

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни

«Зварювання різномірних та композитних матеріалів»

для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» освітніх
програм «Технології та устаткування зварювання» та
«Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій»
усіх форм навчання

2024

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Зварювання різнорідних та композитних матеріалів» для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» освітніх програм «Технології та устаткування зварювання» та «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» усіх форм навчання / Укл. Г.М. Лаптева. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 42 с.

Укладач: Г.М. Лаптева, доцент, канд. техн. наук

Гаранти ОПП: О.Є. Капустян, доцент, канд. техн. наук
М.Ю. Осіпов, доцент, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск: Г.М. Лаптева, доцент, канд. техн. наук

ЗАТВЕРДЖЕНО:
на засіданні кафедри ІТЗ та МК
Протокол №5 від 29.11.2024р.

Рекомендовано
до видання НМК ІФФ
Протокол №4
від 17.12.2024р

ЗМІСТ

1 Зварювання композитних матеріалів	4
2 Різномірні зварні з'єднання.....	22
2.1 Алюміній + мідь.....	24
2.2 Алюміній + титан.....	29
2.3 Титан + мідь	38
2.4 Алюмінієві сплави+магнієві сплави	41
Рекомендована література	42

1 ЗВАРЮВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Композитні матеріали (КМ) дозволяють реалізувати комплекс протилежних властивостей – високу міцність і жорсткість при розтягненні і стисканні з високими показниками витривалості і роботи руйнування у поєднанні з низькою питомою густиною. Це матеріали, утворені з двох чи більшої кількості інгредієнтів, наприклад, металева матриця, зміцнена безперервними або короткими волокнами, ниткоподібними кристалами, частками і т.і. Матричний сплав передає навантаження на несучі волокна і перерозподіляє їх, перешкоджає розповсюдженню тріщин через переріз деталі, формує волокна і захищає їх від зовнішнього впливу.

В якості матриць для металевих КМ в найбільшій мірі застосовується алюміній, магній, титан, нікель і кобальт. У свою чергу зміцнюючі компоненти завдяки високій температурі плавлення, малій густині, відсутності фазових перетворень в зоні робочих температур, мінімальній розчинності в матриці і т.і. надають КМ спеціальні властивості. Це високоміцні, високомодульні волокна, ниткоподібні вуса, частки карбідів і оксидів металів, дисперсійно зміцнювані компоненти, псевдосплави і т.і.

Дисперсійно зміцнювані композитні матеріали (ДЗКМ) мають в матриці рівномірно розподілені дрібнодисперсні частки іншої речовини. При навантаженні всі зусилля сприймає матриця, в якій множина практично нерозчинених часток зміцнюючої фази утворює структуру, яка ефективно протистоїть пластичній деформації.

При створенні сучасних об'єктів нової техніки виникає необхідність використання не тільки окремих вузлів, виготовлених з КМ, так і поєднання їх між собою, а також з однорідними матеріалами, що пов'язано з певними труднощами [1].

1. Температура плавлення матриці лежить у межах 600-1700 °С, а зміцнителя – 1500-2500 °С, що призводить при зварюванні плавленням до порушення цілості зміцнителя, можливості вступу до хімічної реакції між ним і матричним сплавом, наслідком чого може бути насичення зварного шва газами і утворення крихких інтерметалідних сполук. В результаті КМ втрачає свої властивості.

2. Армування матричного сплаву змінює характер розповсюдження тепла в матриці, що залежить від розташування

армуючих волокон і їх об'ємної частки. Це вимагає ретельного контролю введення тепла при зварюванні, що досягається введенням присадного метала, який, розплавляючись, захищає верхні шари зміцнителя від впливу високотемпературної дії джерела нагріву, проникає і змочує нижчележачі волокна. Деякі волокнисті матеріали, наприклад, бор, графіт, Al_2O_3 , не змочуються присадними металами, сумісними з матричними сплавами. Зварювання таких КМ ведеться із зазором і відповідними присадними металами. Так, проблема поганій змочуваності вуглецевих волокон вирішується шляхом добавок цинка або хрома, які взаємодіють з вуглецевими волокнами до утворення карбідів, маючих кращу змочуваність.

3. Значна різниця в коефіцієнтах теплоємності і теплопровідності, а також в коефіцієнтах лінійного розширення матриці і зміцнителя, що спонукає виникненню значних температурних напружень. Останні виникають також в процесі зварювання тиском, навіть без підігріву, внаслідок різних значень модулів пружності складових компонентів.

4. На відміну від традиційних матеріалів міцність КМ залежить від безперервності волокон по всій площині в напрямку, поперечному основній вісі напружень, а при порушенні цієї умови при зварюванні, майже повністю втрачаються механічні властивості КМ.

5. При зварюванні деталей з накладками або внапустку внаслідок концентрації напружень знижуються міцнісні характеристики і збільшується вага виробу з КМ [1].

Тому при виборі способу зварювання і призначенні технології і техніки виконання зварювальних робіт необхідно забезпечити одержання безпористого зварного з'єднання без втрати міцності, без розплавлення зміцнителя, без взаємодії компонентів КМ між собою. Спосіб зварювання має бути придатним також для зварювання КМ з однорідними металами. Серед металічних КМ найбільше розповсюдження отримали алюмінієві і магнієві сплави, армовані борними волокнами марок ВКА-1, ВКА-2, ВКМ-1, вуглецевими волокнами марки ВКУ-1, сталевим дротом марок КАС-1, КАС-1А, тонкими волокнами або вусами з карбіду кремнія і т.і. КМ на мідній основі з волокнами ніобія, арматури з вольфрама чи молібдена, зміцнення її тугоплавкими оксидами (Al_2O_3 , BeO , ThO_2) використовуються в електротехніці у виробництві напівпровідників, т.і. Армування титана і його сплавів волокнами карбіда кремнія, бора і

вуглеця, а також металевими дротами дозволяє збільшити діапазон робочих температур до 700-800 °С.

Зварювання плавленням КМ хоча і є найбільш технологічним способом їх поєднання, але і дуже складним, що пов'язано із розшаруванням в пришовній зоні і пористістю. Причиною останнього явища є волога повітря, реагуюча з алюмінієвим порошком з утворенням гідратів або гідрооксидів під час виготовлення КМ. Достатній рівень властивостей з'єднань КМ може бути досягнутий при зварюванні плавленням при таких умовах:

- слід вибирати способи і режими, які забезпечують мінімальне тепловкладання в зону зварювання;

- використовувати цей спосіб тільки для КМ, які складаються із сумісних компонентів (легкі сплави, армовані керамічними наповнювачами або наповнювачами з бар'єрними покриттями);

- застосовувати присадні матеріали або матеріали проміжних прокладок з легуючими добавками, які обмежують розчинення армуючого компонента і утворення крихких продуктів міжфазної взаємодії в процесі зварювання і подальшої експлуатації зварних вузлів. Так, при зварюванні КМ систем Al-SiC, Al-C доцільним є використання присадок з більшим вмістом кремнія, цирконія, титана або інших карбідоутворюючих елементів, попереджаючих утворення карбіда Al_4C_3 , а при зварюванні КМ Al- Al_2O_3 присадок з магнієм;

- для отримання рівномірності при зварюванні дисперсійно зміцнених КМ (ДЗКМ) доцільно використовувати присадки, які вміщують відповідні керамічні компоненти з об'ємною часткою 15-25 %;

- волокнисті і шаруваті КМ доцільно зварювати внапустку при співвідношенні довжини перекриття до товщини матеріалу більше 20, такі з'єднання можуть бути додатково підсилені заклепчними або болтовими з'єднаннями [1].

КМ, армовані частками, короткими волокнами, нитковидними кристалами можна зварювати встик при виборі відповідних способів, зварювальних матеріалів і режиму зварювання, а також при умові, що КМ виготовлені методами рідиннофазової технології. Якщо ж вони виготовлені методом порошкової металургії, то в зоні зварювання можливо утворення дільниць підвищеної пористості, особливо, на границі сплавлення, і міцність таких з'єднань знижується. Тому перед зварюванням треба проводити вакуумну дегазацію для вилучення

водню, оскільки при розплавленні КМ у більшості випадків порушується їх первинна структура, що призводить до зниження або різкого змінення фізичних і механічних властивостей, важливо розподілити їх в залежності від особливостей міжфазної взаємодії. Це дозволяє сформулювати критерії, по яким можна оцінити зварюваність КМ.

Так, якщо компоненти КМ при плавленні утворюють однорідну рідину, а в твердому стані практично нерозчинені одне в одному (системи Al-Be, Ti-Mg), при їх плавленні і кристалізації одержується однорідна гетерогенна структура з переміжними частками матриці і зміцнителя. Зварювання плавленням таких матеріалів дає можливість отримати зварний шов з властивостями, що майже не відрізняються від основного матеріала, тому що конструкція композита спотворюється в найменшій мірі.

Якщо компоненти при розплавленні і кристалізації мають обмежену або необмежену розчиненість (системи Ni-W, Al-Si), утворюються тверді розчини з евтектикою і перитектикою або з концентрацією, що плавно змінюється. Як і в попередньому випадку властивості зварного шва близькі до основного матеріала.

Якщо компоненти КМ взагалі не взаємодіють при зварюванні у зв'язку з великою різницею в температурах плавлення (системи Al-Be-Mg, Fe-Cu-Pb), вони зварюються погано, необхідно вживати спеціальні прийоми для запобігання випарювання більш легкоплавкого компонента.

Якщо компоненти КМ не змішуються у рідинному стані (системи Al-Pb, Fe-Cu-Pb), зварювання плавленням їх неможливе, тому що зварні з'єднання легко руйнуються у місці сплавлення. Найбільше розповсюдження отримали КМ на алюмінієвій матричній основі АД1 і АМг6, КАС-1А з армуючими волокнами із сталевого дроту діаметром 0,15 мм і ВКА-2 з армуючими волокнами з бору Ø 0,15 мм з об'ємною часткою волокон 25-40%, а також АМг5+12% SiC дисперсійно зміцнюваний композитний матеріал (ДЗКМ). Як матриця, можуть застосовуватися і інші алюмінієві сплави [1].

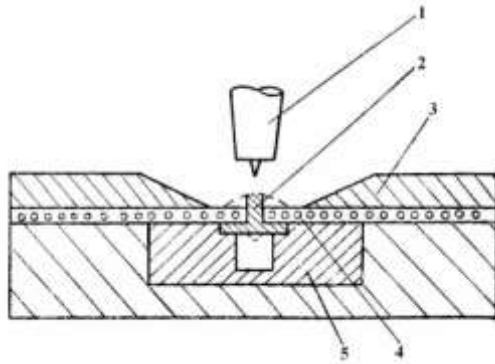
Найчастіше використовується дуговий спосіб зварювання вольфрамовим електродом в інертних газах.

При зварюванні стикових з'єднань із КМ типу ВКА дуже ефективним виявилось застосування спеціальних технологічних проставок з алюмінієвих сплавів типу АМг-6, 1420, 1201 і

використання електрода, що обертається.

Деталі закріплюються у рухомому локальному притиску з притискними кільцями з неметалевих матеріалів, а зварювання ведеться на формуючій підкладці з канавкою спеціальної форми. Радіус обертання електрода вибирається в залежності від ширини технологічних проставок і товщини плакуючого шару на матеріалі

Так листи товщиною 1,2 мм із КМ ВКА-2 зварюються вздовж волокон в середовищі гелія через проміжну Т-подібну вставку, що розплавляється, виготовлену з високоміцного алюмінієвого сплаву (рис. 1.1).



1 – пальник; 2 – вставка; 3 – мідний притиск; 4-КМ; 5 – мідна підкладка
Рисунок 1.1 – Схема зварювання листового КМ ВКА-2 через проміжкову Т-подібну вставку, що розплавляється

При цьому здійснюється сплавлення кромок КМ з металом вставок без його руйнування, досягається необхідне проплавлення вставки на всю висоту шва, зменшується зона термічного впливу, забезпечується висока швидкість нагріву і охолодження метала, покращується структура метала шва. Міцність такого з'єднання становить 80-95% від міцності матричного матеріалу [1].

При зварюванні КМ товщиною 1-3 мм з матрицею з алюмінієвого сплаву 1330, армованого борними волокнами діаметром 0,14 мм (ВКА-2) і з матрицею із сплаву 1340, армованого сталевим дротом діаметром 0,15 мм (КАС-1А) процес ведеться при поєднанні встик вздовж напрямку армування, з вставкою зі сплаву АМг6 і додатковим присадним матеріалом Св АК5 в імпульсному режимі:

$$I_{\text{мп}} = 50-60 \text{ А на } 1 \text{ мм товщини КМ}$$

$I_{\text{паузи}} = 20-25$ А, частота 2-10 Гц, $V_{\text{зв}} = 5-10$ м/год.

При зварюванні ДЗКМ Al+SiC – з використанням присадних матеріалів виникає додаткове ускладнення – розбавлення зварювальної ванни, перехід зміцнюючих компонентів у зварний шов, нерівномірний їх розподіл. Інтенсивний зварювальний нагрів руйнує частки SiC і сприяє утворенню крупних пластин Al_4C_3 , що призводить до зменшення механічних властивостей. Зварювання вольфрамовим електродом на змінному струмі в аргоні КМ АМг5 + 12-20% SiC товщиною 3 мм ведеться з присадним дротом типа АМг на параметрах режиму: $I_{\text{зв}} = 150$ А, $V_{\text{зв}} = 10-12$ м/год. Шви, виконані без присадки, більш міцні, але після термічної обробки і шви, одержані з присадним дротом, мають задовільні міцнісні характеристики на рівні 0,85 від міцності основного матеріалу завдяки більш рівномірному розподілу армуючого наповнювача.

Так і при зварюванні КМ алюмінієвий сплав +20% Al_2O_3 рекомендується використовувати присадку з матричного сплаву з 5% магнію, що сприятиме кращому розподілу Al_2O_3 в металі шва; цей же матеріал можна застосовувати, як присадний плавкий електрод, а після зварювання корисно піддавати виріб термічній обробці.

Для збільшення текучості зварювальної ванни при одночасному підвищенні кількості зміцнюючих часток і гарантії проплавлення кореня шва присадний дріт має бути розміщеним в зварювальній ванні, а кут розкриття кромки становити 90° . З цією метою використовуються зварювальні дроти з 5% кремнію (типу АК5).

Зварювання відлитих зразків ДЗКМ АЛ2+10% SiC ведеться на змінному струмі: $d_{\text{вс}} = 4$ мм, $I_{\text{зв}} = 365$ А, $U_{\text{д}} = 14$ В, $V_{\text{зв}} = 30$ м/год. Погонна енергія має бути мінімальною.

КМ Ti + 20% W отримується таким способом. Вольфрамові дроти діаметром 0,2 мм укладаються з двох боків на титановий лист товщиною 0,43 мм і закриваються такими ж титановими листами зовні, так що сумарна товщина утвореного «сендвіча» складає 1,7 мм, який потім піддається дифузійному зварюванню на параметрах режиму: $T=870$ °С, $P=7$ МПа, $t=1$ год. [1].

Подальше дугове зварювання здійснюється вольфрамовим електродом в аргоні вручну на параметрах режиму: $I_{\text{зв}} = 60$ А, $U_{\text{д}} = 10$ В, і механізованим способом $I_{\text{зв}} = 25$ А, $U_{\text{д}} = 12$ В, $V_{\text{зв}} = 15$ м/год без присадки. Перед зварюванням кромки обробляються так, щоб волокна рівномірно підходили до їх торців.

Зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів можна досягти кращих результатів завдяки можливості впливати на склад метала зварного шва.

Зварювані деталі з КМ Al + 18,4% карбиду кремнію по об'єму збираються для забезпечення повного провара в стиковому з'єднанні з зазором. Зварювання ведеться плавким електродом типу АМг3 в аргоні на параметрах режиму: $I_{зв} = 100-110$ А, $U_{д} = 19-20$ В, $V_{зв} = 18-22$ м/год, $Q_{Ar} = 16-19$ л/хв. Міцність зварних швів перевищує цей показник для алюмінієвих сплавів, що деформуються. Однак під час зварювання внаслідок дії зварювальної дуги декілька волокон викидаються з ванни, тому для компенсації втрат армуючий матеріал треба подавати у низькотемпературну хвостову частину ванни за допомогою спеціального пристрою.

Об'ємна частка волокон, що подають у ванну, визначається попередньо.

Інші варіанти передбачають попереднє нанесення на зварювані кромки суміші армуючого матеріала, порошку матриці і зв'язуючої речовини, а також деяких легуючих добавок, які спонукають або стримують змочування волокон. В якості зв'язуючого використовуються клеї, пасти, етиловий спирт, їх кількість складає 50-80% по об'єму відносно волокон.

Для зварювання також можна використовувати плавкий електрод, який вміщує: метал матриці або подібний йому, суміш метала матриці і волокна. Конструкція такого електрода складається із зовнішньої тонкостінної оболонки з матеріалу матриці і серцевини з пресованої суміші порошку матриці і нарізаних волокон або із самих волокон.

Таким чином аргонодуговим зварюванням поєднуються встик листи товщиною 12,7 мм з КМ з об'ємною часткою магнію 41% і волокон Al_2O_3 на параметрах режиму: $I_{зв} = 90-100$ А, $U_{д} = 20-22$ В, $Q_{Ar} = 5$ л/хв. В якості плавкого електрода використовується магнієва трубка із сумішню матричного порошку з волокнами Al_2O_3 із розрахунку 17% по об'єму в металі шва. Зварювання ведеться з попереднім підігрівом до 400 °С [1].

Для компенсації викидів волокон із зварювальної ванни їх можна вводити інжекцією або за допомогою спеціального пристрою (рис. 1.2).

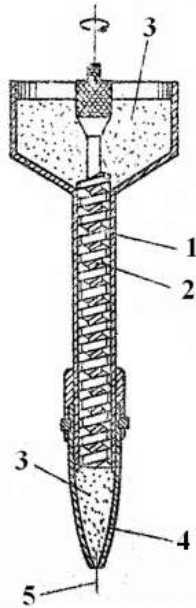


Рисунок 1.2 – Схема пристрою для подачі присадного армуючого матеріалу у зварювальну ванну

Він складається з кожуха 1 зі шнеком 2 для подачі армуючого порошкоподібного матеріалу 3 через жароміцне керамічне сопло 4, відкіль матеріал у вигляді струменя поступає у ванну. Обертання шнека може здійснюватися вручну або за допомогою механічного привода.

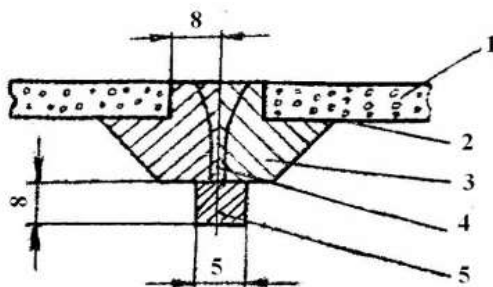
Швидкість подачі визначається розміром ванни і необхідним співвідношенням волокон і метала матриці, яке потрібно в металі шва. При цьому треба мати на увазі, що велика кількість часток в ванні може привести до збільшення в'язкості розплавленого метала, що погіршить рідкотекучість і змочування. Концентрація волокон знаходиться у межах 12-20% по об'єму, а для інтенсифікації змочування вводяться різні добавки, знижуючи сили поверхневого натягання [1].

При електроннопроменевому зварюванні використовуються проміжкові прошарки. Так при зварюванні встик листового КМ товщиною 4 мм магнієвий сплав + 20% Al_2O_3 застосовується прошарок

товщиною 0,5 мм з матричного сплаву. При зварюванні КМ на основі алюмінієвих сплавів товщиною 10 мм + 22% SiC використовується технологічні накладки товщиною 2 мм з матричних сплавів і проміжкові проставки зі сплавів з підвищеним вмістом (до 3,5%) магнію і кремнію. Електроннопроменеве зварювання ведеться також через вставки таврового або двотаврового профілю, які мають склад з матричного алюмінієвого сплаву з додатковим вмістом кремнію, нікелю, хрому та інших елементів – всього до 5-10% на параметрах режиму: $I_{зв} = 20-30$ мА, $f = 5-10$ Гц, $V_{зв} = 20-30$ м/год.

При комбінованому зварюванні бороволокнистих труб діаметром 120 мм і товщиною стінки 3 мм, використовуються гомогенні перехідники зі сплаву марки 01980, які спочатку приварюються до труб дифузійним зварюванням [1].

Для забезпечення жорсткості гомогенного зварного вузла товщина кільцевих перехідників береться рівною трьом товщинам стінки труби (рис. 1.3).



1-стінка труби, 2-дифузійне з'єднання, 3-перехідник, 4-зварний шов, 5-підкладка
Рисунок 1.3 – Схема з'єднання зібраного під електроннопроменеве зварювання бороволокнистих труб

Підкладка попереджає витікання розплавленого металу із зварювальної ванни і забезпечує отримання зварного шва без корневих дефектів, характерних для цього способу зварювання з нескрізним проплавленням.

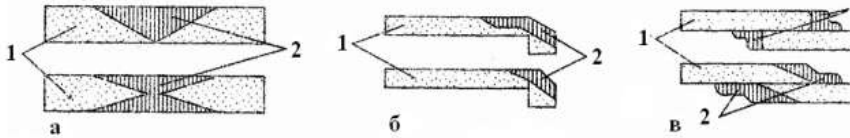
Деталі збираються і закріплюються у цанговому пристрої, що поєднується з приводом обертання виробу установки ЕЛУ-5. Величина зазору не більше 0,1 мм, поперечне биття стику відносно пучка складає $\pm 0,15$ мм. Зварювання ведеться на параметрах режиму: $I_{п} =$

45-46 мА, $U_{\text{приск}} = 52 \text{ кВ}$, $V_{\text{зв}} = 20 \text{ м/год}$.

При оплавленні матриці волокнистого матеріалу, яка одержана шляхом плазмового напилення, в зварному шві утворюються пори, які можна подолати виконанням двох-трьох проходів на одному і тому ж режимі.

При малій масі деталі, щоб запобігти спучення матриці в біляшовній зоні, треба кожний подальший прохід виконувати після повного охолодження деталей.

Розроблений спосіб зварювання диспергованим металом, який здійснюється за рахунок електроннопроменевого розплавлення присадного металу з бокової поверхні диска, що обертається зі швидкістю 1800-3100 об/хв в вакуумі – циліндричної заготовки зі сплаву АЛ 25 діаметром 160 мм необхідного складу. Роздрібнені краплі розплавленого металу переносяться на попередньо нагріті формоутворюючі поверхні, до 0,5-0,65 $T_{\text{пл}}$ підложки, де і здійснюється їх кристалізація на відповідно підготовлених зварюваних кромках (рис. 1.4).



1-основний метал, 2-присадний метал

Рисунок 1.4 – Схема зварювання з використанням диспергованого розплава стикових (а), кутових (б) і внапустку (в) з'єднань КМ

При цьому способі зварювання ведеться без оплавлення основного металу [1].

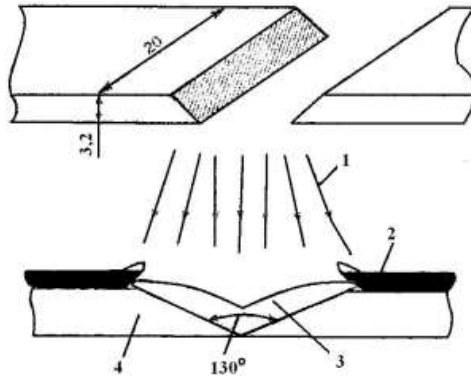
Керування пучком променя здійснюється прибором дискретної розвертки з набором траєкторій сканування, що створює умови розподілу щільності потужності пучка в зоні нагріву і одержання необхідного об'єму розплавленого металу і розмірів рідких крапель, що переносяться центробіжною силою до виробу. На відміну від зварювання з оплавленням кромки в матричному матеріалі частки зміцнителя SiC не розпадаються і не порушується їх зв'язок з матричним матеріалом.

З метою полегшення головок циліндрів двигунів внутрішнього згорання і покращення їх зносостійкості до термічної втоми використовується також комбінований спосіб. В центральній частині

відлитої силумінової заготовки виконується приглиблення діаметром 70 мм і глибиною 2 мм. По його розміру виготовляється КМ на алюмінієвій основі з керамічним порошком на основі карбіду кремнію. При виборі матеріалів пари деталь-вкладиш керуються міркуваннями малої різниці в коефіцієнтах термічного розширення, але для вкладиша він має бути трохи більшим, ніж у деталі для попередження напружень затискання вкладиша з усіх боків. Поверхні основного метала і вкладиша очищуються шляхом занурення у лужний розчин, де вони оброблюються ультразвуком протягом 10 хв. Після цього вкладиш розміщується в гнізді і обварюється по периметру електронним променем у вакуумі з одержанням ізолюваного від зовнішнього середовища зазору між вкладишем і деталлю. Потім дифузійним зварюванням в середовищі аргону під тиском 20-150 МПа при температурі 400-500 °С від 3 хв до 3 год здійснюється утворення зварного з'єднання.

Отриманий виріб піддається зміцнюючій обробці: гартування в рідинному середовищі при 500°С протягом 3 год з подальшим відпуском при 180°С протягом 6 год.

Одним з можливих способів поєднання КМ алюмінієвий сплав + 10-20% SiC є плазмове напилення. Напилювані деталі збираються встик без зазору, як показано на рис. 1.5 [1].



1- частки, що напилюють 2-захисні пластини, 3-напилений матеріал, 4-основний матеріал

2-Рисунок 1.5 – Схема процесу зварювання КМ напиленням

На лицьовий поверхні наждаком створюється необхідно

шорсткість для кращого зчеплення з основним металом. Напилення ведеться порошком на основі алюмінієвого сплаву з об'ємною часткою 15% SiC, діаметр гранул якого становить 45-150 мкм.

Мундштук для напилення виконує зворотно поступальні рухи перпендикулярно деталям, які попередньо підігріваються до 200 °С із швидкістю 0,21 м/с; його відстань від поверхонь становить 95 мм. Напилення ведеться на всю висоту зварюваних деталей.

Для покращення якості з'єднання, зниження мікропористості і збільшення міцності деталі разом із швом піддаються ізостатичному пресуванню при $T=500$ °С, $P=103$ МПа протягом 1 год, після чого термічно обробляються – гартуванням і старінням при $T=160$ °С протягом 18 год. Незважаючи на те, що в напиленому шарі вміст карбиду кремнію зменшився до 8,5% внаслідок термічного розкладу в плазмовому струмені, термічна обробка збільшує міцність з'єднання майже вдвічі порівняно зі станом після напилення.

При зварюванні тиском можна досягти більш надійних результатів внаслідок меншої енергії, що підводять тому режими зварювання вибираються такими, щоб зменшити зміщення або подріблення армуючих компонентів. Для усунення деформації виробів використовують спеціальні термофіксуючі пристрої, у яких і проводиться часто термічне оброблення – вакуумний відпал [1].

При електричному контактному зварюванні КМ має місце зниження тепло- і електропровідності порівняно з матеріалом матриці, що перешкоджає формуванню литого ядра.

Подолати це явище можна вибором електродів з різною провідністю, з обтисненням периферійної зони, зміною діаметра і радіуса закруглення електродів, використання проміжкових прокладок. Так при зварюванні КМ системи Al - SiC застосовуються прокладки товщиною 0,5 мм із сплавів Al + 3%Mg, Al + 12%Si. Наявність в структурі матеріалу складових з різними властивостями вносить деякі особливості в формування зварної точки. Так, при зварюванні односпрямованого КМ ВКА-1, який має анізотропію по механічним властивостям вздовж і поперек волокна, контактні площадки деталь-деталь і електрод-деталь мають еліпсоподібну форму. Чим вищий вміст волокон бору, тим більша різниця діаметрів зварної точки вздовж і поперек волокна. Якщо при вмісті бору 20% і 33% утворюються практично круглі точки, то при вмісті бору 51% відношення діаметрів точки вздовж і поперек волокна становить

0,8:7,0. Із збільшенням об'ємної частки ниток бора в матеріалі деформаційна спроможність матеріала ВКА знижується. Це утруднює процес вигину деталей і призводить до того, що контактна площадка деталь-деталь має на чітко обкреслені форми. Її діаметр на 10 – 40%, а площа в 1,3 – 2,0 рази більша, ніж у алюмінієвих сплавів типа Д16Т. По всій площадці утворюється велика кількість випадково розташованих фактичних плям контакту – "ситочного" контакту. Це призводить до значного зниження концентрації силових ліній струму і різкому зниженню надійності ущільнюючого пояса. При цьому зростає схильність до виплеску, особливо, для КМ ВКА з високою об'ємною часткою ниток бора і малою товщиною плакуючого шара. Для матеріала з вмістом бора 55% товщина плакуючого шара повинна бути не менше 100 - 150 мкм. При меншій товщині рекомендується застосовувати проміжкові прокладки з алюмінієвої фольги, додаткове тепло з якої передається ниткам бора. Завдяки високому електричному опору і низькій теплопровідності нитки бору нагріваються більше алюмінієвої матриці і слугують додатковим нагрівачем для плакуючого шара в зонах контакту електрод-деталь. При нагріванні механічні властивості плакуючого шара різко спадають, в той час як нитки бору зберігають свою головну властивість – високу жорсткість [1].

На відміну від однорідних металів при проходженні зварювального струму через КМ має місце розтікання силових ліній струму на більшій площадці внаслідок впливу суцільної сітки бору. Зниження концентрації силових ліній струму призводить до розсіяння тепловиділення. Тому необхідно збільшувати контактну площадку електрод-деталь, використовуючи електроди з радіусом сфери 150 – 200 мм. Це сприяє більш рівномірному розподілу ліній струму в перерізі контакту і дозволяє повністю ліквідувати зовнішні виплески. Для запобігання внутрішніх виплесків треба вести зварювання на режимах середньої жорсткості.

Силові і струмові параметри зварювального циклу, а також геометричні розміри електродів при зварюванні матеріалу з 20 і 33% ниток бору практично не відрізняються від рекомендованих для алюмінієвих сплавів типа Д16Т: їх зварювання можна вести на жорстких режимах без загрози утворення виплесків. КМ системи алюміній-бор не схильні до утворення тріщин в ядрі зварної точки, тому кувальне зусилля не обов'язкове, його застосовують тільки для

зниження залишкових деформацій в конструкціях. Вибір режимів зварювання матеріалу ВКА – 1 з 55% ниток бору більш складний у зв'язку з обмеженням можливого діапазону умов процесу.

Хоча основні характеристики матеріалу ВКА, які впливають на процес тепловиділення і тепловідводу, подібні з такими показниками сплавів типу 1420 і Д16Т, при їх поєднанні лите ядро формується, в основному, з боку цих сплавів, а для забезпечення необхідної величини проплавлення з боку КМ слід використовувати спеціальні електроди і відносно жорсткі імпульси зварювального струму.

Одним з недопустимих дефектів є утворення виплеску, що пов'язано з високою жорсткістю поверхневого шару, малою товщиною плакуючого шару і несиметричною контактною площадкою деталь-деталь. Використання електродів з обтискачем повністю ліквідує виплеск при зварюванні КМ з товщиною плакуючого шару 50 – 150 мкм, зменшує зварювальне зусилля на 20 – 40%, знижує вірогідність пошкодження волокон бору, підвищує стабільність якості зварного з'єднання. При зварюванні КМ з товщиною плакуючого шару більше 200 мкм доцільно використовувати електроди зі сталевією шайбою з внутрішнім діаметром 5 – 8 мм, яка забезпечує необхідну щільність струму в контакті [1].

При зварюванні матеріалу ВКА – 1 з товщиною плакуючого шару 200 мкм і більше за рахунок розплавлення цього шару доцільно використовувати м'які режими зварювання і помірні зусилля стиску.

Міцність з'єднання при цьому визначається тільки міцністю матеріалу матриці.

При відповідному підборі параметрів режиму і геометрії електродів за рахунок нагріву і нерівномірності зусиль стиску метала плакуючого шару можна забезпечити його інтенсивне вдавлювання в зазор з'єднання практично без утворення зони розплавлення.

При цьому відстань між волокнами бору деталей, що поєднуються, складає 20 – 80 мкм, з'єднання набуває композиційних властивостей і спроможне передавати значну частину навантаження на розташовані поруч волокна бора. Ці властивості у найбільш повній мірі проявляються тільки у багатоточкових з'єднаннях або одноточкових, одержаних у спеціальних пристроях, включаючих вигин.

Усадка КМ ВКА – 1 значно менша порівняно з алюмінієвими сплавами внаслідок незначного пластичного деформування каркаса з

волокон бору, тому в точкових з'єднаннях дефектів у вигляді пор і тріщин практично не буває. Міцність зварних з'єднань з матеріалу ВКА – 1 на зріз в 1,2 – 1,5 рази, а на відрив в 2 – 3 рази менша порівняно із з'єднаннями такої ж товщини зі сплаву Д16Т. Міцність на розтягнення залежить від об'ємної частки волокон бору, найкращі показники мають місце у КМ з 35% волокон бору.

Показники міцності на втому наближаються до значень, характерних для сплаву Д16Т.

Дифузійним зварюванням КМ у вакуумі або в інертній атмосфері можна поєднати деталі, зібрані як внапустку, так і встик. При цьому можна отримати з'єднання в твердій фазі майже без деформації, для чого потребується зняття оксидного шару перед зварюванням. З'єднання з деформацією не потребує очищення поверхні, але для цього використовуються значні тиски. З'єднання, отримані за допомогою процесу, що нагадує дифузійне паяння, передбачає зварювання через прокладку – фольгу певного складу. ДЗКМ систем алюмінієві сплави + частки SiC, Al₂O₃, TiC зварюються з використанням проміжних прокладок з міді, срібла; сплавів Al-Li при застосуванні фольги з міді, цинку, срібла [1].

Принцип вибору складу прокладок такий: вони повинні мати температуру плавлення евтектики 550°C (мідь) і 560°C (срібло) нижче температури плавлення алюмінію або температура солідуса сплаву Д1 має бути нижче, ніж у сплаву типу АД – 31. Зварювання треба вести в області температур вище температури евтектики і солідуса, тобто коли утворюється рідка фаза.

При використанні прокладки зі сплаву Д1 товщиною 75 мкм і міді руйнування іде по основному металу, а в інших випадках – по поверхні розподілу. Крім того при зварюванні з прокладками ступень деформації становить менше 2 %.

Дифузійне зварювання КМ АМг5 + 27% Al₂O₃ можна здійснювати через наношарову фольгу на основі системи Ni/Al, яка отримується методом пошарового електроннопроменевого осадження елементів на підложку, що обертається.

Саме зварювання виконується на установці П-115 в формуючих матрицях з примусовим деформуванням зони контакту, з проміжною прокладкою складу 77% Ni – 23%Al мас % товщиною 0,05 і 0,07 мкм відповідно.

Параметри режиму зварювання: T = 520 °C, t = 5хв.

В процесі зварювання прошарок фрагментується на окремі дисперсні частки внаслідок твердофазної реакції в умовах інтенсивного пластичного деформування матеріалу.

Прошарки з такою структурою не тільки активують процеси, сприяючи дифузійному зварюванню КМ, але і не знижують суттєво його міцнісні властивості. Міцність зварного з'єднання становить 76% від міцності основного КМ.

Той же самий КМ $AMg5+27\%Al_2O_3$ зварювали з використанням проміжного прошарку із швидко закристалізованої стрічки системи Al/Si евтектичного складу $Al+33\% Si$ товщиною 0,07 мм. Зварювання виконувалося на параметрах режиму $T=500^\circ C$; $t=10xв$; $P=40MPa$; загальна пластична деформація дорівнювала 25%. Завдяки використанню спеціальних формуючих пристроїв, діючих по схемі тиск-зсув можна одержувати якісне з'єднання при більш низькій температурі і меншому часі зварювання. Проміжний прошарок після подальшої термічної обробки повністю зникає [1].

При зварюванні ДЗКМ $Al - 30\% SiC$, який виготовляється, як порошковим, так і ливарним способом, застосовується напилене проміжне покриття з нікеля. Воно напилюється у вакуумі шаром товщиною 2 – 5 мкм; завдяки цьому інтенсифікуються процеси зварювання, яке виконується на параметрах режиму: $T = 560 - 570^\circ C$, $P = 0,6 - 0,7 MPa$, $t = 15 xв$; а руйнування з'єднання здійснюється по шару з вирином основного матеріала.

Перед зварюванням корисно здійснювати дегазацію деталей, це значно поліпшує якість зварного з'єднання.

У волокнистих ДЗКМ на нікелевій основі, як зміцните лі, вживаються ниткоподібні кришталі, дроти тугоплавких металів, керамічні та вуглецеві волокна. Вони зварюються з проміжною прокладкою товщиною 0,1 – 0,3 мм з кобальтового сплаву $Co + 2,8\%Cr + 25\%W + 0,9\%Ti + 0,4\%Zn + 2\%Re + 0,15\%C$. Рівномірність при цьому майже досягається, але показник при 100-годинній міцності при $T = 1090^\circ C$ має не більшою 15% від міцності основного матеріалу.

Цей спосіб зварювання є придатним і для поєднання різнорідних матеріалів, таких, наприклад, як титановий сплав і КМ $KAC - 1A$ на параметрах режиму $T = 500^\circ C$, $P = 100 MPa$, $t = 10 xв$ з подальшою витримкою при температурі зварювання, але без тиску (відпал) протягом 30 хв. Інтерметалідні фази на границі титан-алюміній і сталь-алюміній не утворюються; початкове розташування армуючих

сталевих дротів залишається незмінним.

При зварюванні титанових сплавів з КМ боралюміній можна поєднувати дві операції: формування деталі з одночасним зварюванням моношарів напівфабрикату КМ на режимі, необхідним для формування боралюмінія.

При дифузійному зварюванні в атмосферних умовах для попередження окислювання титанової поверхні в зоні зварювання краще за все алітувати її в розчині алюмінієвого сплаву АЛ (АД33) при $T = 680^{\circ}\text{C}$ і тиску 10 МПа протягом 10с. При цьому утворюється захисний шар товщиною 0,1 – 0,3 мм, який забезпечує отримання міцного з'єднання: руйнування відбувається по границі розподілу плакуючого шару і боралюмінія [1].

Найбільш ефективним типом з'єднання КМ з титаном є замок типа "ластівкин хвіст", який забезпечує передачу навантаження на боралюміній за рахунок зсуву в умовах стиску (рис. 1.6).

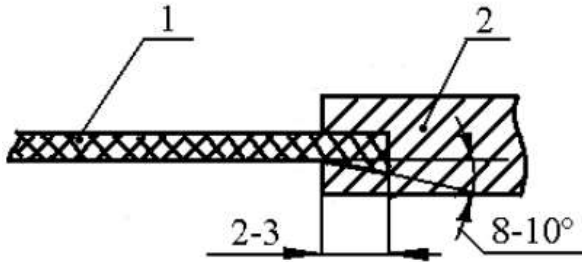
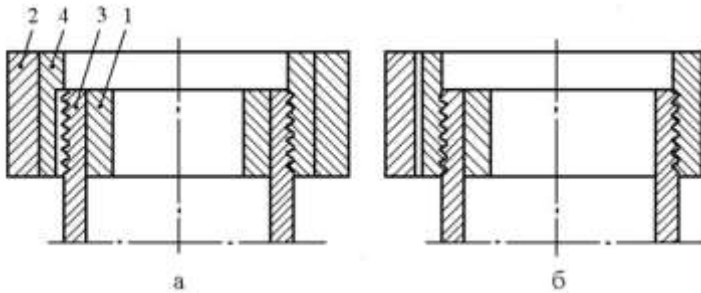


Рисунок 1.6 – Схема поєднання КМ (1) з монометалом (2) типа "ластівкин хвіст"

З'єднання внапустку не забезпечує повноцінну передачу навантаження на шари КМ, з'єднання вскіє ускладнює для шаруватих КМ забезпечення рівномірності розподілу тиску в процесі дифузійного зварювання, а висока жорсткість і крихкість борних волокон призводить до утворення дефектів на границі розподілу титан-алюміній.

Клинопресове зварювання виробів з КМ боралюмінія із кінцівками, виготовленими із звичайних конструкційних сплавів, виконується у спеціальному пристрої (рис. 1.7).



а – до зварювання, б – після зварювання

Рисунок 1.7 – Схема отримання клинопресовим зварюванням з'єднання кінцівки з алюмінієвого сплаву Д20 з циліндричним конусом з КМ боралюміній з поздовжнім і окружним армуванням

Оправка 1 пристрою виготовлена з титанового сплаву ВТ6, а обойма 2 – з молібденового сплаву. На внутрішній поверхні алюмінієвої кінцівки попередньо наноситься різьба глибиною 0,3 мм і з кроком 0,5 мм. Кінцівка 4 стискається з обіймою 2 пристрою по ковзній посадці. Між різьбовою поверхнею кінцівки і циліндричним конусом 3 є збиральний зазор величиною 0,1 мм.

Збирання оправки 1 з конусом 3 виконується по ковзній посадці.

Тиск впресування отримується за рахунок термічних напружень, виникаючих при нагріванні двох коаксіально зібраних жорстких циліндрів з різними коефіцієнтами термічного розширення (КТР). Зібрані деталі разом з пристроєм нагріваються в захисному середовищі до температури $0,7 - 0,9 T_{пл}$ більш легкоплавкого з металів, що поєднуються. Оправка має більший КТР, ніж обойма, тому відстань між робочими поверхнями оправки і обійми скоротиться, а виступи ("клини") різьби впресуються в плакуючі шари труби. Молібденова обойма пристрою в процесі нагрівання перешкоджає розширенню алюмінієвої кінцівки і фактично осаджує її по зовнішньому діаметру.

Оправка з титанового сплаву ВТ6 збільшується в діаметрі при нагріванні і, натискаючи на внутрішню поверхню конуса, упрugo деформується. Її призначенням є збільшення стійкості стінки циліндричного конуса при впресованні плакуючого шару виступів різьби кінцівки. Середній діаметр циліндричного корпусу в місці кінцівки не змінюється. При випробуванні на зсув руйнування здійснюється по плакуючому шару алюмінію [1].

При зварюванні тертям ДЗКМ має місце руйнування армуючих часток, інтенсивне пластичне деформування матриці і зростання твердості, а в зоні термічного впливу – зниження твердості в результаті відпалу матричного сплаву. Тому для досягнення рівномірності доцільна термічна обробка алюмоматричних ДЗКМ – старіння, після чого міцність таких з'єднань сягає 80% міцності основного матеріалу.

2 РІЗНОРІДНІ ЗВАРНІ З'ЄДНАННЯ

Часто оптимальні експлуатаційні властивості виробів можна одержати лише при умові використання окремих зварних вузлів з різнорідних кольорових металів. Це дає можливість найбільш повно реалізувати властивості, притаманні кожному окремому металу.

Так, шляхом поєднання зварюванням алюмінію з міддю можна суттєво скоротити витрати дефіцитної міді, особливо при виготовленні струмоведучих деталей електромашин, трансформаторів, шинопроводів енергоємних агрегатів і т. і.

В електрохімічній промисловості, в гальванотехніці для електролітичного очищення кольорових металів потребується використання спеціальних виробів – титаномідних катодів і титаноалюмінієвих анодів електролизерів, а також трубчастих перехідників, біметалевих кронштейнів, які складаються з титанових труб кінцевками із алюмінієвих сплавів і т. і.

Використання таких комбінованих зварних вузлів взагалі дозволяє створювати принципово нові види конструкцій, раніше відсутні.

На додаток до визначених раніше труднощів щодо зварювання кольорових металів з'являються нові, пов'язані з особливістю їх взаємодій у рідкому і твердому стані при зварюванні. Вже на стадії розглядання бінарних діаграм стану поєднуваних металів виявляється наявність вкрай обмеженої їх взаємної розчинності у рідкому і твердому стані, з утворенням більшої чи меншої кількості інтерметалідів, які мають високу твердість і крихкість і руйнуються самі по собі під дією температурних напружень при охолодженні

зварного шва.

Ці інтерметаліди виділяються на границі сплавлення основного метала у вигляді суцільного дифузійного прошарка різної товщини, який залежить від температури і часу взаємодії. При невеликій товщині 2 – 3 мкм прошарок не впливає суттєво на міцність зварного з'єднання, при більшій – різко знижує цей показник. Тому металургійні дії при зварюванні треба направляти не тільки на його зменшення, але і на формуванні не суцільної, а переривчастої його будови.

Поряд з металургійними труднощами існують і технологічні, пов'язані із значною різницею матеріалів, що поєднуються в питомій вазі, температурі плавлення, теплоємності і теплопровідності, а також коефіцієнті лінійного розширення. Останнє дуже суттєво впливає на властивості зварного з'єднання: зварювальні напруження, уникнути яких неможливо, залишаються в ньому, бо зняти їх шляхом термічної обробки неможливо, нагрівання після зварювання зробить їх ще більшими.[1]

Ця трудність долається більш високим попереднім підігріванням метала з меншим коефіцієнтом лінійного розширення або застосуванням проміжних металів – компенсаторів, у вигляді метала, наплавленого чи напиленого на зварювані кромки або металевих вставок. Останнє широко практикується при зварюванні в твердій фазі – дифузійному у вакуумі, тертям і т. і.

При зварюванні плавленням треба застосовувати таку технологію і техніку зварювання, при якій потужність джерела нагрівання зміщувалась би у бік більш теплопровідного метала, а більш тугоплавкий метал захищався від розплавлення за допомогою спеціального охолоджуючого пристрою.

Такі прийоми лежать в основі способу поєднання різнорідних металів в твердо-рідкому стані під назвою зварювання – паяння, коли один з них має меншу температуру плавлення. Необхідні міцності зв'язки в такому з'єднанні утворюються в процесі змочування рідким металом поверхні твердого метала і подальшою дифузією. Таке зварювання може бути успішним при умові ретельного додержання параметрів режиму і часу контактування між рідким і твердим металом. Нанесення на поверхню твердого метала покриттів, які збільшують цей час, дозволяє розширити діапазон параметрів режиму. Ці покриття вміщують елементи, які не утворюють хімічних сполук зі

зварюваними металами і сприяють гальмуванню дифузійних процесів на границі їх контакту або підвищують взаємну розчинність елементів, впливаючих на утворення хімічних сполук.

Зварювання у твердій фазі дає найкращі результати при поєднанні різнорідних металів за умовою ведення процесу при температурі не більше $0,4 T_{пл}$ більш легкоплавкого метала при достатній активації поверхні міцнішого метала.

Для зварювання різнорідних металів використовують ті ж самі види з'єднань, що і для однорідних – стикові, внапустку і кутові, але для максимального зменшення тепловкладення кут розчищення кромки зменшується, і перевага віддається стиковим швам.

Поверхні підготовлюються до зварювання відповідно рекомендацій для кожного із зварюваних металів.

Треба мати на увазі, як умови експлуатації таких конструкцій, так і технологія і техніка зварювання біметалевих перехідників передбачають перебування шва різнорідного з'єднання при температурі не вище $300 - 400^{\circ}\text{C}$, інакше внаслідок протікання дифузійних процесів буде утворюватися проміжний прошарок із відповідних інтерметалідів, що в свою чергу призведе до руйнування конструкції [1].

2.1 Алюміній + мідь

Металургійні труднощі при зварюванні плавленням цих двох металів пов'язані з обмеженою розчинністю одне в одному в твердому стані при кімнатній температурі. Вміст міді в алюмінії не перевищує $6 - 8\%$, а вміст алюмінію в міді майже 9% . Хоча при плавленні їх взаємна розчинність досить висока, при кімнатній температурі метал шва є перенасиченим, в результаті чого надлишкова кількість елементів виділяється у вигляді інтерметалідів типу Al_mCu_n і евтектики $\text{Al}_2\text{Cu} + \chi$, розташованих на границі сплавлення. Вони мають низьку міцність і дуже крихкі, внаслідок чого шов руйнується під дією термічних напружень при охолодженні.

Порівняння хіміко-фізичних властивостей алюмінію і міді показує, що температура плавлення міді більше ніж в 1,6 рази вище цього показника для алюмінію, питома вага відповідно у 3,3 рази

більше, а коефіцієнт лінійного розширення майже в 1,5 рази менше, ніж у алюмінію. Є різниця і в інших показниках, все це разом узятє ускладнює і технологічні труднощі поєднання цих металів.

Тому ефективним способом їх значного подолання є зварювання з використанням третіх металів, які більш-менш задовільно розчинюються в міді і алюмінії, поліпшуючи властивості зварного шва і зони сплавлення – срібла, цинку і кремнію. Крім того процес зварювання треба вести так, щоб, в основному, розплавлявся алюміній, а мідь майже не плавилася, що досягається зміщенням вісі електрода від вісі шва на величину 0,5 – 0,6 товщини зварюваного металу у бік мідної деталі. Таким чином одержання різнорідного зварного з'єднання алюміній – мідь забезпечується відповідним регулюванням складу зварного шва при оптимальних температурних умовах.

Зрозуміло, що виконання умов зварювання можливе тільки при автоматичному веденні процесу, де всі параметри можуть бути незмінними за весь час.

Розчищенню піддаються тільки кромки мідної деталі: для аргонодугового зварювання – це V-подібне одностороннє з кутом розкриття кромки 30°, для зварювання по шару флюсу – це U-подібне розчищення, яке заповнюється присадними дротами марки АД1. На поверхню зварних кромок мідних деталей попередньо гальванічним способом наноситься шар з цинку товщиною 50 – 60 мкм.

Таке покриття слугує бар'єром, який перешкоджає взаємодії між алюмінієм і міддю так, що перед зварювальною ванною, яка рухається, утворюється рідкий прошарок цинку, сприяючий кращому змочуванню поверхні міді алюмінієм [1].

Ще кращі результати можна отримати, застосовуючи спеціально розроблений електродний алюмінієвий дріт, легований кремнієм і цинком. Одержані зварні мідноалюмінієві з'єднання мають механічні властивості, відповідаючи алюмінієвій складовій, а руйнуються зразки по алюмінію.

Зварюванням прокаткою одержують біметалеві листи, стрічки і плити. При холодній прокатці необхідно вживати великі обтиснення 60–75 %, що, зважаючи на обмежені здатності прокатного обладнання, дозволяє отримати біметал товщиною не більше 4 мм, де мідна складова становить 0,1 – 0,8 мм. З деформованою структурою при гарячій прокатці в вакуумі, вакуумованих пакетах, в атмосфері аргону (для уникнення окислювання міді) одержується біметал більшої

товщини, а мідь має рекристалізовану структуру.

Холодне зварювання алюмінію з міддю має декілька різновидів.

Холодне точкове зварювання вимагає одночасного пластичного деформування цих металів в місці зварювання, що досягається при умові достатнього питомого тиску.

В умовах відмінних показників меж текучості необхідно прикладати різні питомі тиски (для алюмінію – 280 – 590 МН/м², для міді - 1960 МН/м²), оскільки при зварюванні на алюміній і мідь діють одні і ті ж зусилля. Ступінь необхідної деформації залежить від властивостей того з металів, який зварюється легше, тому застосовуються пуанسونи з різною площею їх робочих частин.

Площі пуансонів з боку алюмінію і міді можуть бути визначені із співвідношення питомих тисків в кінцевий момент зварювання в однорідному відношенні даних товщин і твердості металів.

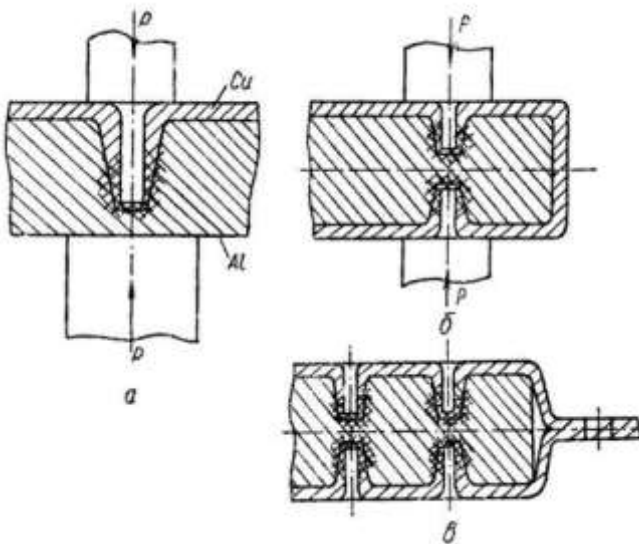
Таким чином можна зварювати алюміній з латунями марок ЛС59, ЛС62, в тому числі при однобічному вдавлюванні пуансонів з боку латуні чи міді, коли поверхня алюмінію залишається гладкою.

Іншим різновидом холодного зварювання алюмінію з міддю є армування-облицьовування міддю алюмінію [1].

Алюмінієві шини товщиною 3 – 10 мм облицьовуються відпаленими мідними штабами товщиною 0,3 – 1,2 мм у спеціальному пристрої, де одночасно зварювання ведеться декількома точками, або окремими послідовно виконаними точками (рис. 2.1).

Багатоточкове з'єднання більш продуктивне, і при ньому не порушується міцність сусідніх точок, однак для його реалізації потрібний прес великої потужності.

Кращі результати одержуються при використанні прямокутних пуансонів шириною, наближеною до товщини міді і трохи більшою. Цим самим досягаються кращі умови течії метала і рівномірного розподілу питомого тиску в місці контакту і, як наслідок, висока міцність з'єднання. Висота пуансона при товщині алюмінію до 3 мм вибирається такою, щоб залишкова товщина в місці зварювання складала 17–20 % сумарної товщини алюмінію і міді, при більших товщинах алюмінію висота пуансонів становить 2,5 – 4,0 товщини мідного облицьовування.



а – однобічне, б – двобічне, в – двобічне з кріпленням на міді
Рисунок 2.1 – Схема армування алюмінію міддю

При холодному точковому зварюванні електропровідність зварних з'єднань, рівна цьому показнику для основного метала, як правило, досягається при меншій площі зварювання, ніж рівномірність. Тому рівномірність таких з'єднань завжди забезпечує і надійну електропровідність [1].

Холодне стикове зварювання алюмінію з міддю протікає в умовах різного ступеня деформування цих металів, але використовуються ті ж самі пристрої, що і для зварювання цих металів в однорідному стані.

Перед зварюванням треба відпалити мідь хоч би на дільниці вильоту. Припуск на зварювання – різний, більший для алюмінію, ніж для міді. При зварюванні спочатку деформується переважно алюміній, мідь в процесі осаджування вдавлюється в алюміній, виникає складна деформація з елементами зсуву алюмінію по міді.

Для забезпечення провару при зварюванні стержнів установлюються такі припуски: $l_{Al} = (1,35 - 1,75)d_{Al}$; $l_{Cu} = (0,8 - 1,0)d_{Cu}$, а при зварюванні штабів $l_{Al} = (1,5 - 2,0) \delta_{Al}$; $l_{Cu} = (1,0 - 1,25) \delta_{Cu}$, де d_{Al} , δ_{Al} – діаметр і товщина алюмінію, а d_{Cu} , δ_{Cu} – діаметр і товщина міді.

При необхідності зварювання встик деталей алюмінію і міді різних діаметрів і товщин, звичайно, у алюмінію більших, ніж у міді, слід виконати попередню посадку міді, а потім відпалити припуск на зварювання. Зусилля осадження визначається співвідношенням:

$$P_{oc (Al + Cu)} = (1,35 - 1,90) P_{oc Al}$$

Параметри режиму холодного стикового зварювання мідноалюмінієвих деталей наведені в табл. 1.69. Властивості зварних з'єднань відзначаються високою статичною, динамічною міцністю і електропровідністю.

Зварювання тертям алюмінію з міддю дозволяє одержати з'єднання без мікродеформування більш міцного металу завдяки різкій різниці опору деформуванню зварюваних металів при температурі в стикі. Завдяки цьому границя розподілу з'єднання цих різнорідних металів представляє собою переривчасту лінію інтерметалідів товщиною до 1,5 мкм. При накладенні збільшеного зусилля кування має місце зростання міцності з'єднання завдяки зростанню площі і числа дільниць в зоні контакту, де утворилися металеві зв'язки.

Так, при зварюванні стержнів із металів М1 + АД1 діаметром 22 мм лінійна швидкість обертання становить 1,5 – 2,0 м/с, швидкість осьової деформації становить 5,5 – 8 мм/с, питомий тиск при нагріванні 40 – 70 МПа, при куванні – 50 – 210 МПа, час гальмування становить 0,2 с. [1]

За рахунок інтенсифікації деформації і її локалізації на початку зварювання можна обмежити зростання прошарку вздовж поверхні контакту і тоді формується дисперсна структура без шару інтерметалідів.

Взагалі треба намагатися вести процес зварювання при мінімальному часі нагрівання і максимальному часі гальмування, тиску нагрівання і проковки. За рахунок оптимізації часу гальмування можна значно знизити тиск проковки.

Магнітно-імпульсне зварювання використовується при виготовленні мідноалюмінієвих трубчастих перехідників. Сутність процесу полягає в реалізації зусиль, виникаючих при взаємодії магнітних полів струму індуктора і наведеного в поєднаних трубках. Для цього використовується енергія конденсаторної батареї ємністю 80 мкФ і максимальною напругою 20 кВ, так що накопичена енергія

сягає 16 кДж; вона подається на індуктор, всередині якого знаходяться зварювані трубки. Поєднані мідні трубки діаметром 6 мм з алюмінієвими діаметром 8 мм, збираються внапустку: мідна вводиться всередину розвальцьованої частини алюмінієвої трубки з певним зазором між ними. Для збереження необхідного перерізу всередину мідної трубки вводиться сталевий стержень, який вилучається після зварювання. Телескопічно зібрані труби вводяться в центральну частину робочого органа машини-індуктора в зону найбільшої концентрації магнітних силових ліній.

Під дією пондермоторних сил розвальцьована частина алюмінієвої трубки співударяється з мідною, і утворюється міцне герметичне з'єднання.

На це витрачається 4,4 – 6,5 кДж енергії при миттєвому значенні сили струму 165 – 200 кА [1].

При ударному зварюванні у вакуумі біметалевих шайб, зібраних внапустку, з'єднання М1 + АД1 товщиною 2,4 мм діаметром 30 мм можна одержати зону зварювання без інтерметалідних включень на параметрах режиму: $T = 500^{\circ}\text{C}$; енергія удару – 2 – 3 кДж.

Нагрівання ведеться кільцевим електронно-променевим джерелом. Деталі збираються із зазором 2 - 3 мм. При імпульсному навантаженні заготовки переміщуються в холодну деформуючу матрицю, де і здійснюється зварювання з одночасним формуванням контакту необхідної конфігурації. Деформація мідної і алюмінієвої деталей складає 10% і 40% відповідно. Маса ударника і швидкість його переміщення забезпечують необхідну енергію для утворення міцного зварного з'єднання.

2.2 Алюміній + титан

При зварюванні титана з алюмінієм внаслідок практично відсутнього взаємного розчинювання при кімнатній температурі існують інтерметалідні сполуки TiAl , TiAl_3 і γ -фаза, а в алюмінії при тих же умовах може розчинитися тільки 0,07% Ti по масі.

При таких металургійних умовах уникнути утворення зварних швів з крихкими фазами неможливо.

При зварюванні титана з алюмінієвими сплавами АМг і АМц

додаткові труднощі з'являються у зв'язку з підвищеною концентрацією на границі розподілу фаз типа Al_mMg_n , Al_mCu_n і їм подібних, так що в результаті утворюються крихкі і неміцні з'єднання.

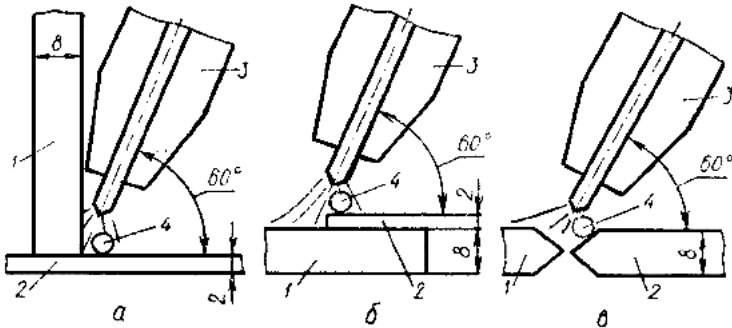
Тому сучасна технологія зварювання цих двох металів передбачає ведення процесу зварювання – паяння. Більш надійне таке зварне з'єднання одержується зварюванням у твердій фазі за рахунок сумісного деформування цих металів.

При зварюванні – паянні взаємодіє рідкий алюміній з твердим титаном. За рахунок короткочасного контактування концентрація титана недостатня для утворення γ -фази, а кількість сполук $TiAl_3$ може бути суттєво зменшена. Така технологія дозволяє одержати задовільне зварне з'єднання аргонодуговим способом з попереднім алітуванням або наплавленням титанових кромок чистим алюмінієм. При невеликих розмірах деталі доцільно виконувати алітування, яке здійснюється шляхом занурення всієї деталі або її частини в розплав алюмінію при $T = 800 - 830^\circ C$. Час витримки залежить від розміру деталі і об'єму ванни і становить 1 – 3 хв; охолодження деталі здійснюється на повітрі.

При наплавленні алюмінію без алітування треба вживати флюс марки Ф-320, а саме наплавлення вести з обмежувачими алюмінієвими смужками, які попереджають стікання рідкого шлаку.

Саме наплавлення кромок при товщині метала більше 8 мм ведеться на параметрах режиму: $I_{зв} = 170 - 180$ А, $U_0 = 18 - 20$ В, $d_{прис} = 5 - 8$ мм, $Q_{Ar} = 16 - 18$ л/хв. Товщина наплавленого шару 5 – 8 мм вибирається в залежності від глибини проплавлення при подальшому зварюванні з алюмінієвою деталлю – непроплавлена частина шару має бути не менше 2 – 3 мм [1].

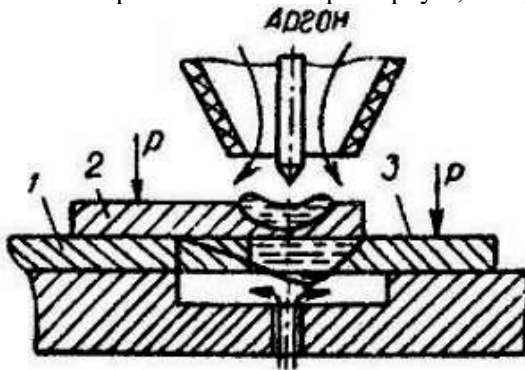
При товщині шару титана більше 3 мм з'єднання встик здійснюється при V чи X подібному розчищенні; кут скоса на титані становить 40 - 45°, а на алюмінії - 35°, величина притуплення повинна бути достатньою для зручного виконання наплавлення без проплавлення титана; можливі схеми зварювання різних типів зварних з'єднань наведені на рис. 2.2.



1- алюміній; 2 – титан; 3 – палик з неплавким електродом; 4 – присадний алюмінієвий дріт

Рисунок 2.2 – Схеми процесу одержання таврових (а), внапустку (б) і стикових (в) з'єднань титана з алюмінієм

Положення центра зварювальної плями повинно бути на рівні краю титанової деталі або зі зміщенням її у бік алюмінієвої деталі. Зварювальна ванна утворюється без повного проплавлення титанової деталі з товщиною непроплавленого прошарку 0,3 – 0,4 мм (рис. 2.3).



1 – прокладка – холодильник, 2 – титанова деталь, 3 – алюмінієва деталь

Рисунок 2.3 – Схема аргонодугового зварювання титана з алюмінієм з утворенням двох роздільних зварювальних ванн

Під дією надлишкового тепла рідкої титанової ванни плавиться алюмінієва деталь, в свою чергу утворюючи ванну рідкого алюмінію, але завдяки прошарку твердого титана обидві ванни не контактують між собою.

Завдяки підвищеній хімічній активності титану при температурі

вище 800°C здійснюється відновлення поверхневих оксидних плівок в процесі зварювання і дифузія кисню в титан, внаслідок чого трохи зростає його твердість і міцність.

Захист плавильного простору і прилягаючих зон металів здійснюється за рахунок піддува інертного газу в труби чи в підкладку і зовні у спеціальне "плаваюче" сопло і козирок (рис. 2.4) [1].

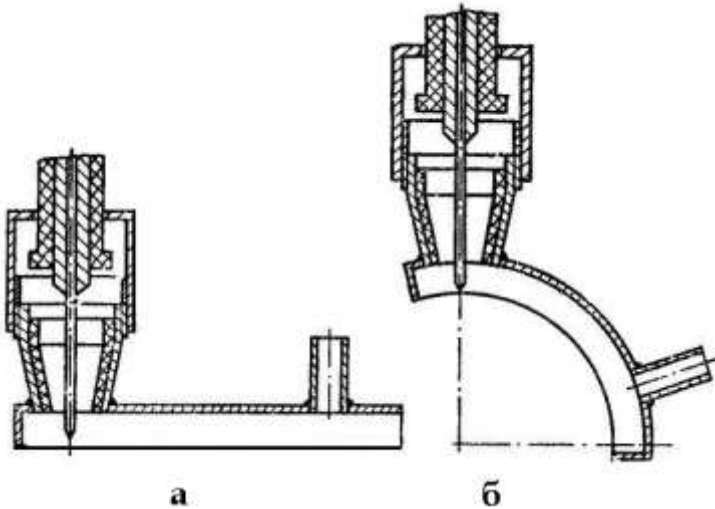
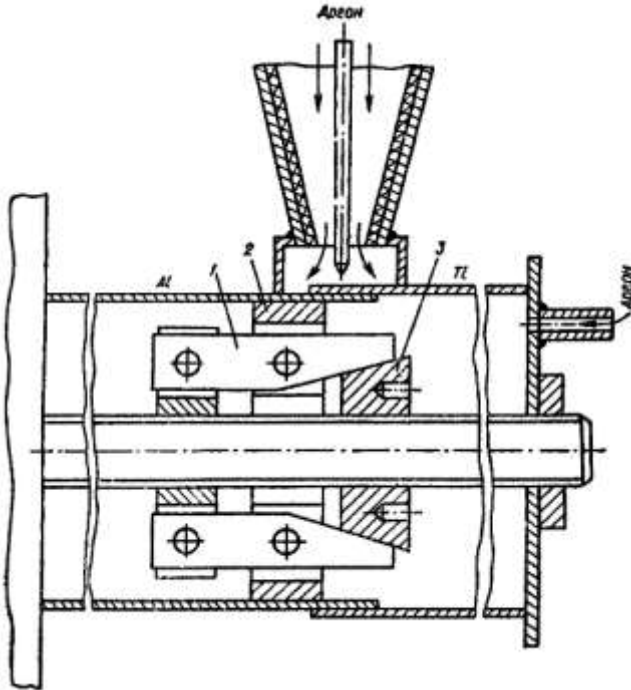


Рисунок 2.4 – Конструкція "плаваючого" сопла з козирком для зварювання поздовжніх (а) і кільцевих (б) швів титано - алюмінієвих з'єднань

Обов'язковою умовою якісного протікання цього процесу є щільне прилягання двох зварюваних деталей, що забезпечується їх притиском. Очищення поверхні алюмінієвої ванни забезпечує її краще розтікання по поверхні титана і сприяє утворенню якісного зварного з'єднання. Температура нагріву титанової поверхні при цьому має бути достатньою для змочування титана рідким алюмінієм, але не більшою до максимально допустимої (орієнтовно 1100°C). При зварюванні "на вазі" важко забезпечити виконання параметрів режиму, при яких було б відсутнє збільшення проплавлення алюмінієвої кромки. Тому для відведення надлишкового тепла від алюмінієвої кромки використовуються спеціальні внутрішні чи зовнішні пристрої – холодильники у вигляді сталевий або мідної підкладки чи кільця (рис. 2.5).



1 – важіль, 2 – сталеве розтискне охолоджуюче кільце, 3 – натискна гайка

Рисунок 2.5 – Схема телескопічного зварного з'єднання алюмінієвої трубки з титановою

Їх розміри визначаються експериментально в залежності від теплопровідних властивостей матеріалів і параметрів режиму зварювання [1].

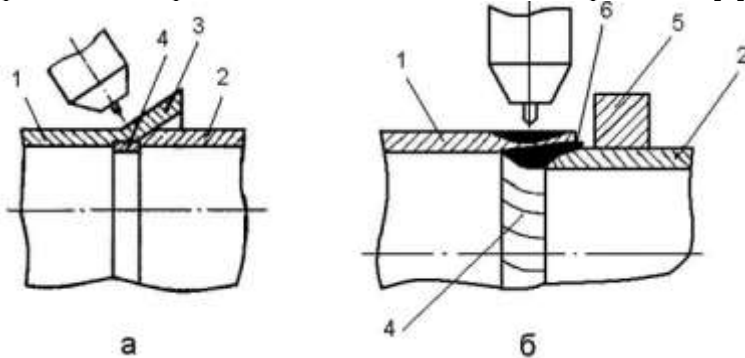
Зварювання ведеться присадним дротом марки АК5 діаметром 3 мм. Зварювальна дуга переміщується переважно по поверхні алюмінію при зміщенні електрода від вісі стику у межах 0 – 4 мм в залежності від товщини титанового листа. При ретельному виконанні техніки і параметрів режиму зварювання створюються допустимі температурно – часові умови взаємодії алюмінію з титаном. Хоча повністю уникнути утворення інтерметалідів неможливо, але якщо вони є в невеликій кількості і у вигляді окремих включень, це є допустимим з точки зору роботоспроможності різнорідної конструкції. При цьому має місце збільшення фактичної площі контакту за рахунок

розтікання рідкого алюмінію по поверхні нагрітого титана.

Стикове зварювання листових титано-алюмінієвих конструкцій може виконуватись з попереднім алітуванням скошених кромки титанового листа; кромки алюмінієвого листа не піддаються обробці.

Зварювальна дуга зміщується на кромку алюмінію на відстань товщини зварюваних пластин. При цьому досягається повне проплавлення алюмінію при гарному змочуванні кромки алітованого титана з сприятливим формуванням зворотного боку шва на спеціальній підкладці.

Найчастіше виникає необхідність виконання титано-алюмінієвих трубчастих перехідників. Крацюю роботоспроможністю відзначаються стикові зварні з'єднання, які були застосовані при зварюванні труб з алюмінія АД1 і титана ВТ 1-0 діаметром 45 мм і товщиною стінки 1,5 мм. Кромки під зварювання підготовляються згідно рис.2.6, а [1].



1 – титанова труба, 2 – алюмінієва труба, 3 – технологічний буртик, 4- циліндричне присадне кільце, 5 – холодильник, 6 – галтель

Рисунок 2.6 – Схема підготовки до зварювання титано-алюмінієвого трубчастого перехідника, зібраного встик (а) і утворення зварного шва на деталях, зібраних внапустку (б)

Технологічний буртик на титановій трубі виконується з метою збільшення теплоємності кромки і забезпечення достатньої кількості тепла для розплавлення алюмінію. Після зварювання воно вилучається; його оптимальна довжина має складати 4 – 5 товщин труби, а кут розвальцювання титанової труби і скося алюмінієвої кромки дорівнювати 20° . Присадне кільце виготовляється із алюмінієвого сплаву, легованого 3,5 – 5 % Si для запобігання гарячих тріщин і для забезпечення формування алюмінієвої зварювальної

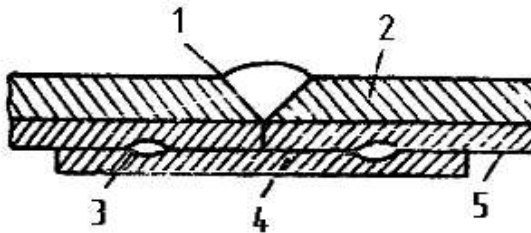
ванни без меніска в процесі її змочування титанового буртика. Зварювальний пальник розташовується, як показано на рис. 2.6, а.

Для забезпечення стабільності в формуванні зварного шва мідний холодильник у вигляді зовнішнього кільця накладається на алюмінієву трубу на відстані 1 – 1,5 м, від технологічного буртика (на рис. 2.6, а не показаний).

Збирання труб внапустку потребує менше трудовитрат, а для компенсації можливої нещільності при збиранні на титановій трубі робиться внутрішній скіс кромки для кращої циркуляції аргона, що піддувається. Це спонукає рух зварювальної ванни в корені шва, так що в щілину скоса витісняється рідкий алюміній і утворює валик типа галтели (рис. 2.6, б). Наявність валика свідчить про якісне очищення поверхні алюмінію від оксидів під час зварювання. Розміри холодильника 5 (рис. 2.6, б), виконаного у вигляді мідного кільця з внутрішнім діаметром 45 мм, зовнішнім 60 мм і шириною 10 мм, забезпечують необхідне формування зварного шва на алюмінії на параметрах режиму: у безперервному процесі $I_{зв} = 90 - 120$ А, $V_{зв} = 15$ м/год, в імпульсному $I_{зв} = 120$ А, $I_{паузи} = 25$ А, $V_{зв} = 10$ м/год, $t_{імп} = t_{пауз} = 0,5$ с. Для надійного притиску поверхонь зварюваних деталей, що поєднуються застосовується питоме осьове зусилля 10 – 20 МПа.

Перелічені заходи у поєднанні з оптимальними параметрами режиму, дозволяють отримати якісні зварні різнорідні з'єднання сплавів титана марок ОТ4, ВТ 6С, ВТ 20 та інш. з алюмінієм та його сплавами марок АД0, АД1, АМц [1].

Зварювання встик біметалу АД1 – ВТ 1-0 товщиною 1,5 + 1,0 мм відповідно, одержаного сумісною гарячою прокаткою, виконується в 2 етапи по схемі, наведеній на рис. 2.7.



1 – шов; 2 – алюміній; 3 – титан; 4 – накладка; 5 – зварна точка
Рисунок 2.7 – Схема стикового з'єднання біметалу алюміній – титан

Спочатку до титанового шару біметалу точковим конденсаторним зварюванням приварюється титанова накладка такої ж самої товщини із кроком точок 7 мм. Потім на змінному струмі зварюється алюмінієвий шар біметалу на параметрах режиму $d_{we} = 2$ мм; $d_{прис} = 2$ мм; $I_{зв} = 40 - 50$ А; $Q_{Ar} = 4 - 5$ л/хв.

Іншим різновидом зварювання – паяння є ведення процесу в камері з контрольованою інертною атмосферою низького тиску. Після вакуумування при залишковому тиску повітря в камері 1 – 3 Па вона заповнюється аргоном, і утворюється тиск порядку 800 Па. Нагрівання торців зварюваних деталей здійснюється електричною дугою змінного струму, яка горить в зазорі між деталями і рівномірно розігріває торцеві поверхні, здійснює їх катодне очищення і формування шару розплавленого алюмінію. Після цього виконується осадження, при якій рідкий метал витискається із стика з утворенням з'єднання у твердорідкій фазі. Зварювання трубчастого перехідника пари ВТ 6С (14×2) + АМг 3 (16×4) ведеться на таких параметрах режиму: виліт деталі із затискного пристрою ВТ 6С – 10 мм, АМг 3 – 8 мм; величина зазору між торцями – 3,5 мм, величина імпульсного струму 650 А, тривалість його дії – 0,2 С, число імпульсів – 14, час нагрівання дорівнює 1 – 3 с, оплавлення 0,1 – 0,3 с, регулюється за допомогою тиристорного переривача, зусилля осадження 1,5 кН, час осадження 5 с. Імпульсне нагрівання покращує умови рівномірного тепловкладення і стабілізує формування рідкого шару металу протягом 1,5 – 2 с. Таким чином зварюються титано-алюмінієві трубчасті перехідники з Ду від 4 до 40 мм, приварюється кінцева арматура, а також стержневі заготовки діаметром 3 – 20 мм.[1]

При цьому способі зварювання відсутні непровари, невелика кількість витиснутого ґрата практично не зменшує прохідний переріз труби, а міцність зварного з'єднання сягає 95% міцності алюмінію.

Аналогічним чином можна зварювати різномірні метали і при електричному точковому контактному зварюванні з керованим внутрішнім виплеском. Зварювані деталі стискаються електродами та нагріваються до температури плавлення.

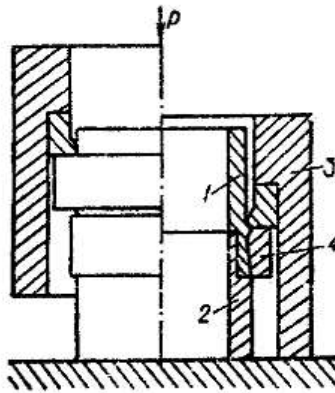
Робоча частина електродів з боку більш пластичного металу або з меншою товщиною повинна мати форму конуса із сферичною робочою поверхнею, а з протилежного боку – циліндричною з плоскою робочою поверхнею.

Для запобігання початковому внутрішньому виплеску передній

фронт зварювального імпульсу модулюється. Після реалізації внутрішнього виплеску, під час якого вилучаються рідинна складова ядра разом з інтерметалідними сполуками, деталі проковуються підвищеним зусиллям для остаточного витискування рідкого металу та механічного дроблення інтерметалідного прошарку завтовшки 2 – 4 мкм.

Зварювання у твердій фазі титана з алюмінієм досягається при одержанні такого біметала прокаткою при $T = 470 - 500^{\circ}\text{C}$ і обтисненні 68 – 70%. Стабільна висока якість зварного з'єднання біметала ВТ1-0 + АМг 6 має місце, якщо на контактуючі поверхні попередньо нанесені тонкі шари алюмінію. Завдяки цьому величина обтиснення може бути знижена до рівня 47 – 50 %.

Холодне зварювання тієї ж самої композиції виконується при виготовленні трубчастих перехідників шляхом сумісного деформування заготовок в спеціальній оправці (рис. 2.8) [1].



1- алюмінієва заготовка; 2 – титанова заготовка; 3 – обтискне кільце; 4– сталеве кільце

Рисунок 2.8 – Схема виготовлення титано-алюмінієвого перехідника холодним зварюванням

Алюмінієва заготовка складається з титановою, циліндрична поверхня якої має циліндричні канавки і виступи трикутної форми з кутом 60° і глибиною 1 мм. Затискне кільце має конічну форму з кутом 50° . По торцю сталевого кільця прикладається питоме осьове зусилля величиною 280 – 320 МПа, яке обтискує заготовку при переміщенні кільця в задане положення зі швидкістю 60 – 100 мм/хв,

так що середня величина пластичного деформування контактних поверхонь стиснення складає 37 – 43 %.

Алюміній заповнює канавки при обтисненні, утворюючи міцний контакт між заготівками, що поєднуються. Таким чином можна виготовляти роботоспроможні титано-алюмінієві перехідники діаметром 10 – 100 мм, їх міцність дорівнює цьому показнику алюмінієвого сплаву.

Дифузійне зварювання титана з алюмінієм має декілька технологічних особливостей в залежності від складу зварюваних матеріалів [1].

Підготовка алюмінієвих поверхонь під зварювання ведеться шляхом травлення у розчині складу, (30 мл H_2SO_4 , 70 мл H_3PO_4 , 5 мл HNO_3 , 10 мл гліцерин) протягом 1 – 1,5 хв при $T = 80 - 85^\circ C$. Після цього деталі зберігаються в гліцерині до установки їх в камері, де гліцерин випаровується в процесі зварювання.

Безпосереднє зварювання титана ВТ 1-0 зі сплавом АД 1 дозволяє одержати з'єднання без інтерметалідного прошарка, але для зварювання пари ВТ 1-0 + АМг3 потребується алітування титанової поверхні або розміщення між зварюваними деталями проміжного прошарку з фольги АД 1 товщиною 0,4 мм. Зварювання ведеться при $T = 520 - 550^\circ C$, часі витримки – 60 хв при тиску, більшим за σ_T матеріалів при температурі процесу, а для зберігання необхідних геометричних розмірів виробу використовується спеціальне оснащення, яке забезпечує примусове формування металу в зоні контакту. В якості прошарку можна вживати алюмінієву прокладку з покриттям зі сплаву Al – Si і тоді вести зварювання при температурі, трохи вищій за температуру плавлення алюмінію протягом 15 хв при тиску 2 МПа.

2.3 Титан + мідь

Титан і мідь також значно відрізняються своїми властивостями, утворюючи систему з дуже обмеженою розчинністю, яка при $T = 400^\circ C$ становить всього 0,4 мас %. Розплавлення цих металів супроводжується виникненням евтектик і інтерметалідних фаз Ti_2Cu , $TiCu$ і $TiCu_3$, які і є причиною руйнування з'єднання при охолодженні

зварних з'єднань. Тому поєднання цих металів, як при плавленні, так і у твердій фазі з нагрівом виконується, в основному, з використанням проміжних прокладок з третіх матеріалів, які задовільно зварюються як з титаном, так і з міддю.

Зварювання плавленням титана з міддю можливе, якщо його виконувати способом зварювання-паяння по схемі, наведеній раніше для одержання різнорідної пари титан – алюміній (рис. 8.6). За рахунок максимального обмеження тривалості взаємодії цих металів при високій температурі можна значно зменшити товщину інтерметалідного прошарку і забезпечити задовільні властивості зварного з'єднання [1].

Зварювані деталі збираються внапустку, їхні кромки зачищаються до металевого блиску і знежирюються ацетоном. Для попередження від зміщення деталей і короблення кромки використовуються спеціальні механічні притискові пристрої, за допомогою яких деталі закріплюються до основи з підкладкою. Особлива увага приділяється точності установки і витримання постійної відстані від вісі вольфрамового електрода до торця мідної деталі по всій її довжині. Зварювання ведеться на постійному струмі прямої полярності при витраті аргону в пальник з козирком 6 л/хв, на піддув в пристрої – 2 л/хв.

При зварюванні β – титанових сплавів VT15 і Ti3Al37Nb з міддю МЗр попередньо титанова кромка на деталях товщиною 3 і 5 мм розчищається з одного боку під кутом 45° , після чого на всі титанові кромки методом плазмової металізації наноситься шар міді товщиною 0,15 – 0,25 мм; зварювані деталі збираються встик. При зварюванні вольфрамовий електрод зміщується від вісі у бік мідної деталі на 2,5 – 4,5 мм. Зварювання ведеться вольфрамовим електродом діаметром 3 – 4 мм на постійному струмі прямої полярності з присадним дротом, на параметрах режиму, наведених в табл. 8.9.

Існує технологія зварювання титана з мідним сплавом – хромовою бронзою марки БрХ1 з використанням проміжної вставки з тугоплавких металів – ванадію, ніобію, танталу. Саме зварювання ведеться в два прийоми: спочатку зварюється титановий сплав з тугоплавким металом, а потім з цим металом хромова бронза.

Міцність з'єднань, отриманих цими двома способами, знаходиться на рівні хромової бронзи, а руйнування при випробуванні здійснюється по границі шва з бронзою.

Електричне контактне точкове зварювання титана краще реалізується з мідними сплавами, наприклад, з латунню ЛБЗ, якщо процес ведеться з керованим виплеском.

Зварна точка з задовільними міцнісними характеристиками утворюється у рідинно-твердому стані з інтерметалідним прошарком товщиною 2- 3 мкм.

Зварювання титана з міддю в твердій фазі краще за все реалізується, коли процес іде без нагрівання по схемі, рекомендованій для холодного зварювання титану і алюмінію.

На поверхнях, що поєднуються, передбачаються виступи і відповідні їм впадини. Виступи розташовуються на міді і вдавлюються у впадини на титані. При цьому зварювані поверхні металів знаходяться під кутом до напрямку стискуючого зусилля [1].

При зварюванні тертям стержнів \varnothing 20 мм титана ВТ1 – 0 і міді М1 досягаються гарні результати, якщо процес ведеться в захисній атмосфері – аргоні, який подається в камеру з тиском, трохи більшим атмосферного. Вона закриває зварювані кінці деталей по 40 мм з кожного боку. Інші параметри режиму такі: $n = 1500 - 3000$ об/хв; $V_{\text{под}} = 7 - 15$ мм/с; $t_{\text{зв}} = 0,2 - 0,5$ с; $t_{\text{осадж}} = 2,5 - 2,8$ с; $P_{\text{осадж}} = 80$ МПа; виліт деталей – 3 – 4 мм; потужність процесу – 13 кВт. Незважаючи на те, що частина утворених інтерметалідів витісняється разом з пластичним металом, зона з'єднання має хоча і розрібнений, але інтерметалідний прошарок товщиною близько 7 мкм.

Тим не менше при випробуванні зварених зразків на розтягування руйнування відбувається по міді на відстані від утвореного зварного шва.

Взагалі безпосереднє якісне зварювання у твердій фазі з будь-яким нагрівом не дає можливості уникнути утворення інтерметалідних сполук. Навіть такий спосіб, що швидко реалізується - зварювання вибухом потребує використання проміжного прошарку із ніобію при виготовленні біметалу титан-мідь для подальшої переробки його прокаткою, де нагрівання обов'язкове. Товщина його залежить від товщини зварюваних металів і лежить у межах 0,3 – 1,0 мм, коли товщина титанових листів дорівнює 5- 15 мм, а мідних – 3 – 8 мм.

Зварена вибухом заготовка нагрівається до $T = 750 - 800^{\circ}\text{C}$ зі швидкістю 0,75 – 0,8 град/с, потім виконується примусове відстужування пакета так, щоб перепад температур між міддю і

титаном становив 70 - 120°C, після чого здійснюється прокатка з обтисненням за один прохід на 30 – 40 %.

Дифузійне зварювання титана VT1-0 з міддю M1 може бути отримано тільки в дуже вузькому температурно-часовому інтервалі: $T = 850^{\circ}\text{C}$, $t = 10$ хв, $P = 5$ МПа, що незручно для практичного використання.

Тому зварювання ведеться через проміжні прошарки, які розміщуються між поверхнями титана і міді як у вигляді фольги, так і в якості напиленого шару [1].

2.4 Алюмінієві сплави+магнієві сплави

Безпосереднє зварювання алюмінієвих сплавів з магнієвими не дозволяє отримати повноцінного зварного з'єднання навіть у твердій фазі.

При зварюванні вибухом для одержання біметала MA2-1+AMг6 використовується проміжна прокладка з алюмінію марки АД1. Для підвищення роботоспроможності такої магній-алюмінієвої комбінації краще вводити між шарами AMг6 і MA2-1 біметалевий прошарок VT1-0+АД1. Внаслідок того, що титан має найменший коефіцієнт лінійного розширення, після відпуску при $T=300^{\circ}\text{C}$ цей фактор спричиняє сприятливий розподіл залишкових напружень при зберіганні міцності з'єднання на рівні алюмінію АД1. Для підвищення пластичності і уникання структурної неоднорідності магнієві заготовки перед зварюванням і після кожної подальшої операції треба піддавати відпалу при $T=450^{\circ}\text{C}$, який знімає вибухове зміцнення. Таким чином можна одержати багатошаровий напівфабрикат для подальшої металообробки прокаткою AMг6 – 10 мм, АД1 -3мм, VT1-0-2 мм, MA2-1-5, 10, 20 мм.

Подальше зварювання встик подібного багатошарового з'єднання з іншими розмірами (рис. 2.9) виконується у такій послідовності.

Спочатку зварюються титанові складові без присадки на вазі, щоб запобігти оплавлення зовнішніх шарів. Потім зварюються алюмінієві складові з використанням присадки СвAMг61 так, щоб забезпечити натікання алюмінію на активовану дугою поверхню

титана. Після цього зварюється магнієвий сплав з використанням присадки ВМД-10. Виникаючий при цьому інтерметалідний прошарок не знижує міцності внаслідок його малої товщини [1].

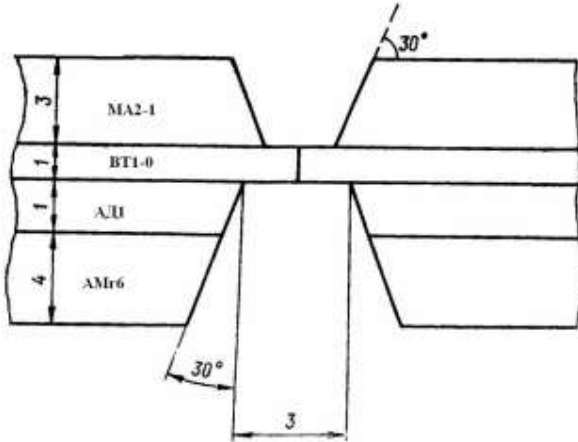


Рисунок 2.9 – Схема підготовки кромок до зварювання багатошарового матеріалу

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Биковський О.Г. Зварювання та різання кольорових металів. – Київ: Основа, 2011. – 392с.
2. Биковський О.Г., Пінковський І.В. Довідник зварника. – Київ: Техніка, 2002. – 336с.

Додаткова

1. Технологія та обладнання електричного контактного зварювання.: Навч. посіб./ О.Г. Биковський, Д.М. Лутов, І.В. Пінковський. – Київ: Техніка, 2001. – 240с.