

# Ocena mikrotwardości oraz własności wytrzymałościowych trimetalu AA2519-AA1050-Ti6Al4V po różnych obróbkach cieplnych

Evaluation of microhardness and strength properties of trimetallic composite AA2519-AA1050-Ti6Al4V after various heat treatments

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań trimetalu AA2519-AA1050-Ti6Al4V połączonego metodą zgrzewania wybuchowego. Określono charakterystykę gięcia blach z trimetalu w stanie surowym, po wyżarzaniu w temperaturze 530 °C przez 120 minut, oraz po wyżarzaniu z dodatkowym starzeniem w 165 °C przez 600 minut. Dla otrzymanych w taki sposób próbek przeprowadzono próby gięcia zgodnie z ASTM E-290-14 oraz analizę zmian mikrotwardości w złączu platerowanym. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowane obróbki cieplne zwiększają, w różnym stopniu, wytrzymałość trimetalu oraz twardość poszczególnych jego warstw. Największy wzrost wytrzymałości jak i mikrotwardości uzyskano po wyżarzaniu z dodatkowym starzeniem.

**Słowa kluczowe:** zgrzewanie wybuchowe; próba gięcia; Ti6Al4V; AA2519

## Abstract

The article presents results of tests of the trimetallic joint AA2519-AA1050-Ti6Al4V performed by explosive welding. Shown characteristics of bending of trimetal in a raw state, after annealing at 530 °C for 120 minutes and annealing with additionally aging at 165 °C for 600 minutes. For the obtained specimens were performed bending tests acc. to ASTM E-290-14 and analysis of microhardness changes in the joint. Performed studies shown that the applied heat treatments increases, in varying degrees, strength and microhardness of each layer of trimetal. The largest increase of strength and microhardness was obtained after annealing with additional aging.

**Keywords:** explosive welding; bend test; Ti6Al4V; AA2519

## Wstęp

Zgrzewanie wybuchowe jest metodą pozwalającą na łączenie materiałów o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych takich jak gęstość, temperatura topnienia, aktywność chemiczna, dla których inne metody spajania nie znajdują zastosowania [1,2]. Wysokoenergetyczny proces łączenia wprowadza do struktury nowego, wielowarstwowego materiału niekorzystne naprężenia i umocnienie, co negatywnie wpływa na właściwości użytkowe i ogranicza możliwości jego dalszego kształtowania metodami przeróbki plastycznej, czy obróbki ubytkowej [3]. W celu poprawienia własności wytrzymałościowych oraz skrawalności zaleca się wykonanie obróbek cieplnych. W przypadku połączenia trimetalu: stop aluminium 2519 + aluminium 1050 + stop tytanu Ti6Al4V, istotnym jest dobór parametrów obróbki cieplnej, takich jak temperatura wyżarzania oraz prędkość chłodzenia. Ze względu na specyfikę platerów wymagane jest, aby temperatura obróbki cieplnej takich wielowarstwowych konglomeratów była niższa niż temperatura przejścia w stan ciekły warstwy o najniższej temperaturze topnienia.

Analizowany w tym artykule trimetal ma znaleźć swoje zastosowanie jako materiał na wysokowytrzymałe a jednocześnie lekkie osłony w przemyśle lotniczym, wojskowym, bądź w aeronautyce. Proces technologiczny ich wytwarzania wymaga dopasowania formatów blach do szkieletu konstrukcji. W tym celu najczęściej stosuje się przeróbkę plastyczną, głównie tłoczenie, oraz wiercenie otworów pod śruby, czy nity. Głównym problemem technologicznym jest słaba plastyczność stopu aluminium 2519 [4], przez co mogą występować problemy z formowaniem tego typu trimetalu. Ponadto mała wytrzymałość tego stopu, w porównaniu ze stopem tytanu Ti6Al4V, dodatkowo negatywnie wpływa na wypadkową wytrzymałość plateru. Z tego też powodu zaproponowano zastosowanie obróbek cieplnych, które mają wpłynąć na poprawę wytrzymałościowych charakterystyk trimetalu.

## Techniki badawcze

### Materiał do badań

W ramach realizowanych badań wytworzono metodą wysokoenergetyczną trójwarstwowy plater składający się

Mgr inż. Michał Najwer; dr hab. inż. Piotr Niesłony – Politechnika Opolska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: [michal1656@gazeta.pl](mailto:michal1656@gazeta.pl)

**Tablica I.** Własności mechaniczne łączonych materiałów  
**Table I.** Mechanical properties of joined materials

Material	$R_m$ , MPa	$R_{p0,2}$ , MPa	A, %
AA2519	430	355	15
AA1050	125	85	12
AA1050	860	758	10

**Tablica II.** Własności mechaniczne łączonych materiałów  
**Table II.** Mechanical properties of joined materials

Próbka	Nagrzewanie	Wyżarzanie		Chłodzenie
		Temp., °C	Czas, min	
RM	Bez obróbki cieplnej			
HT1	Wsad materiału do pieca nagranego do temperatury 530 °C	530	120	Woda
HT2				Woda*

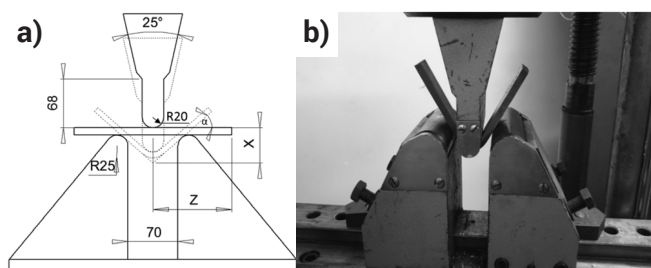
\* dodatkowe starzenie w temperaturze 165°C przez 600 minut.

z materiału podstawowego będącego blachą ze stopu tytanu Ti6Al4V o grubości 5 mm, z międzywarstwy technologicznej z aluminium AA1050 o grubości 1 mm oraz materiału nakładanego ze stopu aluminium AA2519 o grubości 5 mm.

Własności mechaniczne poszczególnych warstw zostały przedstawione w tabeli I. Materiały zostały połączone w jednym akcie strzałowym, a przeprowadzone ultradźwiękowe badanie ciągłości złącza wykazało 95% połączenia zgrzewanych blach. Z wykonanego elementu wycięto próbki o wymiarach 210 x 24 x 11 mm, które poddano zaplanowanym obróbkom cieplnym. Parametry obróbek cieplnych wraz z oznaczeniami próbek zostały przedstawione w tabeli II.

### Technologiczna próba gięcia

Technologiczną próbę gięcia prowadzono na maszynie wytrzymałościowej zgodnie z ASTM E-290-14 [5], przy użyciu specjalnego trzpienia o wymiarach jak na rysunku 1a. Schemat stanowiska do próby gięcia wraz z zdjęciem stanowiska rzeczywistego został przedstawiony na rysunku 1. Badania prowadzono z sześcioma powtórzeniami, przy założeniu rozciągania warstwy tytanowej. Miało to na celu zasymulowanie formowania takich platerów np. metodą tłoczenia.



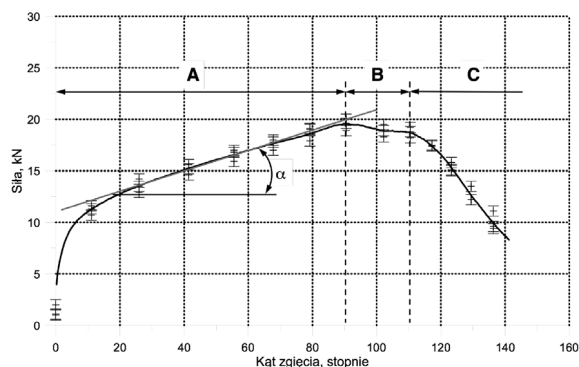
**Rys. 1.** Technologiczna próba gięcia: a) schemat stanowiska wraz z charakterystycznymi wymiarami technologicznymi [5], b) zdjęcie rzeczywistego stanowiska podczas próby gięcia

**Fig. 1.** Bend test: a) scheme of test-position with characteristic dimensions [5], b) picture of test-position during bend test

### Wyniki eksperymentu

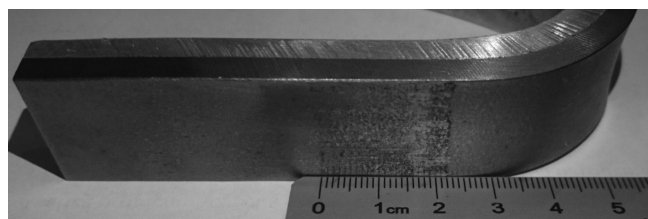
Podczas technologicznych prób gięcia z ścisną warstwą ze stopu aluminium mierzono, w trybie „in-process”, siłę gięcia oraz przemieszczenie penetratora. Na tej podstawie możliwe było wyliczenie aktualnego kąta wygięcia próbki.

Przykładowy wykres przebiegu tak zdefiniowanej próby gięcia dla próbek z trimetalu w stanie surowym (RM) przedstawiono na rysunku 2. Powtarzalność uzyskanych wyników pomiaru jest bardzo dobra, co można zaobserwować na wykresie analizując wybrane punkty pomiarowe. Sam proces gięcia można podzielić na trzy strefy. W strefie A, po ustabilizowaniu się układu, wyraźnie zaobserwowano monotoniczny, jednostajny wzrost siły gięcia w funkcji kąta wygięcia próbki. Strefa B charakteryzuje się pewnymi fluktuacjami siły gięcia, co może być związane z przewężeniem warstwy rozciąganego materiału oraz rozpoczęciem procesu przeginania próbki i jej włączaniem ślizgowym w oprzyrządowanie testowe. Ostatnia strefa C jednoznacznie związana jest z wyginaniem próbki włączając ślizgowo pomiędzy szczęki oprzyrządowania. Wyraźnie widoczny efekt strefy poślizgu przedstawiono na rysunku 3.



**Rys. 2.** Zmiana siły gięcia w funkcji kąta zgięcia badanych elementów dla próbek bez obróbki cieplnej RM

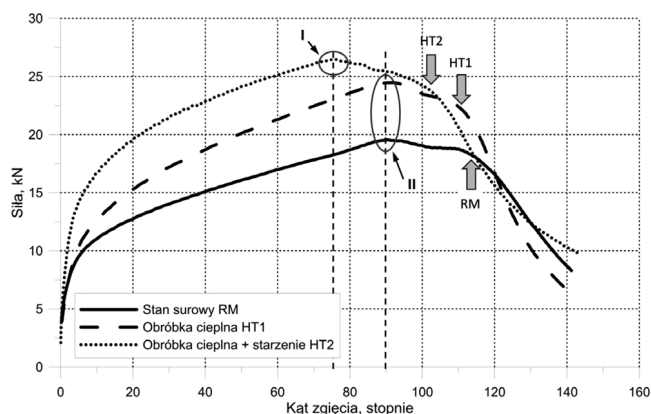
**Fig. 2.** Change of bend force as a function of bend angle for specimens without heat treatment RM



**Rys. 3.** Efekt strefy poślizgu zaobserwowany na zewnętrznej wyginanej warstwie trimetalu (stop tytanu)

**Fig. 3.** The effect of sliding area observed on the external, bended layer of trimetal (titanium alloy)

Wpływ obróbki cieplnej na wytrzymałość badanych blach z trimetalu przedstawiono na rysunku 4.

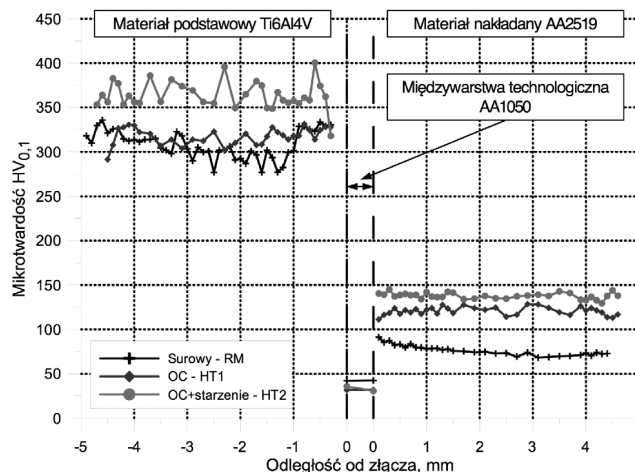


Rys. 4. Wpływ obróbki cieplnej na zmiany siły gięcia w funkcji kąta gięcia badanych próbek

Fig. 4. Influence of heat treatment on change of bend force as a function of bend angle for all specimens

Próbki RM (rys. 4) wykazywały najmniejszą podatnością na zginanie. Znaczący wzrost wytrzymałości obserwowano dla próbek HT1 oraz HT2. Dla średniego kąta zgięcia 60° przyrost siły wynosił odpowiednio 4,5kN (26%) i 8kN (47%). Obróbka cieplna wpłynęła również na skrócenie strefy A ocenianych przebiegów (obszaru o monotonicznym wzroście siły gięcia). Zgodnie z oczekiwaniami wzrost wytrzymałości koreluje z skróceniem tego obszaru, co w analizowanym przypadku jest wyraźnie widoczne dla próbki HT2 (rysunek 4 – punkt I), gdzie koniec strefy A uzyskano dla około 78° kąta gięcia w przeciwieństwie dla próbek RM i HT1 (rysunek 4 – punkt II), dla których parametr ten jest mniej wrzählivy, a wartość końca obszaru A plasowała się przy około 90° kąta gięcia. Skrócenie obszaru A pociągnęło za sobą odpowiednie przemieszczenie końca strefy B, co przedstawiono na rysunku 4 za pomocą znaczników strzałkowych. Dodatkowo, w celu oceny wytrzymałości na zginanie w stabilnym obszarze gięcia, wyliczono poszczególne gradienty przyrostu siły w funkcji kąta gięcia. Najmniejszym gradientem równym 100 N/stopień charakteryzowały się próbki RM.

Zastosowanie parametrów obróbki cieplnej, jak dla próbki HT1, spowodowało wzrost gradientu do wartości 130 N/stopień, a najwyższe wartości 133 N/stopień uzyskano dla HT2. Ma to istotne znaczenie przy projektowaniu technologii kształtowania i obróbki takich materiałów. Wiedza ta pozwala na zaprojektowanie w odpowiedniej kolejności etapów kształtowania takich platerów, aby obrabiać plastycznie blachy w podatne na kształtowanie (próbka RM) a procesy obróbki cieplnej (głównie jak dla próbek HT2) prowadzić przed obróbką skrawaniem.



Rys. 5. Wpływ obróbki cieplnej na zmiany mikrotwierdzości w badanych próbkach

Fig. 5. Influence of heat treatment on change of microhardness for all specimens

Potwierdzeniem uzyskanych informacji o wytrzymałości na zginanie blach po różnej obróbce cieplnej jest rysunek 5, gdzie przedstawiono rozkład mikrotwierdzości HV0.1 w przekroju poprzecznym dla poszczególnych typów próbek. Wyraźnie zaobserwowano, że dla próbki HT2 mikrotwierdzość zarówno w warstwie stopu tytanu jak i aluminium wzrosła w odniesieniu do próbek RM. Starzenie spowodowało dosyć istotny wzrost twardości dla Ti6Al4V, co jest ciekawym efektem możliwym do wykorzystania przy konstruowaniu lekkich i wysokowytrzymałych jak i twardych elementów maszyn.

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych można zdefiniować następujące spostrzeżenia:

- zaproponowane warunki obróbki cieplnej wpływają w znaczący sposób na wytrzymałość na zginanie i twardość poszczególnych warstw badanego trimetalu;
- najwyższą wytrzymałość na zginanie jak i odpowiednią twardość uzyskano dla obróbki cieplnej HT2 skojarzonej ze starzeniem;
- możliwe jest wykorzystanie posiadanej wiedzy w celu odpowiedniego zaprojektowanie kolejności etapów kształtowania takich platerów, co pozwala na zarówno kształtowanie plastyczne tych blach jak i uzyskanie żądanej, podwyższonej wytrzymałości i twardości bez narażania się na zniszczenia mogące być skutkiem odkształceń związanych z prowadzonymi procesami wytwórczymi.

*Badania zostały przeprowadzone w ramach Programu Badań Stosowanych NCBiR dla projektu numer PBS2/A5/35/2016 zatytułowanego: „Nowe zaawansowane materiały warstwowe Al-Ti o podwyższonej odporności balistycznej na konstrukcje lotnicze i kosmiczne”, realizacja 2013-2016.*

## Literatura

- [1] Walczak W.: Zgrzewanie wybuchowe metali i jego zastosowanie. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1989.
- [2] Dya H., Maranda A., Trąbiński R.: Zastosowanie technologii wybuchowych w inżynierii materiałowej. Politechnika Częstochowska – Wydawnictwo. Częstochowa 2001.
- [3] Pocica A., Bański R., Waindok P., Szulc Z., Gałka A.: Wpływ czasu obróbki cieplnej na własności bimetalu tytan-stal, XVI Międzynarodowa Konferencja „Spawanie w energetyce”. Opole-Jarnołtówek 23-25 kwietnia 2008, Opole 2008.
- [4] Dobrzański L.: Metalowe materiały inżynierskie. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 2004
- [5] ASTM E-290-14 Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility.