

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МІЦНІСТЬ БІМЕТАЛЕВОГО Al–Ti СТІЛЬНИКОВОГО ЗАПОВНЮВАЧА

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

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

Розглянуто вплив термічної обробки на міцність біметалевих алюміній-титанових стільникових конструкцій. Біметал алюміній–титан отримували дифузійним зварюванням в вакуумі з малолегованих сплавів алюмінію АД1 та титану ВТ1-0. Досліджено можливість точкового зварювання біметалевих стрічок шириною 12 мм для отримання стільникового заповнювача в різних поєднаннях шарів титану та алюмінію. Показано, що оптимальним є зварювання стрічок в комбінації Al/Ti + Al/Ti. При цьому середня міцність стільників на стиснення становить 41,1 МПа. Відпал біметалевих стільників проводили при температурах 600 та 700 °С. Час відпалу при 600 °С становив 60...1200 хв, при 700 °С – 10...30 хв. Встановлено, що відпал протягом 60 хв при 600 °С призводить до утворення в стику між шарами алюмінію та титану окремих осередків інтерметалідного прошарку товщиною до 1 мкм, що обумовлює підвищення міцності на стиснення стільникових зразків на 11,7 % у порівнянні з вихідним станом. Подальше зростання часу відпалу призводить до росту інтерметалідного прошарку в стику та зниження міцності на стиснення стільникових зразків. Показано, що стільникові зразки після відпалу протягом 60...600 хв при 600 °С при стисненні з максимальним рівнем деформації 50 % деформуються без руйнування місця зварювання та стінок біметалевого матеріалу. Збільшення часу відпалу призводить до окрихчення як місця зварювання, так і матеріалу в цілому. Бібліогр. 10, табл. 3, рис. 7.

Ключові слова: алюміній, титан, фольга, біметалеві з'єднання, дифузійне зварювання, відпал, інтерметалідний прошарок, міцність на стиснення

Тришарові алюмінієві панелі з стільниковим заповнювачем знайшли широке застосування в літако-, суднобудуванні, будівництві та інших галузях промисловості внаслідок своїх унікальних властивостей завдяки тому, що при відносно невеликій масі ці конструкції характеризуються високими значеннями міцності і жорсткості, крім того, вони мають хороші вібраційні і радіотехнічні характеристики, звуко- і теплоізоляційні властивості. Подібні конструкції можуть застосовуватися в якості силових елементів в крилі, фюзеляжі, підлозі, а також в якості теплозахисних елементів [1, 2].

Підвищення експлуатаційних характеристик стільникових панелей, а також збільшення стійкості заповнювача тришарової панелі можливе за рахунок застосування більш міцного матеріалу, наприклад, титану. Так, авторами роботи [3] було запропоновано між листами обшивки і поперечними ребрами з алюмінієвого сплаву встановити елементи коробчастого профілю з сплаву титану, які запобігають втраті стійкості під час зварювання. Коробчастий профіль в таких панелях виступає основним несучим конструктивним елементом, а листи алюмінієвого сплаву являють собою обшивку. Але з урахуванням того, що вага титану майже вдвічі більша за алюміній, то його використання призведе до суттєвого збільшення загальної ваги конструкції, що для авіакосмічної галузі є не бажаним.

Оптимальним варіантом між мінімальною вагою та максимальною міцністю стільникових кон-

струкцій, на нашу думку, є використання стільникового заповнювача, отриманого на основі біметалевих матеріалів. В роботі [4] була показана можливість отримання біметалу Al–Ti способом дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ).

На основі досліджень, наведених в роботі [5], можна зробити припущення, що використання шаруватих композиційних матеріалів (ШКМ), до яких можна віднести біметали на основі фольги, може значно покращити властивості стільникових конструкцій. Беручи до уваги можливість широкого регулювання структури та складу ШКМ на етапі утворення з'єднання, дослідження з виготовлення таких матеріалів із регульованим вмістом інтерметалідної фази в стику є досить актуальним.

Перспективність використання отриманого способом дифузійного зварювання в вакуумі біметалу алюміній–титан для виготовлення тришарових стільникових панелей, а також можливість їх експлуатації при підвищених температурах буде визначатися міцністю та інтенсивністю росту інтерметалідного прошарку в біметалі під час виготовлення стільникових конструкцій та їх експлуатації.

Метою даної роботи було дослідження впливу термічної обробки на міцність Al–Ti стільникового заповнювача.

Методики досліджень, матеріали та підготовка зразків. Для виготовлення стільникового

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

Федорчук В.Є. – <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>, Половецький Є.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8113-0434>

© Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, В.Є. Федорчук, Є.В. Половецький, 2021

Таблиця 1. Хімічний склад сплавів АД1 та ВТ1-0 [6], мас. %

Сплав	Al	Ti	Fe	Si	Mn	Cu	Mg	Zn	Сума домішок
АД1	Основа	0,15	0,3	0,3	0,025	0,02	0,05	0,1	–
ВТ1-0	–	Основа	0,025	0,10	–	–	–	–	0,30

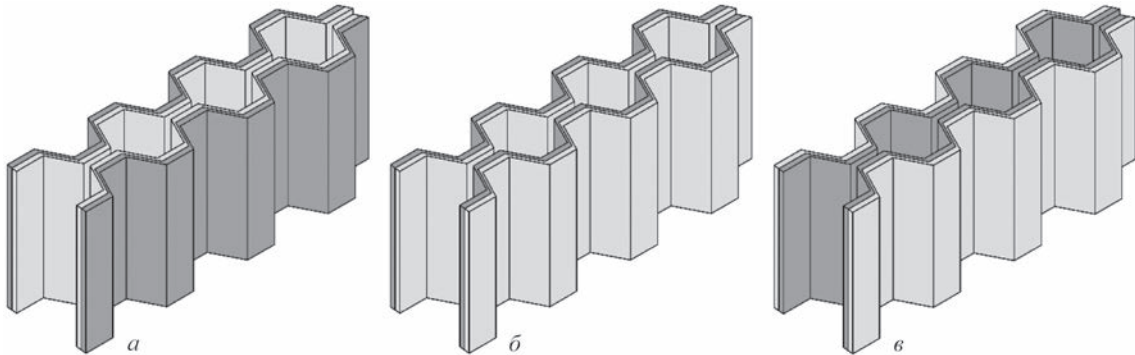


Рис. 1. Схематичне зображення можливих варіантів з'єднання двох гофрованих біметалевих стрічок Al–Ti: а – Ti/Al + Al/Ti; б – Al/Ti + Al/Ti; в – Al/Ti + Ti/Al

заповнювача застосовували біметалеві заготовки Al–Ti розміром 130×130×0,180 мм, які попередньо було отримано способом ДЗВ. В якості вихідних матеріалів використовували сплави алюмінію АД1 і титану ВТ1-0, склад яких наведено в табл. 1 [6]. З біметалевих листів виготовляли стрічки шириною 12 мм, з яких, в свою чергу, на спеціальному оснащенні було сформовано гофровані стрічки з кроком перегину 10 мм.

На відміну від однорідного матеріалу при точковому зварюванні біметалевих смуг можуть виникнути певні ускладнення, що обумовлені не тільки неоднорідністю матеріалу по товщині, але і різними фізико-механічними властивостями титану та алюмінію. Титан має низьку електро- і теплопровідність, дуже активний по відношенню до газів, що містяться в атмосфері. Його зварювання проводиться при відносно малих параметрах струму, зусиллі стиснення і тривалості нагрівання. Алюміній має високу теплопровідність, малий електричний опір і тугоплавку окисну плівку на поверхні. Тому поверхні деталей перед зварюванням необхідно ретельно обробляти для видалення товстої окисної плівки з метою запобігання несправів [7].

Для отримання якісних з'єднань з гофрованих стрічок та визначення оптимальної конфігурації шарів один відносно іншого проводили експерименти з трьох варіантів поєднання (рис. 1) зразків з біметалу:

Ti/Al + Al/Ti за рахунок приварювання алюмінієвого шару до алюмінієвого;

Al/Ti + Al/Ti за рахунок приварювання алюмінієвого шару до титанового;

Al/Ti + Ti/Al за рахунок приварювання титанового шару до титанового.

Точкове зварювання проводили при кімнатній температурі на повітрі. Перед зварюванням контактні поверхні гофрованих стрічок зачища-

ли механічним шляхом і знежирювали. Зварювання проводили при постійних значеннях напруги $U_{зв} = 3$ В та струму $I_{зв} = 270...300$ А, інтенсивність нагріву при цьому визначалась тривалістю імпульсу $t_{зв} = 0,5...5,0$ с і їх кількістю $N_{зв} = 1...20$.

Дослідження впливу термічної обробки на формування прошарку інтерметаліду між титаном та алюмінієм проводили при нормальних умовах на спеціально розробленому стенді, що являв собою муфельну піч і систему контролю температури, яка складалася з термоконтролеру REX C-100, твердотільного реле SSR-40 DA і хромель-алюмелевої термопари (рис. 2). Зразок розміщували в середині печі на керамічній підставці. Параметри термообробки задавали в наступних діапазонах: температура $T_{відп} = 600...700$ °С, тривалість витримки $t_{відп} = 10...1200$ хв.

Аналіз структурних характеристик фольги і зварних з'єднань виконували на шліфах за допомогою скануючого електронного мікроскопу CAMSCAN 4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу EDX INCA 200 для локального хімічного складу на плоских зразках.

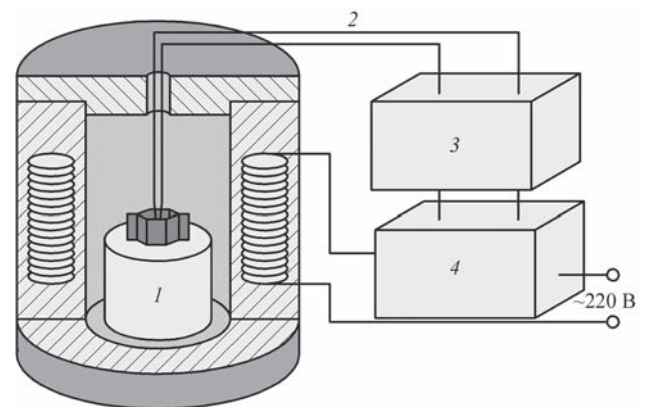


Рис. 2. Схема пристосування для термічної обробки зразків: 1 – керамічна підставка; 2 – термопара; 3 – термоконтролер REX C-100; 4 – твердотільне реле SSR-40 DA

Підготовку шліфів поперечного перерізу зварних з'єднань проводили за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального устаткування фірми Struers.

Дослідження механічних властивостей зразків визначали при випробуванні їх на стискання, що відповідає методиці, наведеній в роботах [1, 8].

Для проведення механічних випробувань стільникової конструкції на стискання використовували цифровий контролер тиску фірми «KOLI» марки ХК3118Т1 і датчик тиску фірми «CAS» марки MNC-1 з робочим інтервалом від 0 до 1000 кг.

Результати досліджень. Для отримання стільникової конструкції заповнювача було розроблено технологію зварювання біметалевих профільованих стрічок. Встановлено, що для отримання з'єднань зразків біметалу при приварюванні алюмінієвого шару до алюмінієвого (Ti/Al+Al/Ti), достатньо використання циклу зварювання з 2-х імпульсів струму тривалістю $t_{зв} = 3$ с. Для отримання заповнювача при контакті алюмінієвого та титанового шару (Ti/Al+Ti/Al) кількість імпульсів зростає до 4-х, а тривалість залишається сталою $t_{зв} = 3$ с. Для отримання заповнювача при контакті титанового шару з титановим (Al/Ti+Ti/Al) тривалість імпульсів зростає до $t_{зв} = 5$ с, а їх кількість збільшується до 20-ти, при цьому спостерігається надмірний перегрів під електродами прошарку із алюмінію з його витіканням з зони з'єднання. Мікроструктура з'єднань приведена на рис. 3.

На основі аналізу режимів зварювання стільникових заповнювачів можна зробити висновок, що найменш енерго- та трудомістким є варіант приварювання алюмінієвого шару до алюмінієвого.

Проте, з урахуванням того, що при виготовленні стільникового заповнювача виникає необхідність контакту шарів алюмінію та титану, то оптимальним варіантом є приварювання алюмінієвого шару до титанового.

Для оцінки міцності зразків одиничних стільників проводили їх випробування на стиснення (рис. 4, а). Осадку стільників задавали на рівні 50 % від вихідної висоти. Встановлено, що у випадку поєднання шарів металу Ti/Al + Al/Ti і Ti/Al + Ti/Al (рис. 4, б), при стисненні відбувається деформування стінок стільникового заповнювача без руйнування місць точкового зварювання, а у випадку поєднання шарів Al/Ti + Ti/Al (рис. 4, в) спостерігається відшарування між шарами титану. Середня міцність з'єднань при поєднанні біметалу Ti/Al + Al/Ti і Ti/Al + Ti/Al близька за значенням і становить 44,5 та 41,1 МПа відповідно. Поєднання Al/Ti + Ti/Al призводить до падіння середнього значення міцності до 35,2 МПа і руйнування з'єднань (табл. 2). Можливо причиною падіння міцності є окислення поверхонь титану в процесі зварювання та формування в стику значної кількості дефектів (рис. 3, в).

Для дослідження особливостей росту прошарку інтерметаліду між шарами титану та алюмінію в процесі термічної обробки проводили нагрівання біметалевих з'єднань Al–Ti до температур 600 та 700 °С. Аналіз мікроструктури біметалу Al–Ti показав, що під час нагрівання відбувається утворення та ріст прошарку інтерметаліду, збільшення товщини якого передусім залежить від температури та тривалості термічної обробки (табл. 3).

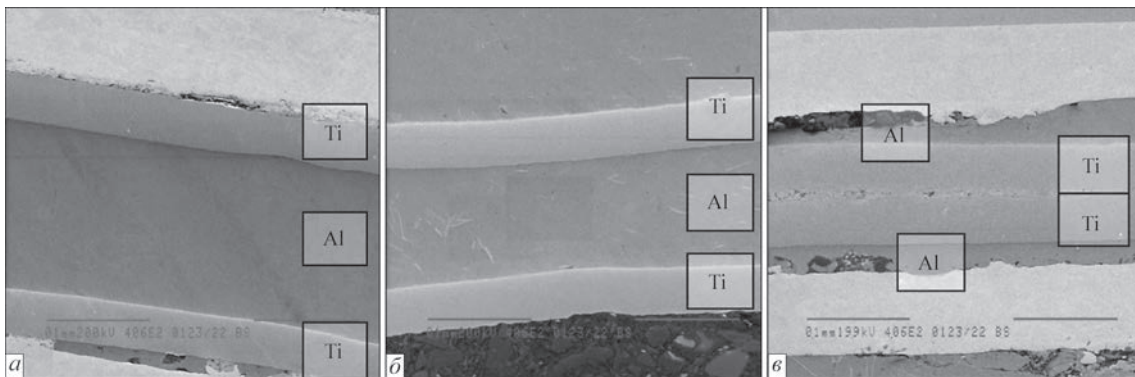


Рис. 3. Мікроструктура точкових з'єднань біметалевої фольги Al–Ti: а – Ti/Al + Al/Ti; б – Ti/Al + Ti/Al; в – Al/Ti + Ti/Al



Рис. 4. Загальний вигляд зразків одиничних стільників до механічних випробувань на стискання (а) та після (б, в)

Таблиця 2. Результати випробувань біметалевих зразків стільникового заповнювача на стиснення

Поєднання поверхонь біметалевих стрічок	Випробування зразків	Міцність на стиснення, МПа	Середнє значення міцності на стиснення, МПа
Ti/Al + Al/Ti	Без руйнування	42,1	44,5
	-"-	54,1	
	-"-	37,4	
Ti/Al + Ti/Al	-"-	40,3	41,1
	-"-	38,5	
	-"-	44,6	
Al/Ti + Ti/Al	З руйнуванням	38,2	35,2
	-"-	32,2	
	-"-	35,1	

Таблиця 3. Залежність товщини інтерметалідного прошарку та міцності біметалу Al-Ti від режиму термічної обробки

Зразок	Температура нагрівання зразка $T_{відп.}, ^\circ\text{C}$	Тривалість витримки зразка, хв	Середні	
			товщина прошарку інтерметаліду, мкм	міцність на стиснення, МПа
1	—	—	—	41,1
2	600	60	—	45,9
3	600	150	2	39,9
4	600	300	4	35,6
5	600	600	10	32,4
6	600	1200	11	29,8
7	700	10	4	33,3
8	700	30	14	27,2

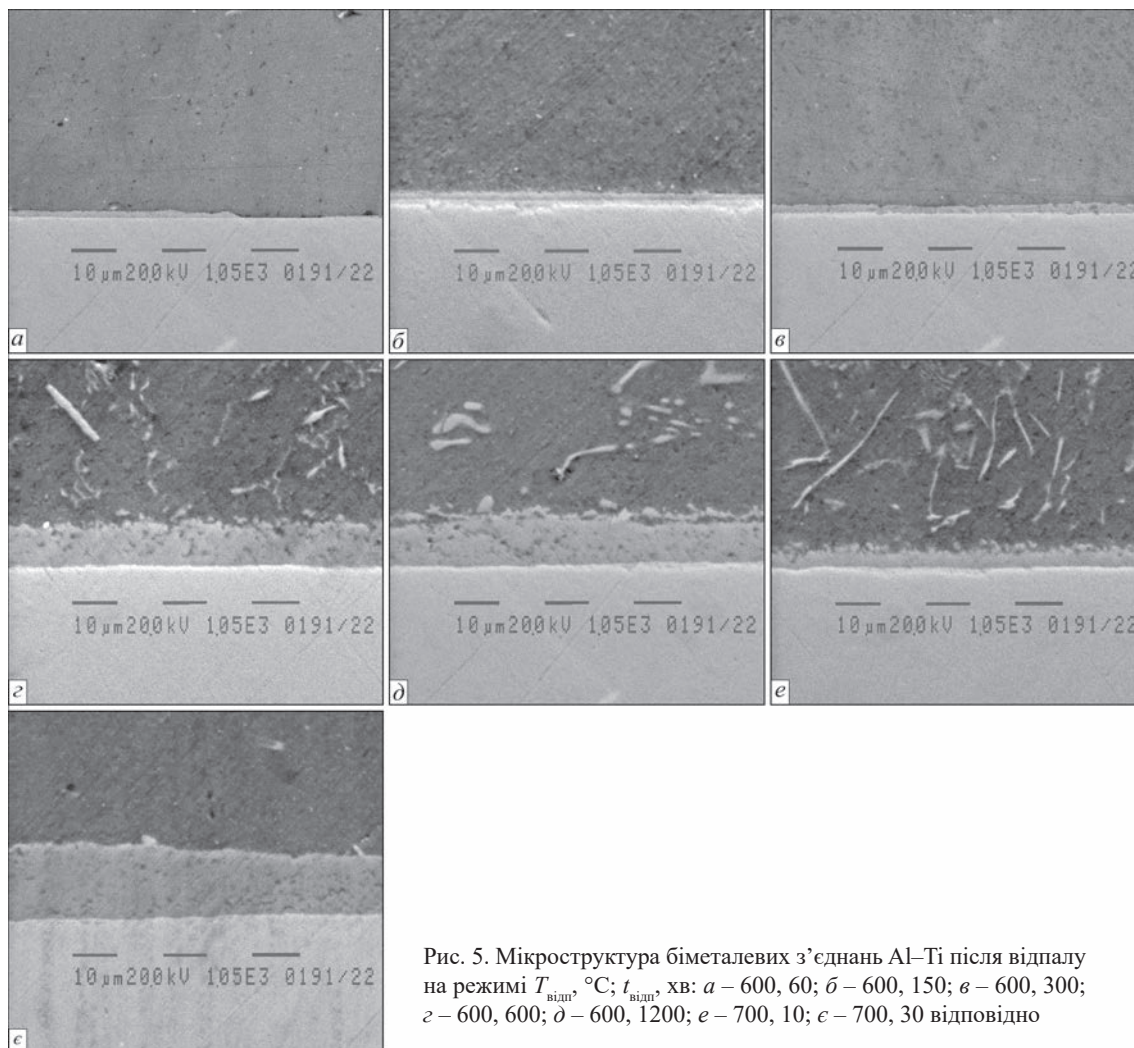


Рис. 5. Мікроструктура біметалевих з'єднань Al-Ti після відпалу на режимі $T_{відп.}, ^\circ\text{C}$; $t_{відп.}, \text{хв}$: а – 600, 60; б – 600, 150; в – 600, 300; г – 600, 600; д – 600, 1200; е – 700, 10; є – 700, 30 відповідно

У структурі біметалевої фольги Al–Ti після дифузійного зварювання інтерметалідний прошарок не ідентифікується [9]. Дослідження впливу термічної обробки показали, що витримка при температурі 600 °C протягом 60 хв не призводить до утворення суцільного інтерметалідного прошарку (рис. 5, а), але в зоні з'єднання алюмінію з титаном спостерігається утворення окремих ділянок інтерметалідів товщиною до 1 мкм. При збільшенні тривалості відпалу до 150 хв на границі алюміній/титан спостерігається утворення та ріст суцільного інтерметалідного прошарку товщиною до 2 мкм (рис. 5, б). Подальше збільшення тривалості відпалу до 300 хв призводить до росту товщини інтерметалідного прошарку до 4 мкм, що вдвічі більше за попередній результат (рис. 5, в). Проведення термообробки протягом 600 хв призводить до утворення інтерметалідного прошарку товщиною біля 10 мкм (рис. 5, г). Збільшення часу витримки при температурі 600 °C до 1200 хв впливає на товщину інтерметалідного прошарку вже несуттєво. Середня товщина інтерметалідного шару становить 11 мкм (рис. 5, д).

Хімічний аналіз, проведений за допомогою скануючого електронного мікроскопу, показав, що інтерметалідні прошарки мають наступний склад, мас. %: 55,58...58,93 Al та 41,07...44,42 Ti. Відповідно до подвійної діаграми Al–Ti цей склад відповідає сплаву на основі суміші інтерметалідів Al_2Ti та Al_3Ti .

Залежність товщини інтерметалідного прошарку від тривалості відпалу при 600 °C наведено на рис. 6.

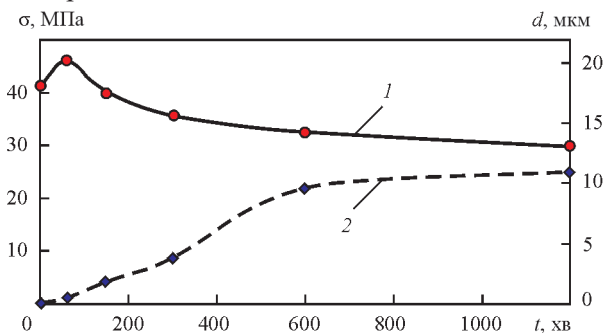


Рис. 6. Залежність міцності на стиснення σ (1) і товщини d (2) інтерметалідного прошарку від тривалості відпалу зразків при температурі 600 °C



Рис. 7. Загальний вигляд зразків одиничних стільників після відпалу та механічних випробувань на стиснення, $T_{\text{відп.}}$, °C; $t_{\text{відп.}}$, хв: а – 600, 150; б – 600, 600; в – 600, 1200

Збільшення температури витримки до 700 °C призводить до прискорення росту інтерметалідних прошарків (табл. 3, рис. 5, е, є).

Визначення міцності зразків після термообробки проводили на одиничних стільниках (рис. 3, а). Було встановлено, що після відпалу протягом 60 хв при 600 °C відбувається підвищення міцності на стиснення стільникових зразків на 11,7 % у порівнянні з вихідним станом (45,9 проти 41,1 МПа) (табл. 3, рис. 6). Таке підвищення міцності може бути пов'язано з утворенням окремих осередків інтерметалідної фази в зоні з'єднання титану з алюмінієм. Відпал зразків протягом 150 хв, згідно з результатами металографічних досліджень, призводить до утворення в стику тонкого шару інтерметаліду (~2 мкм), наявність якого неістотно впливає на несучу спроможність стільника, а міцність залишається майже на рівні вихідних значень (39,9 МПа). Подальше збільшення часу витримки до 1200 хв при 600 °C негативно впливає на міцність, значення якої знижуються до 29,8 МПа. Причиною цього є нерівномірність росту та дефектність шару інтерметаліду, що можна пов'язати зі зміною механізму його утворення [10], а також інтенсивною перекристалізацією алюмінію.

Підвищення температури термічної обробки до 700 °C призводить до значного падіння міцності внаслідок деградації структури шару алюмінію (табл. 3).

Аналіз стільників після проведення механічних досліджень показує, що при стисненні зразків, відпалених при 600 °C протягом 300 хв включно, відбувається деформування стінок стільникового заповнювача з утворенням окремих тріщин без руйнування місць точкового зварювання (рис. 7, а). Збільшення тривалості термообробки до 600 хв призводить до часткового руйнування матеріалу стільників і місць точкового зварювання (рис. 7, б). Після витримки при 600 °C протягом 1200 хв матеріал стільників розпадається на окремі елементи (рис. 7, в).

Таким чином, отримані результати досліджень, проведені на зразках, які складаються з одиничного стільника, свідчать, що використання біметалевого Al–Ti заповнювача у порівнянні з алюмінієвим дозволяє вчетверо підняти його міцність на стиснення з 9,8 до 41,1 МПа відповідно.

Висновки

1. Досліджено можливість точкового зварювання біметалевих стрічок для отримання стільникового заповнювача з різним поєднанням шарів титану та алюмінію. Показано, що оптимальним є зварювання стрічок, що відповідає з'єднанню Al/Ti + Al/Ti, середня міцність якого становить 41,1 МПа.

2. Показано, що відпал стільникового заповнювача при температурі 600 °С протягом 60 хв призводить до утворення в стику між шарами алюмінію та титану окремих часток інтерметалідної фази розміром до 1 мкм, що обумовлює підвищення міцності на стиснення зразків на 11,7 % у порівнянні з вихідним станом.

3. Подальше зростання часу відпалу з 60 до 1200 хв призводить до утворення і росту інтерметалідного прошарку в стику та зниження міцності на стиснення стільникових зразків.

4. Показано, що зразки стільникового заповнювача після відпалу при 600 °С протягом 60...600 хв при стисненні з максимальним рівнем деформації 50 % деформуються без руйнування місця зварювання та стінок біметалевого матеріалу. Збільшення часу відпалу призводить до окричення як місць зварювання, так і матеріалу стільників в цілому.

5. Використання біметалевого стільникового заповнювача у порівнянні з алюмінієвим дозволяє вчетверо підняти його міцність на стиснення з 9,8 до 41,1 МПа.

Список літератури/References

1. Bitzer, T. (1997) *Honeycomb Technology. Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing*. Springer-Science+Business Media Dordrecht.

2. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. (1991) *Конструкции с наполнителем. Справочник*. Москва, Машиностроение.
Panin, V.F., Gladkov, Yu.A. (1991) *Structures with filler: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

3. Башурин А.В., Мاستихин Е.Ю., Колмыков В.И. (2010) Диффузионная сварка пустотелых биметаллических панелей. *Заготовительное производство в машиностроении*, 1, 13–15.
Bashurin, A.V., Mastikhin, E.Yu., Kolmykov, V.I. (2010) Diffusion welding of hollow bimetal panels. *Zagotov. Proizvodstvo v Mashinostroyenii*, 1, 13–15 [in Russian].

4. Falchenko, Ju.V., Petrushynets, L.V., Polovetskii, E.V. (2020) Peculiarities of producing Al–Ti bimetal sheet joints by the method of vacuum diffusion welding. *The Paton Welding J.*, 8, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.08.04>.

5. 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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(00\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(00)00077-2).

6. Карпачев Д.Г., Доронькин Е.Д., Цукерман С.А. и др. (2001) *Цветные металлы и сплавы*. Справочник. Нижний Новгород, Вента-2.
Karpachev, D.G., Doronkin, E.D., Tsukerman, S.A. et al. (2001) *Nonferrous metals and alloys*: Refer. book. Nizhny Novgorod, Venta-2 [in Russian].

7. Васильев К.В., Вилль В.И., Волченко В.Н. и др. (1978) *Сварка в машиностроении*. Справочник в 4-х т. Т.1. Москва, Машиностроение.
Vasiliev, K.V., Vill, V.I., Volchenko, V.N. et al. (1978) *Welding in mechanical engineering*: Refer. book. In: 4 Vol., Vol. 1. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

8. Seemann, R. (2020) *A Virtual Testing Approach for Honeycomb Sandwich Panel Joints in Aircraft Interior*, Springer Vieweg.

9. Falchenko, Ju.V., Petrushynets, L.V., Polovetskyi, Ye.V. (2020) Peculiarities of producing Al–Ti bimetal sheet joints by the method of vacuum diffusion welding. *The Paton Welding J.*, 8, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.08.04>.

10. Falchenko, Ju.V., Petrushynets, L.V., Polovetskii, E.V. (2020) Peculiarities of producing layered metal composite materials on aluminium base. *The Paton Welding J.*, 4, 9–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.04.02>.

INVESTIGATION OF HEAT TREATMENT EFFECT ON THE STRENGTH OF Al–Ti BIMETAL HONEYCOMB CORE

Yu.V. Falchenko, L.V. Petrushynets, V.Ye. Fedorchuk, Ye.V. Polovetskiy

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

The effect of heat treatment on the strength of aluminium-titanium bimetal honeycomb structures is considered. Aluminium-titanium bimetal was produced by vacuum diffusion welding of strips of AD1 aluminium and VT1-0 titanium low alloys. The possibility of spot welding of bimetal strips 12 mm wide for producing the honeycomb core was studied with different combinations of titanium and aluminium layers. It is shown that the optimal method is welding the strips in Al/Ti + Al/Ti combination. Here, the average compressive strength of the honeycomb is equal to 41.1 MPa. Annealing of bimetal honeycombs was performed at temperatures of 600 °C and 700 °C. Annealing time at 600 °C was 60...1200 min., at 700 °C it was 10...30 min. It is found that annealing for 60 min. at 600 °C leads to formation of individual sites of an intermetallic interlayer up to 1 ~m thick in the butt joint between the aluminium and titanium layers that that results in increase of compressive strength of the honeycomb samples by 11,7 %, compared to the initial condition. Further increase of annealing time leads to growth of the intermetallic interlayer in the butt joint and to lowering of the compressive strength of the honeycomb samples. It is shown that the honeycomb samples after annealing for 60...600 min at 600 °C at compression with the maximum deformation level of 50 % deform without fracture of the welding site or bimetal material walls. Increase of annealing time leads to embrittlement of both the welding sites, and the material as a whole. 10 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Keywords: aluminium, titanium, foil, bimetal joints, diffusion welding, annealing, intermetallic interlayer, compressive strength

Надійшла до редакції 22.03.2021