

# OPRACOWANIE TECHNOLOGII KLEJENIA ANODOWANEGO STOPU ALUMINIUM 6005 T6 STOSOWANEGO W LOTNICTWIE

## *Bonding technology development of anodized aluminum alloy 6005 T6 used in aviation*

Agnieszka SOBIESZEK, Małgorzata WOJTAS, Tomasz SZCZEPANIK

**Streszczenie:** W artykule opisano przebieg badań doświadczalnych, mających na celu określenie technologii klejenia dla stopów aluminium. Proces opracowania technologii oparto na badaniach anodowanego stopu aluminium 6005 T6. Z wybranego stopu aluminium wykonuje się elementy wirnika nośnego wiatrakowca tj. łopaty oraz kieszenie łopat. We wstępie artykułu przedstawiono zalety procesu klejenia w zastosowaniach lotniczych. Opisano warianty przygotowania powierzchni i dobór substancji klejącej, spośród dedykowanych aluminium, dwuskładnikowych klejów epoksydowych oraz żywicy epoksydowej z wypełniaczem. Omówiono kolejne etapy przygotowania każdej z czterech z zaproponowanych metod przygotowania powierzchni. Opisano przebieg badań oraz stanowisko badawcze zapewniające czyste ścinanie połączeń klejonych. System akwizycji danych zapewnił rejestrację przebiegu siły w funkcji przemieszczenia. Przeanalizowano zalety i wady wybranych wariantów połączeń w odniesieniu do zastosowań w lotnictwie, uwzględniając warstwę anody, która nie powinna być naruszona podczas przygotowania powierzchni. Na podstawie wytrzymałości statycznej na ścinanie oraz pozostałych kryteriów (tj. łatwość przygotowania mieszanki klejącej i aplikacji kleju, pracochłonność przygotowania powierzchni oraz minimalizacja ingerencji w warstwę anodowaną, koszty, czas potrzebny do pełnego utwardzania) określono optymalne parametry klejenia dla duralu 6005 T6. Przeprowadzone prace badawcze i otrzymane wyniki wytrzymałości statycznej połączeń klejonych stanowią podstawę do wykorzystania opracowanej technologii na rzeczywistym obiekcie. Analiza wyników uwzględniająca wszystkie zawarte w pracy badawczej kryteria pozwoliła na określenie optymalnych parametrów połączenia klejonego, tj. konkretnej mieszanki klejącej przy jednej z przebadanych powierzchni klejenia.

**Słowa kluczowe:** klejenie, wytrzymałość połączeń na ścinanie, stopy aluminium, wiatrakowiec

**Abstract:** This article describes the testing process to determine bonding technology for aluminum alloys, this process was developed based on anodized 6005 T6 aluminum alloy research. The components of gyro rotor ie. the blades and blades pockets are made of that aluminum alloy. In the introduction of this paper advantages of the bonding process in aerospace industry are presented. Variants of surface preparation and selection of the adhesive (dedicated to aluminum two-component epoxy adhesives and epoxy resin with the filler) were described. Discussed the steps of preparing each of four of the proposed methods of surface preparation. The conduct of the study and test stand to provide a pure shear bonded joints were describes. The data acquisition system assured the registration course of force versus displacement. The advantages and disadvantages of selected variants joints for uses in aviation, taking into account the anode layer, which should not be violated during surface preparation were analyzed. On the basis of static shear strength and other criterias (ie. the ease of adhesive mixture preparation, adhesive application, surface preparation workload to minimize interference with the anodized layer, costs and time needed for a full curing) for optimal adhesion for 6005 T6 aluminum alloy were determined. Conducted research and the results of bonded joints static strength provide a basis for the use technology to the real object. Analysis of the results, taking into account all included criteria allowed to define optimum conditions for adhesive connection, selected adhesive for one of the tested bonding surface.

**Keywords:** bonding, shear strength joints, aluminum alloys, gyroplane

### Wprowadzenie

Połączenia klejone odgrywają dużą rolę w rozwoju nowoczesnych konstrukcji lotniczych. Wytwarzane elementy konstrukcyjne powinny mieć dużą sprawność konstrukcyjną, niezawodność oraz powinny zapewniać bezpieczeństwo. Dlatego też istotne jest zapewnienie optymalnych połączeń. Dzięki ciągłemu rozwojowi technologii klejenia, dopasowaniu odpowiednich parametrów procesu w zależności od zastosowanych materiałów, można określić optymalne warunki procesu klejenia dla konkretnych materiałów konstrukcyjnych.

Zaletą wyboru technologii klejenia jako metody połączeń stosowanych w lotnictwie jest przede wszystkim relacja wytrzymałości do wagi konstrukcji (przy wytrzymałości

porównywalnej do nitowania, spawania, zgrzewania czy lutowania) oraz możliwość łączenia materiałów o różnych właściwościach fizycznych i chemicznych. Istotną cechą, zwłaszcza w konstrukcjach śmigłowców są właściwości tłumiące drgania. Dodatkowe zapewniają brak zmian strukturalnych w klejonych materiałach w przeciwieństwie do spawania, zgrzewania czy lutowania oraz stanowią dobry środek uszczelniający i umożliwiają regenerację konstrukcji. Czas i koszt wykonania połączenia klejonego jest w większości przypadków mniejszy niż inne metody połączeń stosowane w przemyśle lotniczym [1, 2].

Celem badań jest określenie wytrzymałości połączeń klejonych anodowanego stopu aluminium (6005 T6), z którego zostały wykonane łopaty wirnika nośnego wiatrakowca oraz kieszenie przez które łopata montowana

Tab. 1. Sposoby przygotowania powierzchni anodowanego aluminium

Tab. 1. The way of anodized aluminum surface preparation

		Powierzchnia I	Powierzchnia II	Powierzchnia III	Powierzchnia IV
Etapy przygotowania powierzchni	1	Odtłuszczenie za pomocą rozpuszczalnika (aceton)	Usuwanie zanieczyszczeń za pomocą środka czyszczącego niezawierającego chloru	Odtłuszczenie za pomocą rozpuszczalnika (aceton)	Odtłuszczenie powierzchni za pomocą rozpuszczalników (np. aceton)
	2	Kąpiel w wodzie destylowanej i suszenie (w temperaturze otoczenie)	Kąpiel w wodzie destylowanej i suszenie (w temperaturze otoczenia)	Kąpiel w wodzie destylowanej i suszenie (w temperaturze otoczenia)	Kąpiel w wodzie destylowanej i suszenie (w temperaturze otoczenia)
	3	–	Odtłuszczenie za pomocą rozpuszczalnika (aceton)	Trawienie za pomocą 35% roztworu kwasu fosforowego przez 10 [min]	Obróbka ręczna za pomocą papieru ściernego o ziarnistości 400–600
	4	–	Kąpiel w wodzie destylowanej i suszenie (w temperaturze otoczenia)	Kąpiel w wodzie destylowanej i suszenie (w temperaturze otoczenia)	Odtłuszczenie za pomocą rozpuszczalnika (aceton)
	5	–	–	–	Kąpiel w wodzie destylowanej i suszenie (w temperaturze otoczenia)

jest na głowicy. Analizie poddano połączenia klejone aluminium (w postaci próbek) z zastosowaniem różnych substancji klejących przy różnie przygotowanych powierzchniach. Porównano sposoby przygotowania powierzchni połączeń w odniesieniu do ich wytrzymałości.

### Technologia klejenia

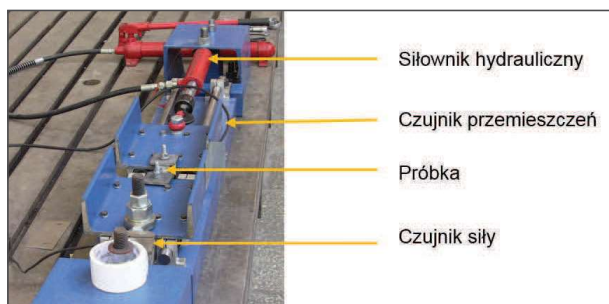
W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych próbki pozyskano metodą cięcia laserowego z duralowej, anodowanej łąpaty dedykowanej wiatrakowcom klas B, C i D. Próbki poddano badaniom na stanowisku badawczym, zapewniającym czyste ścinanie połączenia klejonego. Powierzchnia połączenia klejonego wynosiła 30 × 15 [mm]. Po ówczesnej analizie substancji dedykowanych do klejenia aluminium oraz powszechnie używanych w lotnictwie klejów i żywic epoksydowych, uwzględniając ich parametry wytrzymałościowe, wybrano następujące substancje do prób eksperymentalnych:

- Epidian 52 z utwardzaczem Z1 (100:13 [g]) oraz wypełniaczem w postaci krzemionki (ok. 2% wagowo), pełne utwardzenie (w temperaturze 20°C) po 7–8 dniach,
- Araldite 2011 – klej epoksydowy, dwuskładnikowy (100:80 [g]), który osiąga pełne utwardzenie (w temperaturze 20°C) po 36 h,
- Elen-tech ADH 90.91.– dwuskładnikowy klej epoksydowy (100:45 [g]), pełne utwardzenie (w temperaturze 20°C) po 48 h.

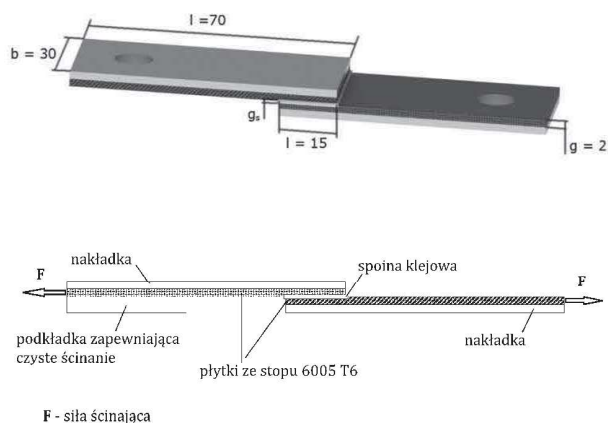
Przegląd literaturowy oraz wstępne badania własne pozwoliły na wybranie sposobów przygotowania powierzchni dla anodowanego aluminium [3-5] i przedstawiono je w tab. 1. Stopy aluminium przeznaczone do klejenia nie są zazwyczaj anodowane ze względu na pogorszenie właściwości skleiny. Warstwę anodowaną przed przystąpieniem do procesu klejenia zazwyczaj usuwa się chemicznie, stosując kąpiele w kwasie chromowym lub fosforowym albo mechanicznie. Wadą manualnego matowienia powierzchni przy pomocy papieru ściernego, jak w przypadku powierzchni IV, jest stosunkowo mała powtarzalność. Sposób przygotowania I i II powierzchni nie narusza warstwy anodowanej. W przypadku kiedy nie można naruszyć warstwy anodowanej, przygotowując powierzchnie do klejenia, stosuje się środki czyszczące niezawierające chloru (powierzchnia II). Najmniej pracochłonny i najbardziej ekonomiczny jest I sposób przygotowania powierzchni.

### Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zaprojektowano w taki sposób, aby możliwe było poprawne wykonanie badań połączeń klejonych – zapewniono czyste ścinanie. Część wykonawcza stanowiska badawczego (rys. 1) składała się z siłownika hydraulicznego do zadawania siły, tensometrycznego czujnika siły oraz optycznego czujnika przemieszczeń. Akwizycja danych była realizowana urządzeniem NI PXIe z dedykowaną aplikacją napisaną



Rys. 1. Część wykonawcza stanowiska badawczego do badania połączeń klejonych na ścinanie  
Fig. 1. Test stand for testing bonded joints



Rys. 2. Schemat próbki połączenia klejonego i sposobu zadawania siły  
Fig. 2. Bonding sample schematic and way of force input

w LabView, która rejestrowała w czasie rzeczywistym siłę w funkcji przemieszczenia.

Próbki badane na stanowisku są klejone na zakładkę. Ze względu na siły występujące przy próbie konieczne było wzmocnienie próbki stalowymi nakładkami. Konieczność zastosowania stalowych nakładek wynikała ze wstępnych prób, podczas których okazało się, że wytrzymałość aluminium T6005 T6 była mniejsza niż wytrzymałość połączenia klejonego i próbka ulegała zerwaniu w miejscu mocowania na stanowisku. Rys. 2 przedstawia schemat próbki i sposób zadawania siły. W celu uzyskania miarodajnej odpowiedzi o wytrzymałość połączenia kolejnego wykonano po 5 próbek z każdego z zaproponowanych wyżej wariantów. Wymiary próbek nie były znormalizowane. Materiał na próbki pozyskano z płaskownika, jaki dało się wyciąć metodą cięcia laserowego z profilu aerodynamicznego łopaty wykonanej metodą ciągnięcia

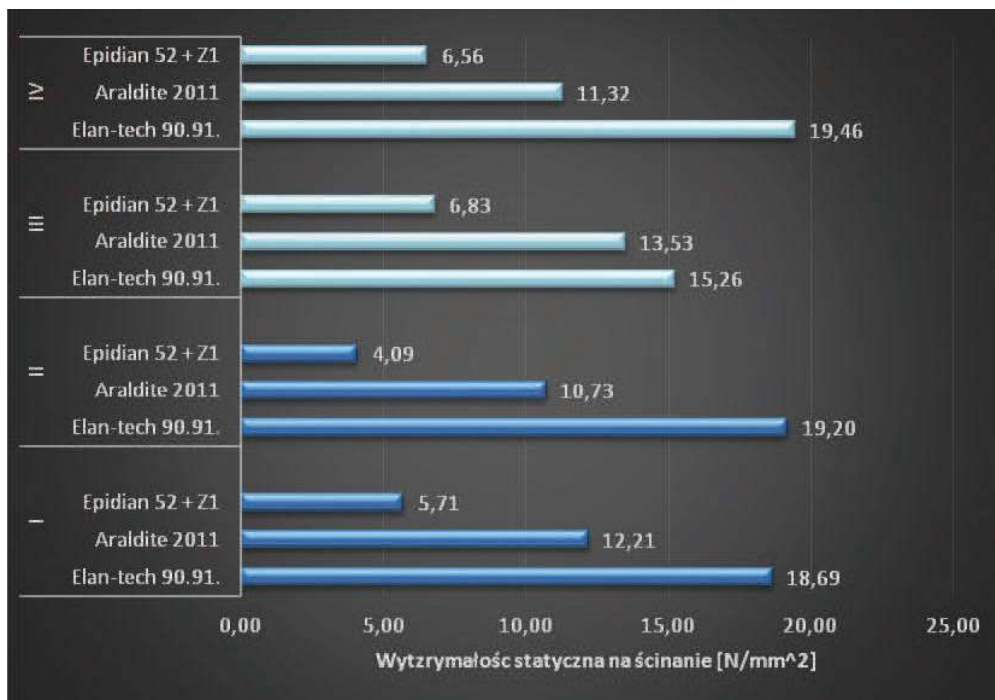
w hucie. Ze stopu aluminium 6005 T6 nie wykonuje się blach, dlatego jedyną możliwością pozyskania próbek do przeprowadzanych badań było wycięcie ich z gotowych profili. Wymiary połączenia klejowego były następujące, a kontrole grubości spoiny klejowej realizowano za pomocą mikrometru:

- grubość aluminiowych płaskowników – 2 mm,
- grubość stalowych nakładek – 2,5 mm,
- szerokość próbek – 30 mm,
- długość próbek – 70 mm,
- długość zakładki spoiny klejowej – 15 mm,
- grubość spoiny klejowej ok. 0,1 mm.

Tab. 2. Wyniki próby wytrzymałościowej próbek klejonych z aluminium 6005 T6 dla różnie przygotowanych powierzchni klejenia i mieszanek klejących

Tab. 2. Stress test results of aluminum 6005 T6 bonding joints for differently prepared bonding surfaces and adhesive mixtures

Powierzchnia	Mieszanka klejąca	Średnia siła zrywająca [N]	Wytrzymałość statyczna na ścinanie $R_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]
I	Elan-tech 90.91.	8410,00 ± 356	18,69
	Araldite 2011	5492,50 ± 340	12,21
	Epidian 52 + Z1	2568,00 ± 231	5,71
II	Elan-tech 90.91.	8640,00 ± 472	19,20
	Araldite 2011	4830,00 ± 301	10,73
	Epidian 52 + Z1	1842,00 ± 120	4,09
III	Elan-tech 90.91.	6865,00 ± 672	15,26
	Araldite 2011	6088,00 ± 147	13,53
	Epidian 52 + Z1	3072,50 ± 171	6,83
IV	Elan-tech 90.91.	8756,00 ± 384	19,46
	Araldite 2011	5094,00 ± 248	11,32
	Epidian 52 + Z1	2950,00 ± 320	6,56



Rys. 3. Wyttrzymałość statyczna na ścinanie  
Fig. 3. Static shear strenght

### Analiza wytrzymałości połączeń klejonych

Na podstawie wyników badań wytrzymałości połączeń klejonych aluminiowych próbek wybrano technologię przygotowania powierzchni oraz klej, który zapewni optymalne parametry wytrzymałościowe dla tego typu połączeń. Za kryterium oceny przyjęto wytrzymałość statyczną na zrywanie połączeń (tab. 2). Pod uwagę wzięto również takie aspekty jak: łatwość przygotowania mieszanki klejącej i aplikacji kleju, pracochłonność przygotowania powierzchni oraz minimalizacja ingerencji w warstwę anodowaną, koszty substancji klejących, czas potrzebny do pełnego utwardzania. Elan-tech 90.91. oraz Araldite 2011 są dostępne w dozownikach z mieszalnikami, które zapewniają łączenie składników kleju w odpowiednich proporcjach oraz uzyskanie jednorodnej mieszanki. Natomiast przygotowanie Epidianu 52 wraz z utwardzaczem Z1 oraz wypełniaczem wymaga wykorzystania precyzyjnej wagi, gdzie każdy ze składników przed połączeniem musi zostać zważony, a następnie metodą mieszania mechanicznego połączony w jednorodną mieszankę. Klej powinien zapewniać możliwie szybkie utwardzanie, ponieważ docelowo ma być stosowany w warunkach warsztatowych przy elementach o dużych gabarytach, wykluczających wygrzewanie w piecu.

Analizując wyniki (rys. 3) stwierdza się, że najwyższą wytrzymałość statyczną na ścinanie ma klej Elan-tech 90.91. Maksymalna wartość wytrzymałości statycznej na ścinanie  $R_t = 19,46$  [N/mm<sup>2</sup>] przypada na powierzchnię IV. Porównywalne wartości wytrzymałości zostały osiągnięte w przypadku powierzchni II.

### Podsumowanie i wnioski

Badania wytrzymałościowe na czyste ścinanie próbek z aluminium 6005 T6 pozwoliły określić optymalną w danych warunkach technologię klejenia oraz dobrać najlepszą mieszankę klejącą spośród wybranych substancji dedykowanych aluminium. Uwzględniono również minimalizację ingerencji w warstwę anodowaną, dlatego mimo porównywalnych osiągnięć wytrzymałościowych powierzchnia IV została odrzucona. Dodatkową wadą była stosunkowo mała powtarzalność wyników w porównaniu do innych metod przygotowania powierzchni. Substancją klejącą, która przy każdej metodzie przygotowania powierzchni przewyższała osiągniętą wartość wytrzymałości statycznej pozostałe mieszanki klejące jest Elan-tech 90.91. Nie tylko zwiększenie średniej siły zrywającej przemawia za wyborem tej substancji do badań dowodowych, ale również konsystencja, która zapewnia łatwe rozprowadzanie po powierzchni próbki. Najmniej odpowiednią substancją klejącą, zarówno ze względu na wytrzymałość, jak również czas utwardzania i łatwość przygotowania mieszanki, okazał się dla każdej z przygotowanych powierzchni Epidian 52 z utwardzaczem Z1 i krzemionką. Ostatecznie wybrana metoda przygotowania powierzchni (powierzchnia II), mimo większej pracochłonności pozwoliła osiągnąć lepsze wyniki wytrzymałościowe niż zastosowanie powierzchni I. Do badań dowodowych postanowiono odrzucić powierzchnie, które w jakikolwiek sposób ingerowały w warstwę anody. Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono dalsze badania, w efekcie badania



dowodowe, które miały na celu potwierdzenie technologii klejenia, która jest w stanie wzmocnić nasadę łopaty wirnika nośnego wiatrakowca.

**Badanie realizowane w ramach projektu „Nowoczesny Wirnik Autortacyjny”, współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. Nr POIG.01 03.01-14-007/12 22.05.2013 r.**

#### LITERATURA

- [1] Cagle C.V.. 1973. „Handbook of adhesive bonding”. McGraw-Hill, California.
- [2] Ciecińska B. 2004. „Ocena możliwości klejenia blach ze stali AISI 4130 w konstrukcjach lotniczych”. *TiAM* (1)
- [3] Domińczuk J. 2011. „Wpływ wybranych czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych”. *Postęp Nauki i Techniki* (10) 14–26.

- [4] Kłonica M., Kuczmaszewski J. 2013. „Badania skuteczności klejenia stopu tytanu Ti6Al4V i stali nierdzewnej 0H18N9. Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji”. 651–662.
- [5] Sęp J. 2014. „Połączenia stosowane w konstrukcjach lotniczych”. *STAL Metale & Nowe Technologie*. 128–133.

---

Mgr inż. Agnieszka Sobieszek – Instytut Lotnictwa, al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa, Zakład Badań Sprzętu i Wyposażenia Lotniczego, e-mail: agnieszka.sobieszek@ilot.edu.pl,

Mgr inż. Małgorzata Wojtas – Instytut Lotnictwa, al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa, Zakład Badań Sprzętu i Wyposażenia Lotniczego, e-mail: małgorzata.wojtas@ilot.edu.pl

Mgr inż. Tomasz Szczepanik – Instytut Lotnictwa, al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa, Zakład Konstrukcji Lotniczych – Organizacja Projektująca, e-mail: tomasz.szczepanik@ilot.edu.pl