

WERYFIKACJA MOŻLIWOŚCI WZMOCNIENIA NASADY ŁOPATY WIRNIKA NOŚNEGO WIATRAKOWCA

Verification of possibilities for strengthen gyroplane rotor blades base

Małgorzata WOJTAS, Agnieszka SOBIESZEK, Tomasz SZCZEPANIK

Streszczenie: W publikacji przedstawiono zagadnienie wzmocnienia nasady łopaty wirnika nośnego wiatrakowca przez wklejenie kieszeni łopaty. Technologia klejenia jaką zastosowano została opracowana dla stopu aluminium 6005 T6, z którego wykonane zostały łączone elementy. W celu opracowania optymalnych parametrów klejenia przeprowadzono szereg badań, w wyniku których dobrano substancję klejącą oraz sposób przygotowania powierzchni, zapewniający największą wytrzymałość statyczną połączenia. Obiekt badań stanowi łopata wirnika nośnego wiatrakowca oraz kieszeń będąca łącznikiem między łopatą a głowicą wirnika wiatrakowca. Oba elementy zostały zaprojektowane w ramach projektu „Nowoczesny wirnik autortacyjny”. W celu opracowania metody wklejania kieszeni na nasadę łopaty sprawdzono wytrzymałość połączenia dla różnych wariantów montażu kieszeni. Pierwszy wariant polegał na nasunięciu kieszeni na łopatę, w drugim natomiast wykorzystano kieszeń przeciętą wzdłuż krawędzi natarcia. Drugi wariant powstał po wstępnych próbach, które ujawniły wady nasuwania kieszeni na jej nasadę niezależnie od kierunku nasuwania. Wyniki badań zostały zestawione z wynikami zrywania nasady łopaty, na którą nie naklejano kieszeni (kieszeń była montowana tylko śrubami). Zestawienie wyników zweryfikowało możliwość wzmocnienia nasady łopaty przez wklejanie kieszeni, stopień wzmocnienia i określiło optymalne rozwiązanie montażu kieszeni na nasadzie łopaty. Zrealizowany proces badawczy może stanowić zarówno próby dowodowe wytrzymałości nasady łopaty wirnika wiatrakowca i podstawę do wprowadzenia wdrożenia opracowanej technologii klejenia dla wykorzystywanego do produkcji łopat stopu aluminium.

Słowa kluczowe: łopaty wirnika, połączenia klejone, wiatrakowiec, aluminium 6005 T6, montaż, klejenie

Abstract: The paper presents the issue of strengthening the gyroplane rotor blade base by bonding the blade socket to it. Adhesive technology for aluminum alloy 6005 T6 has been developed. In order to develop optimal bonding parameters, a number of tests has been conducted, which resulted with selecting the best adhesive and the best method of surface preparation that provides the highest static strength. The test objects are, the gyro rotor blade and socket which is the link between the blade and the hub of gyroplane rotor, both elements were designed in Modern Autorotating Rotor Project. In order to develop a method of bonding a socket on the blade base the joint strength was tested for different way of socket installation. The first variant was pushing socket on the base of rotor blade, and another which uses the pocket cut along the leading edge. The second variant was created after initial tests that revealed defects in the socket docking on the rotor blade base, regardless of the direction of the docking. The results are compared with results of strength tests of the rotor blade base, where socket was only mount by screws. Summary of results verified the possibility to strengthen the rotor blade base by bonding socket and identified the optimal socket mounting solution on rotor blade base. Carried out the research process can be evidence strength test of gyroplane rotor blade base as well as basis for the implementation of bonding technology to use in the production of aluminum alloy rotor blades.

Keywords: rotor blades, bonding joints, gyroplane, aluminum alloy 6005 T6, mounting, bonding

Wprowadzenie

W publikacji przedstawiono proces dopracowania metody tj. szereg badań, które miały na celu zapewnienie wzmocnienia elementów konstrukcyjnych innowacyjnego wirnika nośnego wiatrakowca. Badania o których mowa w artykule odnoszą się do projektu „Nowoczesny Wirnik Autortacyjny” [1], w którym jednym z założeń było stworzenie konstrukcji zapewniającej bezpieczeństwo i wysoką niezawodność. Dopracowanie i szczegółowe badania poszczególnych elementów wirnika oraz opracowanie technologii umocnienia nasady łopat stanowi zapewnienie wysokiej klasy bezpieczeństwa i jakości lotu.

Badania mają określić wzmocnienie nasady łopaty przez zastosowanie opracowanej technologii oraz zweryfikować siłę niszczącą połączeń klejonych anodowanego

stopu aluminium (6005 T6), z którego zostały wykonane łopaty wirnika nośnego wiatrakowca oraz kieszenie łopat, przez które łopata montowana jest na głowicy. Badania przeprowadzono na podstawie prób określających optymalne warunki technologii klejenia dla omawianego stopu aluminium. W celu dopracowania technologii klejenia przeprowadzono szereg badań dla próbek których powierzchnię przygotowano wg czterech wariantów i klejono je za pomocą trzech różnych mieszanek epoksydowych. Po przebadaniu wytrzymałości statycznej połączeń klejonych określono substancję i sposób przygotowania powierzchni wykorzystywanych podczas prób na obiekcie rzeczywistym. Badania dowodowe oparto na procesie dopracowania technologii klejenia oraz wynikach badań wstępnych przedstawionych w artykule „Opracowanie technologii klejenia anodowanego stopu aluminium 6005



Rys. 1. Obiekty badań – duralowa łopata wirnika nośnego wiatrakowca (po lewej), kieszeń łopaty (po prawej)

Fig. 1. Objects of research – gyroplane aluminum alloy rotor blade (left), blade pocket (right)

T6 stosowanego w lotnictwie” (A. Sobieszek, M. Wojtas, T. Szczepanik).

Publikacja zawiera opis obiektu badań, przebieg i realizację procesu badawczego oraz efekty badań. Badania zostały przeprowadzone w dwóch etapach podczas których weryfikowano różne warianty sposobu łączenia łopaty z kieszenią łopaty [2-4].

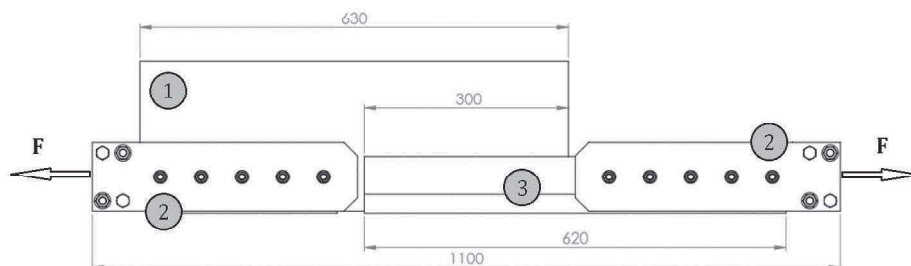
Obiekt badań

Przedmiotem badań są łopaty aluminiowe o nowym profilu aerodynamicznym ILW-LT-11.0 [5], opracowanym w Instytucie Lotnictwa oraz kieszenie łopat stanowiące umocnienie jej nasady oraz łącznik między łopata a głowicą wiatrakowca. Nowy profil laminarny ILW-LT-11.0 jest dedykowany do pracy w autorotacji na wiatrakowcach klasy D, C, B. Dotychczas stosowanym profilem łopat w wirnikach wiatrakowców jest profil asymetryczny NACA 9H12, który jest znany od lat 40. ub. w. Nowe rozwiązanie konstrukcyjne ma zapewnić wysokie charakterystyki aerodynamiczne, bezpieczeństwo oraz niezawodność w locie, przewyższając tym samym dotychczas stosowane rozwiązania. Łopaty oraz kieszenie łopat wykonane zostały przez krajowego wykonawcę, który opracował technologię aerodynamicznych profili ciągnionych.

Potrzeba wzmocnienia nasady łopaty wynikała z wcześniej przeprowadzonych prób wytrzymałościowych nasady łopaty. Analiza wyników wspomnianych prób wykazała potrzebę wzmocnienia nasady łopaty. Jednym z rozwiązań może być połączenie kieszeni łopaty z łopata przy użyciu odpowiedniej mieszanki klejącej. Dotychczas kieszeń łopaty i łopata były łączone za pomocą śrub podczas montażu na głowicy wiatrakowca. Na rys. 1 przedstawiono łączone elementy tj. łopaty wirnika wiatrakowca oraz kieszenie łopat.

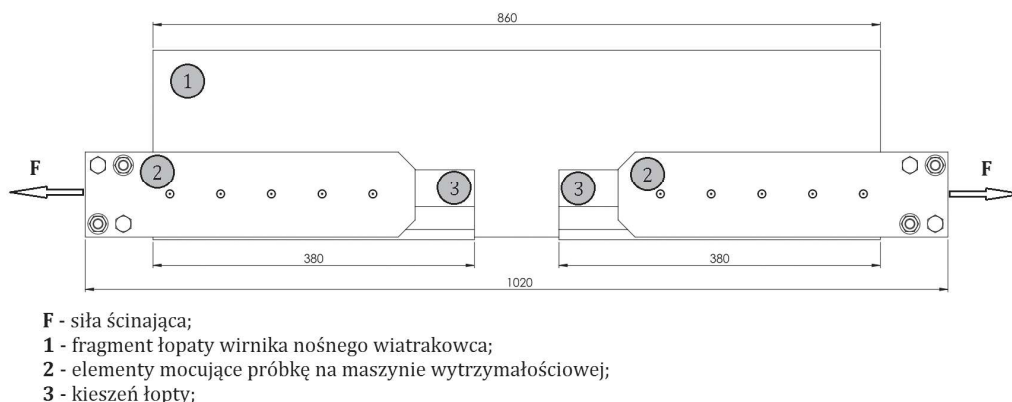
Tabela 1. Etapy przygotowania powierzchni stopu aluminium z którego wykonana jest łopata wirnika wiatrakowca i kieszeń łopaty
Tabele 1. Steps of preparing the surface of aluminum alloy from which are made gyroplane rotor blades and blades pocket

Etap	Etapy przygotowania powierzchni			
	1	2	3	4
Sposób przygotowania powierzchni	Usuwanie zanieczyszczeń za pomocą środka czyszczącego nie zawierającego chloru	Kąpiel w wodze destylowanej i suszenie (w temperaturze otoczenia)	Odtłuszczenie za pomocą rozpuszczalnika (aceton)	Kąpiel w wodze destylowanej i suszenie (w temperaturze otoczenia)



- F - siła ścinająca;
 1 - fragment łopaty wirnika nośnego wiatrakowca;
 2 - elementy mocujące próbkę na maszynie wytrzymałościowej;
 3 - kieszeń łopaty;

Rys. 2. Schemat próbki 01.n, $n \in (1,2,3)$ połączenia klejonego łopata-kieszeń
 Fig. 2. Blade – blade pocket adhesive connection sample schematic 01.n, $n \in (1,2,3)$



Rys. 3. Schemat próbki 02.n $n \in (1,2)$ połączenia klejonego łopata-kieszeń
 Fig. 3. Blade – blade pocket adhesive connection sample schematic 02.n, $n \in (1,2)$

Badania dowodowe

Badania dowodowe miały na celu określenie siły niszczącej połączenia klejonego oraz zweryfikowanie czy wklejenie kieszeni łopaty wzmocni nasadę łopaty. Badania przeprowadzono w odniesieniu do przepisów certyfikacyjnych statków powietrznych niemieckiego nadzoru lotniczego LBA. Opisany sposób przeprowadzenia badań dowodowych daje możliwość wykorzystania wyników do wdrożenia omówionej poniżej technologii umocnienia nasady łopat wirnika wiatrakowca, która stanowi temat publikacji.

Badania realizowano w dwóch etapach. Proces klejenia w obu etapach przeprowadzono zgodnie z opracowaną technologią opartą na przygotowaniu powierzchni za pomocą środka czyszczącego, niezawierającego chloru wg etapów przedstawionych w tab. 1 i klejeniu z wykorzystaniem dwuskładnikowego kleju epoksydowego – ElanTech 90.91.

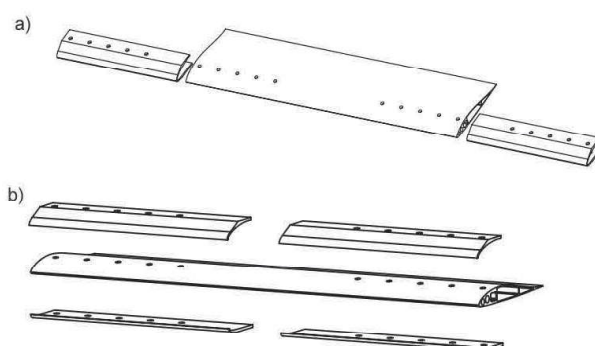
Badania próbek przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej w akredytowanym laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji w Instytucie Lotnictwa. Obciążenie występujące w próbie realizowano przy pomocy siłownika hydraulicznego, będącego elementem ramy wytrzymałościowej AVIATA oraz sterownikiem hydraulicznym R-580-150 ze sterownikiem MTS407/01. Siłę rejestrowano przy użyciu systemu pomiarowo-rejestrującego „System 5000”, a pomiar siły realizowano przetwornikiem do 450 kN. Prędkość obciążania wynosiła 2 mm/min.

W pierwszym etapie badań przygotowano trzy próbki wg schematu przedstawionego na rys. 2. Połączenia klejone było wykonane na długości 300 mm, tj. długości odpowiadającej rzeczywistej długości kieszeni łopaty przeznaczonej do montażu na głowicy wiatrakowca. Procesowi przygotowawczemu poddano zarówno łopatę jak i kieszeń łopaty. Na obie powierzchnie po ich ówczesnym oczyszczeniu i odtłuszczeniu nakładano warstwę kleju o grubości 0,1 mm.

Pierwszy etap badań nie dał jednoznacznej odpowiedzi odnośnie wytrzymałości połączenia klejonego. Wykazał, że połączenie ma większą wytrzymałość niż materiał z którego wykonano kieszeń łopaty. Jednocześnie dowiódł, że kształt i wymiary kieszeni stanowią ograniczenie dla wymagania jakim jest równomierne rozłożenie substancji klejącej na całej powierzchni wewnętrznej kieszeni.

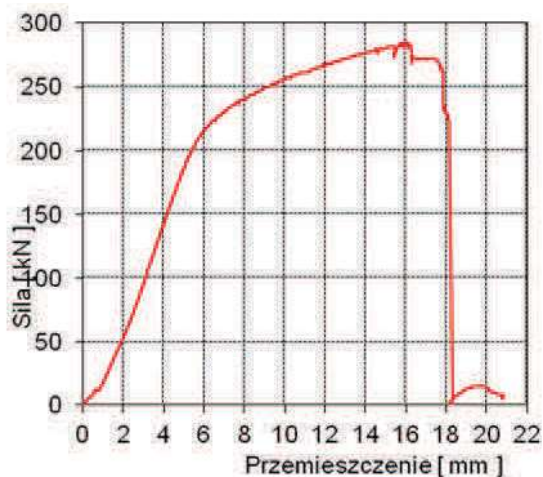
W drugim etapie przygotowano dwie próbki wg schematu przedstawionego na rys. 3. Połączenia przygotowano w taki sposób jak w próbach dowodowych określających siłę niszczącą nasady łopaty. Na potrzebę próby przedłużono kieszeń łopaty do 380 mm. Proces przygotowawczy i technologię klejenia, uwzględniając pojawiające się wcześniej problemy, przeprowadzono jak w etapie pierwszym, wprowadzając dwa sposoby naklejania kieszeni na łopatę.

Pierwszy sposób polegał na wsunięciu łopaty w kieszeń jak na rysunku rys. 4a. Drugi sposób polegał na naklejeniu na łopatę kieszeni, która została przecięta wzdłuż krawędzi natarcia jak na rys. 4b. Wprowadzenie

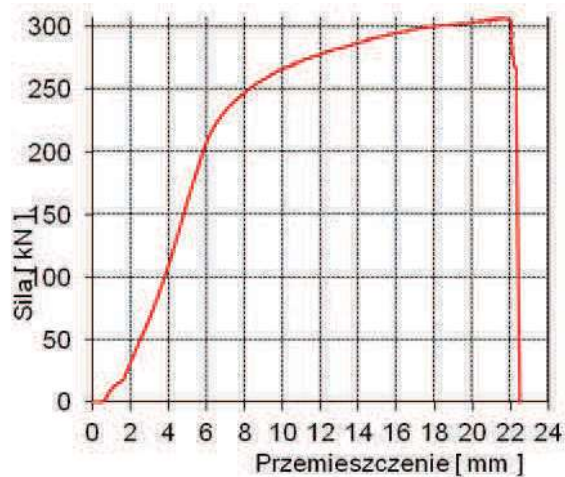


Rys. 4. Sposoby naklejania kieszeni na łopatę: a) w przypadku całej kieszeni, b) w przypadku kieszeni przeciętej wzdłuż krawędzi natarcia

Fig. 4. Methods for bonding rotor blade and pocket, a) whole pocket, b) a pocket cut along the leading edge



a)



b)

Rys. 5. Wykres siły w funkcji przemieszczenia dla prób określających siłę potrzebną do zniszczenia połączenia klejonego łopata-kieszki: a) w przypadku wklejania całej kieszeni, b) w przypadku wklejania kieszeni przeciętej wzdłuż krawędzi natarcia
 Fig. 5 Charts presents force versus displacement for tests to determine the strength of rotor blade – blade pocket adhesive connection: a) in case of bonding the whole pocket, b) in the case of bonding pocket cut along the leading edge

dwóch sposobów klejenia miało na celu wyeliminowanie problemu przygotowania kieszeni i nakładania odpowiednio cienkiej warstwy kleju w trudno dostępnych częściach kieszeni. Miało również określić zależność między sposobem aplikacji kleju (cała kieszeń/półki kieszeni) a osiągniętą siłą niszczącą połączenia klejonego.

Wyniki badań

Przeprowadzone badania pozwoliły określić siłę niszczącą dla połączenia klejonego w różnych wariantach. Pierwszy etap badań dał odpowiedź na temat siły, przy której kieszeń łopaty ulega zniszczeniu, natomiast w etapie drugim otrzymano odpowiedź na temat siły potrzebnej do zniszczenia połączenia klejonego oraz o wzmocnieniu nasady.

Zbiorcze wyniki badań pierwszego etapu tj. próbek 01.n przedstawiono w tab. 2. Siła podana w tab. 2 odnosi się do kieszeni łopaty, która to w pierwszej kolejności uległa uszkodzeniu.

Tabela 2. Wyniki prób z etapu pierwszego
 Table 2. Test results of first stage

Próbka	Siła niszcząca [kN]	Średnia siła niszcząca [kN]
01.1	110,00	106,27
01.2	92,10	
01.3	116,70	

Wyniki próbek z etapu drugiego przedstawiono na wykresach (rys. 5). Przedstawiają one zależność siły niszczącej próbkę w funkcji przemieszczenia. Wykres przedstawiony na rys. 5a obrazuje przebieg siły dla sposobu pierwszego naklejania kieszeni, tj. wsuwania jej na łopatę. Siła niszcząca dla tego sposobu wyniosła 284,8 kN. W przypadku wariantu z kieszenią przeciętą wzdłuż krawędzi natarcia (rys. 5b) siła niszcząca wyniosła 306,5 kN.



a)



b)

Rys. 6. Próbkę po zerwaniu: a) klejona sposobem pierwszym, b) klejona sposobem drugim
 Fig. 6. Bonded samples after strength tests: a) first bonded method b) second bonded method

Tabela 3. Wyniki prób wytrzymałościowych łopat
Tabele 3. Results of rotor blades strength tests

Próbka	Siła niszcząca P_t [kN]	Wzmocnienie [%]
00.1	237,10	$\bar{P}_t = 238,60$ 100,00
00.2	226,40	
00.3	242,10	
00.4	248,60	
02.1	284,80	119,40
02.2	306,50	128,50

W celu określenia wzmocnienia nasady łopaty przez wklejanie kieszeni porównano wyniki próbek 02.1 oraz 02.2 z wynikami badań łopaty bez wklejonej kieszeni (tab. 3) oznaczonych symbolem 00.n., $n \in (1, 2, 3, 4)$.

Wyniki przedstawione w tab. 3 pokazują wpływ wklejania kieszeni na łopatę w zależności od sposobu wklejania. Wzmocnienie nasady łopaty w zależności od sposobu wklejania waha się w granicach 20–30% w stosunku do łopaty zrywanej bez wklejonej kieszeni.

Wnioski

Po doborze technologii klejenia podczas badań wstępnych wykonano badania na obiekcie rzeczywistym. Celem badań było wzmocnienie nasady łopaty przez naklejenie kieszeni łopaty. W tym celu przeprowadzono dwa etapy badań. Pierwszy, ze względu na budowę próbki, nie określił wytrzymałości skleiny, potwierdził jedynie, że nastąpiło wzmocnienie połączenia. Aby określić dokładne parametry i siłę potrzebą do zniszczenia nowo opracowanego połączenia wykonano dwie próbki na obiekcie rzeczywistym. Uwzględniając powstające podczas badań problemy, zdecydowano sprawdzić jaki wpływ na połączenie będzie miało rozcięcie kieszeni przed rozpoczęciem klejenia wzdłuż krawędzi natarcia. Problem stanowiła aplikacja cienkiej warstwy tj. $< 0,2$ w wąskiej szczelinie kieszeni. I wariant – kieszeń wsunięta na łopatę pozwoliła na wzmocnienie nasady łopaty o ok. 20% (siła niszcząca wyniosła 284,8 kN) względem siły potrzebnej do zerwania łopaty nieklejonej. Przez II wariant – kieszeń rozcięta wzdłuż krawędzi natarcia

– zapewniono wzmocnienie nasady o 30%, wartość siły niszczącej wyniosła 306 k kN.

Podsumowując można stwierdzić, że dobrana technologia klejenia pozwoliła na zrealizowanie celu badań – nasada łopaty została wzmocniona. Opracowana została technologia klejenia, tj. dobrano mieszankę i przygotowanie powierzchni zapewniające optymalne warunki dla obiektu rzeczywistego. Zweryfikowano dwa warianty i wybrano taki, który zapewni najlepsze wzmocnienie łopaty u jej nasady.

LITERATURA

- [1] Pobrane z <http://wirnikautorotacyjny.pl>
- [2] Cagle C.V. 1973. „Handbook of adhesive bonding”, McGraw-Hill, California.
- [3] Domińczuk J. 2011. „Wpływ wybranych czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych”, *Postęp Nauki i Techniki* (10): 14–26.
- [4] Ciecińska B. 2004. „Ocena możliwości klejenia blach ze stali AISI 4130 w konstrukcjach lotniczych”, *TIAM* (1)
- [5] Stalewski W. 2015. „Aerodynamic Design Of Modern Gyroplane Main Rotors”. Transactions of the Institute of Aviation.

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

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