**Максимов Сергій Юрійович. Фізико-металургійні особливості та технологія дугового зварювання у воді низьколегованих сталей : Дис... д-ра наук: 05.03.06 – 2006**

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Максимов С.Ю. Фізико-металургійні особливості та технологія дугового зварювання у воді низьколегованих сталей. – Рукопис.  Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені технології». Інститут електрозварювання ім..Є.О.Патона НАН України, Київ, 2006 р.  Дисертація присвячена вивченню особливостей впливу водного середовища на фізико-металургійні закономірності протікання процесу дугового зварювання та розробці на цій основі теоретичних основ та науково обґрунтованого комплексу металургійних та технологічних заходів забезпечення якості зварних з’єднань маловуглецевих на низьколегованих сталей з міцністю до 600 МПа. Визначено умови стабільного горіння дуги у водному середовищі при підвищеному тиску. Розвинено уявлення про механізм утворення пор водневого походження і встановлено закономірності впливу умов зварювання на щільність металу шва. Встановлено методи керування структурою і властивостями металу швів, виконаних під водою, та принципи їх легування для зварювання сталей, схильних до утворення холодних тріщин у ЗТВ. Вивчено якісний і кількісний вплив структурного та водневого факторів, які визначають підвищену схильність зварних з’єднань до пришовних тріщин в екстремальних умовах підводного зварювання. Розроблено комплекс металургійних та технологічних методів забезпечення якості зварних з’єднань низьколегованих сталей підвищеної міцності, принципи побудови електродних матеріалів нового покоління та приклади їх реалізації. | |
| |  | | --- | | 1. Досягнутий в Україні та передових зарубіжних країнах рівень розвитку дугового підводного зварювання мокрим способом не задовольняє вимогам до зварних з'єднань низьколегованих сталей підвищеної міцності, які погано зварюються в екстремальних підводних умовах, особливо на глибинах більше 15-20 м. Необхідне поглиблення і систематизація знань про фізико-металургійні особливості дугового зварювання безпосередньо у воді і розробка на їхній основі сучасних електродних матеріалів нового покоління з метою істотного розширення технологічних можливостей цього способу зварювання для робіт на підводних металоконструкціях відповідального призначення на глибинах принаймні до 120 м.  2. Вивчено особливості впливу водного середовища на процес горіння дуги плавкого електроду при імітації глибини до 200 м. Показано, що дуговий розряд при використанні існуючих електродних матеріалів з підвищенням глибини істотно дестабілізується. Це проявляється через збільшення кількості і тривалості як коротких замикань, так й обривів дуги, причому після 15...20 м переважаючим показником стає частота коротких замикань, що зростає в 10 разів на перших 100 м. На підставі експериментального зіставлення двох реальних шляхів стабілізації процесу за рахунок підвищення потужності дуги або за рахунок керування складом електродного матеріалу встановлена перевага рішення задачі шляхом зниження потенціалу іонізації атмосфери парогазового пузиря введенням до складу порошкового дроту або електроду солей лужних і лужно-земельних металів.  3. На підставі експериментальних даних про склад газів, що відходять (92...95% H2, 1,5...6% CO, 0,5...2% CO2) і газу в порах (98% H2) встановлено водневий характер походження пористості металу шва при мокрому підводному зварюванні. Основна кількість пор має розмір до 5...8 мкм, причому з ростом глибини виконання зварювання їхня кількість трохи зменшується при одночасному збільшенні кількості пор більшого розміру (15...25 мкм) внаслідок зменшення розмірів зварювальної ванни і часу її існування під впливом гідростатичного тиску.  4. Методом математичного моделювання встановлено, що критичний стан зародка пори крім відомих із практики зварювання на повітрі двох основних параметрів - ступеня насичення воднем розплавленого металу і швидкості кристалізації металу зварювальної ванни - в умовах підводного зварювання додатково визначається гідростатичним тиском. Показано, що з ростом вмісту розчиненого водню в межах 15...40 см3/100 м імовірність розвитку зародка в газову порожнину зростає у всьому дослідженому діапазоні глибин (1...200 м). При цьому характер впливу гідростатичного тиску має складну залежністю: на глибинах до 100 м (Р 1,0 МПа) з ростом тиску схильність до пороутворення збільшується через зменшення критичного радіуса зародка; на більших глибинах встановлена зворотна залежність, тобто тенденція до збільшення критичного радіуса зародка, що свідчить про зменшення схильності системи до пороутворення. Встановлено, що чим вище швидкість кристалізації зварювальної ванни (у межах 0,0005...0,005 м/сек), тим вище імовірність еволюції зародка в газову порожнину; при цьому ефективність впливу швидкості кристалізації послабляється при її високих значеннях. Виходячи з результатів аналізу спільного впливу зазначених параметрів на імовірність пороутворення встановлено, що принципові підходи до рішення задачі зменшення пористості металу шва при зварюванні безпосередньо у воді полягають у зниженні ступеня насичення воднем зварювальної ванни і зменшенні швидкості її кристалізації.  5. Вивчено особливості формування структури і властивостей металу шва феритного типу в умовах мокрого зварювання. Встановлено наступні закономірності:  - при звичайній системі легування C-Sі-Mn через високу окисну здатність атмосфери парогазового пузиря всі легуючі елементи майже повністю вигорають (C 0,04%, Sі 0,1%, Mn 0,15%), у результаті чого метал шва являє собою по суті технічно чисте залізо зі структурою переважно полігонального фериту і з низьким рівнем пластичності (d < 8 %) через пористість і неметалеві включення;  - модифікування такого металу шва титаном і бором з метою підвищення його якості приводить до утворення додатково голчастого фериту, мартенситу й МАК-фази, причому завдяки високому вмісту кисню (0,12...0,14%) і прискореному охолодженню (WОХЛ. > 10 C/с) максимально можлива кількість голчастого фериту (50...53%) в 1,7...1,9 рази менша, ніж при зварюванні у звичайних умовах, і досягається при меншому вмісті добавок Tі (0,030...0,032%) і B (0,0016...0,0023%). Визначено, що при модифікуванні міцність металу шва підвищується несуттєво (до 500...520 МПа), а рівень пластичності залишається незадовільним (d < 12 %);  - легування металу шва системи C-Sі-Mn нікелем 1,8...2,6%, як елементом з низькою спорідненістю до кисню, забезпечує формування структури з переважно голчастим феритом і зміцнення твердого розчину, у результаті чого досягається одночасне підвищення властивостей міцності і пластичності до рівня sВ = 480...540 МПа і d 18 %, достатнє для вирішення технологічних задач підводного зварювання низьколегованих сталей загального призначення типу 09Г2С, 10ХСНД.  6. Вивчено особливості зміни температури, об'ємної частки структурних складових і концентрації водню в металі шва і ЗТВ у процесі формування зварного з'єднання з огляду їх впливу на технологічну міцність. Експериментально і за допомогою математичного моделювання встановлені наступні факти та закономірності:  - зміна температури на стадії охолодження від моменту кристалізації до 250...200 С відбувається практично миттєво (за кілька секунд) зі швидкістю 180...220 C/с, що більш ніж на порядок вище відповідної величини при звичайних умовах;  - так само швидко протікає процес розпаду аустеніту з утворенням фериту, бейніту і мартенситу та встановлюються їхні об'ємні частки; причому в ЗТВ сталей, що гартуються, формується мартенситний прошарок шириною біля 200 мкм;  - процес розподілу розчиненого водню на дифузійний і залишковий завершується практично одночасно із закінченням розпаду аустеніту; при феритному типі металу шва рівні їхніх концентрацій у ЗТВ сталей, що гартуються, оцінюється величинами [H]ДИФ = 7...9 см3/100 г і [H]ЗАЛ = 17...20 см3/100 г, що в 4...6 разів перевищує звичайну концентрацію залишкового водню при зварюванні на повітрі;  - вміст залишкового водню збільшується із глибиною зварювання і із зануренням до перших 100 м зростає на 20...25%;  - залишковий водень концентрується головним чином у поглинаючому його мартенситному прошарку ЗТВ (до 80%);  - при металі шва аустенітного типу вміст залишкового водню в ЗТВ знижується до 1,5...2,5 см3/100 г, що нижче критичного рівня 4 см3/100 г в оцінці схильності з'єднання сталі, що гартується, до утворення пришовних тріщин.  7. У зв'язку з тим, що загальноприйняті в практиці зварювання на повітрі технологічні заходи щодо запобігання холодних тріщин, такі як попередній підігрів і наступна термообробка, зварювання з "гарячим" проходом, прожарювання електродних матеріалів і просушка крайок, кування та ін. у специфічних умовах підводного зварювання практично нездійсненні, а зниження високого вмісту водню шляхом розчинення атмосфери парогазового пузиря або зв'язування водню в нерозчинні з'єднання недостатньо ефективні, радикальною мірою вирішення наукової задачі забезпечення технологічної міцності зварних з'єднань низьколегованих сталей підвищеної міцності є застосування електродних матеріалів аустенітного типу. Показано, що такі електродні матеріали повинні забезпечувати запас аустенітності наплавленого металу, достатній для запобігання утворення в ньому поблизу лінії сплавлення крихкого мартенситного прошарку підвищеної твердості (до HV430). З урахуванням зазначених обставин встановлено діапазон легування системи Cr-Nі-Mo-Mn, що визначається наступними даними: хромовий еквівалент - 17,5...23%, нікелевий еквівалент - 25...28%.  8. Сформульовано принципи створення електродних матеріалів нового покоління стосовно до проблеми дугового зварювання безпосередньо у воді низьколегованих сталей підвищеної міцності, які полягають у наступному:  - для сталей масового застосування з sВ до 540 МПа (09Г2С, 10ХСНД і т.п.) раціональними є рішення з одержанням металу шва феритного типу з його легуванням нікелем, що забезпечує пластичність на рівні вимог Стандарту з підводного зварювання, прийнятого МІЗ;  - для сталей більш міцних з sВ = 540... 600 МПа (17Г1С, Х60...70 і т.п.) повинні використовуватися електродні матеріали аустенітного типу з рівнем легування, що забезпечує тотожність характеристик пластичності і міцності металу шва і основного металу;  - для розширення технологічних можливостей способу мокрого зварювання повинні реалізовуватися наступні підходи: стабілізація дугового процесу в широкому діапазоні робочих глибин - зниженням потенціалу іонізації атмосфери парогазового пузиря; запобігання пористості швів - насамперед за рахунок зменшення насиченості розплавленого металу воднем; виключення біляшовних тріщин - шляхом одержання складу металу шва, що забезпечує високий запас аустенітності.  9. Створено наукові засади технології підводного дугового зварювання мокрим способом низьколегованих сталей підвищеної міцності та розроблено електродні матеріали нового покоління стосовно до завдання ремонту і будівництва конструкцій відповідального призначення. Зварні з’єднання відповідають вимогам класу А Специфікації з підводного зварювання ANSI/AWS D3.6. | |