наплавці магніймісними прутками (незалежно від способу зварки) з збільшенням вмісту магнію в наплавленому металі від 0,01 до 0,04 % точечна форма графіта переходить в суміш, з перевагою компактною формою. З'являються і порівняльно великі сфероїди Граз90, а також Граз40. Далі збільшення залишкового вмісту магнію в наплавленому металі, починаючи з 0,05 %, веде до утворення графіта сферичної форми Гф12.

Вміст іттрію в наплавленому металі, рівний 0,04 %, веде до утворення компактного графіта з невеликою кількістю точечного графіта. З збільшенням

содержания иттрия до 0,06 % образуется графит шаровидной и компактной формы, при 0,08 % и выше – шаровидный графит правильной формы Гф12, размер графитного сфероида меньше, чем при модифицировании чугуна магнием, и соответствует Граз30.

Комплексное модифицирование уже при содержании в наплавленном металле 0,02-0,03 % Mg и 0,05-0,06 Y приводит к образованию шаровидного графита правильной четкой формы Гф13.

Причем размер сфероидов меньше, чем при отдельном модифицировании, и соответствует Граз25. необходимо отметить, что практически весь свободный графит представляет собой сфероиды, равномерно распределенные в матрице основы, что характерно для равновесных структур.

### **Выводы**

1. Разработан состав прутка для газовой и электродуговой сварки высокопрочного чугуна, содержащим новую систему легирования и раскисления – РЗМ бор.

2. Структура наплавленного металла у поверхности шва на глубине до 1,5-2 мм перлитная с небольшими участками аустенита дендритной ориентации. Далее по высоте шва в структуре преобладает перлит. Твердость в этой зоне составляет 229 ед. НВ. Графит шаровидный средней величины, несколько мельче, чем в основном металле.

3. Хорошее смачивание жидким металлом поверхности основного металла и образование легкоплавкого шлака.

### **Список использованных источников:**

1. Асиновская Г. А. Газовая сварка чугуна / Г. А. Асиновская, Ю. И. Журавицкий. – М. : Машиностроение, 1974. – 49 с.

2. Иванов Б. Г. Сварка и резка чугуна / Б. Г. Иванов, Ю. И. Журавицкий, В. И. Левченков. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.

3. Левченков В.И. Состояние и перспективы развития сварки чугуна (обзор) / В. И. Левченков // Сварочное производство. – 1988. – № 2. – С. 2–4.

*Калин Н.А., Изотова Е.А.* «Разработка присадочных прутков для сварки высокопрочного чугуна».

Разработан состав чугунолитого литого прутка для газовой и электродуговой сварки высокопрочного чугуна на основе прутков марки А с добавлением легирующих элементов, содержащим редкоземельные металлы и бор. Структура наплавленного металла у поверхности шва на глубине до 1,5-2 мм перлитная и небольшими участками аустенита дендритной ориентации. Далее по высоте шва вплоть до линии сплавления в структуре преобладает перлит. Твердость в этой зоне составляет 229 НВ. Графит шаровидный средней величины, несколько мельче, чем в основном металле.

**Ключевые слова:** электрод, раскислитель, углерод, чугун.

**Калін М.А., Ізотова К.О.** «Розробка присадочних прутків для зварювання високоміцного чавуну».

Розроблено склад чавунного литого прутка для газового й електродугового зварювання високоміцного чавуну на основі прутків марки А с додаванням легируючих елементів, що містять рідкоземельні метали й бор. Структура наплавленого металу біля поверхні шва на глибині до 1,5-2 мм перлітна з невеликими ділянками аустеніту дендритної орієнтації. Далі по висоті шва аж до лінії сплавлення в структурі переважає перліт. Твердість у цій зоні становить 229 НВ. Графіт кулястий середньої величини, трохи дрібніше, ніж в основному металі.

**Ключові слова:** електрод, розкислювач, вуглець, чавун.

**Kalin N.A., Izotova E.A.** “Development prisadochnyh rod for welding vysokoprochnogo cast iron”.

The Designed composition cast-iron cast rod for gas and arc-metal of the welding strong cast iron on base rod marks A with accompaniment легирующих element, contain rare-earth and boron. The Structure welding metal beside surfaces of the seam at the depth before 1,5-2 mms perlite and small area austenite dendrite to orientation. Hereinafter on height of the seam up to line of the fusing in structure dominates perlite. Hardness in this zone forms 229 HB. The Graphite of the globous average value, several small, than basically metal.

**Key words:** electrode, deoxidizer, carbon, cast iron.

Стаття надійшла до редакції 17 вересня 2013 р.