

Лаптева Ганна Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0003-4475-2354

Биковський Олег Григорович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, Scopus ID: 6506391379

Єфанов Володимир Сергійович, PhD, докторант, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-6363-4081

МЕТАЛУРГІЙНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗВАРЮВАННЯ КОМПОЗИТНИХ І РІЗНОРІДНИХ МЕТАЛІВ

При створенні сучасних об'єктів в авіамашинобудуванні, ракетній та космічній техніці виникає необхідність використання не тільки окремих вузлів, виготовлених із композитів, які часто самі одержують методами зварювання, а й з'єднання їх між собою, а також з однорідними і різнорідними матеріалами, що пов'язано з певними труднощами.

Висвітлено основні типи композитних матеріалів, їх будову, властивості та призначення.

Розглянуто можливість фізичної зварюваності матеріалів: розчинність в рідкому стані, здатність до металургійної обробки металу зварювальної ванни.

Проаналізовано основні труднощі, пов'язані зі зварюваністю композитних матеріалів, матрицею яких є кольорові метали, а також різнорідних кольорових металів алюміній + мідь, алюміній + титан, титан + мідь (наявність оксидної плівки, пористість, схильність до втрат з'єднань, забезпечення рівномірності) та шляхи їх подолання як на стадії попередньої підготовки виробів під зварювання, так і під час зварювального процесу.

Показано, що зварювання плавленням є найбільш технологічним з'єднанням КМ, але в той же час дуже складним у зв'язку з розшаруванням в навколошовній зоні і пористістю. Наведено технологічні заходи, при яких зварювання плавленням композитних матеріалів буде давати задовільні результати. Вказано допустиму товщину інтерметалідного прошарку, при якій міцність зварного шва буде на задовільному рівні.

Розглянуто можливості зварювання тиском різнорідних матеріалів.

Для всіх випадків наведено орієнтовну міцність отриманих зварних з'єднань.

Наведено технічні прийоми та технологічні рекомендації щодо зварювання цих матеріалів, розглянуто сучасні тенденції вдосконалення зварюваності, технології та техніки виготовлення зварних металоконструкцій із композитних та різнорідних кольорових металів.

Ключові слова: зварювання, композитні матеріали, матриця, кольорові метали, різнорідні сполуки, оксидна плівка, зварюваність, рівномірність.

Вступ. При створенні сучасних об'єктів в авіамашинобудуванні, ракетній та космічній техніці виникає необхідність використання не тільки окремих вузлів, виготовлених із композитів (композитних матеріалів, далі – КМ), які часто самі одержують методами зварювання, а й з'єднання їх між собою, а також з однорідними і різнорідними матеріалами, що пов'язано з певними труднощами.

Композитні матеріали дозволяють реалізувати комплекс протилежних властивостей – високу міцність та жорсткість при розтягуванні та стисканні з високими показниками витривалості та роботи руйнування у поєднанні з низькою вагою. Металева матриця передає навантаження на несучі волокна, ниткоподібні кристали, частинки тощо, перешкоджає поширенню тріщин, формує волокна та захищає їх від зовнішнього впливу.

Постановка проблеми. Як матриці для металевих КМ найчастіше використовується алюміній, магнієві сплави, титан, нікель та кобальт. Як наповнювачі застосовуються

високоміцні високомодульні волокна, ниткоподібні вуса, частинки карбідів і оксидів металів, дисперсійно-зміцнюючі компоненти, псевдосплави і т.д. Вони відрізняються високою температурою плавлення, мінімальною розчинністю в матриці та надають КМ спеціальних властивостей. Дисперсійно-зміцнювані КМ (ДУКМ) мають у матриці рівномірно розподілені дрібнодисперсні частинки іншої речовини. При навантаженні всі зусилля сприймає матриця, в якій безліч практично нерозчинних частинок фази, що зміцнює, створює структуру, ефективно протистоїть пластичній деформації. Серед металевих КМ найбільшого поширення набули: алюмінієві та магнієві сплави, армовані борними волокнами марок ВКА-1, ВКА-2, ВКМ-1, вуглецевими волокнами ВКУ-1, сталевими дротами марок КАС-1, КАС-1А; КМ на мідній основі з волокнами ніобію, арматури з вольфраму або молібдену; КМ з матрицею з титану та його сплавів, армованої волокнами карбіду кремнію, бору, вуглецю, сталевими дротиками і т.д. [1].

Температура плавлення матриці лежить в межах 600...1700°C, а зміцнювача – 1500...2500°C, що при зварюванні плавленням призводить до порушення цілісності зміцнювача, перебігу реакції між ним і матричним сплавом, наслідком чого можливо утворення інтерметалідних фаз.

Армування матричного сплаву змінює характер поширення у ньому тепла; останнє залежить від розташування волокон та їх об'ємної частки. Це вимагає суворого контролю за введенням тепла при зварюванні, що досягається присадкою електродного металу, який, розплавляючись, захищає верхні шари зміцнювача від дії високотемпературного джерела нагріву, проникає і змочує лежачі нижче волокна. Деякі волокнисті матеріали – бор, графіт, Al_2O_3 – не змочуються присадковими металами, сумісними з матричним сплавом. Зварювання таких КМ ведеться із зазором та відповідними присадками. Проблема поганої змочуваності вуглецевих волокон вирішується шляхом додаткового введення в зварювальну ванну цинку або хрому, що взаємодіють з вуглецевими волокнами з утворенням карбідів, що мають кращу змочуваність.

Значна відмінність у коефіцієнтах теплоємності, теплопровідності та лінійного розширення матриці та зміцнювача призводить до утворення температурних напруг. Останні виникають навіть при зварюванні тиском без підігріву внаслідок різних значень модулів пружності складових компонентів.

На відміну від традиційних матеріалів міцність КМ залежить від безперервності волокон по всій площі в напрямку, поперечному осі основної напруги. При порушенні цієї умови в процесі зварювання майже повністю втрачаються механічні властивості КМ.

При зварюванні деталей з накладками або внапустку внаслідок концентрації напруг знижуються механічні властивості та збільшується маса виробу.

Тому спосіб, технологія та техніка зварювання повинні забезпечити отримання безпористого зварного з'єднання без втрати міцності та розплавлення зміцнювача, без взаємодії компонентів КМ між собою.[1]

Результати та їх обговорення. Зварювання плавленням є найбільш технологічним з'єднанням КМ, але дуже складним у зв'язку з розшаруванням в навколошовній зоні і пористістю. Тому умови зварювання мають передбачати такі заходи:

- способи та параметри режиму зварювання повинні забезпечувати мінімальне тепловкладання;
- зварювання плавленням може застосовуватися тільки для КМ, які складені із сумісних компонентів (легкі сплави, армовані керамічними наповнювачами або мають бар'єрні покриття);
- присадкові матеріали або проміжні прокладки застосовуються з легуючими добавками, що обмежують розчинення армуючого компонента та створення крихких продуктів міжфазної взаємодії в процесі зварювання та подальшої експлуатації зварних вузлів. Так, при зварюванні композитних вузлів системи Al-SiC, Al-C доцільним є використання присадок з великим вмістом кремнію, цирконію, титану або інших карбідоутворюючих елементів, що усувають утворення карбіду Al_2C_3 , а при зварюванні КМ Al- Al_2O_3 – присадок з магнієм;
- для отримання рівномірності при зварюванні ДУКМ доцільно використовувати присадки з відповідними керамічними компонентами з об'ємною часткою 15...25 %;

• волокнисті та шаруваті КМ доцільно зварювати внапустку при співвідношенні величини покриття до товщини матеріалу більше 20, такі шви можна додатково посилити болтовими або заклепочними з'єднаннями.

Композитні матеріали, армовані частинками, короткими волокнами, ниткоподібними кристалами, можна зварювати встик за умови, що вони виготовлені методами рідкофазної технології. Якщо вони виготовлені методами порошкової металургії, то в зоні зварювання утворюються ділянки підвищеної пористості, і міцність таких сполук знижується. Тому перед зварюванням необхідно проводити вакуумну дегазацію для видалення водню. Залежно від особливостей міжфазної взаємодії компонентів можна встановити критерії зварюваності КМ.

Так, якщо компоненти КМ при плавленні створюють однорідну рідину, а в твердому стані взаємно практично нерозчинні (системи Al-Be, Ti-Mg), то після кристалізації в цьому КМ утворюється однорідна гетерогенна структура з частинками матриці та зміцнювача, що чергуються. При зварюванні плавленням таких матеріалів утворюється зварний шов з властивостями, що практично не відрізняються від основного металу.

Якщо компоненти при розплавленні та кристалізації мають обмежену розчинність (системи Ni-W, Al-Si), то в таких КМ утворюються тверді розчини з евтектикою, перитектикою або з концентрацією, що плавно змінюється. Як і попередньому випадку, властивості зварного шва близькі до властивостей основного металу.

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, і необхідно використовувати спеціальні прийоми для усунення випаровування більш легкоплавкого компонента.

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

Дугове зварювання вольфрамовим електродом серед захисних газів – найчастіше використовуваний спосіб. При зварюванні стикових з'єднань КМ типу ВКА ефективно використання спеціальних проміжних розплавлених проставок з алюмінієвих сплавів типу АМг6, 1420, 1201, які часто мають □-подібну форму. Зварювання ведеться вздовж волокон у середовищі гелію на формуючій мідній підкладці з канавкою спеціальної форми, при цьому забезпечується необхідне проплавлення вставки на всю висоту шва, зменшується зона термічного впливу, забезпечується висока швидкість нагрівання та охолодження металу, покращується структура шва, а міцність становить 80...95 % від міцності матричного матеріалу.[1]

Зварювання КМ ВКА-2, КАС-1А можна вести імпульсно-дуговим способом з присадним матеріалом СВАК5, який розміщується в обробці з кутом розкриття 90°. Це дозволяє збільшити рідину зварювальної ванни при одночасному збільшенні зміцнюючих частинок і отримати надійний провар кореня шва.

Зварювання електродом, що плавиться, в середовищі захисних газів дозволяє краще регулювати склад зварного шва. Деталі, що зварюються, з КМ Al + 18 % SiC (карбід кремнію) за обсягом збираються встик із зазором для забезпечення повного провару. Зварювання ведеться на постійному струмі зворотної полярності в аргоні, але внаслідок дії зварювальної дуги деяка кількість волокон викидається зі зварювальної ванни. Тому для компенсації втрат армуючий матеріал слід додатково подавати до низькотемпературної хвостової частини ванни за допомогою спеціального пристрою. Інші варіанти передбачають попереднє нанесення на кромки, що зварюються суміші армуючого матеріалу, порошку матриці, сполучної речовини і легуючих добавок, які сприяють або навпаки стримують змочування волокон. Як сполучна речовина використовуються клеї, пасти, етиловий спирт у кількості 50...80 % за обсягом щодо волокон. Можна також використовувати спеціальний плавкий електрод, що містить метал матриці або подібний до нього, суміш металу матриці і волокна, що по своїй конструкції нагадує порошковий дріт.

Електронно-променево зварювання передбачає використання проміжних прошарків, наприклад, у стиковому з'єднанні з КМ магнієвий сплав + 20 % Al_2O_3 застосовується прошарок товщиною 0,5 мм з матричного сплаву. При зварюванні КМ алюміній + 22 % SiC використовуються проміжні проставки таврового або двотаврового профілю

з 5...10 % додаткових елементів кремнію, нікелю, хрому та ін. Часто застосовуються комбіновані способи зварювання. Так, при стиковому з'єднанні борволокнистих труб використовуються гомогенні перехідники зі сплаву марки 01980, які спочатку дифузійним зварюванням приварюються до труб, після чого виконується зварювання електронним променем гомогенної вставки з формуванням кореня шва на підкладці, що запобігає витіканню розплавленого металу із зварювальної ванни.

Спосіб зварювання диспергованим металом передбачає розплавлення електронним променем присадкового металу у вигляді диска зі сплаву необхідного складу, що обертається з частотою 1800 ... 3100 хв-1. Дрібні краплі розплавленого металу переносяться на попередньо підігріті до температури 0,5...0,6 Тпл підкладки, що формують поверхні, де відбувається їх кристалізація на відповідно підготовлених кромках. Управління пучком променя здійснюється приладом дискретної розгортки з набором траєкторій сканування, що створює різні умови розподілу щільності енергії пучка в зоні нагріву та отримання необхідного об'єму розплавленого металу та розмірів рідких крапель, що переносяться відцентровою силою до виробу. На відміну від зварювання з оплавленням кромки у матричному матеріалі частки зміцнювача не розпадаються, як і зв'язок з матричним матеріалом не порушується.

Плазмове напilenня може бути використане при зварюванні КМ алюмінієвий сплав + 10...20 % SiC.

Попередньо V-подібно оброблені та підготовлені під напilenня кромки збираються без зазору. Напilenня ведеться порошкоподібним матеріалом на основі алюмінієвого сплаву з об'ємною часткою 15 % SiC у вигляді гранул до заповнення всієї обробки, після чого з'єднання піддається ізостатичному пресуванню і термічній обробці – загартовування та старіння.

Способи зварювання тиском дозволяють досягти хороших результатів внаслідок меншої енергії, що підводиться, завдяки чому можна зменшити зміщення або дроблення армуючих компонентів [1].

Для усунення деформації виробів застосовуються спеціальні термофіксуючі пристрої, де часто виробляється і термічна обробка. При електричному контактному зварюванні КМ має місце зниження тепло- та електропровідності порівняно з матеріалом матриці, що перешкоджає формуванню литого ядра. Ця обставина долається вибором електродів з різною провідністю, обтисканням периферійної зони, зміною діаметра та радіусу закруглення електродів, використанням проміжних прокладок. На відміну від однорідних металів при проходженні зварювального струму через КМ ВКА має місце розтікання силових ліній струму на більшій площі через вплив сітки бору, що призводить до розсіяного тепловиділення. Тому потрібно збільшувати контактну площадку електрод-деталь, використовуючи електроди з радіусом сфери 150 ... 200 мм, що забезпечить більш рівномірний розподіл ліній струму в перерізі контакту і повністю ліквідує зовнішні виплески. Для запобігання внутрішнім виплескуванням зварювання потрібно вести на режимах середньої жорсткості, використовуючи електроди з обтисненням, особливо при товщині плакуючого шару 50...150 мкм.

Композитні матеріали системи Al-B можна зварювати на параметрах режиму, рекомендованих для алюмінієвих сплавів типу Д16Т, при цьому в ядрі зварної точки тріщини не утворюються, додаток куваального зусилля не обов'язково, він необхідний лише для зниження залишкових напружень у металоконструкції. При товщині шару плакуючого більше 200 мкм необхідно використовувати м'які режими зварювання і помірні зусилля стиснення. Міцність зварного з'єднання визначається лише міцністю матеріалу матриці. При відповідному виборі параметрів режиму і геометрії електродів за рахунок нагрівання і нерівномірності зусиль стиснення металу плакуючого шару можна забезпечити його інтенсивне вдавлювання в зазор з'єднання практично без утворення зони розплавлення. При цьому з'єднання набуває композиційних властивостей і здатне передавати значну частину навантаження на розташовані поруч волокна бору. Однак ці властивості найбільш повною мірою проявляються тільки в багатоточкових з'єднаннях або одноточкових, виконаних у спеціальних пристроях, що включають вигин.

У зв'язку з меншою усадкою КМ ВКА-1 порівняно з алюмінієвими сплавами в точкових з'єднаннях відсутні дефекти у вигляді пор та тріщин. Міцність зварних з'єд-

нань з цього КМ на зріз в 1,2-1,5 рази, а на відрив у 2-3 рази менше в порівнянні з тими ж товщинами зі сплаву Д16Т; проте показники міцності втомі у цих матеріалів близькі.

Дифузійне зварювання у вакуумі або інертній атмосфері КМ можливе як встик, так і внапустку з утворенням з'єднання у твердій фазі або нагадує процес зварювання-паяння. У цьому разі передбачається зварювання через прокладку (фольгу).

Дисперсійно-зміцнювані КМ – системи алюмінієві сплави + частинки SiC, Al₂O₃, TiC – зварюються через проміжні прошарки із міді, срібла; сплави системи Al–Li – з тими самими зміцнювачами під час використання фольги з міді, цинку, срібла. 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 сплава у АД1 повинна бути нижчою, ніж у сплава типу АД-31. Зварювання потрібно вести в області температур вище за температуру евтектики і солідуса при утворенні рідкої фази.

Зварювання з прокладкою забезпечує більшу міцність та менший ступінь деформації. Ще краще здійснювати зварювання КМ АМг5 + 27 % Al₂O₃ через наночарову фольгу на основі системи Ni–Al, яка наноситься методом шарового електронно-променевого осадження металу на підкладку, що обертається; товщина шару становить 0,05...0,07 мкм.

У процесі зварювання прошарок фрагментується на окремі дисперсійні частинки внаслідок твердофазної реакції в умовах інтенсивного пластичного деформування матеріалу. Шари з такою структурою не тільки активують дифузійні процеси, але й не знижують суттєві властивості зварного з'єднання.

Волокнисті ДУКМ на нікелевій основі із зміцнювачами з ниткоподібних кристалів, дротів із тугоплавких металів, керамічних або вуглецевих волокон зварюються з проміжною прокладкою товщиною 0,1–0,3 мм складу: Co + 28 % Cr + 25% W + 0,9% Ti + 0,4% Zn + 2% Re + 0,15% C.

Цей спосіб зварювання придатний і для з'єднання різнорідних матеріалів, таких як титановий сплав + КМ КАС-1А без утворення інтерметалідних фаз на межах Ti–Al і сталь–Al і збереження початкового розташування сталевих армуючих дротів.

Найбільш ефективним типом з'єднання КМ з титаном є зварювання в замок типу "ластівчиного хвоста", яке забезпечує передачу навантаження на боралюміній за рахунок зсуву в умовах стиснення.

Сполука внапустку не забезпечує повноцінної передачі навантаження на шари КМ, з'єднання ускладнює для шаруватих КМ забезпечення рівномірності розподілу тиску, а висока жорсткість і крихкість борних волокон сприяє утворенню дефектів на межі розділу Ti–Al.

Клінопресове зварювання виробів з КМ боралюмінію із законцюванням із звичайних конструкційних сталей виконується у спеціальному пристосуванні, де оправлення виготовлено з титанового сплаву ВТ6, а обойма – з молібденового сплаву. На внутрішній поверхні алюмінієвого законцювання попередньо наноситься дрібне різьблення, а сама закінцівка посаджена з обоймою на посадці, що ковзає. Тиск пресування виходить за рахунок термічної напруги, що виникає при нагріванні двох коаксіально зібраних жорстких циліндрів з різними коефіцієнтами термічного розширення. Нагрів здійснюється у середовищі аргону. Виправлення з титанового сплаву збільшується в діаметрі при нагріванні, і, натискаючи на внутрішню поверхню конуса, пружно деформується. Її призначенням є збільшення стійкості стінки конуса при впресуванні плакуючого шару виступів різьблення законцювання в плакуючий шар труби, а молібденова обойма в процесі нагрівання перешкоджає розширенню алюмінієвої закінцівки і фактично тримає в облозі її по зовнішньому діаметру. При випробуванні на зсув руйнування відбувається по шару плакуючого алюмінію [1].

Зварювання тертям ДУКМ супроводжується руйнуванням армуючих частинок, інтенсивною пластичною деформацією матриці та зростанням твердості, а в зоні термічного впливу – навпаки, зниженням твердості через відпал матричного сплаву. Тому доцільно виробляти старіння алюмоматричних ДУКМ, після чого міцність таких сполук досягає 80% міцності основного матеріалу.

Часто оптимальні експлуатаційні властивості виробів можна отримати лише за умови використання окремих зварних вузлів із різнорідних кольорових металів. Так, шляхом

зварювання алюмінію з міддю можна істотно скоротити витрату дефіцитної міді при виготовленні струмопідвідних деталей електромашин і апаратів, шинопроводів: в електрохімічній промисловості – це титаномідні катоди і титаноалюмінієві аноди електролізерів, а також трубчасті перехідники [2].

Використання подібних комбінованих зварних вузлів взагалі дозволяє створювати принципово нові види конструкцій, які раніше були відсутні.

Додатково до раніше розглянутих труднощів зварювання кольорових металів з'являються нові, пов'язані з особливістю взаємодії при зварюванні. Вже на стадії розгляду бінарних діаграм стану металів, що з'єднуються, з'ясовується наявність обмеженого їх взаємного розчинення в рідкому і твердому станах з утворенням інтерметалідів з високою твердістю і крихкістю, що руйнуються мимоволі під дією температурних напруг при охолодженні зварного шва. Ці інтерметаліди виділяються по межах сплавлення у вигляді дифузійних прошарків різної товщини. При невеликій товщині (2...3 мкм) прошарок не впливає істотно на міцність, при більшій різко її зменшує. Тому при зварюванні металургійна дія має бути спрямована не тільки на зменшення товщини прошарку, а й на формування не суцільної, а переривчастої її будови.

Існують і технологічні труднощі, зумовлені значною різницею щільності матеріалів, що з'єднуються, їх температур плавлення, теплоємностей, теплопровідності, коефіцієнтів лінійного розширення. Остання обставина особливо суттєва, оскільки неможливо зняти зварювальні напруги шляхом термічної обробки: нагрівання після зварювання ще більше їх збільшить.[2]

У цьому випадку потрібно використовувати більш високий попередній підігрів металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення або проміжні метали-компенсатори, наплавлені або напилені на кромки, що зварюються, або у вигляді вставок.

Останнє широко практикується при зварюванні у твердій фазі – дифузійному у вакуумі, тертям тощо.

Найкращі результати досягаються за умови ведення процесу при температурі не більше 0,4 $T_{пл}$ легкоплавкого металу при достатній активації поверхні міцнішого металу.

При зварюванні плавленням необхідно використовувати технологію і техніку, при яких теплова потужність джерела нагріву зміщувалася б у бік більш теплопровідного матеріалу, а більш тугоплавкий метал захищався від розплавлення пристроєм, що охолоджує.

Такі прийоми лежать в основі способу з'єднання різнорідних металів – зварювання-паяння, коли один з металів має значно меншу температуру плавлення. і твердим металом. Нанесення на поверхню твердого тіла покриттів з третіх металів, які не створюють хімічних сполук з матеріалами, що зварюються, сприяють гальмування дифузійних процесів на межі їх контакту або підвищують взаємну розчинність елементів, що сприяє поліпшенню якості виробів.

При зварюванні різнорідних металів застосовуються ті типи з'єднань, що і для однорідних – стикові, внапустку і кутові, але для максимального зменшення тепловкладання кут обробки кромки зменшується, а перевага надається стиковим швам.

Зварювані поверхні деталей готуються відповідно до рекомендацій для кожного з металів.

Слід мати на увазі, що як умови експлуатації, так і технологія і техніка зварювання біметалічних різнорідних перехідників передбачають перебування зварного шва при температурі не вище 400°C, інакше внаслідок протікання дифузійних процесів буде виникати проміжний прошарок з інтерметалідів, яка розміцнить металоконструкцію.

Пара металів алюміній + мідь характеризується обмеженою взаємною розчинністю: при кімнатній температурі вміст міді в алюмінії вбирається у 8 %, а алюмінію в міді – 9 %.

Внаслідок перенасичення зайва кількість елементів виділяється у вигляді інтерметалідів типу $AlmCu_n$ та евтектики Al_2Cu , розташованих за межами сплавлення, що мають низьку міцність та крихкість. Крім того, температура плавлення міді в 1,6 рази, щільність в 3,3 рази вище за цей показник для алюмінію, а коефіцієнт лінійного розширення майже в 1,5 рази нижче, ніж у алюмінію.

Зварювання плавленням цих металів ведеться із застосуванням третіх металів, що наносяться на мідь гальванічним методом товщиною 50...60 мкм – срібла, цинку, кремнію, які більш-менш задовільно розчиняються як у міді, так і в алюмінії, покращуючи властивості зварного шва та зони сплаву. Таке покриття є бар'єром, що перешкоджає взаємодії алюмінію з міддю, внаслідок того, що перед зварювальною ванною, що рухається, утворюється рідкий прошарок цинку, що покращує змочування поверхні міді алюмінієм. Процес зварювання треба вести так, щоб в основному розплавлявся алюміній, а мідь майже не плавилася, що досягається зміщенням осі електрода від осі зварного шва на величину 0,5...0,6 товщини металу, що зварюється в бік мідної деталі і може бути виконано тільки при автоматичному зварюванні. Обробці піддаються тільки кромки мідної деталі.[3]

Зварювання виконується або вольфрамовим електродом у середовищу аргону на змінному струмі або під шаром флюсу марки АН-А1 на постійному струмі зворотної полярності. Як присадка використовується спеціальний алюмінієвий дріт, легований кремнієм і цинком. Отримані зварні мідноалюмінієві сполуки мають характеристики міцності на рівні алюмінію.

Зварювання у твердій фазі виконується прокаткою для отримання біметалічних листів, смуг та плит. При холодній прокатці використовуються великі обтискання 60...75 %, що з урахуванням можливостей прокатного обладнання дозволяє отримати біметал сумарною товщиною не більше 4 мм, у якому мідна складова дорівнює 0,1...0,8 мм. При гарячій прокатці у вакуумі, вакуумованих пакетах, в атмосфері аргону можна отримати біметал більшої товщини, де мідь матиме рекристалізовану структуру.

Холодне зварювання міді з алюмінієм має кілька різновидів. При точковому зварюванні ступінь необхідної деформації здійснюється пуансонами з різною площею їх робочих частин, які визначаються із співвідношення різних питомих тисків (для алюмінію 280...590 МН/м², для міді – 1 960 МН/м²) в кінцевий момент зварювання в однорідному співвідношенні. Користуючись тими самими міркуваннями, можна зварювати алюміній з латунями марок ЛС59 ЛС62 при односторонньому вдавлюванні пуансонів з боку міді або латуні, коли поверхня алюмінію залишається гладкою.

Іншим різновидом холодного зварювання алюмінію з міддю є облицювання міддю алюмінію.

Алюмінієві шини завтовшки 3...10 мм облицюються відпаленими мідними штабами завтовшки 0,3...1,2 мм у спеціальному пристрої одночасно декількома точками. Кращі результати досягаються при використанні прямокутних пуансонів із шириною, близькою до товщини міді і навіть трохи більшою. Цим досягаються кращі умови течії металу та рівномірного розподілу питомого тиску в контакті і, як наслідок, більш висока міцність. Рівномірність таких з'єднань завжди забезпечує надійну електропровідність.

При холодному стиковому зварюванні необхідно відпалити мідь хоча б на ділянці вильоту. Припуск на зварювання призначається більше алюмінію, ніж міді. При зварюванні спочатку деформується алюміній, виникає складна деформація з елементами зсуву алюмінію з міддю. При зварюванні встик деталей різних діаметрів і товщин, зазвичай у алюмінієвих більших, ніж у мідних, спочатку треба виконати посадку міді, а потім відпалити припуск на зварювання. Властивості таких зварних з'єднань відрізняються високою статичною, динамічною міцністю та електропровідністю.

Зварювання тертям алюмінію з міддю дозволяє отримати з'єднання без мікродеформування міцнішого металу завдяки різкій різниці опору деформування металів під час нагрівання в стику. Кордон розділу є переривчастою інтерметалідною лінією завтовшки до 1,5 мкм. При додатку кувального зусилля міцність підвищується. За рахунок інтенсифікації деформації та її локалізації на початку зварювання можна обмежити зростання прошарку вздовж поверхні контакту та сформувати дисперсну структуру без шару інтерметаліду. Процес треба вести при мінімальному часі нагріву та максимальному часі гальмування, тиску при нагріванні та проковуванні. За рахунок оптимізації часу гальмування можна значно зменшити зусилля проковування.

Дифузійне зварювання у вакуумі дозволяє отримати як безпосереднє з'єднання міді з алюмінієм на оптимальних режимах, так і із застосуванням проміжних вставок з цинку та срібла, якщо температурні та часові параметри режиму зварювання перевищують

оптимальні. При їх використанні із зони зварювання добре видаляються оксидні плівки Al_2O_3 , проте при перевищенні температури вище евтектичних міцність різко знижується, особливо при використанні цинку. Час зварювання у всіх випадках має бути мінімальним, щоб не допускати зростання інтерметалідного прошарку, товщина якого не повинна перевищувати 10 мкм.

Магнітно-імпульсне зварювання використовується для виготовлення мідно-алюмінієвих трубчастих перехідників. Сутність цього процесу полягає в реалізації зусиль, що виникають при взаємодії магнітних полів струму індуктора і наведеного в трубках, що зварюються. Зварювана мідна трубка діаметром 6 мм збирається внапустку з алюмінієвою діаметром 8 мм, так що мідна знаходиться всередині алюмінієвої розвальцьованої з невеликим зазором.

Для збереження прохідного перерізу всередину мідної трубки вводиться сталевий стрижень, який згодом видаляється. Зібрані трубки вводяться в центральну частину машини-індуктора до зони найбільшої концентрації магнітних силових ліній. Під дією пондермоторних сил розвальцьована частина алюмінієвої трубки співпадає з мідною з утворенням міцного герметичного з'єднання.

Ударне зварювання у вакуумі застосовується при виготовленні біметалічних шайб, зібраних внапустку товщиною 2,4 мм та діаметром 30 мм. Деталі, зібрані із зазором 2...3 мм, попередньо підігріваються кільцевим електронно-променевим джерелом. При імпульсному навантаженні заготовки переміщуються в холодну матрицю, що деформує, де і відбувається зварювання з одночасним формуванням контакту необхідної конфігурації. При цьому деформації мідної та алюмінієвої деталі становлять 10 та 40 % відповідно, а міцне зварне з'єднання утворюється без інтерметалідів.

Алюміній+титан. Згідно з діаграмою стану Al–Ti внаслідок практичної відсутності взаємної розчинності при кімнатній температурі в алюмінії може розчинятися лише 0,07 % Ti, решта – інтерметалідні сполуки $TiAl$, $TiAl_3$ та $\square$ -фаза.

При зварюванні титану з алюмінієвими сплавами АМг і АМц з'являються додаткові труднощі у зв'язку з підвищеною концентрацією на межі розділу фаз типу $AlmMgn$, $AlmCup$ та подібних до них, так що уникнути утворення зварних швів з крихкими фазами неможливо [4].

Зварювання плавленням цих металів передбачає ведення процесу способом зварювання-паяння, де має місце взаємодія рідкого алюмінію з твердим титаном. Така технологія забезпечує короткочасне контактування двох металів, коли концентрація титану недостатня для створення $\square$ -фази, а кількість сполук $TiAl_3$ суттєво зменшена. Необхідною умовою є попереднє нанесення на титанові кромки шару алюмінію, найкраще алітуванням, якщо розміри деталей невеликі. Наплавлення шару алюмінію виконується під шаром флюсу Ф-320, а процес ведеться на змінному струмі вольфрамовим електродом в середовищу аргону; товщина наплавленого шару вибирається в залежності від глибини проплавлення при подальшому зварюванні з алюмінієвою деталлю. Непроплавлена частина шару має бути не менше 2 мм. Основні типи зварних з'єднань – стикове, внапустку та таврове. Техніка зварювання передбачає розміщення центру плями зварювальної дуги лише на рівні краю титанової деталі чи зі зміщенням їх у бік алюмінієвої деталі. При зварюванні внапустку процес ведеться із створенням двох окремих зварювальних ванн. Під дією зайвого тепла рідкої титанової ванни плавиться алюмінієва деталь, створюючи у свою чергу ванну рідкого алюмінію, але завдяки шару твердого непроплавленого титану товщиною 0,3...0,4 мм обидві ванни не контактують між собою. Захист плавильного простору та прилеглих зон металу здійснюється за рахунок піддуву інертного газу в підкладку, спеціальне "плаваюче" сопло та в козирок.

При зварюванні труб аргон подається в їхню внутрішню порожнину. Обов'язковою умовою якісного процесу є щільне прилягання деталей, що зварюються. При зварюванні "на вазі" для зменшення проплавлення алюмінієвої кромки шляхом відведення зайвого тепла застосовують спеціальні холодильники у вигляді сталевих або мідних підкладок або кілець. Їх розміри у кожному випадку визначаються експериментально залежно від теплопровідних властивостей матеріалів та параметрів режиму зварювання. Як присадка використовується алюмінієвий дріт СВАК5. При ретельному дотриманні параметрів режиму та техніки зварювання забезпечуються допустимі темпера-

турні умови взаємодії алюмінію з титаном. Хоча повністю усунути появу інтерметалідів неможливо, їх наявність як окремих розрізнених включень є допустимим з погляду працездатності таких різнорідних конструкцій.

Іншим різновидом зварювання-паяння є ведення процесу в камері з контрольованою інертною атмосферою, коли нагрівання кромки, що з'єднуються (найчастіше деталей з компактною формою поперечного перерізу) здійснюється електричною дугою змінного струму, що горить у зазорі між деталями. Вона рівномірно розігріває торцеві поверхні, здійснює їх катодне очищення та формує шар розплавленого алюмінію. Після цього здійснюється осадка, при якій рідкий метал витісняється зі стику, і зварне з'єднання формується у твердій фазі. При цьому способі зварювання відсутні непровари, а міцність зварного з'єднання становить 95% міцності алюмінію [4].

Електричне контактне точкове зварювання з керованим внутрішнім виплеском дозволяє також отримати з'єднання у твердорідкому стані. Для попередження початкового внутрішнього виплеску передній фронт зварювального імпульсу модулюється, а після реалізації внутрішнього виплеску, під час якого видаляється рідка частина ядра разом з інтерметалідними з'єднаннями, деталі додатково проковуються з підвищеним зусиллям для остаточного витіснення рідкого металу і механічного дроблення. роблячи її дискретною.

Зварювання у твердій фазі титану з алюмінієм виконується кількома способами. Виготовлення біметалу такого складу здійснюється прокаткою у вакуумі з обтисканням 68...70 % за температури 470...500 °C [5].

Отримання складу біметалу VT1-0 + АМг6 високої та стабільної якості забезпечується в тому випадку, якщо на поверхні, що контактують, попередньо нанесені тонкі шари алюмінію; при цьому величина обтиснення може бути знижена до рівня 47...50%.

Холодне зварювання такої ж композиції проводиться при виготовленні трубчастих перехідників шляхом спільного формування заготовок у спеціальній оправці. Алюмінієва заготовка поєднується з титановою, на поверхні якої виконуються циліндричні канавки та виступи трикутної форми з кутом 60° та глибиною 1 мм. Затискне кільце має конічну форму, і з його торця прикладається особливе зусилля, яке стискає алюмінієву заготовку із середньою величиною стиснення 37...43 %. Алюміній при цьому заповнює канавки, створюючи щільний контакт між металами, що з'єднуються, так що міцність різнорідного з'єднання дорівнює міцності алюмінію.

Дифузійне зварювання титану VT1-0 зі сплавом АД1 здійснюється при безпосередньому контактуванні без утворення інтерметалідного прошарку, а при зварюванні пари VT1-0 + АМг3 необхідно алітування титанової деталі або розміщення проміжного прошарку з фольги АД1 товщиною 0,4 мм.

Зварювання ведеться при тиску, більшому межі плинності матеріалів при температурі процесу, а збереження необхідних геометричних розмірів виробу забезпечується спеціальним оснащенням, що забезпечує примусове формування металу в зоні контакту.

Титан + мідь. Титан і мідь також розрізняються за своїми властивостями, утворюючи систему з обмеженою взаємною розчинністю, яка при температурі 400°C становить лише 0,4 % за масою. Тому з'єднання цих металів як при плавленні, так і в твердій фазі з нагріванням здійснюється в основному з використанням проміжних прокладок з третіх металів, що задовільно зварюються як з титаном, так і з міддю.

Зварювання плавленням титану з міддю виконується за схемою зварювання-паяння, наведеною раніше для отримання різнорідної сполуки титан-алюміній. Деталі, що зварюються, збираються внапустку, їх крайки зачищаються і знежирюються. Використовуються спеціальні притискні механічні пристосування для попередження зміщення кромки, особлива увага приділяється точності установки та підтримки постійної відстані осі вольфрамового електрода від торця мідної деталі по всій довжині шва, яке в залежності від товщини становить 1,5...4,5 мм у бік міді. Зварювання ведеться на постійному струмі прямої полярності. Іноді на оброблену кромку під кутом 45°C наноситься методом плазмового напилення шар міді завтовшки 0,15...0,25 мм, а деталі, що зварюються, збираються встик. Зварювання ведеться вольфрамовим електродом, вісь якого зміщується у бік мідної деталі на 2,5...4,5 мм із використанням мідної присадки типу BrX1 або MCp10.

За рахунок максимального обмеження тривалості взаємодії цих металів за високої температури можна значно зменшити товщину інтерметалідного прошарку та забезпечити задовільні властивості зварного з'єднання.

У разі застосування проміжної вставки з тугоплавких металів – ванадію, ніобію, танталу – зварювання ведеться у два прийоми: спочатку зварюється титановий сплав із тугоплавким металом, а потім з ним зварюється мідний сплав аргондуговим або електронно-променевим зварюванням. Міцність такого з'єднання знаходиться на рівні мідного сплаву, а руйнування відбувається по його межі зі швом.

Електричне контактне точкове зварювання титану краще реалізується з мідними сплавами, наприклад, з латунню, якщо процес ведеться з керованим виплеском, коли зварна точка з задовільними характеристиками міцності утворюється в рідко-твердій фазі з інтерметалідним прошарком товщиною 2...3 мкм [5].

Зварювання титану з міддю в твердій фазі найкраще реалізується, якщо процес ведеться за схемою, описаною раніше для пари Ti–Al. На поверхнях міді, що з'єднуються, виконуються виступи і відповідні їм западини на титані. Зварювані поверхні, що знаходяться під кутом до напрямку дії стискаючого зусилля взаємно контактують, і при вдавненні утворюється міцне і щільне зварне з'єднання.

При зварюванні тертям, яке повинно вестися в середовищі аргону, незважаючи на часткове видалення інтерметалідів разом з пластичним металом, зона з'єднання характеризується розрізненим прошарком товщиною близько 7 мкм, але руйнування з'єднання відбувається за мідною складовою на відстані від зварного шва.

Взагалі, безпосереднє з'єднання цих двох металів неможливе без утворення інтерметалідного прошарку. Навіть такий швидкореалізований спосіб, як зварювання вибухом, вимагає використання проміжного металу – ніобію товщиною 0,3...1,0 мм при отриманні заготовки біметалу Ti–Cu для подальшої металообробки прокаткою, де нагрівання ведеться до температури 750...800 °C. Після цього виконується примусове підстуджування пакета, щоб перепад температур між міддю і титаном становив 70...120 °C для наступної прокатки з обтисканням 30...40 % за один прохід.

Безпосереднє дифузійне зварювання титану з міддю може бути здійснено тільки у вузькому температурно-часовому діапазоні, що іноді практично важко, тому використовуються як проміжні матеріали молибден і ніобій як у вигляді фольг, і так і у вигляді напилених шарів [6].

Техніка дифузійного зварювання істотно впливає на поведінку металу в приконтактних зонах під дією термодеомаційного циклу. Якщо зварювання ведеться у щільній оправці з кільцевою проточною у місці стику, відбувається локальна деформація, в приконтактному шарі міді протікає динамічна рекристалізація під навантаженням, метал залишається пластичним, зберігає свої властивості, а руйнування відбувається по поверхні контакту.

Якщо ж зварювання ведеться в щільній жорсткій оправці, яка забезпечує спільну деформацію металів незалежно від їх властивостей, потрібно значно більший час, щоб титан продавив мідь, деформація розосереджується, захоплюючи не лише приконтактний шар, а й подальші ділянки. Динамічна рекристалізація забезпечує повний розвиток фізичного контакту, релаксуючи напруги, заліковує дефекти кристалічних ґрат і усуває пори.

Бібліографічний перелік

1. Сварка композиционных материалов: обзор / В.Р. Рябов. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1990. 60 с.
2. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рябкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижевская. Машиностроение, 1984. 239 с.
3. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами / В.Р. Рябов. Киев: Наукова думка, 1983. 264 с.
4. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блащук и др. 2-е изд., доп. и перераб. Киев: Наукова думка, 1986. 240 с.
5. Технологія та обладнання електричного контактного зварювання: навч. посіб. / О.Г. Біковський, Д.М. Лутов, І.В. Пінковський. Киев: Техніка, 2001. 240 с.
6. Сахацкий Г.П. Технология сварки металлов в холодном состоянии. Киев: Наукова думка, 1979. 296 с.

References

1. Welding of composite materials: a review / V.R. Ryabov. Kyiv: E.O. Paton Electric Welding Institute, 1990. 60 p.
2. Welding of dissimilar metals and alloys / V.R. Ryabov, D.M. Ryabkin, R.S. Kurochko, L.G. Strizhevskaya. Mashinostroenie, 1984. 239 p.
3. Welding of aluminum and its alloys with other metals / V.R. Ryabov. Kyiv: Naukova Dumka, 1983. 264 p.
4. Metallurgy and technology of welding titanium and its alloys / S.M. Gurevich, V.N. Zamkov, V.E. Blashchuk et al. 2nd ed., supplemented and revised. Kyiv: Naukova Dumka, 1986. 240 p.
5. Technology and equipment of electric contact welding: training manual / O.G. Bikovsky, D.M. Lutov, I.V. Pinkovsky. Kyiv: Technika, 2001. 240 p.
6. Sakhatsky G.P. Cold metal welding technology. Kyiv: Naukova Dumka, 1979. 296 p.

Lapteva Anna, candidate technical Sciences, associate professor of the department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0000-0003-4475-2354

Bykovsky Oleg, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia National University, Scopus ID: 6506391379

Yefanov Volodymyr, PhD, doctoral student, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, ORCID: 0000-0002-6363-4081

METALLURGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF WELDING COMPOSITE AND DISSECTIOUS METALS

When creating modern objects in aircraft engineering, rocketry, and space technology, there is a need to use not only individual components made of composites, which are often obtained by welding methods, but also to connect them with each other, as well as with homogeneous and heterogeneous materials, which is associated with certain difficulties.

The main types of composite materials, their structure, properties and purpose are highlighted.

The possibility of physical weldability of materials is considered: solubility in the liquid state, susceptibility to metallurgical processing of the weld pool metal.

In this article the main problems connected with welding capacity of composite materials with matrix from nonferrous metals and heterogeneous nonferrous metal aluminium + copper, aluminium + titanium, titanium + copper (oxide film, weld porosity, losses of strengthen fibres and particles, formation of intermetallic compositions, equivalent solid) and the ways that help to overcome them both on stage to preliminary prepare of wares before welding and during of the welding process are analyzed.

It is shown that melting welding is the most technologically advanced type of composite material joining, but at the same time it is very complex due to delamination in the near-seam zone and porosity. Technological measures are presented, under which melting welding of composite materials will give satisfactory results. The permissible thickness of the intermetallic layer is indicated, at which the strength of the weld will be at a satisfactory level.

The possibilities of pressure welding of dissimilar materials are considered.

For all cases, the approximate strength of the resulting welded joints is given.

The technical methods and technological recommendations by the welding this materials are given too.

Modern tendencies on perfection welding capacity, technology and technique of manufacture from composite and heterogeneous nonferrous metals welded constructions are examined.

Keywords: welding, composite materials, matrix, non-ferrous metals, dissimilar compounds, oxide film, weldability, uniform strength