



Warstwowe kompozyty Ti/Al/Ti otrzymane metodą dyfuzyjnego łączenia

Layered composites of Al-Ti alloy fabricated by diffusion bonding

(1) Piotr Bednarczyk, (2) Stefan Szczepanik*, (3) Piotr Nikiel

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Katedra Plastycznej Przeróbki Metali, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 23.06.2016

Recenzja: 28.09.2016

Akceptacja: 31.03.2017

Wkład autorów

- (1) Wykonanie kompozytów, przeprowadzenie badań własności mechanicznych i opracowanie wyników, redakcja manuskryptu
- (2) Koncepcja badań, opracowanie parametrów wytwarzania kompozytów, analiza wyników, redakcja manuskryptu
- (3) Wykonanie kompozytów, przeprowadzenie badań mikrostruktury

Streszczenie

Aluminium często jest używane do projektowania kompozytów warstwowych. Stosowane są wyroby z aluminium w postaci blach, czy też w postaci materiału typu „plaster miodu”. Do wytwarzania płaskich wyrobów warstwowych stosuje się między innymi procesy przeróbki plastycznej, metodę wybuchowego łączenia lub klejenie lekkiego rdzenia z wytrzymałą i sztywną metaliczną okładziną. Rdzeń takiego materiału jest wykonywany w postaci materiałów spienionych o strukturze porowatej lub materiałów typu plaster miodu. Okładziny wykonuje się natomiast ze stopów metali lekkich takich, jak aluminium i tytan. Całkowicie metaliczna konstrukcja może być osiągnięta poprzez zgrzewanie dyfuzyjne, ale uzyskuje się wówczas zwiększenie jej masy. W artykule przedstawiono wyniki badań możliwości zastosowania dyfuzyjnego łączenia do wytwarzania kompozytu warstwowego stop tytanu – proszek aluminium – stop tytanu w procesie prasowania na gorąco. Prasowanie realizowano w trzech etapach. Do wytworzenia kompozytu użyto blachy tytanowej ze stopu Ti6Al4V o grubości 1 mm oraz proszku aluminium, o wielkości cząstek mniejszej od 250 μm . Proces prasowania prowadzono w temperaturze 450°C, stosując nacisk prasowania 80 MPa. Podczas tego procesu otrzymano warstwę przejściową o grubości od 4 do 8 μm . Po trzecim prasowaniu osiągnięto zadawalającą wartość wytrzymałości na zginanie kompozytu wynoszącą 890 MPa, niewiele niższą od granicy plastyczności stopu Ti6Al4V, przy wytrzymałości na ścinanie połączenia 51 MPa. Problem dyfuzyjnego łączenia w warstwie przejściowej jest związany z utlenianiem aluminium i zmianą kształtu zagęszczonego podczas prasowania na gorąco proszku aluminium.

Słowa kluczowe: dyfuzyjne łączenie, prasowanie na gorąco, kompozyty Ti/Al/Ti, kompozyty sandwich

Article info

Received: 23.06.2016

Reviewed: 28.09.2016

Accepted: 31.03.2017

Authors' contribution

- (1) Composites, mechanical properties' testing and test results description, manuscript preparation
- (2) Concept of research, description of composites' parameters, test results analysis, manuscript preparation

Abstract

Aluminium is frequently used to designing of a layered composites, as a sheet or honeycomb components. Layered, flat composites are fabricated using metal forming processes and explosive bonding, or adhesive bonding of light core with strong and rigid metallic facings. The cores of these materials are often made from porous, foamed structure or honeycomb. Facings are fabricated from light metal alloys, like aluminium and titanium. An all metal construction can be achieved by diffusion bonding, with a weight penalty. Feasibility of fabrication of composites by hot pressing, up to three applications, of a titanium alloy – aluminium powder – titanium alloy sandwich beams by diffusion bonding was demonstrated. Ti6Al4V sheet with thickness 1mm and aluminium powder with particle size less than 250 μm were used: temperature 450°C, compression stress 80 MPa. A continuous interfacial layer with thickness from 4 to 8 μm was produced. After third pressing, 51 MPa shear strength was attained with the flexural stress, 890 MPa, slightly below the yield stress of Ti6Al4V. Problems of bonding of an in the

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 12 617 38 46; e-mail: szczepan@metal.agh.edu.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 12 617 38 46; e-mail: szczepan@metal.agh.edu.pl

(3) *Composites, microstructure testing*

interfacial zone are associated with oxidation of aluminium and shape change of the being densified aluminium powder during hot pressing.

Keywords: *diffusion bonding, hot pressing, composites Ti/Al/Ti, sandwich composite*

1. WSTĘP

W kompozytach warstwowych aluminium często stosowane jest jako materiał w postaci „plaster miodu”, który połączono poprzez klejenie z wytrzymałą i sztywną metaliczną okładziną [1]. Całkowicie metaliczna konstrukcja może być osiągnięta poprzez zgrzewanie dyfuzyjne, ale uzyskuje się wówczas zwiększenie jej masy. Rozwiązaniem alternatywnym może być zastosowanie proszku, który poprzez prasowanie na gorąco ulegnie spiekaniu oraz częściowemu zagęszczeniu, przy jednoczesnym wytworzeniu dyfuzyjnego połączenia z metalową okładziną kompozytu. Masa konstrukcji wówczas się zmniejszy, a zachowana zostanie lepsza odporność korozyjna i temperaturowa. W badaniach jako okładzinę zastosowano blachę ze stopu Ti6Al4V. Problemem, który wymaga zbadania jest wytworzenie dyfuzyjnego połączenia pomiędzy blachą z Ti6Al4V a proszkiem aluminium. Połączenie to utrudnione jest przez utlenienie aluminium oraz zmniejszenie wysokości rdzenia kompozytu podczas prasowania. W warstwie przejściowej możliwe jest także utworzenie wydzieleni faz γ -TiAl i α_2 -Ti₃Al [2, 3]. Dlatego zastosowane ciśnienie i temperatura podczas procesu łączenia muszą zostać zoptymalizowane. Według wiedzy autorów nie realizowano dotychczas badań na temat łączenia proszku aluminium i stopu tytanu. W pracy [4] przedstawiono proces dyfuzyjnego łączenia litego stopu aluminium 7075 i czystego tytanu. Rajakumar i Balasubramanian [4] przeprowadzili test ścinania próbek łączonych na zakładkę dla kompozytów prasowanych w temperaturze 510°C z naciskiem prasowania 17 MPa i czasem oddziaływania nacisku 37 minut. Dla warstwy przejściowej o grubości 7 μm otrzymano największą wartość wytrzymałości na ścinanie 87 MPa, przy twardości 163 HV.

Celem tej pracy jest uzyskanie w kompozycie stop tytanu – proszek aluminium – stop tytanu naprężeń w warstwie okładziny odpowiadających wytrzymałości stopu Ti6Al4V. Moż-

1. INTRODUCTION

Aluminium in sandwich structures is frequently used as a honeycomb glued to the high strength and modulus metallic faces [1]. An all metal construction can be achieved by diffusion bonding, with a considerable weight penalty. A compromise can be attained by using powder, which by hot pressing will be sintered, partly densified and simultaneously diffusion bonded to the faces. Thus the weight penalty will be reduced and superior corrosion and temperature resistance retained. The face material for this study was Ti6Al4V sheet. A problem to be investigated therefore is Ti6Al4V sheet-Al powder diffusion bonding, hindered by oxidation, especially of the aluminium powder, and shrinkage of the core during pressing. It is possible also to precipitate intermetallic phases, γ -TiAl and α_2 -Ti₃Al, in the interfacial layer [2, 3]. Pressure and temperature of the bonding process have to be optimised. To the authors' knowledge bonding of Al powder to titanium alloy has not been previously investigated, but there are some reports of solid Al 7075 and pure titanium diffusion bonding [4]. Rajakumar and Balasubramanian [4] performed lap shear tests and reported that the best bonds were fabricated with the bonding temperature of 510°C, bonding pressure of 17 MPa, and holding time of 37 min. These yielded maximum shear strength of 87 MPa, hardness of 163 HV, and interface layer thickness of 7 μm , respectively.

In our investigation the aim was naturally to attain in the faces of the Ti alloy-Al powder - Ti alloy sandwich the yield strength of Ti6Al4V. Possible preceding failure sites were the partly sin-

liwymi miejscami inicjacji pęknięć w tym materiale jest częściowo zagęszczony aluminiowy rdzeń, warstwa przejściowa oraz połączenie między warstwą przejściową a aluminiowym rdzeniem i blachą tytanową. W badaniach materiału dla przedstawionego przypadku zwrócono uwagę głównie na wytrzymałość połączenia na ścinanie, a mniejszą na własności mechaniczne i masę warstwowych belek Ti6Al4V-Al-Ti6Al4V.

2. PRZEBIEG BADAŃ

Do wytworzenia materiałów kompozytowych użyto blachy Ti6Al4V o grubości 1 mm i składzie chemicznym zgodnym z normą ASTM 265 oraz proszku aluminium R-Al1 o składzie według PN-79/H-82163 i wielkości cząstek nie przekraczającej 250 μm . Blacha tytanowa stanowiła warstwy zewnętrzne kompozytu, natomiast proszek aluminium zastosowano jako rdzeń. Dyfuzyjne łączenie przeprowadzono w procesie prasowania na prasie hydraulicznej ZD 100. Przed prasowaniem blacha tytanowa została przeszlifowana i odtłuszczona. Proszek aluminium został ręcznie zasypyany pomiędzy warstwy blachy tytanowej. Wytwarzanie kompozytów realizowano przy przyjętych parametrach:

- temperatura prasowania 450°C,
- jednostkowy nacisk prasowania 80 MPa,
- czas oddziaływania nacisku 12 minut.

Próbki po prasowaniu umieszczono w piecu, a następnie studzono wraz z nim od temperatury 400°C celem minimalizacji naprężeń cieplnych występujących w materiale.

Badania metalograficzne przeprowadzono na mikroskopie świetlnym Leica DM4000M oraz na skaningowym mikroskopie elektronowym HITACHI S-3500N. Próbki trawiono odczynnikami Wecka o składzie 100 ml wody destylowanej, 4 g KMnO_4 i 1 g NaOH. Dokonano pomiaru grubości warstwy przejściowej widocznej na granicy między blachą tytanową i aluminiowym rdzeniem oraz przeprowadzono liniową analizę składu chemicznego warstwy przejściowej między składnikami kompozytu metodą mikroanalizy rentgenowskiej EDS, na aparatu-

tered Al core, the Al-interfacial layer interface, the interfacial layer itself and the interfacial layer-Ti alloy interface. In the feasibility study now reported attention was paid to shear strength of the bond, rather than the weight and mechanical properties of the Ti6Al4V-Al-Ti6Al4V sandwich beams.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURES

Ti6Al4V sheet, with thickness 1 mm, and chemical composition according to norm ASTM 265, and aluminum powder with chemical composition according to PN-79/H-82163 and particle size less than 250 μm were the starting materials. Composite structure was an external layer of titanium sheet and core from aluminum powder. Titanium sheet was ground and degreased before pressing. Aluminum powder was manually put between the alloy sheets. Diffusion bonding was realized by pressing on hydraulic press ZD 100. Composite fabrication was carried out with parameters:

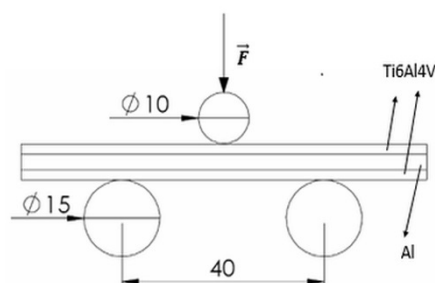
- *pressing temperature range 450°C,*
- *compression stress 80 MPa,*
- *time of pressing 12 minutes.*

After pressing specimens were put in a furnace, and cooled from 400°C to mitigate a temperature stress effect.

Metallographic studies were carried on a light microscope Leica DM4000M and a scanning electron microscope HITACHI S-3500N. Specimens were etched by Weck's reagent with composition of 100 ml distilled water, 4 g KMnO_4 and 1 g NaOH. Thickness of transient layer between titanium sheet and aluminum core was measured on microstructural images. Linear EDS microanalysis for chemical composition was conducted on a HITACHI S-3500N instrument

rze HITACHI S-3500N z przystawką analizującą EDS NORAN 986B-1SPS. Pomiaru dokonano na przekroju wzdłużnym próbek.

Połączenie i wytrzymałość na zginanie wytworzonego kompozytu badano poprzez trójpunktową próbę zginania, na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 1196. Przygotowano prostopadłościenną próbkę o długości 80 mm i stosunku szerokości do wysokości (w zależności od wysokości otrzymanego kompozytu) 2:1. Schemat narzędzia do zginania pokazano na rys. 1. Zginanie realizowano z prędkością 1 mm/min, a rozstaw pomiędzy podporami wynosił 40 mm.



Rys. 1. Schemat urządzenia do próby trójpunktowego zginania

Fig. 1. Diagram of the device for three-point bending test

Podczas trójpunktowego zginania dokonano pomiaru zmiany siły w zależności od przemieszczenia trawersy. Obliczenia własności kompozytu, wartość maksymalnego naprężenia na powierzchni okładziny tytanowej σ_f oraz wartość wytrzymałości na ścinanie w warstwie połączenia τ_c wykonano zgodnie z analizą materiałów typu sandwich [5, 6]. Do obliczeń wykorzystano wartość $E=114$ GPa dla Ti6Al4V, a dla aluminium $E=70$ GPa. Strzałkę ugięcia, będącą sumą odkształcenia związanego ze zginaniem jak i ścinaniem warstw kompozytu, określono za pomocą formuły:

$$\delta = \delta_b + \delta_s = \frac{Pl^3}{48(EI)_{eq}} + \frac{Pl}{4(AG)_{eq}} \quad (1)$$

gdzie δ_b – składowa zginania, δ_s – składowa ścinania, P – siła, l – odległość między podporami, $EI_{(eq)}$ – zastępczy moduł sztywności związany ze zginaniem, $AG_{(eq)}$ – zastępczy moduł sztywności związany ze ścinaniem. Ze względu na niskie własności wytrzymałościowe połączenia po pierwszym prasowaniu próbki poddano drugiemu i trzeciemu prasowaniu, a następnie prze-

with an analyser NORAN 986B-1SPS. Measurements were taken on longitudinal sections of specimens.

Joint and flexural strengths in the fabricated composites were tested by the three-point bending test on an universal tester INSTRON 1196, using rectangular beam specimens. Specimen length was 80 mm, and the ratio width-height (depending on composite thickness) was 2:1. Fig. 1 shows the scheme of tools for the bending test. Bending was carried with speed 1 mm/min and the span was 40 mm.

Force vs. ram displacement was measured during three-point bending test and maximal titanium facing stress σ_f and shear strength in the joint zone τ_c were calculated according to standard sandwich beam theory [5, 6]. For calculation Young's modulus of Ti6Al4V 114 GPa and for aluminium 70 GPa were used, respectively. Deflection, as the sum of the deformation associated with bending and shear of the composite layers was determined by the formula:

$$\delta = \delta_b + \delta_s = \frac{Pl^3}{48(EI)_{eq}} + \frac{Pl}{4(AG)_{eq}} \quad (1)$$

where δ_b – bending component, δ_s – shear component, P – force, l – span length, $EI_{(eq)}$ – equivalent flexural rigidity, $AG_{(eq)}$ – equivalent shear rigidity. In view of the relative low strength of the bond after initial pressing, second and third pressing procedures were carried out and flexural testing subsequently carried out. Before pres-

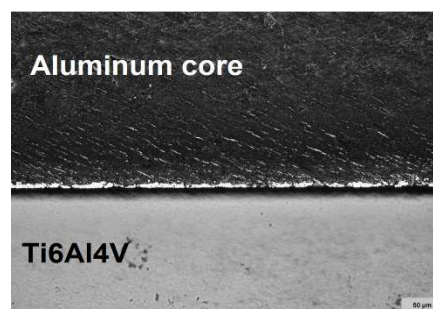
prowadzono analizę zginania. Przed prasowaniem próbki docięto na wymiar 60x40 mm, aby umożliwić swobodne płynięcie warstwy aluminium. Kolejne procesy prasowania realizowano w temperaturze 430°C z naciskiem jednostkowym prasowania 140 MPa.

Pomiar mikrotwardości metodą Vickersa przeprowadzono na twardościomierzu ZWICK 3212002 z siłą 4,905 N. Dla każdej próbki wykonano 8 odcisków, z losowo wybranych miejsc na przekroju wzdłużnym próbki, a następnie obliczono wartość średnią.

3. WYNIKI

W wyniku prasowania uzyskano kompozyty o wymiarach 60x80 mm i grubości około 7,4 mm. Średnia gęstość wytworzonych materiałów przez prasowanie przy temperaturze 450°C z naciskiem jednostkowym 80 MPa przez 12 minut wynosiła 2,97 g/cm³, natomiast gęstość rdzenia wykonanego z proszku 2.34 g/cm³. Udział objętościowy poszczególnych komponentów kompozytu wynosił 27% Ti6Al4V i 73% aluminium.

Na rys. 2 przedstawiono mikrostrukturę warstwy połączenia dla prasowanej próbki. Wyraźnie widoczna jest nietrawiąca się, ciągła biała warstwa przejściowa. Grubość powstałej w wyniku pierwszego prasowania warstwy wynosi od 4 do 8 μm. Dopiero analiza struktury połączenia próbki na skaningowym mikroskopie elektronowym ujawnia pewne pęknięcia (rys. 3a i 3b). Pęknięcia ułożone są głównie prostopadle do powierzchni łączenia, a tylko niewielka ich część skierowana jest pod kątem około 45°. Ich wielkość wynosi mniej niż 2 μm.



Rys. 2. Mikrostruktura warstwy połączenia po pierwszym prasowaniu, powiększenie 200x

Fig. 2. Microstructure of joint after first pressing, magnification 200x

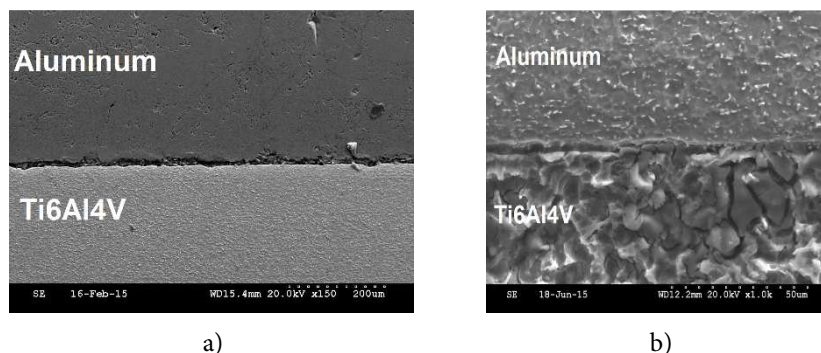
ing the specimen were cut to dimension 60x40 mm, to allow free lateral flow of the aluminium layer. Additional pressings were realized at 430°C, with compression stress 140 MPa.

Microhardness test using Vickers intender was carried out with force 4.905 N, on a ZWICK 3212002 tester. For every composite sample 8 indentations were made, on a random area, on the longitudinal section of the specimen. Mean values were calculated.

3. RESULTS

Composites with thickness 7.4 mm and dimension 60x80 mm were fabricated at temperature 450°C, compression stress 80 MPa, and pressing time 12 minutes. The mean composite density was 2.97 g/cm³, with core density 2.34 g/cm³. The volume fraction of composite components were 27% Ti6Al4V and 73% aluminium.

Fig. 2 shows an unetched joint microstructure. A white interfacial layer is clearly seen, with a thickness of 4 to 8 μm, continuous along all joint length. Only on a scanning electron microscope, at 1000x magnification, some cracks in joints are observed (Fig. 3a and 3b), not detected on a light microscope. Cracks were mostly perpendicular to the joining surface, and only a small part at an angle of approximately 45°. Their size is less than 2 μm.

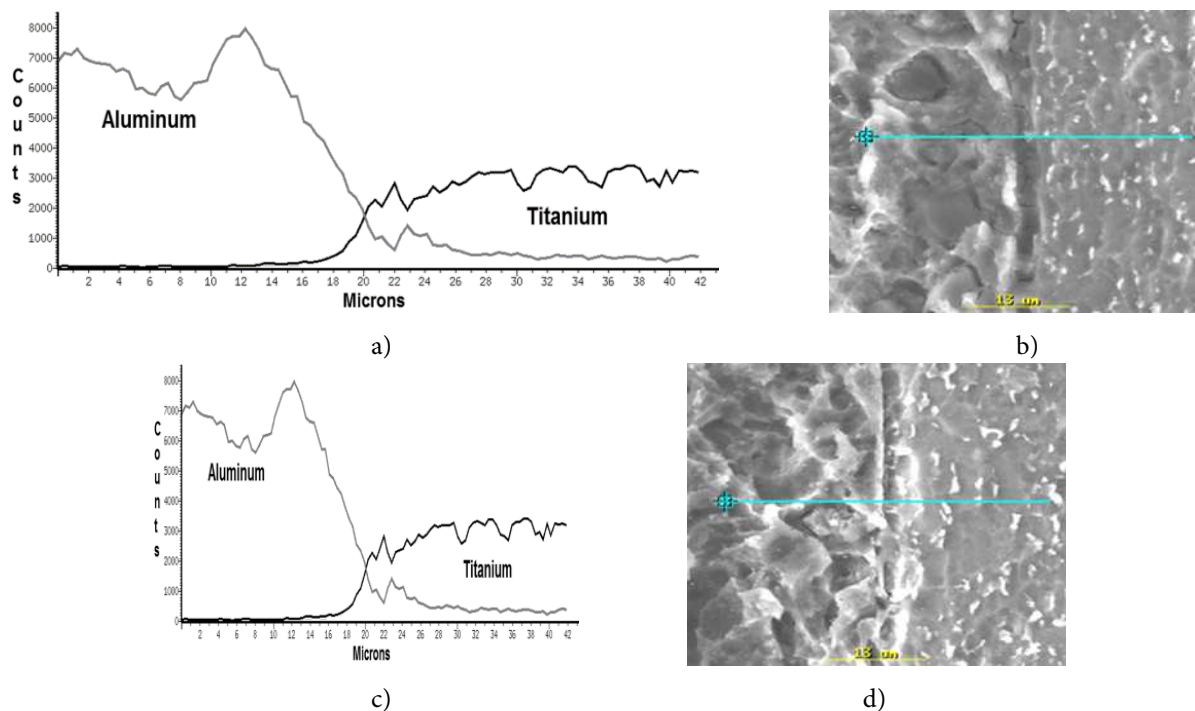


Rys. 3. Struktura próbki po pierwszym prasowaniu (450°C, 80 MPa) obserwowana na skaningowym mikroskopie elektronowym: a) powiększenie 150x b) powiększenie 1000x

Fig. 3. SEM structure of specimen after first pressing (450°C, 80 MPa):
a) magnification 150x b) magnification 1000x

Na rys. 4 przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy EDS. Wyniki wskazują, że na badanym obszarze mogą występować fazy międzymetaliczne układu Ti-Al. Grubość tej warstwy wynosi od 4 do 8 mikrometrów, co jest zgodne z wartościami otrzymanymi w badaniach metalograficznych na mikroskopie świetlnym.

Fig. 4 shows the results of EDS analysis indicating that intermetallic phases from Ti-Al phase diagram can exist in joints area. Thickness of observed layer is from 4 to 8 microns, which is similar to the layer thickness measured in light microscopic studies.



Rys. 4. Liniowa analiza EDS: a), c) wyniki, b), d) zaznaczone obszary badania

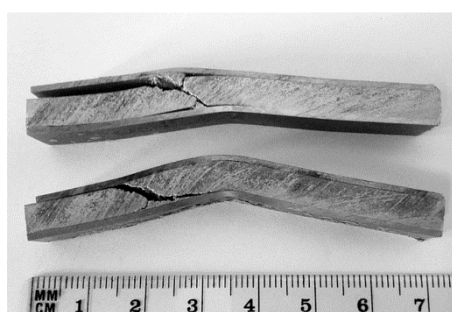
Fig. 4. Linear EDS analysis: a), c) results, b), d) marked area of analysis

Identyfikacja jakościowa tego obszaru wymaga wykonania dodatkowych badań metodą dyfraktometrii rentgenowskiej.

Quality recognition of this area requires additional survey, based on X-ray diffraction.

Twardość warstwy tytanowej po procesie prasowania wynosi 341 HV0.5 w stosunku do twardości 350 HV0.5 w stanie dostawy, natomiast twardość aluminium 20 HV0.5. W trakcie próby trójpunktowego zginania dla próbek po pierwszym prasowaniu odklejenie warstwy tytanowej nastąpiło dla naprężenia ścinającego τ_c 21 MPa, przy strzałce ugięcia 0.1 mm. Osiągnięta wartość 421 MPa dla naprężenia zginającego jest znacznie niższa od granicy plastyczności dla Ti6Al4V. Dodatkowo w warstwie aluminiowej widoczne są liczne pęknięcia, nachylone pod kątem ok. 45° do powierzchni połączenia (rys. 5).

Hardness of titanium layer after pressing was 341 HV0.5, in comparison with 350 HV0.5 for the material in the initial state, and for aluminum it was 20 HV0.5, respectively. Three point bending test on initially pressed sandwich beams showed debonding at shear stress τ_c of 21 MPa, with a deflection of 0.1 mm. The flexural stress reached, 421 MPa, was well below the yield stress of Ti6Al4V. Additionally many cracks, at angle of 45° to the joint surface, were observed in the aluminium core (Fig. 5).



Rys. 5. Próbkę po próbie zginania

Fig. 5. Specimens after bending test

Dodatkowe procesy prasowania wywołały wzrost gęstości rdzenia, i tym samym zmianie ulega geometria próbek, poprzez zmniejszenie wysokości rdzenia kompozytu. Jest to niekorzystne z punktu widzenia projektowania kompozytów typu *sandwich*. Wysokość rdzenia po pierwszym prasowaniu wynosi 5,4 mm, po drugim 3,6 mm a po trzecim 2,1 mm (tab. 1). Grubość warstwy przejściowej wynosi odpowiednio 14 μm po drugim prasowaniu i 20 μm po trzecim prasowaniu.

Additional pressing induced an increase in the core density and thus changed the specimens' geometry, reducing of the core height, which is disadvantageous for sandwich composite design. The core height after initial pressing was 5.4 mm, after second pressing 3.6 mm, and after third pressing 2.1 mm (Tab. 1). The thickness of the interfacial layer increased to 14 and 20 μm for the second and third pressing, respectively.

Tab. 1 Wysokość rdzenia, gęstość wytworzonych kompozytów i udział objętościowy komponentów
Tab. 1. Core height and density of fabricated composites, with volume fraction of composite components

Próbka Specimen	Udział objętościowy komponentów kompozytu [%] Volume fraction of composite components [%]	Wysokość rdzenia [mm] Core thickness [mm]	Gęstość teoretyczna kompozytu [g/cm^3] Composite theoretical density [g/cm^3]	Gęstość rdzenia [g/cm^3] Core density [g/cm^3]
Po pierwszym prasowaniu After initial pressing	Ti6Al4V: 27 Al core: 73	5,4	2,97	2,34
Po drugim prasowaniu After first pressing	Ti6Al4V: 36 Al core: 64	3,6	3,29	2,59

Próbka <i>Specimen</i>	Udział objętościowy komponentów kompozytu [%] <i>Volume fraction of composite components [%]</i>	Wysokość rdzenia [mm] <i>Core thickness [mm]</i>	Gęstość teoretyczna kompozytu [g/cm ³] <i>Composite theoretical density [g/cm³]</i>	Gęstość rdzenia [g/cm ³] <i>Core density [g/cm³]</i>
Po trzecim prasowaniu <i>After third pressing</i>	Ti6Al4V: 49 Al core: 51	2,1	3,54	2,66

Dodatkowe prasowanie miało pozytywny wpływ na własności mechaniczne połączenia, wzrosła wartość naprężenia zginającego i wytrzymałości na ścinanie, przy której odklejeniu ulega warstwa tytanowa (tab. 2). Naprężenie zginające jest jednak nawet po trzecim prasowaniu nieznacznie mniejsze od oczekiwanej wartości 960 MPa dla Ti6Al4V.

Additional pressing had the desired effect on the joint mechanical properties: flexural stress and shear strength at which the titanium layer is debonding increased (Tab. 2). The flexural stress in the Ti alloy, however, was still somewhat smaller, even after the third pressing, than value expected for Ti6Al4V: 960 MPa.

Tab. 2. Wyniki próby zginania

Tab. 2. Bending results

Próbka <i>Specimen</i>	Strzałka ugięcia <i>Deflection [mm]</i>	$(EI)_{eq}$ [N*m ²]	σ_f [MPa] (okładzina / skin)	Max τ_c [MPa] (połączenie / interface)
Po pierwszym prasowaniu <i>After initial pressing</i>	0,1	35,54	421	21
Po drugim prasowaniu <i>After second pressing</i>	0,2	21,86	696	40
Po trzecim prasowaniu <i>After third pressing</i>	0,32	8,44	892	51

Po trzecim prasowaniu twardość warstwy tytanowej wynosi 318 HV0.5, a aluminium 49 HV0.5. Znaczny wzrost twardości warstwy aluminiowej jest efektem jej dogęszczenia oraz częściowego odkształcenia plastycznego. Wyniki pomiaru twardości przedstawiono w tab. 3.

After the third pressing hardness of titanium layer was 318 HV0.5, and 49 HV0.5 for aluminium, respectively. Significant growth in aluminium hardness is the effect of densification and partial plastic deformation of core. Tab. 3 shows hardness measurement results.

Tab. 3. Wyniki pomiaru mikrotwardości

Tab. 3. Results of microhardness measurements

Próbka / <i>Specimen</i>	Komponent / <i>Element</i>	HV0,5
Po pierwszym prasowaniu <i>After initial pressing</i>	Ti6Al4V sheet	341
	Aluminum core	20
Po trzecim prasowaniu <i>After third pressing</i>	Ti6Al4V sheet	318
	Aluminum core	49

4. DYSKUSJA

Prasowanie materiałów Ti6Al4V-Al-Ti6Al4V ukazało wiele problemów technologicznych zwią-

4. DISCUSSION

Hot pressing of Ti6Al4V-Al powder-Ti6Al4V sandwich beams showed many technological prob-

zanych z procesem dyfuzyjnego łączenia. Są one związane z obecnością tlenków na powierzchni cząstek aluminium oraz mikrostrukturalnymi wadami powstałymi w procesie łączenia, prawdopodobnie wywołanymi skurczem proszku aluminium w trakcie prasowania. Nawet po trzecim prasowaniu wytrzymałość na zginanie jest o 7% mniejsza niż granica plastyczności stopu tytanu, przy wytrzymałości na ścinanie połączenia 51 MPa. Wartość ta jest porównywalna do wytrzymałości połączeń klejonych [5, 6], ale nadal nieco mniejsza niż 87 MPa uzyskane dla połączenia czysty tytan – lity stop Al, określonego w próbie ścinania [4].

5. WNIOSKI

Wyniki badań przedstawiają liczne problemy związane z wytworzoną warstwą przejściową, które wymagają rozwiązania przed udanym zastosowaniem kompozytu stop tytanu – proszek aluminium – stop tytanu jako element konstrukcyjny. Kompozyty *sandwich* wytworzone poprzez dyfuzyjne łączenie/prasowanie na gorąco (przeprowadzone w trzech operacjach, które wiążą się z poprawą wytrzymałości na ścinanie i zginanie) nie uzyskały pełnych własności wytrzymałościowych okładziny wykonanej z Ti6Al4V. Po trzecim prasowaniu na gorąco zbliżono się do granicy plastyczności tytanu 960 MPa, przy otrzymaniu wytrzymałości połączenia na ścinanie 51 MPa, która to wartość jest porównywalna ze stosowanymi klejami, ale niższa niż wytrzymałość dla połączenia czysty tytan – lity stop aluminium.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały zrealizowane w ramach badań statutowych na AGH nr 11.11.110.292 w roku 2016.

LITERATURA

- [1] National Research Council Committee on Benchmarking the Technology and Application of Lightweighting. 2012. *Application of Lightweighting Techno-*

lems associated with the diffusion bonding process. These are related to oxide present on the aluminium particles and microstructural defects produced in the bonding layer, possibly caused by shrinkage of the aluminium powder during pressing. Even after the third pressing the flexural strength was some 7% less than the yield stress of the titanium alloy with joint shear strength being 51 MPa. This value is comparable to those of engineering adhesives [5, 6], but still well below 87 MPa reported for pure Ti-solid Al alloy, determined by shear testing [4].

5. CONCLUSIONS

The feasibility study has identified numerous problems, mainly connected with the interfacial zone, which need resolution before a successful application of Ti alloy-Al powder-Ti alloy as a construction member. The sandwich beams manufactured by diffusion bonding/hot pressing (up to three operations, resulting in increasing flexural stress and shear strength) failed to make full use of the strength of Ti6Al4V facing sheets. After 3 hot pressings the yield strength of the Ti alloy was nearly attained, 960 MPa, with the shear strength of the bond, 51 MPa, being comparable to those of construction adhesives, but still below that of pure Ti-solid Al.

ACKNOWLEDGEMENTS

Research was realized as a part of AGH Statutory Work Program 11.11.110.292 in 2016.

REFERENCES

- [1] National Research Council Committee on Benchmarking the Technology and Application of Lightweighting. 2012. *Application of Lightweighting Techno-*

- logy to Military Aircraft, Vessels and Vehicles*. Washington D.C., USA: The National Academies Press.
- [2] Li T., F. Jiang. 2007. „Damage evolution in Ti6Al4V-Al₃Ti metal-intermetallic laminate composites”. *Materials Science and Engineering A* 443: 1–15.
- [3] Price R., F. Jiang, R.M. Kulin, K.S. Vecchio. 2011. „Effects of ductile phase volume fraction on the mechanical properties of Ti–Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites materials”. *Materials Science and Engineering A* 528: 3134–3146.
- [4] Rajakumar S., V. Balasubramanian. 2016. „Diffusion bonding of titanium and AA 7075 aluminum alloy dissimilar joints—process modeling and optimization using desirability approach”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86: 1095–1112.
- [5] Davies J.M. 2001. *Lightweight sandwich construction*. United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd.
- [6] Gibson L.J., M.F. Ashby. 1999. *Cellular solids: structures and properties*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- logy to Military Aircraft, Vessels and Vehicles*. Washington D.C., USA: The National Academies Press.
- [2] Li T., F. Jiang. 2007. „Damage evolution in Ti6Al4V-Al₃Ti metal-intermetallic laminate composites”. *Materials Science and Engineering A* 443: 1–15.
- [3] Price R., F. Jiang, R.M. Kulin, K.S. Vecchio. 2011. „Effects of ductile phase volume fraction on the mechanical properties of Ti–Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites materials”. *Materials Science and Engineering A* 528: 3134–3146.
- [4] Rajakumar S., V. Balasubramanian. 2016. „Diffusion bonding of titanium and AA 7075 aluminum alloy dissimilar joints—process modeling and optimization using desirability approach”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86: 1095–1112.
- [5] Davies J.M. 2001. *Lightweight sandwich construction*. United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd.
- [6] Gibson L.J., M.F. Ashby. 1999. *Cellular solids: structures and properties*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.