

СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ У РОЗВИТКУ ЗВАРЮВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ З МАТРИЦЕЮ ІЗ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ (огляд)

Складено на основі аналізу літератури і статей у періодичних виданнях за останні 25 років. Розглянуто сучасні способи зварювання композитних матеріалів з матрицею із кольорових металів. Показано технологічні прийоми і параметри режимів зварювання, які дозволяють виготовляти зварні з'єднання прийнятної якості.

Ключові слова: композитні матеріали, кольорові метали, зварювання, огляд.

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, яка зміцнена безперервними або короткими волокнами, ниткоподібними кришталями, частинками і т.і. Матричний сплав передає навантаження на міцні 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, частинки карбідів і оксидів металів, дисперсійнозміцнюючі компоненти, псевдосплави тощо.

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

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

1. Температура плавлення матриці лежить у межах 600–1700 °С, а зміцнителя – 1500–2500 °С, що призводить при зварюванні плавленням до порушення суцільності 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. Армуння матричного сплаву змінює характер розповсюдження теплоти в матриці, що залежить від розташування волокон, які армують, і їх об'ємної частки. Це вимагає ретельного контролю введення теплоти при зварюванні, що досягається введенням присадного металу, який, розплавляючись, захищає верхні шари зміцнителя від впливу високотемпературної дії джерела нагріву, проникає і змочує волокна, які розташовано нижче. 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 поганого змочуваності вуглецевих волокон вирішується шляхом добавок цинку або хрому, які взаємодіють з вуглецевими волокнами до утворення карбідів, які мають кращу змочуваність.

3. Значна різниця в коефіцієнтах теплоємності і теплопровідності, а також у коефіцієнтах лінійного розширення матриці і зміцнювача, що спонукає виникненню значних температурних напружень. Останні виникають також у 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.

Тому при виборі способу зварювання і призначенні технології і техніки виконання зварювальних робіт необхідно забезпечити одержання безпористого зварно-

го з'єднання без втрати міцності, без розплавлення зміцнителю, 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 кремнію і т.і. КМ на мідній основі з волокнами ніобію, арматури з вольфраму чи молібдену, зміцнення її тугоплавкими оксидами (Al_2O_3 , BeO , ThO_2) використовуються в електротехніці у виробництві напівпровідників тощо. Армування титану і його сплавів волокнами карбіду кремнію, бору і вуглецю, а також металевими дротами дозволяє збільшити діапазон робочих температур до 700–800 °С.

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

- 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 проміжкових прокладок з легувальними добавками, які обмежують розчинення компоненту, що армує, 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 кремнію, цирконію, титану або інших карбідоутворювальних елементів, які попереджають утворення карбіду 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 заклепочними або болтовими з'єднаннями.

КМ, армовані частинками, короткими волокнами, нитковидними кришталями можна зварювати встик при виборі відповідних способів, зварювальних матеріалів і режиму зварювання, а також за умови, що КМ виготовлені методами рідиннофазової технології.

Якщо ж вони виготовлені методом порошкової металургії, то в зоні зварювання можливе утворення ділянок 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 зміння фізичних і механічних властивостей, важливо розподілити їх у залежності від особливостей міжфазної взаємодії. Це дозволяє сформулювати критерії, за якими 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 частинками матриці і зміцнювача, які чергуються. Зварювання плавленням таких матеріалів дає можливість отримати зварний шов з властивостями, що майже не відрізняються від основного матеріалу, тому що конструкція композиту 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, яка повільно змінюється. Як і в попередньому випадку властивості зварного шва близькі до основного матеріалу.

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 компоненту.

Якщо компоненти КМ не змішуються у рідкому стані (системи Al-Pb, Fe-Cu-Pb), зварювання плавленням їх неможливе, тому що зварні з'єднання легко руйнуються по місцю сплавлення.

Найбільше розповсюдження отримали КМ на алюмінієвій матричній основі АД1 і АМг6, КАС-1А з волокнами із сталевго дроту діаметром 0,15 мм і ВКА-2 із волокнами з бору \varnothing 0,15 мм з об'ємною часткою волокон 25–40 %, а також АМг5+12 % SiC дисперсійно зміцнюваний композитний матеріал (ДЗКМ). Як матриця, можуть застосовуватися й інші алюмінієві сплави. 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 в 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 гелію через проміжкову Т-подібну вставку, яка розплавляється виготовлену з високоміцного алюмінієвого сплаву (рис. 1).

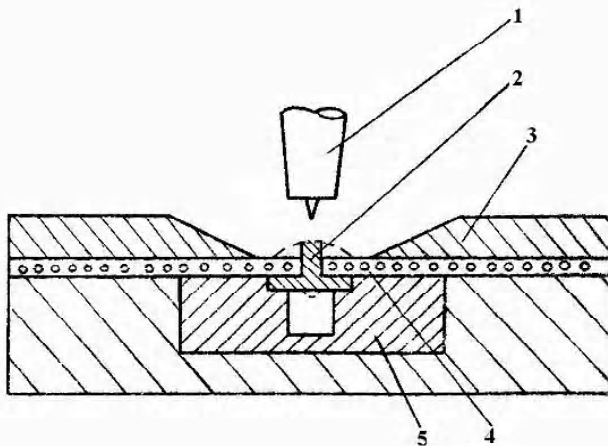


Рис. 1. Схема зварювання листового КМ ВКА-2 через проміжкову Т-подібну вставку, яка розплавляється:

1 – пальник; 2 – вставка; 3 – мідний притиск; 4 – КМ; 5 – мідна підкладка

При цьому здійснюється сплавлення кромки 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.

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 з сплаву АМг6 і додатковим присадним матеріалом Св АК5 в імпульсному режимі:

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

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

При зварюванні ДЗКМ Al+SiC – з використанням присадних матеріалів виникає додаткове ускладнення – розбавлення зварювальної ванни, перехід зміцнювальних компонентів у зварний шов, нерівномірний їх розподіл. Інтенсивний зварювальний нагрів руйнує частинки 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 типу АМг на параметрах режиму: $I_{\text{зв}} = 150 \text{ А}$, $V_{\text{зв}} = 10\text{--}12 \text{ м/год}$. Шви, виконані без присадки, більш міцні, але після термічної обробки і шви, що одержано з присадним дротом, мають задовільні міцнісні характеристики на рівні 0,85 від міцності основного матеріалу завдяки більш рівномірному розподілу наповнювача, що армує.

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 зміцнювальних частинок і гарантії проплавлення кореня шва присадний дріт має бути розміщеним у зварювальній ванні, а кут розкриття кромки становити 90° . З цієї метою використовуються зварювальні дроти з 5 % кремнію (типа АК5).

Зварювання відлитих зразків ДЗКМ АЛ2+10 % SiC ведеться на змінному струмі: $d_{\text{вк}} = 4 \text{ мм}$, $I_{\text{зв}} = 365 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 14 \text{ В}$, $V_{\text{зв}} = 30 \text{ м/год}$. 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 «сандвіча» складає 1,7 мм, який потім піддається дифузійному зварюванню на параметрах режиму: $T = 870^\circ\text{C}$, $P = 7 \text{ МПа}$, $t = 1 \text{ год}$.

Подальше дугове зварювання здійснюється вольфрамовим електродом в аргоні вручну на параметрах режиму: $I_{\text{зв}} = 60 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 10 \text{ В}$, і механізованим способом $I_{\text{зв}} = 25 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 12 \text{ В}$, $V_{\text{зв}} = 15 \text{ м/год}$ 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 металу зварного шва.

Зварювані деталі з КМ Al + 18,4 % карбіду кремнію по об'єму збираються для забезпечення повного провару в стиковому з'єднанні з зазором. Зварювання ведеться плавким електродом типу АМг3 в аргоні на параметрах режиму: $I_{\text{зв}} = 100\text{--}110 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 19\text{--}20 \text{ В}$, $V_{\text{зв}} = 18\text{--}22 \text{ м/год}$, $Q_{\text{Ар}} = 16\text{--}19 \text{ л/хв}$. 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 подаються у ванну, визначається попередньо.

Інші варіанти передбачають попереднє нанесення на зварювані кромки суміші матеріалу – зміцнювача, порошку матриці і речовини – зв'язки, а також деяких легувальних добавок, які спонукають або стримують змочування волокон. В якості зв'язки 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 подібну йому суміш металу 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, $U_0 = 20-22$ В, $Q_{Ar} = 5$ л/хв. В якості плавкого електрода використовується магнієва трубка із сумішшю матричного порошку з волокнами Al_2O_3 із розрахунку 17% по об'єму в металі шва. Зварювання ведеться з попереднім підігрівом до 400 °С.

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

При електронно-променевому 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.

Для забезпечення жорсткості гомогенного зварного вузла товщина кільцевих перехідників береться рівною трьом товщинам стінки труби (рис. 2).

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

Деталі збираються і закріплюються у цанговому пристрої, що поєднується з приводом обертання ви-

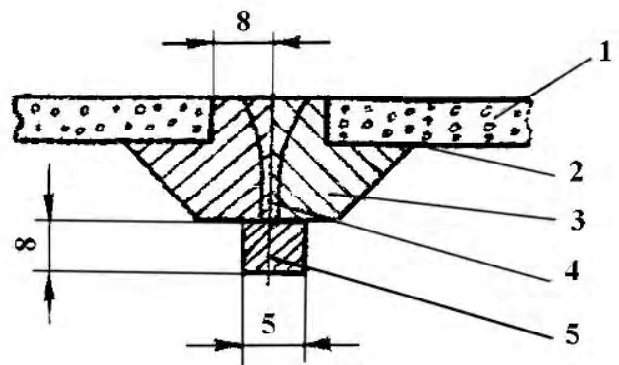


Рис. 2. Схема зварного вузла, який зібрано під електроннопроменеве зварювання бороволокнистих труб:

1 – стінка труби, 2 – дифузійне з'єднання, 3 – перехідник, 4 – зварний шов, 5 – підкладка

робу установки ЕЛУ-5. Величина зазору не більше 0,1 мм, поперечне биття стика відносно пучка складає $\pm 0,15$ мм. Зварювання ведеться на параметрах режиму: $I_n = 45-46$ мА, $U_{приск} = 52$ кВ, $V_{зв} = 20$ 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.

Спосіб зварювання диспергованим металом здійснюється за рахунок електронно-променевого розплавлення присадного металу з бокової поверхні у вакуумі зі швидкістю 1800–3100 об/хв диска, що обертається – циліндричної заготовки із сплаву АЛ 25 діаметром 160 мм необхідного складу. Роздрібнені краплі розплавленого металу переносяться на попередньо нагріті формоутворювальні поверхні, до 0,5–0,65 $T_{пл}$ підложки, де і здійснюється їх кристалізація на відповідно підготовлених зварюваних кромках.

При цьому способі зварювання ведеться без оплавлення основного металу.

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 до виробу центробіжною силою. На відміну від зварювання з оплавленням кромки у матричному матеріалі частинки зміцнителя SiC не розпадаються і не порушуються їх зв'язок з матричним матеріалом.

Одним з можливих способів поєднання КМ алюмінієвий сплав + 10–20 % SiC є плазмове напилення. Напилювані деталі збираються встик без зазору, як показано на рис. 3.

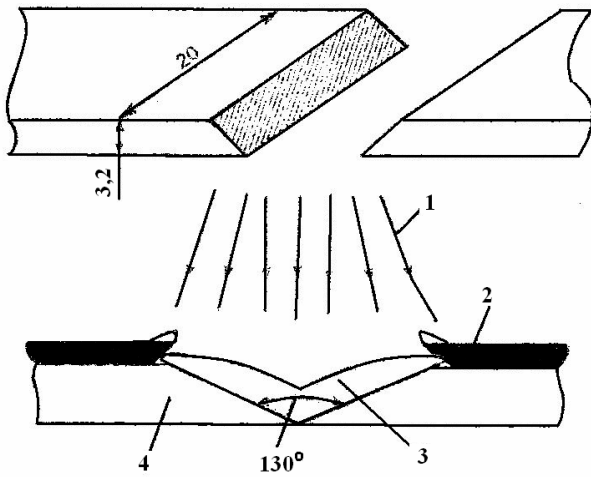


Рис. 3. Схема процесу зварювання КМ напиленням:

1 – напилювані частки, 2 – захисні пластини, 3 – напилений матеріал, 4 – основний матеріал

На лицьовій поверхні наждаком створюється необхідна 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 зворотнопоступальні 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 зі 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, яку підводять, тому режими зварювання вибираються такими, щоб зменшити зміщення або подріблення армуючих компонентів, що армують. Для усунення деформації виробів використовуються спеціальні термофіксуючі пристрої, у яких і проводиться часто термічне оброблення – вакуумний відпал.

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 у структурі матеріалу складових з різними властивостями вносить деякі особливості у формування зварної точки. Так, при зварюванні однонаправленого КМ ВКА-1, який має анізотропію по механічних властивостях 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 бору в матеріалі деформаційна спроможність матеріалу ВКА знижується. Це утруднює процес вигину деталей і призводить до того, що контактна площадка деталь-деталь має нечітко обкреслені форми. Її діаметр на 10–40 %, а площа в 1,3–2,0 рази більша, ніж у алюмінієвих сплавів типу 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 бору і малою товщиною плакуючого шару. Для матеріалу з вмістом бору 55 % товщина плакуючого шару повинна бути не менше 100–150 мкм. При меншій товщині рекомендується застосовувати проміжкові прокладки з алюмінієвої фольги, додаткова теплота з якої передається ниткам бору. Завдяки високому електричному опору і низькій теплопровідності нитки бору нагріваються більше алюмінієвої матриці і слугують додатковим нагрівачем для плакуючого шару в зонах контакту електрод-деталь. При нагріванні механічні властивості плакуючого шару різко спадають, в той час як нитки бору зберігають свою головну властивість – високу жорсткість.

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 типу Д16Т: їх зварювання можна вести на жорстких режимах без загрози утворення виплесків. КМ системи алюміній-бор не схильні до ут-

ворення 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, що знаходить підтвердження в табл. 1.

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.

При зварювання 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 (табл. 2).

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 металу плакуючого шару можна забезпечити його інтенсивне вдавлювання в зазор з'єднання практично без утворення зони розплавлення.

При цьому відстань між волокнами бору в деталях, які з'єднуються, складає 20–80 мкм, з'єднання набуває композиційних властивостей і спроможне передавати значну частину навантаження на розташовані поруч волокна бору. Ці властивості у найбільш повній мірі проявляються тільки у багаточкових з'єднаннях або однокчових, одержаних у спеціальних пристроях, які включають 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 із 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 необхідне 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, який нагадує дифузійне паяння, передбачає зварювання через прокладку – фольгу певного складу. ДЗКМ систем алюмінієві сплави + частинки SiC, Al₂O₃, TiC зварюються з використанням проміжкових прокладок з міді, срібла; сплавів Al-Li при застосуванні фольги з міді, цинку, срібла.

Таблиця 1 – Орієнтовні параметри режиму контактного точкового зварювання матеріалу ВКА-1 на машині МТК 8004

| Товщина деталі, мм | Об'ємна частка ниток бору, % | Радіус сфери електроду, мм | $I_{зв},$ кА | $t_{зв},$ с | $P_{стискання}$ електроду, кН | | Час включення кування, с | Характеристики машини | |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|--------------|-------------|-------------------------------|----------|--------------------------|--------------------------------------|------------|
| | | | | | зварювальне | кувальне | | Ємність батареї, мкФ·10 ³ | Напруга, В |
| 0,8+0,8 | 20 | 50 | 22 | 0,06 | 2,0 | – | – | 157,5 | 235 |
| | 33 | 50 | 23 | 0,06 | 2,5 | – | – | 157,5 | 240 |
| | 55 | 150 | 24 | 0,07 | 3,5 | – | – | 245,0 | 210 |
| 1,0+1,0 | 20 | 75 | 24 | 0,06 | 2,5 | – | – | 157,5 | 250 |
| | 33 | 75 | 25 | 0,06 | 3,0 | – | – | 157,5 | 260 |
| | 55 | 150 | 26 | 0,07 | 4,5 | – | – | 245,0 | 220 |
| 1,5+1,5 | 20 | 100 | 27 | 0,06 | 4,0 | 0,7 | 0,08 | 157,5 | 280 |
| | 33 | 100 | 29 | 0,07 | 5,0 | 0,8 | 0,08 | 245,0 | 250 |
| | 55 | 200 | 31 | 0,08 | 7,0 | 1,0 | 0,09 | 315,0 | 250 |
| 2,0+2,0 | 20 | 100 | 29 | 0,07 | 5,0 | 0,8 | 0,08 | 245,0 | 250 |
| | 33 | 100 | 34 | 0,07 | 6,0 | 0,9 | 0,08 | 245,0 | 280 |
| | 55 | 250 | 40 | 0,08 | 9,0 | 1,2 | 0,09 | 315,0 | 300 |

Таблиця 2 – Орієнтовні параметри режиму контактного точкового зварювання матеріалу ВКА-1 з алюмінієвими сплавами на машині МТК-75

| Зварювані матеріали | Товщина деталі, мм | Радіус сфери електрода, мм | $I_{зв}$, кА | $t_{зв}$, с | P , кН | | Час включення кування, с | Характеристики машини | |
|---------------------|--------------------|----------------------------|---------------|--------------|--------------|-----------|--------------------------|--------------------------------------|------------|
| | | | | | зварювальний | кувальний | | Ємність батареї, мкФ·10 ³ | Напруга, В |
| ВКА-1 + ВКА-1 | 0,08+0,8 | 150 | 25 | 0,07 | 2,5 | – | – | 269 | 240 |
| | 1,0+1,0 | 150 | 30 | 0,07 | 3,5 | – | – | 269 | 250 |
| | 1,2+1,2 | 150 | 35 | 0,07 | 4,0 | – | – | 269 | 260 |
| | 1,5+1,5 | 200 | 45 | 0,07 | 5,5 | – | – | 269 | 290 |
| | 2,0+2,0 | 200 | 50 | 0,08 | 6,0 | – | – | 269 | 310 |
| ВКА-1 + Д16Т | 1,0+1,2 | 150 (100) | 30 | 0,07 | 3,5 | 7,0 | 0,05 | 269 | 250 |
| | 1,0+1,5 | 150 (100) | 32 | 0,07 | 4,0 | 8,0 | 0,05 | 269 | 255 |
| | 1,2+1,2 | 150 (100) | 32 | 0,08 | 4,0 | 8,0 | 0,05 | 269 | 255 |
| | 1,2+1,5 | 150 (100) | 35 | 0,08 | 4,5 | 8,0 | 0,05 | 269 | 260 |
| ВКА-1 + 01420 | 1,0+1,2 | 150 (100) | 25 | 0,06 | 3,5 | 7,0 | 0,05 | 269 | 180 |

Примітки: 1. Коефіцієнт трансформації $K = 40$.

2. Тривалість зростання струму до максимальної величини становить 0,04 с.

3. Дані у дужках наведені для електрода з боку алюмінієвих сплавів.

4. Товщина плакуючого шару становить 200 мкм.

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

При застосуванні будь-якої прокладки міцність з'єднання завжди забезпечується більшою, ніж без прокладки. При використанні прокладки зі сплаву Д1 товщиною 75 мкм і міді руйнування йде 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 % Al_2O_3 можна здійснювати через наночарову фольгу на основі системи Ni/Al, яка отримується методом пошарового електроннопроменевого осадження елементів на підложку, що обертається.

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

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

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

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

При зварюванні ДЗ КМ Al – 30 % SiC, який виготовляється як порошковим способом, так і литвом,

застосовується напилене проміжкове покриття з нікелю. Воно напилюється у вакуумі шаром товщиною 2–5 мкм; завдяки цьому інтенсифікуються процеси зварювання, яке виконується на параметрах режиму: $T = 560$ – 570 °С, $P = 0,6$ – $0,7$ МПа, $t = 15$ хв; а руйнування з'єднання здійснюється по шару з вирином основного матеріалу.

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

У волокнистих ДЗКМ на нікелевій основі, як зміцнителі вживаються ниткоподібні кристали, дроти тугоплавких металів, керамічні та вуглецеві волокна. Вони зварюються з проміжковою 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 $T = 1090$ °С має не більш 15 % від міцності основного матеріалу.

Цей спосіб зварювання є придатним і для поєднання різномірних матеріалів, таких, наприклад, як титановий сплав і КМ КАС – 1А на параметрах режиму $T = 500$ °С, $P = 100$ МПа, $t = 10$ хв 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 боралюмінію.

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 $T = 680$ °С

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 боралюмінію.

Найбільш ефективним типом з'єднання КМ з титаном є замок типу «ластівкин хвіст», який забезпечує передачу навантаження на боралюміній за рахунок зсуву в умовах стиску (рис. 4).

З'єднання внапустку не забезпечує повноцінну передачу навантаження на шари КМ, з'єднання вскіє ускладнює для шароватих КМ забезпечення рівномірності розподілу тиску в процесі дифузійного зварювання, а висока жорсткість і крихкість борних воло-

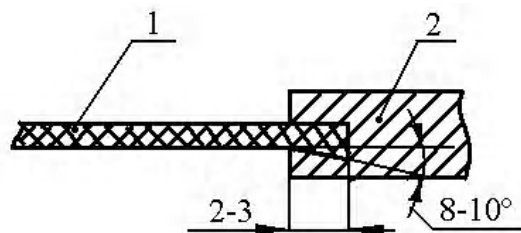


Рис. 4. Схема поєднання КМ (1) з монометалом (2) типу «ластівкин хвіст»

кон призводить до утворення дефектів на границі розподілу титан-алюміній.

Клинопресове зварювання виробів з КМ боралюмінію із закінцівками, виготовленими із звичайних конструкційних сплавів, виконується у спеціальному пристрої (рис. 5).

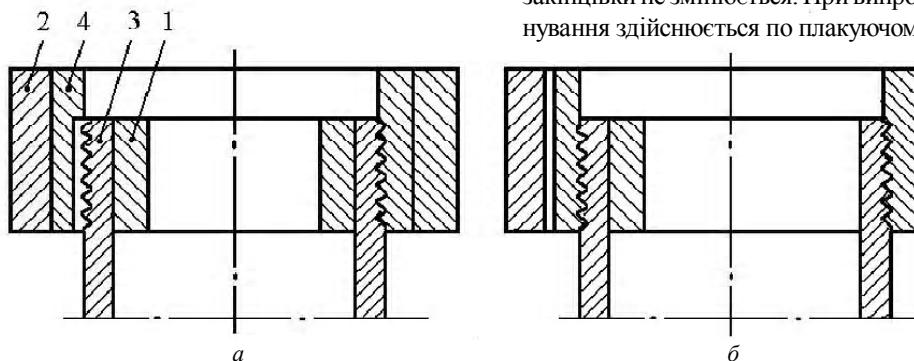


Рис. 5. Схема отримання клинопресовим зварюванням з'єднання закінцівки з алюмінієвого сплаву Д20 з циліндричним конусом з КМ боралюміній з поздовжнім і окружним армуванням: а – до зварювання, б – після зварювання

О. Г. Bykovsky, М. М. Brykov

MODERN STATE AND TRENDS IN NON-FERROUS METAL MATRIX COMPOSITES WELDING DEVELOPMENT (OVERVIEW)

Рассмотрены существующие способы сварки композитных материалов с матрицей из цветных сплавов. Показаны технологические приемы и параметры режимов сварки, позволяющие получать сварные соединения приемлемого качества.

Ключевые слова: композитные материалы, цветные металлы, сварка, обзор.

Modern techniques of non-ferrous metal matrix composites welding are considered. Some techniques and regimes are shown to produce welded joints of acceptable quality.

Key words: composites, non-ferrous metals, welding, overview.