

ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ МЕТАЛЕВИХ ШАРУВАТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА АЛЮМІНІЄВІЙ ОСНОВІ

Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, Є.В. Половецький

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено аналіз публікацій, присвячених отриманню шаруватих композиційних матеріалів на алюмінієвій основі. Досліджено способи з'єднання матеріалів з тонкої фольги, які дозволяють отримувати шаруваті з'єднання з різною кількістю проміжних шарів. Показано, що основними способами зварювання, які дозволяють отримувати з'єднання з шаруватою структурою є прокатка, зварювання ультразвуком, вибухом, дифузійне зварювання та реакційне спікання. Аналіз літератури показав, що процес з'єднання можливо проводити як в умовах вакууму, так і на повітрі. З'єднання фольги з титану та алюмінію на режимах зварювання нижчих за температуру плавлення алюмінію (660 °С) забезпечує отримання з'єднань без формування між шарами інтерметалідної фази. Для збільшення міцності отриманих композитів доцільно використання в процесі зварювання технологічної операції у вигляді пропускання струму або після зварювання термічної обробки шаруватих композиційних матеріалів, що забезпечує підвищення реакційної здатності між шарами алюмінію і титану та утворення в якості продукту реакції інтерметалідної фази. Бібліогр. 31, рис. 7.

Ключові слова: металеві шаруваті композиційні матеріали, методи з'єднання, зона з'єднання, інтерметалідна фаза

При розробці зразків нової техніки висуваються все більші вимоги до її ваги та показників міцності, що обумовлює необхідність розробки нових матеріалів, які б задовольняли цим потребам. До таких матеріалів можна віднести композиційні.

Композиційними (КМ) називають матеріали, до складу яких входять нерозчинні або мало розчинні один в одному компоненти, які суттєво відрізняються за властивостями, та розділені в матеріалі чітко вираженою границею. Властивості КМ в основному залежать від фізико-механічних властивостей компонентів і міцності з'єднання між ними. Відмінною особливістю КМ є те, що в них проявляються переваги компонентів, а не їх недоліки. Разом з тим КМ притаманні властивості, яких не мають окремі компоненти, що входять до їх складу. Для оптимізації властивостей вибирають компоненти, що різко відрізняються, але доповнюють один одного [1].

Властивості КМ залежать від форми та характеру розподілу наповнювача. За геометричною формою наповнювачі поділяють на нульмірні, одномірні та двовимірні (рис. 1). Нульмірні наповнювачі мають розміри одного порядку в трьох вимірах (дисперсно-зміцнені КМ). Одномірні наповнювачі складаються з волокна того чи іншого

перетину (волокнисті КМ), а двовимірні наповнювачі являють собою пластини, довжина яких перевищує їх товщину (шаруваті КМ) [2].

Шаруваті композиційні матеріали (ШКМ) складаються з жорстко з'єднаних металевих або металовмісних шарів, що чергуються. Ці матеріали являють собою унікальну ламіновану структуру з різко вираженими границями розділу та можуть складатися з шарів широкого спектру матеріалів. Шари в композитах, в залежності від товщини, можна класифікувати як листи або пластини з товщиною 1...10 мм і більше, фольги товщиною 0,05...1,0 мм і плівки товщиною 0,001...0,05 мм [3]. ШКМ можуть значно поліпшити ряд властивостей, включаючи в'язкість руйнування, втомні характеристики, ударні характеристики, знос, корозію та демпфуючу здатність, забезпечують підвищену пластичність крихких матеріалів. Вибір матеріалів компонентів та їх об'ємного відсотку, товщини шарів і відповідної обробки дозволяють виготовити матеріал із заданими властивостями [4].

ШКМ з твердою матрицею та м'яким наповнювачем застосовуються, в основному, в якості жаростійких матеріалів, а з м'якою матрицею та твердим наповнювачем як теплостійкі матеріали.

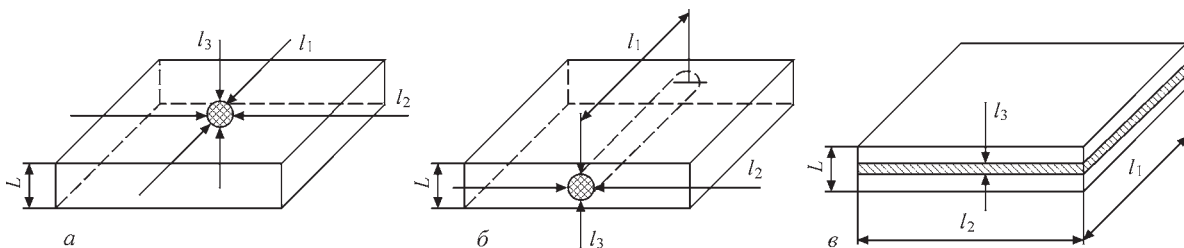


Рис. 1. Форми наповнювачів: а – нульмірні; б – одномірні; в – двовимірні; l_1, l_2, l_3 – розміри наповнювача; L – товщина матриці [2]

Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>, Петрушинець Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>,

Половецький Є.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8113-0434>

© Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, Є.В. Половецький, 2020

За функціональними ознаками ШКМ поділяються на: корозійностійкі, антифрикційні, електротехнічні, інструментальні, зносостійкі, термобіметали, біметали для глибокої витяжки та побутових виробів [3].

З урахуванням того, що алюміній та титан є одними з найлегших металів і широко застосовуються у різних галузях промисловості, метою цієї роботи було провести аналіз способів отримання ШКМ на основі алюмінію та титану.

Методи отримання ШКМ умовно можна розділити на такі, що формуються в твердому або рідкому стані методами зварювання, а також через газоподібний стан чи розчин методами осадження. До першої групи можна віднести: з'єднання через розплав методом просочення, спікання, прокатки, ультразвукового, дифузійного зварювання, зварювання вибухом. До другої групи входять: газотермічне напилення, випаровування та осадження з парової фази в вакуумі, методи хімічного осадження металу з розчинів.

Розглянемо отримання шаруватих композиційних матеріалів методами зварювання.

Виготовлення ШКМ **методом просочення** (через розплав) передбачає контакт рідкого металу наповнювача з твердим металом матриці. Автори [5] запропонували механізм протікання процесів при взаємодії розплаву алюмінію з твердим титаном (рис. 2), згідно з яким спочатку розплав алюмінію не перебуває у безпосередньому контакті з титаном, бо між ними знаходяться прошарки оксидів Al_2O_3 , TiO_2 (або TiO). Процес дифузії атомів титану та алюмінію через границю розділу при наявності окисних плівок уповільнений, тому переважно він відбувається по розривах в оксидних плівках з утворенням в титані локальних ділянок пересиченого твердого розчину $Ti(Al)$ з подальшим формуванням зародків інтерметаліду Al_3Ti . Далі відбувається поперечне зростання алюмінідів до їх змикання з утворенням суцільної прошарку вздовж титану.

Фрагментація оксидної плівки сприяє збільшенню дифузії атомів алюмінію з розплаву до поверхні титану, сприяючи формуванню та прискореному зростанню зародків інтерметалідної фази. Утворення інтерметаліду в обсязі, обмеженому титаном, що прореагував, призводить до подальшого руйнування оксидної плівки, різкого збільшення внутрішніх напружень і руйнування алюмінідів, що утворилися, на окремі фрагменти та їх витіснення з реакційного об'єму. Це полегшує доступ розплаву алюмінію практично до реакційної поверхні, сприяє прискоренню процесів локалізованого розростання інтерметалідів аж до їх змикання та виникнення суцільної смуги фрагментів алюмінідів, покритих плівкою розплаву алюмінію.

Фрагменти інтерметалідів, що відокремилися, малорухливі та залишаються поблизу реакційної поверхні, від якої відтісняються новими фрагментами, що постійно утворюються.

В роботі [6] досліджували вплив температури рідкої фази на формування ШКМ. В якості матеріалів використовували технічний алюміній А7 і титан ВТ1-0 розміром $40 \times 40 \times 0,5$ мм. Зазор між шарами титану становив $0,125 \dots 0,7$ мм. Титан попередньо травили протягом $5 \dots 10$ хв при $20^\circ C$ в розчині: на 1 л води $20 \dots 30$ мл H_2NO_3 та $30 \dots 40$ мл HCl . Для активації поверхонь використовували флюс системи $KF-AlF_3$. Темпе-

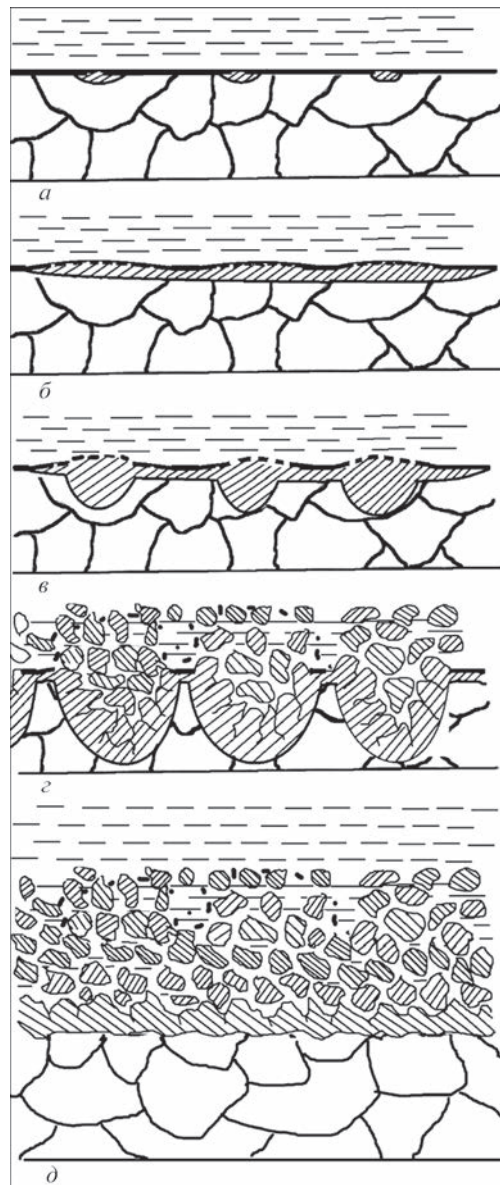


Рис. 2. Механізм трансформації мікроструктури шаруватого композиту ВТ1-0/АД1 в процесі термічної обробки при температурах вище точки ліквідусу алюмінію: а – виникнення зародків алюмінідів; б – поперечне зростання ділянок тонкого прошарку; в – формування та прискорене зростання зародків інтерметалідної фази в зонах каналів між фрагментами оксидної плівки; з – фрагментованість інтерметаліду; д – виникнення суцільної смуги фрагментів інтерметалідів, покритих плівкою розплаву Al [5]

ратуру розплаву алюмінію задавали в діапазоні 670...950 °С. Було встановлено, що рівень змочування практично не змінюється при підвищенні температури розплаву та досягає максимального значення при 700...750 °С. Найвищі значення рівня змочування, а також кращі механічні властивості в усьому досліджуваному діапазоні температур були отримані для з'єднань з зазором між шарами титану 0,35 мм ($\tau \approx 65...80$ МПа). Під час формування ШКМ між шарами Al та Ti відбувається формування двофазної зони, яка складається з алюмінієвої (Al та до 0,5 % Ti) і титанової (Al_3Ti) фаз. При цьому кількість інтерметалідної фази збільшується з ростом температури процесу. При 800 °С між алюмінієм і титаном утворюється суцільний прошарок Al_3Ti .

При виготовленні ШКМ методом **плазмового спікання** в якості джерела нагріву застосовують імпульсний постійний струм, при цьому матеріал в зоні впливу може розігріватися до високих температур, аж до плазмового стану.

В роботі [7] шаруватий титан-алюмінієвий композит отримували методом плазмового спікання фольги алюмінію та титану товщиною 100 та 200 мкм, відповідно, діаметром 26 мм. Загальна кількість фольги в пакеті становила 70 штук. Процес проводили при температурі 830 °С, тиску 5,7 МПа, тривалості 1...5 хв. Часткове видавлювання розплавленого алюмінію з пакету, а також пластична деформація титану призводять до зменшення товщини зразків на 10...30 %. Після проведення процесу формується шаруватий інтерметалічний композит Ti- Al_3Ti . Збільшення часу витримки до 5 хв дозволяє знизити пористість в шарах алюмініду титану, а також підвищити їх твердість з 2,9 до 3,8 ГПа.

Автори [8] для отримання шаруваті структури також використовували плазмове спікання. Дослідження проводили з фольгою технічно чистого алюмінію та титану з товщиною, відповідно, 27 і 45 мкм, діаметром 15 мм. Фольгу очищали в ультразвуковій ванні в метанолі та складали в пакет з 40 дисків Al та 41 – Ti. Іскрове плазмове спікання проводили в умовах вакууму 10^{-3} Па при постійному струмі 1,0...1,5 кА, напрузі 5...10 В, частота імпульсів змінювалася в діапазоні 30...40 кГц. Попередньо пакет спікали при температурі 450 °С, тиску 50 МПа, витримці 10 хв. Далі проводили відпал при 900 °С протягом 30 хв в атмосфері аргону. Остаточне спікання проводили в інтервалі температур 950...1200 °С зі швидкістю нагріву 100 °С/хв, тиску 50 МПа, при тривалості витримки 10 хв. Після попереднього спікання була отримана шарувата структура без помітної взаємодії між Al і Ti. Після відпалу бінарна структура перетворюється на прошарки: $\alpha-Ti$, $AlTi_3$,

$AlTi$, Al_2Ti та товстий шар пористого Al_3Ti . Причинами утворення пор вказуються плавлення Al, ефект Кіркендала та різниця мольних об'ємів між реагентами та продуктами. Другий цикл спікання дозволяє майже цілковито залікувати пори. При температурі процесу 950 °С утворюється наступний склад шарів: $\alpha-Ti$, $AlTi_3$, $AlTi$, $Al_{11}Ti_5$ та Al_3Ti . Подальше підвищення температури призводить до зменшення кількості шарів. Так, при 1050 °С були отримані $\alpha-Ti$, $AlTi_3$, $AlTi$, а при 1200 °С – однорідна суміш $AlTi_3$ з $AlTi$. Також було встановлено, що міцність на вигин шаруватих зразків, отриманих при 950 °С більш ніж втричі вища, ніж тих, які спікали при 1050...1200 °С ($\sigma_{в. виг.} = 1400$ МПа проти $\sigma_{в. виг.} = 389...446$ МПа). Це пояснюється наявністю шару $\alpha-Ti$, який пластично деформувався та перешкодив розповсюдженню тріщини в напрямі, перпендикулярному до площини шарів композиту, сприяючи її відхиленню та розгалуженню. Така мікроструктура поглинає велику кількість енергії перед руйнуванням.

В роботі [9] виконували реакційне спікання пакету фольги зі сплавів ВТ00 і А5Е ($100 \times 10 \times 0,05$ мм). Перший і останній шари були з титану. Загальна товщина пакету становила 1 мм. Фольги попередньо обробляли 2 %-м розчином плавикової кислоти. Пакет укладали між керамічними пластинами та нагрівали до 630 °С в теплостійкому боксі зі швидкістю 15 °С/хв. Струм пропускали з частотою 40, 800 і 1600 Гц. Кращі результати були отримані при пропусканні монополярних імпульсів («-» підключений до шарів Ti, «+» – до Al). Було встановлено, що при нагріванні без пропускання струму повне перетворення пакету в ШКМ Ti- Al_3Ti відбувається за 420...480 хв. Додаткове пропускання струму зменшує час формування шаруватого композиту до 300 хв. У процесі спікання формується тільки інтерметалід Al_3Ti , утворення якого призводить до виникнення пор і мікротріщин на початку хімічного перетворення. До закінчення процесу спікання під дією тиску несущільності заліковуються таким чином, що кінцева структура шаруватого композиту являє собою чергування залишкових шарів Ti товщиною 30...35 мкм і шарів Al_3Ti з мікротвердістю 4,5...7,0 ГПа.

Автори роботи [10] запропонували методику розрахунку параметрів процесу та схему перетворення шарів при виготовленні титан-алюмінієвого ШКМ при пропусканні постійного струму. Фольги алюмінію та титану ($90 \times 10 \times 0,05$ мм) набирали в пакет загальною товщиною 1 мм. Перший та останній шари були з Ti. Спікання проводили при температурі 630 °С і тиску 25 МПа. На рис. 3 наведено схему трансформації шарів пакету з фольги Al та Ti. В роботі наведено процедуру роз-

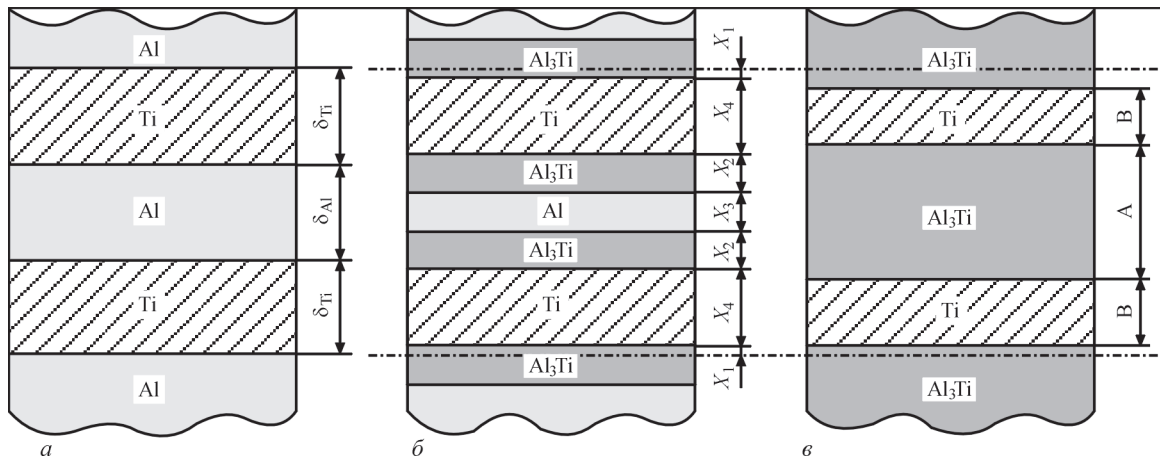


Рис. 3. Схема трансформації шарів пакету з фольги Al і Ti: а – початковий стан; б – проміжний стан; в – закінчення процесу [10]

рахунку параметрів обробки струмом багатошарового пакету для отримання метал-інтерметалідного ШКМ Ti–Al₃Ti. Обґрунтовано вибір граничних значень сили струму, що дозволяють знизити час обробки пакету без підплавлення шарів алюмінію. Для розглянутого випадку гранична сила струму становить 150 А.

Одним з найбільш поширених способів виготовлення ШКМ є **прокатка**, яка являє собою спільне прокатування пакету з шарів металів.

Автори роботи [11] для отримання шаруватого титан-алюмінієвого композиту використовували метод прокатки. Для цього збирали в пакет пластини зі сплаву ВТ1-0 (100×50×0,1 мм) та сплаву АД1 (100×50×0,02 мм). Співвідношення товщини шарів титану і алюмінію вибирали наступні: 100/20, 100/40, 100/60, 100/200 (мкм). Прокатку проводили в сталевих обкладинках при температурі 450...520 °С в умовах вакууму 0,01 Па. При першому проході ступінь деформації становив 25...40 %, при наступних 8...10 %. У результаті було отримано смуги товщиною 0,35 мм з 4800 шарами. При цьому середня товщина титанового шару склала 100...120 нм, а алюмінієвого 80...90 нм. Деформація шарів з алюмінію становила на 25...30 % більше, ніж шарів з титану. Це призвело до порушення суцільності титанового шару. Деформація приповерхневих шарів обох матеріалів була на 10...15 % більшою за центральні. Результати експериментів дозволили встановити оптимальну температуру прокатки (470 °С) і ступінь обтиснення (до 30 % за прохід), які дозволяють забезпечити зварювання шарів Ti і Al, а також запобігають утворенню більш ніж 0,5 % інтерметалідних фаз в композиті.

В роботі [12] пакет з двох фольг алюмінію АА1235 товщиною 300 мкм і однієї фольги титану товщиною 25 мкм прокатували при кімнатній температурі. Загальна товщина пакету зменшувалась з 625 до 130 мкм. При цьому шар титану руйнувався та диспергував в алюмінієвій матри-

ці. Далі з метою формування інтерметаліду Al₃Ti виконували відпал отриманих зразків при 600 °С протягом 3600...10080 хв. При тривалості термообробки менше за 720 хв через значну різницю в дифузії Al і Ti при утворенні інтерметалідної фази на границі розділу Al/Al₃Ti, спостерігаються пори (ефект Кіркендала), наявність яких призводить до зниження значень пластичності та міцності композиційного листа. Збільшення часу відпалу до 1440 хв сприяє заліковуванню пор, композиційний матеріал складається з крупнозернистих частинок Al та ультрадисперсних Ti та Al₃Ti, також при цьому досягаються вищі значення механічних властивостей ($\sigma_T = 135$ МПа). При тривалості відпалу 2880 хв відбувається зникнення чистого Ti з його повним переходом в Al₃Ti. При подальшому збільшенні часу відпалу до 10080 хв частинки Al₃Ti перерозподіляються в матриці Al ближче до поверхні ШКМ, що призводить до зниження міцності та пластичності.

Автори роботи [13] з'єднували фольги Al та Ti методом прокатки при кімнатній температурі. Після очищення металеву щіткою та в ацетоні фольги збирали в пакет 100×50 мм, що складався з шарів титану товщиною 82 мкм і алюмінію товщиною 80...140 мкм. Було встановлено, що рівень деформації майже однаковий для всіх шарів ШКМ. Проте з'єднання центральних шарів пакету відбувається раніше за зовнішніх, причиною чого є еластичне відновлення зовнішніх шарів, що призводить до руйнування зв'язків, утворених після проходження під валками. Наявність подряпин на алюмінії після очищення призводить до збільшення коефіцієнту тертя на границях розділу шарів, що сприяє підвищенню міцності схоплювання на початковій стадії процесу та зменшенню витискання м'якого металу по краях пакету. Також експериментальні результати показали, що при використанні тоншого шару алюмінію (80 мкм) його товщина суттєво зменшується у порівнянні з початковим значенням. Збільшення товщини Al дозволяє отримати ШКМ з більш однорідною зміною

відносної товщини обох металів, а екструзія алюмінію мінімізується (рис. 4).

В роботі [14] досліджували утворення дислокацій в алюмінії при тривалому відпалі ШКМ Al/Ti/Al. Для виготовлення ШКМ використовували алюмінієву фольгу AA1235 товщиною 300 мкм та чистий титан товщиною 25 мкм. Холодну прокатку пакету з трьох фольг проводили на чотирьохвалковому прокатному стані з валками діаметром 50 мм. Загальна товщина пакету знизилась з 625 до 130 мкм. Після прокатки виконували відпал отриманих з'єднань при 600 °C протягом 360...10080 хв. Термічна обробка сприяє дифузії Al та Ti до границі розділу та реакції між ними з утворенням інтерметаліду Al₃Ti. Внаслідок ефекту Кіркендала та різниці молярних об'ємів реагентів відбувається утворення пор на границі розділу між Al та Al₃Ti. Збільшення тривалості відпалу до 2880 хв призводить до суттєвого зменшення розміру пор. При термообробці протягом 10080 хв в шарі Al поблизу інтерметаліду Al₃Ti спостерігається аномально висока щільність дислокацій 7,5·10¹⁴ м⁻². Автори стверджують, що причиною цього є розвиток пор і дифузія атомів Ti. Дифузія між Ti та Al і утворення Al₃Ti при тривалому відпалі сильно деформованого матеріалу дозволяє деяким атомам Ti виходити за межі стехіометрії Al₃Ti та утворювати буферну зону, що складається з твердого розчину Ti в Al. По мірі збільшення часу відпалу великі пори розпадаються на дрібніші та розподіляються в алюмінієвій матриці. Рух атомів при високій температурі сприяє поступовому зменшенню розміру сферичних пор, які в результаті стають вакансіями. Крім того, для мінімізації вільної енергії розподілені атоми Ti збиралися у вакансіях, а дислокації створювалися та закріплювалися атомами або кластерами Ti.

Ультразвукове зварювання відноситься до твердофазних методів і передбачає поряд з прикладенням тиску використання в якості джерела енергії ультразвукових коливань. Даний процес дозволяє з'єднувати широкий спектр металів товщиною до 3 мм. Зварювання відбувається при низьких температурах, що дозволяє отримувати з'єднання без утворення інтерметалідних сполук.

Автори роботи [15] виконували ультразвукове зварювання пакету Al/Ti в ШКМ. В якості пер-

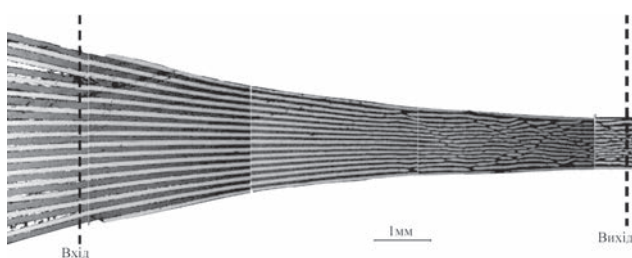


Рис. 4. Поперечний переріз ШКМ Al/Ti, отриманого методом прокатки [13]

шого шару використовували підкладку з алюмінієвого сплаву AA1100 товщиною 1,5 мм. Для експериментів було обрано фольгу з чистого титану та алюмінію AA1100 товщиною 127 мкм, які по чергово укладали у пакет з 2...10 шарів. За один прохід поєднували до чотирьох фольг. Після зварювання проводили термообробку при 480 °C протягом 240 хв. Було встановлено, що міцність на розрив росте зі збільшенням загальної кількості шарів і досягає $\sigma_b = 216$ МПа для ШКМ з 10 шарів, що пояснюється збільшенням об'ємного вмісту титану. Пластичність шаруватого матеріалу також зростає зі збільшенням кількості шарів до 6 ($\delta = 32\%$), після чого майже не змінюється.

В роботі [16] були продовжені попередні дослідження, проте зварювання виконувалось вже без підкладки. В експериментах було використано чистий титан та алюміній марки 1100 товщиною по 127 мкм. Фольги по чергово складали в пакети з загальною кількістю шарів 7...15 штук, перший і останній з яких були з титану. Зразки з'єднували при деякому зусиллі та частоті сонотроду 20 кГц. В залежності від кількості шарів виконували декілька етапів зварювання. Спочатку збирали і пропускали під сонотродом пакет з трьох фольг Al/Ti/Al. Потім до нього додавали ще дві фольги Al + Ti та повторювали процес. Далі для покращення якості з'єднань проводили відпал при 480 °C протягом 240 хв. Збільшення кількості шарів має незначний вплив на механічні характеристики з'єднань. Проте кращі результати були отримані для пакету з 15 фольг, що пояснюється більшою кількістю проходів при зварюванні під сонотродом.

Автори роботи [17] досліджували особливості формування з'єднань ШКМ під впливом ультразвукового зварювання. Для цього було використано по три фольги з чистого титану та алюмінію 1100 з товщиною по 127 мкм. Зварювання було виконано на обладнанні Fabrisonic SonicLayer 4000 потужністю 9 кВт при наступних параметрах: зусилля стиснення 3500 Н, амплітуда вібрації 41,55 мкм, швидкістю зварювання 25,4 мм/с. Для підвищення пластичності та інтенсифікації процесу схоплення підкладку з алюмінієвого сплаву 6061 підігрівали до 93,3 °C. За проход приварювали по одній фользі з титану та алюмінію. На границях розділу між окремими шарами спостерігаються несучільності. Інтерметаліди в зонах з'єднання відсутні. Під час зварювання деформується переважно алюміній, про що свідчить розорієнтація зерен на 9° і зменшення їх розміру більш ніж вдвічі при майже незмінних значеннях для титану. Було зроблено висновок, що основним механізмом, який відповідає за утворення з'єднання при ультразвуковому зварюванні є сильна деформація зсуву на границі розділу між шарами.

Подальші дослідження були присвячені визначенню впливу термообробки на з'єднання та висвітлені в роботі [18]. Сплави і параметри режиму ультразвукового зварювання були ті ж самі, що і в попередній роботі. Зразки з'єднань піддавали відпалу при 600 °С протягом 60 хв. Були отримані бездефектні з'єднання, в яких після термообробки відбувається значний ріст зерна в алюмінієвому шарі та утворення тонкого прошарку інтерметаліду на границях розділу Al/Ti. Результати досліджень на відшаровування показали, що зусилля, необхідне для руйнування зразків після термічної обробки, більш ніж вдвічі вище ніж безпосередньо після зварювання (5,8 кН проти 2,4 кН). При цьому руйнування ШКМ після зварювання відбувається в межах одного шару, а у відпалених зразках – проходить через кілька шарів, що вказує на вищу міцність з'єднання вздовж шарів у порівнянні з вихідними матеріалами. Дослідження міцності на зсув показали таку ж тенденцію значень – $\tau_{зр} = 46,3$ МПа після зварювання та $\tau_{зр} = 102,4$ МПа для термооброблених ШКМ.

В роботі [19] досліджували вплив термічної обробки на механічні властивості ШКМ, отриманих методом ультразвукового зварювання. Була використана фольга з алюмінієвого сплаву 3003-Н18 товщиною 150 мкм і чистого титану товщиною 75 мкм. ШКМ нарощували пошарово на масивну підкладку зі сплаву 3003-Н18 починаючи з титану. Режим приварювання алюмінієвої фольги був наступний: зусилля стиснення 1750 Н, амплітуда вібрації 16 мкм, швидкість зварювання 23,7 мм/с; для фольги з титану – зусилля стиснення 2000 Н, амплітуда вібрації 28 мкм, швидкість зварювання 10,58 мм/с. Температура попереднього підігріву в обох випадках становила 150 °С. Далі проводили відпал при 480 °С протягом 30...270 хв. Методом оптичної металографії було показано суцільний контакт між Al та Ti, дефекти в зонах з'єднання не виявлені. Термообробка протягом 30 хв дозволяє зняти напруження, що

виникли між шарами металів в процесі зварювання, а також майже вдвічі підвищити міцність на зріз у порівнянні з невідпаленими зразками ($\tau_{зр} = 72,96$ МПа проти $\tau_{зр} = 37,78$ МПа). Збільшення тривалості витримки при відпалі призводить до перекристалізації та росту зерна, результатом чого є падіння міцності.

Застосування дифузійного зварювання дозволяє на початковому етапі процесу локалізувати пластичну деформацію матеріалу матриці, необхідну для заповнення простору між шарами зміцнюючої фази та для максимального ущільнення самої матриці. При виникненні щільного контакту між шарами на границі розділу протікають дифузійні процеси, які забезпечують міцний зв'язок на цих границях і необхідний рівень міцності самого КМ.

Автори роботи [20] фольги зі сплавів титану ТА1 та алюмінію 1060 розмірами 220×220×0,1 мм з'єднували методом дифузійного зварювання. Спочатку, для забезпечення щільного контакту між шарами Al і Ti, до зразків в вакуумній печі прикладали тиск 1 МПа. Далі протягом 180 хв виконували нагрівання до 500 °С з витримкою при цій температурі протягом 60 хв для забезпечення рівномірного прогрівання фольги. Потім ще на 30 хв підвищували температуру до 550 °С і витримували протягом 180 хв для проходження дифузійного зварювання між шарами, при цьому тиск збільшували до 3 МПа. Нарешті, фольгу охолоджували з піччю під тиском 1 МПа. Таким чином було отримано ШКМ без пор та інтерметалідних включень на границях між Al і Ti (рис. 5).

В роботі [21] вказується на необхідність попередньої дегазації фольги при виготовленні ШКМ. Автори використовували фольгу з алюмінію марки АМ5 та титану ВТ1-0 з товщинами, відповідно, 50 і 100 мкм. Фольгу промивали в ацетоні, збирали по чергово в пакет і нагрівали до 640 °С протягом 30 хв у вакуумі 1,333 Па для забезпечення проходження дегазації. Про досить інтенсивне газозвиділення свідчить падіння вакууму на цій ста-

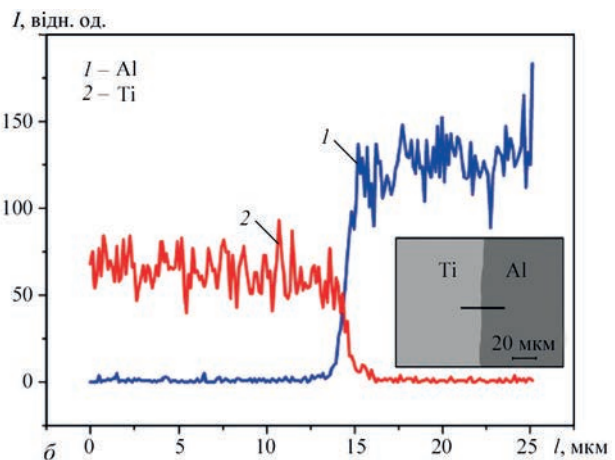
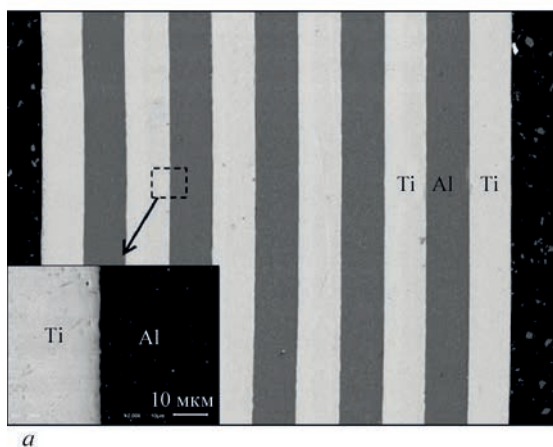


Рис. 5. Поперечний переріз (а) і розподіл елементів в зоні з'єднання (б) ШКМ Al/Ti, отриманого методом дифузійного зварювання [20]

дії на порядок до 13,33 Па. Далі зразки стискали з деяким зусиллям і витримували при тій же температурі ще 240 хв. В результаті був отриманий ШКМ Ti/Al₃Ti, причому в інтерметалідному шарі спостерігається велика кількість мікротріщин і пор на місці колишньої алюмінієвої фольги.

В роботі [22] методом дифузійного зварювання отримували ШКМ зі сплавів алюмінію 1060 товщиною 100 мкм і титану TA1 товщиною 150 мкм. Зварювання проводили на наступному режимі: температура 550 °С, тиск 5 МПа, тривалість процесу 180 хв, вакуум 10⁻³ Па. Для забезпечення щільного контакту між фольгами тиск приклали перед нагріванням. Охолодження до кімнатної температури виконували разом із піччю. Було отримано ШКМ без пор, несучільностей та інтерметалідних включень з межею міцності $\sigma_b = 224$ МПа та відносним подовженням $\delta = 35$ %. Результати випробувань на вигин показали, що мікротріщини на границі розділу Al/Ti з'являються при куті згину 120°, при цьому руйнування зразка не відбувається навіть за його вигинання до 180°.

Автори роботи [23] досліджували вплив товщини фольги з алюмінію та титану на формування ШКМ методом дифузійного зварювання. В якості матеріалів для досліджень використовували чисті титан (товщиною 0,15...0,4 мм) і алюміній AA1060 (товщиною 0,1...0,4 мм). Фольгу Al і Ti розрізали на квадрати 300×300 мм. Вихідне співвідношення товщин шарів Al та Ti було наступне: 0,1/0,15, 0,2/0,25, 0,4/0,4. Загальна товщина пакету становила 1,15...1,2 мм. Перед зварюванням Ti попередньо протравлювали в розчині, що складався з 35 % азотної кислоти, 5 % фтористої кислоти та води. Алюмінієву фольгу спочатку очищали в підігрітому до 50...60 °С лужному розчині 30 г/л гідроксиду натрію, після чого занурювали в водний розчин азотної кислоти 300...350 г/л при кімнатній температурі. Далі зразки промивали у воді, потім у етанолі. Дифузійне зварювання проводили на наступному режимі: температура 550 °С, тиск 5 МПа, витримка протягом 180 хв в умовах вакууму 10⁻² Па. Охолоджували в печі до кімнатної температури. Металографічні дослідження показали, що при зменшенні товщини шарів границя розділу між ними стає хвилеподібною, внаслідок чого збільшується загальна площа поверхні контакту між металами у порівнянні з вихідним станом. Зменшення співвідношення товщин шарів з 0,4/0,4 до 0,1/0,15 також сприяє збільшенню дифузійної зони з 4,1 до 5,2 мкм. Максимальну міцність на розтяг мали зразки зі співвідношенням товщин 0,4/0,4 ($\sigma_b = 288,03$ МПа), проте лише в зразках 0,1/0,15 ($\sigma_b = 223,67$ МПа) відсутнє відшарування між титаном і алюмінієм.

В роботі [24] були продовжені попередні дослідження з наголосом на вивченні процесу ініціювання та розповсюдження тріщини втоми в ШКМ. Були використані фольги Al і Ti з товщиною 0,15 та 0,1 мм, відповідно. Дифузійне зварювання здійснювали на режимі: температура 500...600 °С, тиск 5 МПа, тривалість витримки 180 хв, вакуум 10⁻³ Па. Бездефектні з'єднання без інтерметалідних включень та з вищими механічними властивостями були отримані при температурі зварювання 550 °С ($\sigma_b = 224$ МПа). Після 67554 циклів навантаження на краях зразків з'являються тріщини втоми. Механізмом їх ініціювання є суттєва локальна пластична деформація внаслідок високої концентрації напружень. Тріщини втоми поширюються в основному перпендикулярно до напрямку навантаження, при цьому в процесі поширення утворюються великі трикутні тріщини, та тріщини втоми розходяться у декількох напрямках, утворюючи велику кількість мікротріщин. Далі відбуваються міжфазні відшарування, вони перешкоджають подальшому ініціюванню та розповсюдженню тріщин втоми та вивільнюють напруження циклу втоми. Порогове значення розповсюдження тріщини втоми ШКМ Al/Ti становило близько 7,4 МПа·м^{1/2}, що вище ніж у титана та алюмінія.

В роботі [25] досліджували процес зародження та зростання інтерметалідної фази Al₃Ti між шарами Al і Ti при дифузійному зварюванні з подальшим відпалом. Для цього використовували листи алюмінію та титану з товщиною по 0,5 мм. Перед зварюванням зразки очищали в ультразвуковій ванні в 10 %-му розчині плавикової кислоти. Листи алюмінію та титану уклали почергово до загальної товщини 5 мм, стискали з зусиллям 4 МПа, нагрівали до 550...575 °С та витримували протягом 120...360 хв. Відпал проводили при температурі зварювання протягом 720...2880 хв. Після зварювання тривалістю 360 хв в зоні з'єднання формується тонкий прошарок Al₃Ti, товщина якого збільшується у процесі подальшого відпалу. Після термообробки при 575 °С протягом 2880 хв шар алюмінію повністю зникає. Було встановлено, що при відпалі при 575 °С протягом 2160 хв швидкість дифузії Al в 20 разів вища за Ti ($D_{Al} = 27,133 \cdot 10^{-15}$ м²/с проти $D_{Ti} = 1,202 \cdot 10^{-15}$ м²/с), це призводить до утворення пор поблизу границі розділу Al/Al₃Ti внаслідок ефекту Кіркендала. Така домінуюча дифузія Al в бік Ti стимулює зародження та зростання інтерметалідної фази в основному на границі розділу Ti/Al₃Ti. На рис. 6 наведена схема росту Al₃Ti під впливом температури. Під час зварювання відбувається дифузія окремих атомів Al і Ti з утворенням фази Al₃Ti вздовж границі розділу Al/Ti (рис. 6, б). Під час відпалу відбувається неоднорідне

рідне зростання інтерметалідної фази (рис. 6, а): біля Ті формуються ультрадрібнодисперсні зерна Al_3Ti (А), в центральній частині шару Al_3Ti – зерна грубої структури (В), біля шару алюмінію – відносно невеликі зерна Al_3Ti (С). Причиною цього є високий рівень дифузії алюмінію, що сприяє більш інтенсивному формуванню зародків інтерметалідної фази на границі Ті/ Al_3Ti зі зміщенням областей А, В і С в бік алюмінієвого шару. Після повного переходу Al в інтерметалід області В і С змішуються в центральній частині інтерметалідного шару (рис. 6, з). Таким чином, кінцева структура зерна Al_3Ti складається зі щойно вирощених дрібних зерен Al_3Ti на границі Ті/ Al_3Ti (D), область А з деяким збільшенням зерен зміщена в бік Al, що примикає до області D та змішаних областей В і С у центральній частині.

Автори роботи [26] досліджували реакційну дифузію в багатошаровому пакеті Al/Ti. Експерименти проводили з пакетом з 17 фольг титану та алюмінію розміром 90×25 мм. Фольги з Al та Ti попередньо протравлювали в 10 %-му розчині плавикової кислоти та 15 %-му розчині їдкого натру з подальшим очищенням спиртом і промиванням у воді. З'єднання проводили при температурі 600 °С, тиску 50 МПа, протягом 180 хв в умовах вакууму не нижче 10^{-2} Па. Далі отримані зразки відпалювали при 520...650 °С протягом 60...9000 хв. Було встановлено, що при термообробці в обраному інтервалі температур Al_3Ti є єдиною фазою, що спостерігається в дифузійній зоні. Титан та алюміній дифундують в напрямку один до одного, проте шари Al_3Ti ростуть головним чином у бік Al. При температурі 575...600 °С кінетика зростання Al_3Ti змінюється від параболічної до лінійної. В низькотемпературній кінетиці переважає дифузія атомів Ti вздовж границь зерен шарів Al_3Ti , тоді як реакція на границі розділу Al/ Al_3Ti у високотемпературному режимі обмежена дифузією атомів Ti у фольгу Al на фронті росту

Al_3Ti в результаті підвищеної розчинності Ti в Al з підвищенням температури.

В роботі [27] досліджували вплив товщини титану на формування ШКМ Al/Ti. Були використані титан товщиною 45...180 мкм і алюміній товщиною 54 мкм. Фольгу 40×80 мм зачищали металевою щіткою та очищали в спирті в ультразвуковій ванні. Далі у графітову матрицю почергово уклали 50 шарів Ti та 49 – Al. Зварювання проводили у вакуумній печі на режимі: температура 500 °С, тиск 50 МПа, витримка протягом 30 хв. Потім отриманий зразок для повного переходу алюмінію в інтерметалідні фази відпалювали без тиску при 900 °С протягом 30 хв. Остаточне спікання проводили в високому вакуумі порядку 10^{-3} Па при 1050 °С, під тиском 50 МПа протягом 60 хв, швидкість нагрівання становила 10 °С/хв, а охолодження – близько 15 °С/хв. Після всіх стадій термомодеформаційного впливу були отримані з'єднання з незначною пористістю. Незалежно від товщини титану сформувалась наступна послідовність шарів фаз: α -Ti, AlTi₃, AlTi, Al₂Ti та Al₃Ti. Найвищу міцність на розтяг ($\sigma_b = 606$ МПа) і в'язкість руйнування ($K_{IC} = 47,6$ МПа·м^{1/2}) мали зразки, отримані з титаном товщиною 90 мкм. Це пояснюється оптимальним співвідношенням (майже один до одного) між α -Ti та загальною товщиною інтерметалідних шарів. Така об'ємна частка шарів α -Ti ефективно запобігає безперервному поширенню тріщини в режимі відкриття, змушуючи її відхилитися та роздвоюватися в інтерметалідних шарах. Пластичне деформування титану може поглинути велику кількість енергії до руйнування матеріалу.

Зварювання вибухом має обмежене використання для виготовлення ШКМ. Воно являє собою твердофазний процес отримання з'єднань з інтенсивною пластичною деформацією металу під впливом імпульсу високої амплітуди і малої тривалості.

В роботі [28] для виготовлення ШКМ Al/Ti було застосовано зварювання вибухом. В якості матеріалів для досліджень використовували спла-

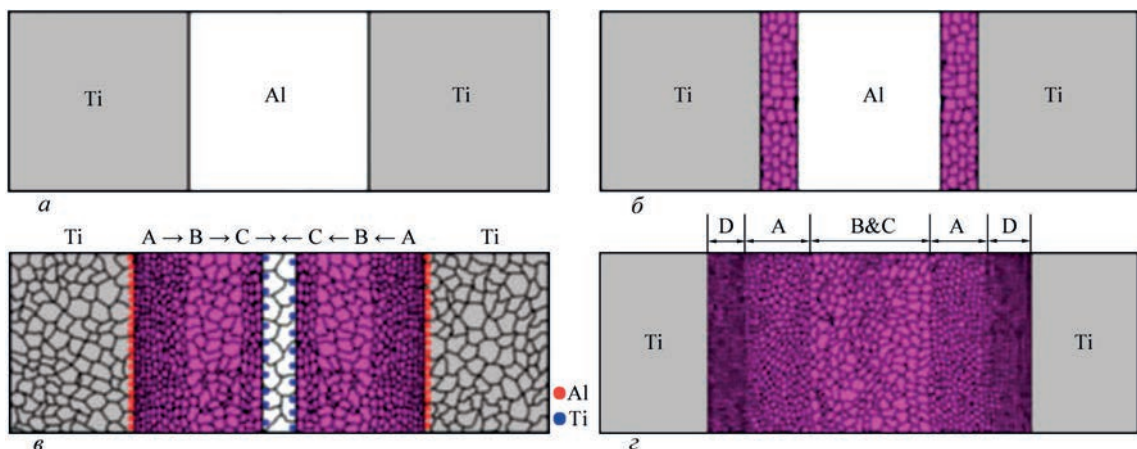


Рис. 6. Схематичне зображення процесу росту Al_3Ti у шаруватій системі Al/Ti: а – вихідний стан; б – проміжні стадії; в – кінцева структура після переходу Al в інтерметалід [25] (опис А, В, С, D – див. у тексті)

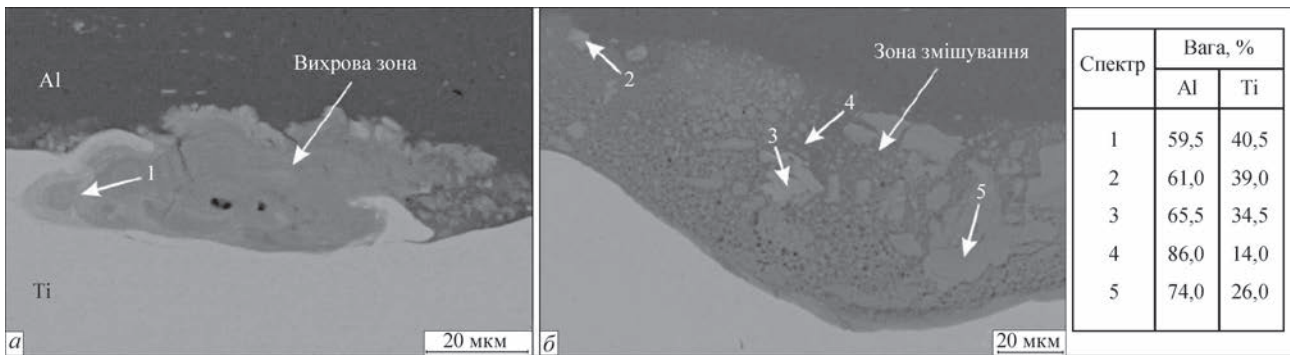


Рис. 7. Структура та хімічний склад зон змішування, що утворюються після зварювання вибухом ШКМ Al/Ti: а – вихрові; б – дисперсні включення (позначені стрілками) [28]

ви титану ВТ1 і алюмінію (Al–Mn) розмірами $100 \times 200 \times 0,2$ мм та $100 \times 200 \times 0,25$ мм, відповідно. Листи почергово вкладали в пакет із загальною кількістю 40 штук. В якості вибухівки було використано порошок аммоніту 6GV щільністю $0,9 \text{ г/см}^3$ та швидкістю детонації 4200 м/с . Далі проводили термообробку в атмосфері повітря при температурі $640 \text{ }^\circ\text{C}$, тиском 3 МПа, протягом 1200 хв. В отриманих зразках спостерігається зміна зони з'єднання між шарами алюмінію та титану від хвиляподібної до майже прямолінійної по мірі віддалення від епіцентру вибуху. Неоднорідність впливу вибухової хвилі є причиною наявності макропор між окремими шарами. В зонах змішування утворюються наступні інтерметалідні фази: Al_3Ti , AlTi , Al_2Ti_3 і AlTi_3 (рис. 7). Подальша термічна обробка ШКМ призвела до росту Al_3Ti , швидкість росту якого в чотири рази була вищою у порівнянні зі зразками, виготовленими за технологією спікання. Прикладення тиску при відпалі дозволяє отримати зразки з мінімальною кількістю дефектів.

Автори робіт [29, 30] зварюванням вибухом поєднували пакет з шести листів алюмінію та титану товщиною 0,5 мм. В якості вибухової речовини використовували суміш аміачної селітри з тротилом і газойлем товщиною 20 мм. Швидкість детонації становила близько 4500 м/с . Далі зразки ШКМ відпалювали при $630 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 60...15600 хв в атмосфері навколишнього середовища. Після зварювання зона з'єднання між алюмінієм і титаном являє собою пряму лінію без вихорів. В деяких місцях між Al і Ti спостерігаються ділянки з Al_3Ti , утворення якого пов'язано з локальним підвищенням температури в процесі зварювання. Під час відпалу протягом перших 780 хв швидкість росту шару інтерметаліду має лінійний характер, після чого її поведінка змінюється на параболічну. Це свідчить про перехід механізму росту Al_3Ti від контрольованої реакції до контрольованої дифузії.

В роботі [31] отримували біметал Al/Ti з досить товстих листів методом зварювання вибухом. Для цього були використані пластини з титану Ti Gr.2 ($140 \times 460 \times 0,8$ мм) і алюмінію A1050

($140 \times 460 \times 4$ мм). Відстань між металами до вибуху становила 1,5 мм, а швидкість детонації $1900 \dots 1950 \text{ м/с}$. Далі зразки відпалювали в герметичних кварцових ампулах при $552 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 30...6000 хв. Після зварювання було отримано бездефектні з'єднання. Зона з'єднання між алюмінієм і титаном набуває хвиляподібного вигляду, в вихорах якої утворюються інтерметаліди Al_3Ti , Al_2Ti , AlTi і AlTi_3 . Процес відпалу робить фазу Al_3Ti домінуючою, сприяючи зростанню її шару по всій поверхні з'єднання. Дослідження кінетики інтерметаліду Al_3Ti показали чотири етапи його росту: інкубаційний період (до 90 хв); ріст, що регулюється хімічною реакцією (90...300 хв), змішаний механізм хімічної реакції та об'ємної дифузії (300...2160 хв); об'ємна дифузія (2160...6000 хв). Під час термообробки відбувається інтенсивне зростання зерен алюмінію.

Висновки

На основі представленого огляду публікацій можна констатувати, що:

1. Використання ШКМ може значно поліпшити властивості конструкцій з них, а саме в'язкість руйнування, втомні та ударні характеристики, знос, корозію та демпфуючу здатність.

2. Процес з'єднання алюмінію з титаном можливо проводити як в умовах вакууму, так і на повітрі, при цьому в залежності від кінцевого продукту можливе отримання ШКМ як зі зміцненням за рахунок утворення інтерметалідних прошарків, так і без.

3. Основними методами виготовлення ШКМ на основі алюмінію та титану є просочення (через розплав), прокатка, спікання, зварювання ультразвуком, вибухом та дифузійне зварювання.

4. Кожен процес зварювання має свої характерні особливості. Метод просочення (через розплав) передбачає контакт рідкого алюмінію з твердим титаном та не дозволяє отримати ШКМ без інтерметалідного прошарку. Процес прокатки для отримання ламінатів потребує значної пластичної деформації пакету, що обумовлює значну кількість циклів прокатки. Зварювання ультразвуком

використовується тільки для отримання шаруватого пакету з тонкої фольги. Зварювання вибухом супроводжується утворенням хвилеподібної зони з'єднання та потребує для вирівнювання хімічного складу подальшої термічної обробки. Дифузійне зварювання в залежності від параметрів режиму зварювання дозволяє отримувати ШКМ як з утворенням інтерметалідної фази в стику, так і без неї.

Виходячи з можливостей широкого регулювання структури та складу ШКМ на етапі утворення з'єднання, отриманого за допомогою дифузійного зварювання, актуальними є подальші дослідження з виготовлення таких матеріалів із регульованим вмістом інтерметалідної фази в стику.

Список літератури/References

- Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. (2008) *Материаловедение*. Учебник для вузов. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.
- Arzamasov, B.N., Makarova, V.I., Mukhin, G.G. et al. (2008) *Materials science: Manual for Higher Education Instit.* Moscow, N.E. Bauman MGTU [in Russian].
- Тялина Л.Н., Минаев А.М., Пручкин В.А. (2011) *Новые композиционные материалы*. Учебное пособие. Тамбов, ГОУ ВПО ТГТУ.
- Tyalina, L.N., Minaev, A.M., Pruchkin, V.A. (2011) *New composite materials: Manual*. Tambov, GOU VPO TGTU [in Russian].
- Ковтунов А.И., Мямин С.В., Семистенова Т.В. (2017) *Слоистые композиционные материалы*. Электронное учебное пособие. Тольятти, ТГУ.
- Kovtunov, A.I., Myamin, S.V., Semistenova, T.V. (2017) *Layered composite materials: Electron manual*. Tolyatti, TGU [in Russian].
- Wadsworth J., Lesuer D.R. (2000) Ancient and modern laminated composites – from the Great Pyramid of Gizeh to Y2K. *Materials Characterization*, **4–5**, 289–313.
- Гуревич Л.М. (2013) Механизмы структурообразования при взаимодействии титана с расплавом алюминия. *Известия ВолгГТУ. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»*, **6**, 6–13.
- Gurevich, L.M. (2013) Mechanisms of structure formation at interaction of titanium with aluminium melt. *Izvestiya VolgGTU, Seriya Problemy Materialovedeniya, Svarki i Prochnosti v Mashinostroyenii*, **6**, 6-13 [in Russian].
- Ковтунов А.И., Мямин С.В. (2013) Исследование технологических и механических свойств слоистых титаноалюминиевых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом. *Авиационные материалы и технологии*, **1**, 9–12.
- Kovtunov, A.I., Myamin, S.V. (2013) Investigation of technological and mechanical properties of layred titanium-aluminium composite materials produced by liquid-phase method. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **1**, 9–12 [in Russian].
- Кузьмин К.А., Лазуренко Д.В., Матц О.Э. (2014) Формирование композиционных материалов типа «титан-алюминид титана» методом искрового плазменного спекания. *Актуальные проблемы в машиностроении. Материалы I междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 26 марта 2014 г.* Новосибирск, НГТУ, сс. 514–520.
- Kuzmin, K.A., Lazurenko, D.V., Mats, O.E. (2014) Formation of “titanium-titanium aluminide” composite materials by the method of spark plasma sintering. *In: Proc. of 1st Int. Sci.-Pract. Conf. on Actual Problems in Machine-Building (Novosibirsk, 26 March 2014)*. Novosibirsk, NGTU, 514-520.
- Yanbo Sun, Sanjay Kumar Vajpai, Kei Ameyama, Chaoli Ma (2014) Fabrication of multilayered Ti–Al intermetallics by spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, **5**, 734–740.
- Синчук А.В., Цуркин В.Н., Иванов А.В. и др. (2014) Влияние электрического тока на реакционное спекание слоистой системы Al–Ti. *Конструкции из композиционных материалов*, **1**, 24–31.
- Sinchuk, A.V., Tsurkin, V.N., Ivanov, A.V. (2016) Effect of electric current on reaction sintering of Ti–Al layered system. *Konstruktsii iz Kompozitsionnykh Materialov*, **1**, 24–31 [in Russian].
- Васьянович Н.А., Цуркин В.Н. (2016) Базовые принципы ферроэлектрического синтеза металл-интерметаллидно-го ламината Ti–Al₃Ti из пакета фольги Al–Ti. *Электронная обработка материалов*, **52**, 33–39.
- Vasyanovich, N.A., Tsurkin, V.N. (2016) Basic principles of ferroelectric synthesis of metal-intermetallic laminate Ti–Al₃Ti from foil package Al–Ti. *Electron. Obrabotka Materialov*, **52**, 33–39 [in Russian].
- Куркин С.Э. (2016) Технология получения слоистого алюминий-титанового композита, упрочненного интерметаллидами. *Новая наука: теоретический и практический взгляд*, **5**, 192–196.
- Kurkin, S.E. (2016) Technology of production of layered aluminium-titanium composite material strengthened with intermetallics. *Novaya Nauka: Teoreticheskiy i Prakticheskiy Vzglyad*, **5**, 192–196 [in Russian].
- Hailiang Yu, Cheng Lu, A. Kiet Tieu et al. (2016) Annealing effect on microstructure and mechanical properties of Al/Ti/Al laminate sheets. *Materials Science & Engineering A*, **13**, 195–204.
- Gajanan P. Chaudhari, Viola Acoff (2009) Cold roll bonding of multi-layered bi-metal laminate composites. *Composites Science and Technology*, **10**, 1667–1675.
- Hailiang Yu, A. Kiet Tieu, Cheng Lu, Charlie Kong (2014) Abnormally high residual dislocation density in pure aluminium after Al/Ti/Al laminate annealing for seven days. *Philosophical Magazine Letters*, **11**, 732–740.
- Kaya I., Cora O.N., Acar D., Koc M. (2018) On the Formability of Ultrasonic Additive Manufactured Al–Ti Laminated Composites. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **49**, 5051–5064.
- Kaya I., Cora O.N., Koc M. (2019) Formability of Ultrasonically Additive Manufactured Ti–Al Thin Foil Laminates. *Materials*, **12**, 1–16.
- Sridharan N., Wolcott P., Dapino M., Babua S.S. (2016) Microstructure and texture evolution in aluminum and commercially pure titanium dissimilar welds fabricated using ultrasonic additive manufacturing. *Scripta Materialia*, **17**, 1–5.
- Wolcott P.J., Sridharan N., Babu S.S. et al. (2016) Characterisation of Al–Ti dissimilar material joints fabricated using ultrasonic additive manufacturing. *Science and Technology of Welding and Joining*, **2**, 114–123.
- Obielodan J.O., Stucker B.E., Martinez E. et al. (2011) Optimization of the shear strengths of ultrasonically consolidated Ti/Al 3003 dual-material structures. *Journal of Materials Processing Technology*, **211**, 988–995.
- Liang Qin, Hui Wang, Shengqiang Cui et al. (2017) Characterization and Formability of Titanium/Aluminum Laminate Composites Fabricated by Hot Pressing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **7**, 3579–3587.
- Краснов Е.И., Штейнберг А.С., Шавнев А.А., Березовский В.В. (2013) Исследование слоистого металлического композиционного материала системы Ti–TiAl₃. *Авиационный материалы и технологии*, **3**, 16–19.
- Krasnov, E.I., Shteinberg, A.S., Shavnev, A.A., Berезovsky, V.V. (2013) Examination of layered metallic composite materials of Ti–TiAl₃ system. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **3**, 16–19 [in Russian].
- Liang Qina, Minyu Fan, Xunzhong Guo, Jie Tao (2018) Plastic deformation behaviors of Ti–Al laminated composite fabricated by vacuum hot-pressing. *Vacuum*, **155**, 96–107.
- Minyu Fan, Joseph Domblesky, Kai Jin et al. (2016) Effect of original layer thicknesses on the interface bonding and mechanical properties of TiAl laminate composites. *Materials & Design*, **5**, 535–542.

24. Fan M., Luo Z., Fu Z. et al. (2018) Vacuum hot pressing and fatigue behaviors of Ti/Al laminate composites. *Vacuum*, **154**, 101–109.
25. Thiyaneshwaran N., Sivaprasad K., Ravisankar B. (2018) Nucleation and growth of TiAl₃ intermetallic phase in diffusion bonded Ti/Al Metal Intermetallic Laminate. *Scientific Reports*, **8**, 1–8.
26. Xu L., Cui Y.Y., Hao Y.L., Yang R. (2006) Growth of intermetallic layer in multi-laminated Ti/Al diffusion couples. *Materials Science and Engineering: A*, **435–436**, 638–647.
27. Shaoyuan Lyu, Yanbo Sun, Lei Ren et al. (2017) Simultaneously achieving high tensile strength and fracture toughness of Ti/Ti–Al multilayered composites. *Intermetallics*, **90**, 16–22.
28. Lazurenko D.V., Bataev I.A., Mali V.I. et al. (2016) Explosively welded multilayer Ti–Al composites: Structure and transformation during heat treatment. *Materials & Design*, **102**, 122–130.
29. Foadian F., Soltanieh M., Adeli M., Etminanbakhsh M. (2014) A study on the formation of intermetallics during the heat treatment of explosively welded Al–Ti multilayers. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, **45**, 1823–1832.
30. Foadian F., Soltanieh M., Adeli M., Etminanbakhsh M. (2014) The formation of TiAl₃ during heat treatment in explosively welded Ti–Al multilayers. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, **11**, 12–19.
31. Fronczek D.M., Wojewoda-Budka J., Chulist R. et al. (2016) Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing. *Materials and Design*, **91**, 80–89.

PECULIARITIES OF PRODUCING LAYERED METAL COMPOSITE MATERIALS ON ALUMINIUM BASE

Yu.V. Falchenko, L.V. Petrushinets, E.V. Polovetskii

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

Analysis of publications devoted to producing layered composite materials on aluminium base was performed. The methods of joining thin-foil materials were studied, which allow producing layered joints with different number of intermediate layers. It is shown that the main welding methods, allowing production of joints with a layered structure, are rolling, ultrasonic, explosion, and diffusion welding, and reaction sintering. Analysis of publications showed that the joining process can be conducted, both in vacuum and in air. Joining foil from titanium and aluminium in the welding modes below the aluminium melting temperature (660 °C) allows producing joints without intermetallic phase formation between the layers. In order to improve the strength of the produced composites, it is rational to apply during welding a technological operation in the form of current passing or post-weld heat treatment of layered composite materials that provides increase of reactivity between the aluminium and titanium layers and formation of intermetallic phase as the reaction product. 31 Ref., 7 Fig.

Keywords: metal layered composite materials, joining methods, joint zone, intermetallic phase

Надійшла до редакції 29.01.2020

ХІХ МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2020

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

24 - 27 листопада



ОРГАНІЗАТОР:

Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер: **ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНЖЕНЕРІВ**



Ексклюзивний медіа партнер: **ЖУРНАЛ ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА**

Технічний партнер:



Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ
Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр
www.tech-expo.com.ua