

РОЗДІЛ III. ЗВАРЮВАННЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.791.763.1:539.378.3

DOI: 10.25140/2411-5363-2018-1(1)-58-67

Геннадій Болотов, Максим Болотов

ПРЕЦИЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА МЕТАЛЕВІЙ ОСНОВІ

Вступ. Нині значне поширення отримали композиційні матеріали із металевою матрицею (МКМ), до яких відносять метали, зміцнені неперервними волокнами. МКМ мають високі експлуатаційні властивості, які залежать від природи матриці, геометрії та розподілу наповнювача. Основним матричним матеріалом є алюміній та його сплави, зміцнюючою фазою – вуглецеві, борні або сталеві волокна.

Постановка проблеми. Однією з проблем застосування волокнистих МКМ є з'єднання їх між собою та з конструкціями, виконаними з традиційних металів і сплавів. Механічне кріплення за допомогою болтів та заклепок послаблює конструкцію, оскільки свердлення отворів пов'язане з руйнуванням волокон. Для забезпечення міцності паяного з'єднання необхідно застосовувати значні перекриття. Зварювання плавленням призводить до значного зниження міцності армуючих волокон унаслідок тривалого перебування їх у зоні високих температур.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз особливостей зварювання волокнистих МКМ тиском, насамперед точковим та дифузійним, і визначення сфери їх застосування.

Виклад основного матеріалу. Важливою особливістю цих процесів є незначний термічний вплив процесу зварювання на волокна МКМ. Ці способи зварювання застосовують як для з'єднання заготовок з МКМ, так і з'єднання їх з гомогенними матеріалами. Водночас конструктивні та металургійні особливості композиційних матеріалів суттєво ускладнюють вибір режимів зварювання і ускладнюють технологію їх з'єднання.

Для композиційного матеріалу з об'ємним вмістом волокон бору 20 та 30 % ускладнень у процесі точкового та шовного зварювання не виникає, режими зварювання практично не відрізняються від відомих для сплавів алюмінію. У міру збільшення вмісту волокон неелектропровідного бора значно утруднюються умови формування литого ядра, що вимагає застосування електродів спеціальної форми та жорстких режимів зварювання.

Висока міцність дифузійних з'єднань МКМ на основі алюмінію між собою та з титановими сплавами може бути досягнута оптимальним вибором конструкції з'єднання та застосуванням проміжних металевих прошарків, у ролі яких можуть бути застосовані мідь, нікель та багато інших пластичних металів.

Висновки. Електроконтактне точкове зварювання МКМ системи алюміній-бор із об'ємним вмістом волокон до 30...35 % може ефективно здійснюватися на режимах для зварювання алюмінію. При збільшенні вмісту волокон для отримання якісних зварних з'єднань необхідно застосовувати електроди спеціальної форми, причому товщина плакучого шару на композиційному матеріалі повинна бути не менше 100...200 мкм. Дифузійне зварювання є ефективним способом з'єднання волокнистих МКМ. Для підвищення механічних характеристик з'єднання доцільно застосовувати проміжні прошарки з пластичних металів.

Ключові слова: металеві композиційні матеріали; точкове та шовне зварювання; дифузійне зварювання.

Рис.: 7. Табл.: 2. Бібл.: 8.

Вступ. Композиційні матеріали складаються, здебільшого, з пластичної основи (матриці), армованої наповнювачем, що володіє високою міцністю, жорсткістю та ін. Сполучення різнорідних речовин призводить до створення нового матеріалу, властивості якого кількісно і якісно відрізняються від властивостей кожного з його складових. Варіюванням складу матриці й наповнювача отримують різноманітні матеріали з необхідним набором властивостей, які перевищують традиційні матеріали та сплави за своїми механічними характеристиками і при цьому є значно легшими. Застосування композитів дозволяє зменшити масу конструкцій при збереженні її основних експлуатаційних показників.

Нині значне поширення отримали композити на основі полімерних матриць, які дозволяють за відносно простою технологією виготовляти великогабаритні деталі й конструкції складної форми [1]. Водночас полімерні композити мають обмежений температурний діапазон експлуатації, низьку електро- і теплопровідність, нестабільність розмірів. Ці та багато інших недоліків усуваються застосуванням композиційних матеріалів із металевою матрицею (МКМ), до яких відносять метали, зміцнені неперервними волокнами. МКМ мають високі експлуатаційні властивості, які залежать від природи матриці, геометрії та розподілу наповнювача. Основним матричним матеріалом є

алюміній та його сплави, зміцнюючою фазою – вуглецеві, борні або сталеві волокна діаметром 100...150 мкм. Об'ємна частка волокон складає від 10 до 60 %.

Постановка проблеми. Однією з проблем застосування волокнистих МКМ, поряд із механічною обробкою і необхідністю забезпечення корозійної стійкості, є з'єднання їх між собою та з конструкціями, виконаними з традиційних металів і сплавів. У цьому випадку задача полягає в забезпеченні рівної міцності з'єднання з основним матеріалом. До металевих композиційних матеріалів застосовують механічні методи з'єднання, з'єднання за допомогою паяння, зварювання тиском та плавленням, тому вибір оптимального способу з'єднання є достатньо складним. Механічне кріплення за допомогою болтів та заклепок послаблює конструкцію, оскільки свердлення отворів пов'язане з руйнуванням волокон. Крім того, отвори для кріпильних деталей є концентраторами напружень і джерелами щільної корозії. Для забезпечення міцності паяного з'єднання необхідно застосовувати значні перекриття. Відношення довжини перекриття до товщини матеріалу звичайно не менше 20. Зварювання плавленням призводить до значного зниження міцності армуючих волокон унаслідок тривалого перебування їх у зоні високих температур. До того ж, як визначено у роботах [2; 3], при аргонодуговому зварюванні як із присадковим матеріалом, так і без нього не вдається сформувати стабільну зварювальну ванну й утворити якісне зварне з'єднання. Це пов'язано з тим, що при зварюванні тонкий плакуючий шар алюмінію (50...200 мкм) швидко розплавляється, а сітка армуючих волокон (бору або вуглецю), що знаходиться під ним, перешкоджає утворенню єдиної зварної ванни й утруднює стабільне горіння зварювальної дуги. Дія концентрованого джерела теплоти може призводити до перерізання волокон при достатньо малій товщині МКМ. Крім того, задовільні результати отримати досить складно внаслідок виникнення в багатьох випадках інтерметалідних прошарків, які сприяють підвищенню крихкості зварного з'єднання (рис. 1).

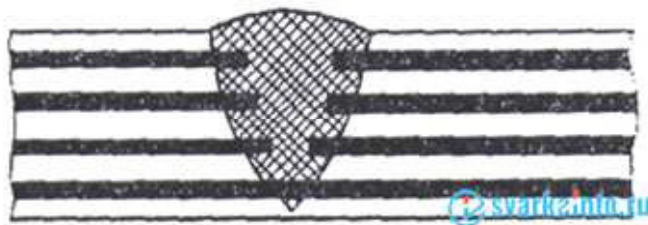


Рис. 1. Руйнування армуючих волокон композиційного матеріалу при зварюванні плавленням

Перелічені вище проблеми привели до більшої уваги фахівців до способів зварювання МКМ тиском – контактного точкового та дифузійного зварювання, які забезпечують значно нижчий тепловий вплив на матеріали.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз особливостей зварювання волокнистих МКМ тиском, передусім точковим та дифузійним, і визначення сфери їх застосування.

Виклад основного матеріалу. У технологічному циклі виробництва вузлів та конструкцій з напівфабрикатів МКМ ключове місце належить способам їх з'єднання, зокрема зварювання. Без цих способів створення нероз'ємних з'єднань сфера застосування МКМ обмежується, в основному, обшивками та найпростішими деталями [4].

Найбільше розповсюдження отримало зварювання тиском, зокрема електроконтактне (точкове і шовне) та дифузійне, які забезпечують високу якість зварних з'єднань. Важливою особливістю цих процесів є незначний термічний вплив процесу зварювання на волокна МКМ. При дифузійному зварюванні температура нагріву не досягає температури плавлення матричного матеріалу МКМ, а при електроконтактному зварюванні

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

хоча сам процес і здійснюється при більш високих температурах, тривалість процесу не перевищує частки секунди. За допомогою точкового електрозварювання з'єднують внапуск елементи жорсткості з обшивками тонкостінних оболонок і панелей. Шовне електрозварювання застосовують при виготовленні силових оболонок і ємностей, де необхідні міцні та герметичні з'єднання. Ці способи зварювання застосовують як для з'єднання заготовок з МКМ, так і з'єднання їх з гомогенними матеріалами. Разом з тим конструктивні та металургійні особливості композиційних матеріалів суттєво ускладнюють вибір режимів зварювання й ускладнюють технологію їх з'єднання.

У роботі [2] досліджені особливості формування з'єднання при контактному точковому зварюванні волокнистого композиційного матеріалу системи алюміній – бор ВКА-1. Товщина матеріалу знаходилась у межах від 0,9 до 2,0 мм, матеріал матриці – сплав АД-1, об'ємний вміст волокон бора становив 20, 30, 45 та 55 %. Визначено, що для композиційного матеріалу із об'ємним вмістом волокон бора 20 та 30 % ускладнень у процесі зварювання не виникає, режими зварювання практично не відрізняються від відомих для сплавів алюмінію.

Для матеріалів із об'ємним вмістом волокон 45 та 55 % визначити однозначно режим зварювання досить складно. Це пов'язано з тим, що у міру збільшення вмісту волокон неелектропровідного бора значно звужуються межі можливої зміни основних параметрів режиму – величини струму і зусилля стискання. Крім того, дуже утруднюються умови формування литого ядра.

При проходженні імпульсу зварювального струму здійснюється розігрівання матеріалу між електродами. При цьому механічні властивості плакуючого шару різко знижуються, а волокна бора зберігають свої властивості, зокрема високу міцність і жорсткість. Плакуючий шар при застосуванні електродів із додатковим обжиманням периферійної зони має можливість вільно текти й утворює при цьому вздуття на поверхні матеріалу. Такий ефект найбільш повно проявляється на МКМ із об'ємним вмістом волокон 45 та 55 %.

Аналіз макроструктури таких матеріалів показує, що прямі шляхи силових ліній струму практично відсутні внаслідок достатньо густої сітки волокон бора, яка перешкоджає проходженню струму по найкоротшому шляху між електродами. Це призводить до розтікання ліній струму по значній площі, концентрація струму втрачається, виділення теплоти в зварюваних матеріалах розсіюється.

Експериментальним шляхом визначено, що при зварюванні матеріалів із 45- та 55%-ним вмістом волокон бору необхідно застосовувати електроди з більшим радіусом сфери, ніж рекомендовано для алюмінієвих сплавів. Електроди з радіусом сфери 200...250 мм (замість 50...100 мм) дозволяють усунути небезпеку руйнування крихких волокон бору, усунути утворення внутрішніх та зовнішніх виплесків матеріалу плакуючих шарів.

Механічні властивості зварних з'єднань наведені в табл. 1. Видно, що міцність при статичному розтягуванні залежить від об'ємного вмісту волокон бору. Причому найбільша міцність спостерігається не у зразків із 45- та 55%-ним вмістом волокон, а у зразків із 30%-ним вмістом. Це може бути пов'язано з тим, що на матеріалах із високим вмістом волокон бору густа сітка зміцнюючих волокон майже повністю перешкоджає механічному перемішуванню розплавленого матричного металу в ядрі точки і гальмує сумісну кристалізацію, що призводить до недостатньо надійного металевого зв'язку.

На матеріалах із 30%-ним вмістом волокон бору розплавлений метал має можливість суттєво перемішуватись у ядрі точки, що забезпечує надійний металевий зв'язок, а у поєднанні ВКА-1 – Д16Т призводить до помітного легування литого ядра елементами, що переходять з більш високоміцного сплаву.

Міцність зварних точкових з'єднань композиційного матеріалу ВКА-1

Зварювані матеріали	Товщина зразків, мм	Напрямок волокон бору відносно прокату	V _{об} , %	Діаметр ядра зварної точки, мм	Зусилля зрізання зварного з'єднання, Н
ВКА-1 + ВКА-1	1+1	вздовж	30	5,1	3350
			55		3050
	1+1	впоперек	30	5,1	2120
			55		1950
	1,5+1,5	вздовж	30	7,2	4600
			55		4070
	1,5+1,5	впоперек	30	7,2	2680
			55		2490
2+2	вздовж	30	8,1	6350	
		55		5930	
ВКА-1+ Д16Т	2+2	вздовж	30	7,9	6150
		впоперек	30		3050

У роботі [5] вивчався вплив товщини плакуючого шару на поверхні МКМ на умови утворення і механічні характеристики зварного точкового з'єднання. Дослідження також проводили на МКМ системи алюміній-бор із товщиною листів 1,3...1,4 мм. Товщина плакуючого шару зі сплаву алюмінію АД1 варіювалась у межах від 50 до 200 мкм.

Результати досліджень свідчать про те, що при точковому зварюванні МКМ із значним об'ємним вмістом волокон з'єднання формується фактично в плакуючому шарі. Для забезпечення якісного і стабільного формування зварної точки товщина плакуючого шару на МКМ повинна бути не менше 100...200 мкм. Тільки в цих умовах утворюється надійний ущільнюючий пояс і зварювання здійснюється без виплесків металу. При товщині плакуючого шару менше 100 мкм відсутнє стабільне формування зварної точки, а процес зварювання супроводжується значними виплесками металу з-під електродів. Дослідження також показали, що при зварюванні МКМ товщиною 1,2...2,0 мм об'єм розплавленого металу є незначним, завдяки чому відсутні умови утворення несучільностей усадкового характеру, а тому нема необхідності застосування циклів стискання електродів із додатковим кувальним зусиллям. Руйнування зразків при випробуваннях на зрізання має характер переважно чистого зрізання, а на відрив – відрив зварної точки в межах плакуючого шару або із захопленням найближчих шарів волокон.

Зварювання із застосуванням електродів, що забезпечують підвищену густину зварювального струму (електроди із кільцем із менш електропровідного матеріалу на робочій частині), підвищує стабільність якісних показників з'єднань. Руйнування з'єднання при механічних випробуваннях зразків здійснюється із відривом декількох шарів волокон бору. При цьому руйнування зразків спостерігається при навантаженнях на 25...30 % більших, ніж для зразків, зварених звичайними електродами. Міцність зразків на зрізання і в цих умовах збільшується незначно.

При точковому зварюванні композиційних матеріалів із металами та сплавами слід враховувати, що МКМ являє собою немеханічну суміш матриці та волокон (бору, вуглецю) і ці компоненти суттєво відрізняються електричними та теплофізичними характеристиками, причому волокна в процесі зварювання, як правило, зберігають свої властивості. Це пояснює той факт, що при зварюванні сполучень сплавів типу Д16Т та 1420 із матеріалами МКМ ВКА-1 (ВКА-2) лите ядро формується, в основному, з боку алюмінієвих сплавів. Для забезпечення необхідної величини проплавлення з боку МКМ необхідно застосовувати спеціальні електроди і жорсткі режими зварювання [2; 5].

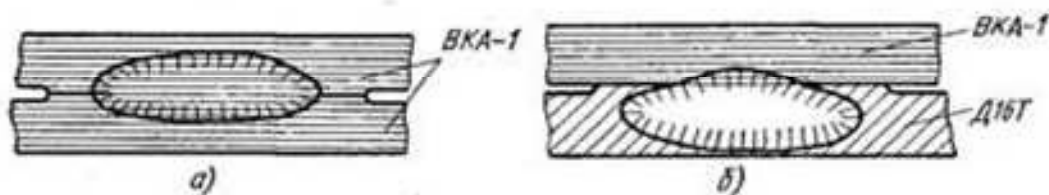


Рис. 2. Утворення литого зварного ядра при однорідному (а) та різномірному (б) з'єднанні композиційного матеріалу

У роботах [1; 4] вказується, що найбільш ефективним і перспективним способом з'єднання металевих композиційних матеріалів є дифузійне зварювання, яке забезпечує найбільш низький тепловий і деформаційний вплив на зварювані деталі. Більшість досліджень також присвячена зварюванню МКМ системи алюміній-бор.

У роботі [6] досліджений вплив характеру навантаження на міцність з'єднань при дифузійному зварюванні МКМ ВКА-2 та КАС-1А (системи алюміній-сталь). Застосовували як статичне, так і динамічне (імпульсне) навантаження. Визначено, що варіюючи рівень і кількість імпульсних стискаючих зусиль можна регулювати швидкість і ступінь деформації зразків в зоні зварювання із поступовим витисканням поверхневих шарів і схоплюванням нових ювенільних поверхонь. Найбільший ефект спостерігається, якщо активація зони зварювання пульсуючим деформуванням буде здійснюватися із частотою пульсації, співрозмірною із часом росту зародків до макроскопічних розмірів. Зокрема, при дифузійному зварюванні зразків з композиційного матеріалу КАС-1А площею 20×20 мм із 5-кратним імпульсним навантаженням у межах від 15 до 35 МПа вдалося досягти міцності зварного з'єднання на розрив вздовж волокон на рівні 80 % від міцності композита.

Перспективним є застосування дифузійного зварювання при виготовленні комбінованих вузлів боралюміній-титан, які широко застосовуються в авіаційній техніці. Процес дифузійного зварювання елементів з титанових сплавів із композитом системи алюміній-бор може проводитись за двома технологічними схемами: одночасно з формованням деталі або після нього із застосуванням проміжних шарів. Більш поширеним і більш універсальним є другий спосіб, який захищає поверхню титанових елементів від контакту з атмосферним повітрям. Для цього на попередньо очищену від оксидів хімічним способом поверхню титану наноситься рідинним способом плакуючий шар алюмінію АЛ2 (АД33). Товщина плакуючого шару становить 0,1...0,3 мкм.

Значну роль у досягненні високої надійності з'єднання титану з боралюмінієм відіграє забезпечення рівномірності розподілу прикладеного тиску в процесі зварювання. Це вимагає раціонального вибору конструкції та геометричних розмірів самого з'єднання. Дифузійне зварювання титану із боралюмінієм можливе із плоскою, клиновою і ступінчастою поверхнею контакту. Найбільш ефективною конструкцією вузла з'єднання композиційного матеріалу із металевим елементом є з'єднання типу «ластівчин хвіст», який забезпечує передачу навантаження на композит за рахунок зсуву в умовах стискання [7] (рис. 3).

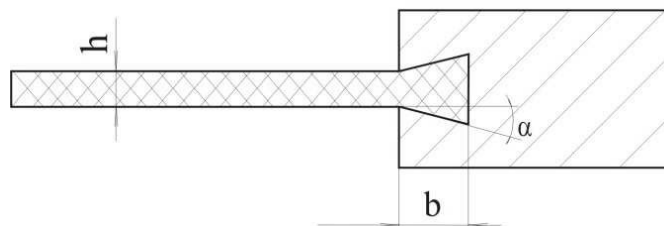


Рис. 3. З'єднання типу «ластівчин хвіст» композиційного матеріалу з металом

Визначені оптимальні конструктивні параметри з'єднання: кут конусності $\alpha = 8 \dots 10^\circ$, довжина $b \geq 2 \dots 3$ мм.

З'єднання внапуск боралюмінію з титановими елементами є недосконалим за конструкцією з погляду механіки передачі навантаження на шари композиційного матеріалу. Рациональна довжина з'єднання при цьому визначається зі співвідношення показників міцності матеріалів вузла, їх товщини, міцності на зсув дифузійного з'єднання і повинна бути не менше десяти товщин. Застосування косоного з'єднання внаслідок ускладнення забезпечення рівномірності розподілу тиску в процесі дифузійного зварювання вимагає збільшення довжини з'єднання до 15...20 товщин конструкції.

У роботі [7] досліджена міцність ступінчастого з'єднання титану з боралюмінієм (рис. 4). На пластинах з титанового сплаву хімічним фрезеруванням отримувалась ступінчаста поверхня із висотою сходинок t , кратній товщині шару боралюмінію. Визначалась міцність з'єднання із симетричним розташуванням сходинок та із зміщенням їх на величину K , з однаковою довжиною сходинок та зміною їх довжини за законом $a_{i+1} = a_i + f$.

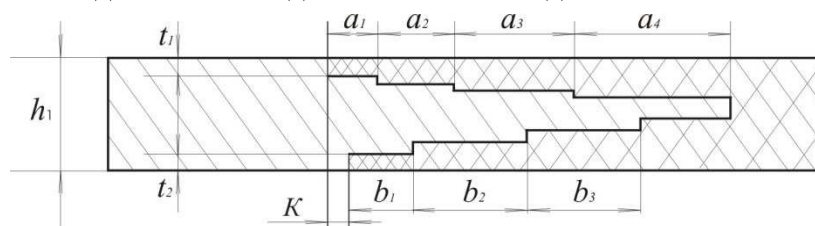


Рис. 4. Ступінчасте з'єднання композиційного матеріалу з металом

Результати випробувань зварних з'єднань боралюмінію з титановим сплавом ОТ-4 на розтягування та згин наведені в табл. 2. Міцність з'єднань на розрив досягає, в основному, 80...90 % міцності титанового сплаву. При випробуваннях на згин руйнування здійснювалось без розшарувань у місцях зміни товщини композитів. Рациональні довжини ступінчастого з'єднання становить 6...8 товщин елементів.

Таблиця 2

Міцність дифузійного з'єднання боралюмінію ВКА-2А з титановим сплавом ОТ4-1

Параметри з'єднання, мм				Товщина зразка h, мм	Міцність на розтягування, МПа	Міцність на згин, МПа
a	b	f	k			
2	2	2	0	2,0	593	1248
3	3	0	0	2,0	630	1025
3	3	0	1,5	2,0	558	1285
5	5	0	0	4,0	498	1132
2	-	2	-	1,5	632	1502

Висока міцність з'єднань МКМ на основі алюмінію між собою та з титановими сплавами може бути досягнена застосуванням проміжних металевих прошарків. У роботі [8] як прошарок при дифузійному зварюванні МКМ КАС-1А та ВКА-2 з титаном застосовані напилені у вакуумі на поверхню композита нікель та мідь товщиною 5 мкм. Для визначення характеру розподілу елементів проводили мікрорентгеноспектральний аналіз різних зон зварного з'єднання. Аналіз показує (рис. 5) рівномірний розподіл нікелю та міді як на межі розділу, так і в матриці МКМ.

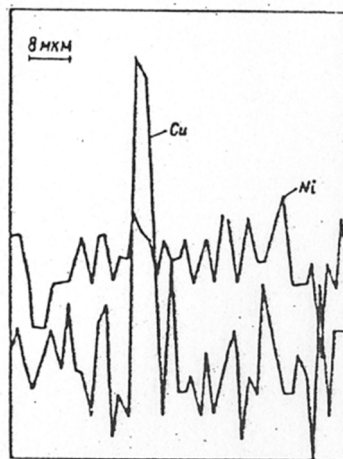
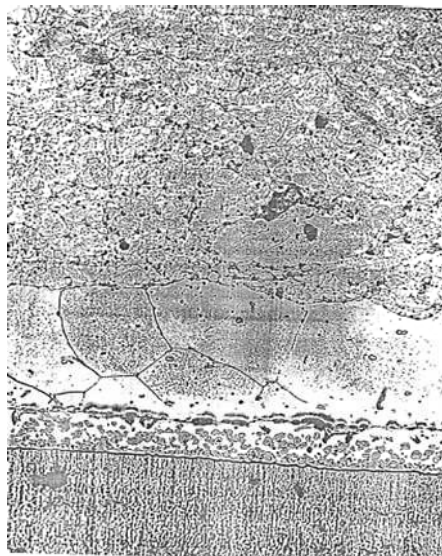


Рис. 5. Розподіл нікелю та міді у зварному з'єднанні КАС-1А – КАС-1А із напиленими проміжними прошарками нікелю та міді

Мікроструктура перехідної зони з'єднання КАС-1А із титаном, виконаного дифузійним зварюванням, наведена на рис. 6. Поверхня титана попередньо плакувалась алюмінієм. Розподіл титану в з'єднанні КАС-1А + титан через інтерметалідний прошарок і плакуючий шар до межі розділу з матрицею композита наведений на рис. 7. З'єднання мають міцність на рівні 70...80 % від міцності композиційного матеріалу.



- Матриця (сплав АВ)
- Плакуючий шар (сплав АД33)
- Шар інтерметаліду титан-алюміній
- Титан ВТ-22

Рис. 6. Мікроструктура перехідної зони з'єднання КАС-1А з титаном (x320)

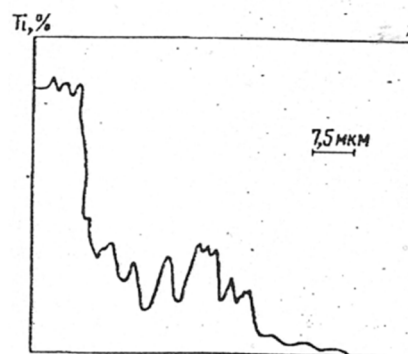


Рис. 7. Розподіл титану впоперек зони з'єднання КАС-1А – титан

Висновки відповідно до статті.

1. Електроконтактне точкове зварювання МКМ системи алюміній-бор з об'ємним вмістом волокон до 30...35 % може ефективно здійснюватися на режимах для зварювання алюмінію. При збільшенні вмісту волокон для отримання якісних зварних з'єднань необхідно застосовувати електроди спеціальної форми, причому товщина плакуючого шару на композиційному матеріалі повинна бути не менше 100...200 мкм.

2. Дифузійне зварювання є ефективним способом з'єднання волокнистих МКМ. Для підвищення механічних характеристик з'єднання доцільно застосовувати проміжні металеві прошарки та імпульсне прикладання зусилля стискання.

Список використаних джерел

1. *Композиционные материалы в машиностроении* / Ю. Л. Пилиповский, Т. В. Грудина, А. Б. Сапожникова и др. – К. : Техника, 1990. – 141 с.

2. *Рязанцев В. И.* Технология контактной и дуговой сварки композиционных материалов типа ВКА-1 / В. И. Рязанцев, В. А. Федосеев // *Материалы VIII Всесоюзного совещания по сварке разнородных, композиционных и многослойных материалов.* – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. – С. 79–83.

3. *Ирвинг Б.* Работы по сварке композитов с металлической матрицей в США / Б. Ирвинг // *Автоматическая сварка.* – 1993. – № 2. – С. 48–51.

4. *Рябов В. Р.* Получение металлических композиционных материалов и методы их неразъемного соединения / В. Р. Рябов // *Автоматическая сварка.* – 1994. – № 4 (493). – С. 49–55.

5. *Точечная* контактная сварка металлокомпозиционного материала системы алюминий-бор / Н. Д. Машков, Г. П. Царьков, Г. Н. Смирнова, О. В. Зуев, А. Н. Машков // *Сварка разнородных, композиционных и многослойных материалов : сборник научных трудов.* – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. – С. 47–51.

6. *Стретович А. Д.* Диффузионная сварка композиционного материала на алюминиевой основе / А. Д. Стретович, Ю. В. Павленко // *Сварка разнородных, композиционных и многослойных материалов : сборник научных трудов.* – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. – С. 40–42.

7. *Преснухин В. А.* Исследование конструкции соединения и технологии диффузионной сварки боралюминия с титановыми сплавами / В. А. Преснухин, А. М. Кшнякин, С. Н. Кушнир // *Сварка разнородных, композиционных и многослойных материалов : сборник научных трудов.* – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. – С. 36–40.

8. *Диффузионная* сварка волокнистого композиционного материала на алюминиевой основе / В. Р. Рябов, Ю. В. Павленко, Т. В. Богданова, И. Я. Дзыкович, Г. П. Болотов // *Автоматическая сварка.* – 1992. – № 9-10. – С. 57–60.

References

1. Pilipovskiy, Yu. L., Grudina, T. V. & Sapozhnikova, A. B. (1990). *Kompozitsionnye materialy v mashinostroenii* [Composite materials in mechanical engineering]. Kyiv: Tekhnika [in Russian].

2. Ryazantsev, V. I. & Fedoseyev, V. A. (1983). Tekhnologiya kontaktnoy i dugovoy svarki kompozitsionnykh materialov tipa VKA-1 [Technology of contact and arc welding of composite materials of type ВКА-1]. *Materialy VIII Vsesoyuznogo soveshchaniya po svarke raznorodnykh, kompozitsionnykh i mnogoslounnykh materialov – Materials of the 8th All-Union Meeting on Welding of Dissimilar, Composite and Multilayer Materials* (pp. 79–83). Kyiv: IES [in Ukrainian].

3. Irving, B. (1993). Raboty po svarke kompozitov s metallicheskoj matritsey v SSHA [Works on welding of composites with a metal matrix in the USA]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2, 48–51 [in Russian].

4. Ryabov, V. R. (1994). Polucheniye metallicheskih kompozitsionnykh materialov i metody ikh nerazyemnogo soyedineniya [Production of metallic composite materials and methods for their permanent connection]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 4 (493), 49–55 [in Russian].

5. Mashkov, N. D., Tsarkov, G. P., Smirnova, G. N., Zuyev, O. V. & Mashkov, A. N. (1990). Tochechnaya kontaktnaya svarka metallokompozitsionnogo materiala sistemy alyuminiy-bor [Spot contact welding of the metal-composite material of the aluminum-boron system]. *Svarka raznorodnykh*,

kompozitsionnykh i mnogoslonykh materialov. Sbornik nauchnykh trudov – Welding of dissimilar, composite and multilayer materials. Collection of scientific papers (pp. 47–51). Kyiv: IES [in Russian].

6. Stretovich, A. D. & Pavlenko, YU. V. (1990). Diffuzionnaya svarka kompozitsionnogo materiala na alyuminiyevoy osnove [Diffusion welding of composite material on an aluminum base]. *Svarka raznorodnykh, kompozitsionnykh i mnogoslonykh materialov. Sbornik nauchnykh trudov – Welding of dissimilar, composite and multilayer materials. Collection of scientific papers* (pp. 40–42). Kyiv: IES [in Russian].

7. Presnukhin, V. A., Kshnyakin, A. M. & Kushnir, S. N. (1990). Issledovaniye konstruksii soyedineniya i tekhnologiiy diffuzionnoy svarki boralyuminiya s titanovymi splavami [Investigation of the design of the compound and the technology of diffusion welding of boron aluminum with titanium alloys]. *Svarka raznorodnykh, kompozitsionnykh i mnogoslonykh materialov. Sbornik nauchnykh trudov – Welding of dissimilar, composite and multilayer materials. Collection of scientific papers* (pp. 36–40). Kyiv: IES [in Russian].

8. Ryabov, V. R., Pavlenko, YU. V., Bogdanova, T. V., Dzykovich, I. YA. & Bolotov, G. P. (1992). Diffuzionnaya svarka voloknistogo kompozitsionnogo materiala na alyuminiyevoy osnove [Diffusion welding of fibrous composite material on an aluminum base]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 9-10, 57–60 [in Russian].

UDC 621.791.763.1:539.378.3

Gennadiy Bolotov, Maksym Bolotov

PRECISION PRESSURE WELDING FIBER COMPOSITE MATERIALS ON METAL BASE

Introduction. Currently, a significant widespread composites with metal matrix (MCM), which include metals, reinforced continuous fibers. MKM have high performance properties, depending on the nature of the matrix, geometry and distribution of the filler. The main-matrix his material is aluminum and its alloys, hardening phase - carbon, boron or steel fibers.

Formulation of the problem. One of the problems is the use of MCM fiber connecting them with each other and with designs made from conventional metals and alloys. Mechanical fastening with bolts and rivets weakens the structure as drilling associated with the destruction of the fibers. For pro-BAKING strength of solder joints must apply considerable overlap. Fusion welding leads to a significant weakening of reinforcing fibers because of their long stay in the area you-high temperatures.

The purpose of the work. The aim is to analyze the characteristics of fiber welding MCM pressure first point and diffusion, and determine its scope. Statement of the material. An important feature of these processes is negligible thermal influence of the welding process into fibers microns. These methods are used for welding pieces of the connection MKM and connecting them with homogeneous materials. At the same time, structural steel and person-composite materials opportunities to impede selection modes welding and techno-logy complicate their connection. For composite material with boron fiber volume content of 20 to 30% of complications during the dot-Volyn NGO and seam welding does not occur, welding is almost indistinguishable from the known to aluminum alloys. As the increase of boron fibers nonconducting significantly hampered conditions of the molten core, which requires the use of special electrodes and forms rigid regimes re-welding. Highly durable diffusion connections MCM from aluminum with each other and with titanium alloys can be achieved optimal design choice connection and use of intermediate metal layers, as that may be used copper, nickel and some other metals plastic.

Conclusions. Electrocontact point welding MKM aluminum-boron system with a bulk fiber content up to 30...35 % can be effectively carried out in modes for welding aluminum. When increasing the fiber content for qualitative welded joints, it is necessary to apply electrodes of a special shape, in which the thickness of the filler layer on the composite material should be at least 100 ... 200 microns. Diffusion welding is an effective way of joining fibrous MKMs. In order to increase the mechanical characteristics of the joining, it is advisable to use intermediate layers of plastic metals.

Keywords: metal composites; spot and seam welding; diffusion welding.

Fig.: 7. Table: 2. References: 8.

УДК 621.791.763.1:539.378.3

Геннадий Болотов, Максим Болотов

ПРЕЦИЗИОННАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

Введение. В настоящее время широкое распространение получили композиционные материалы с металлической матрицей (МКМ), к которым относят металлы, укреплены непрерывными волокнами. МКМ имеют высокие эксплуатационные свойства, которые зависят от природы матрицы, геометрии и распределения наполнителя. Основным матричным материалом является алюминий и его сплавы, укрепляющим фазой – углеродные, борные или стальные волокна.

Постановка проблемы. Одной из проблем применения волокнистых МКМ является соединение их между собой и с конструкциями, выполненными из традиционных металлов и сплавов. Механическое крепление с помощью болтов и закле-

пок ослабляет конструкцию, поскольку сверления отверстий связано с разрушением волокон. Для обеспечения прочности паяного соединения необходимо применять значительные перекрытия. Сварка плавлением приводит к значительному снижению прочности армирующих волокон в результате длительного пребывания в зоне высоких температур.

Цель работы. Целью работы является анализ особенностей сварки волокнистых МКМ давлением, в первую очередь точечным и диффузным, и определение области их применения.

Изложение основного материала. Важной особенностью этих процессов является незначительное термическое воздействие процесса сварки на волокна МКМ. Эти способы сварки применяют как для соединения заготовок из МКМ, так и соединение их с гомогенными материалами. В то же время конструктивные и металлургические особенности композиционных материалов существенно затрудняют выбор режимов сварки и затрудняют технологию их соединения.

Для композиционного материала с объемным содержанием волокон бора 20 и 30 % осложнений в процессе точечного и шовного сварки не возникает, режимы сварки практически не отличаются от известных для сплавов алюминия. По мере увеличения содержания волокон неэлектропроводных бора значительно затрудняются условия формирования литого ядра, требует применения электродов специальной формы и жестких режимов сварки.

Высокая прочность диффузных соединений МКМ на основе алюминия между собой и с титановыми сплавами может быть достигнута оптимальным выбором конструкции соединения и применением промежуточных металлических слоев, в качестве которых могут быть применены медь, никель и ряд других пластичных металлов.

Выводы. Электроконтактная точечная сварка МКМ системы алюминий-бор с объемным содержанием волокон до 30...35 % может эффективно осуществляться на режимах для сварки алюминия. При увеличении содержания волокон для получения качественных сварных соединений необходимо применять электроды специальной формы, причем толщина плакирующего слоя на композиционном материале должна быть не менее 100...200 мкм. Диффузионная сварка является эффективным способом соединения волокнистых МКМ. Для повышения механических характеристик соединения целесообразно применять промежуточные слои из пластических металлов.

Ключевые слова: металлические композиционные материалы; точечная и шовная сварка; диффузная сварка.

Рис.: 7. Табл.: 2. Библ.: 8.

Болотов Геннадій Павлович – доктор технічних наук, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Болотов Геннадий Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

Bolotov Gennadiy – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Welding Technology and CAD/CAM/CAE Systems of Building Structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovgp@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

Болотов Максим Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Болотов Максим Геннадиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

Bolotov Maksym – PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Welding Technology and CAD/CAM/CAE Systems of Building Structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovmg@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0915-4132>