

BADANIA KLEJÓW WYKORZYSTYWANYCH W PRÓBACH STOISKOWYCH KONSTRUKCJI LOTNICZYCH

Research of adhesives used in the stand tests of aircraft structures

Marek ROŚKOWICZ, Sławomir TKACZUK, Piotr LESZCZYŃSKI

Streszczenie: W pracy zaprezentowano rezultaty badań własnych, których celem była analiza porównawcza nośności uchwytów, wykorzystywanych jako węzły układu obciążającego płatowce statków powietrznych w próbach stoiskowych. Uchwyty wykonywane z tkanin są przyklejane do pokrycia płatowca w czasochłonnym i pracochłonnym procesie technologicznym. Zaproponowano zastąpienie stosowanego obecnie kleju rozpuszczalnikowego Butapren innym rodzajem kleju oraz jednocześnie uproszczenie i skrócenie procesu naklejania uchwytów. Z pozoru trywialne zadanie okazało się jednak problemem złożonym, ponieważ spoiny połączeń klejowych narażone są na najmniej pożądany przypadek ich obciążenia, tzn. oddzieranie oraz dostępne na rynku aplikacje klejowe cechuje znacznie dłuższy czas sieciowania od czasów deklarowanych przez producentów.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, wytrzymałość połączeń na odrywanie, próby stoiskowe

Abstract: The paper presents the results of their own research, whose aim was comparative analysis of the capacity of the handles used as nodes of the loading system of aircraft airframes in the stand tests. Handles made of fabric are adhered to the airframe skin in a time consuming and laborious process. It is proposed to replace the currently used solvent adhesive Butapren with another type of adhesive and at the same time to simplify and shorten the process of attaching handles. A seemingly trivial task, however, turned out to be a complex problem, because adhesive joints are exposed to the least desirable case of load, i.e. detaching and the commercially available adhesive application has a much longer cure time than the time declared by the manufacturers.

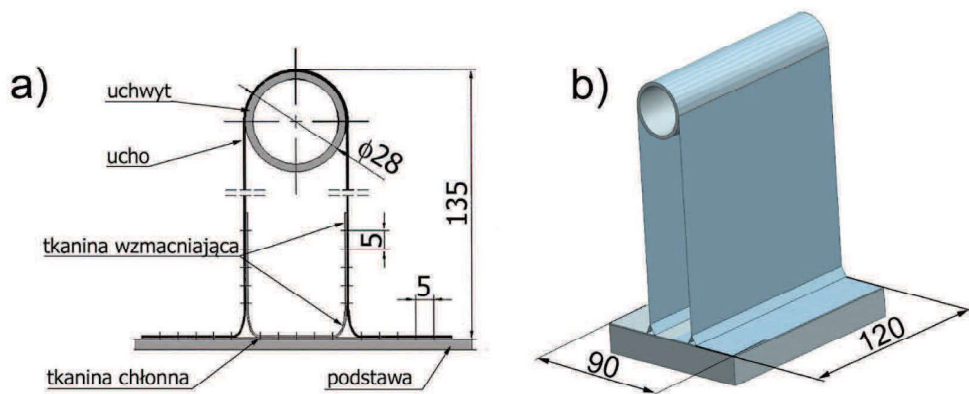
Keywords: adhesive joints, detaching of joint strength, stand tests

Wstęp

Stoiskowe badania wytrzymałościowe statków powietrznych przeprowadzane są w celu uzyskania informacji o odkształceniach konstrukcji płatowca oraz danych dotyczących sztywności poszczególnych jej elementów. Płatowiec statku powietrznego w trakcie prób wytrzymałościowych jest poddawany obciążeniom zewnętrznym ekwiwalentnym obciążeniom występującym w trakcie jego eksploatacji, m.in. w locie, podczas lądowania, z wykorzystaniem układu nadciśnienia kabiny, itd. Elementami obciążającymi, stosowanymi obecnie są najczęściej siłowniki hydrauliczne, mocowane do nośnych elementów stanowiska (tzw. klatki) [5]. Trudność zaprojektowania układu obciążającego polega na zamianie sił skupionych generowanych przez siłowniki układu obciążającego na obciążenie ciągłe, wynikające z działania na konstrukcję sił aerodynamicznych. Stan wyężenia konstrukcji jest realizowany za pomocą układu belek, cięgien, obejm i uchwytów. Obecnie bardzo często wykorzystuje się uchwyty wykonane z tkanin, przyklejanych do pokrycia płatowca. Zaletą tego rozwiązania jest łatwość dopasowania uchwytów do krzywizn płatowca i nieinwazyjna technologia ich montażu. Trudnością natomiast jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości połączenia klejowego uchwytu oraz konieczność jego odklejenia po zakończeniu badań [4].

Najczęściej do połączenia uchwytu z płatowcem wykorzystuje się kleje z grupy klejów rozpuszczalnikowych, m.in. dlatego, że umożliwiają one późniejsze łatwe odklejenie uchwytu [2]. Niestety zalecany do stosowania klej typu Butapren wymaga dokładnego przygotowania powierzchni (wielokrotne przemywanie acetonem i szorstkowanie) oraz długiego czasu potrzebnego do osiągnięcia wymaganej wytrzymałości połączenia klejowego (aż 14 dni w celu całkowitego odparowania rozpuszczalnika). Biorąc pod uwagę liczbę uchwytów oraz czas przygotowania powierzchni pod każdy uchwyt, wykonanie systemu uchwytów staje się zadaniem pracochłonnym i czasochłonnym, a przez to również kosztownym. Dodatkowo zerwanie uchwytu w czasie wykonywania nadzorowanych prób powoduje istotne trudności organizacyjne (konieczność przerwania próby, ponowne naklejenie uchwytu, proces przygotowania kolejnej próby nie wcześniej niż za 14 dni).

Celem wykonanych badań było zastąpienie dotychczas stosowanego kleju typu Butapren innym rodzajem kleju. Założono, że proponowany zamiennik powinien uprościć proces przygotowania powierzchni do klejenia (przygotowanie powierzchni klejonych ograniczone zostanie tylko do odłuszczenia powierzchni) oraz czas jego utwardzania powinien być znacznie krótszy. Założono również, że wytrzymałość połączenia klejowego po zastosowaniu zamiennika nie powinna być mniejsza od dotychczas stosowanych rozwiązań.



Rys. 1. Elastyczny uchwyt stosowany w próbach stoiskowych: a) schemat węzła, b) widok 3D
 Fig. 1. Flexible handle used in the stand tests: a) handle scheme, b) 3D view

Obliczenia numeryczne

W celu określenia rozkładu obciążeń występujących w połączeniu klejowym pojedynczego węzła montażowego wykonano obliczenia numeryczne. Budowa uchwytu oraz sposób jego obciążenia w idealnych warunkach wskazuje na występowanie zjawiska odrywania. Jednakże w przypadku uchwytu wykonanego z tkaniny należy przypuszczać, że połączenie jest obciążone również na oddzieranie [3].

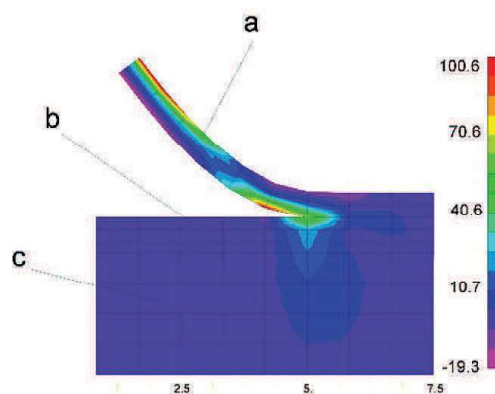
Uchwyt wykonano z trzech kawałków materiału: pierwszy wykonany jest z chłonnej tkaniny i tworzy powierzchnię przylegającą do powierzchni pokrycia o wymiarach 120×90 mm. Zastosowanie chłonnego materiału ma na celu zwiększenie możliwości absorpcji kleju, a co za tym idzie polepszenie właściwości adhezyjnych połączenia klejowego. Pozostałe elementy (ucho i wzmocnienie) wykonano z brezentu o wysokiej wytrzymałości. Wszystkie elementy uchwytu zszyte są ze sobą nićmi w postaci pięciu rzędów szwów wykonanych równolegle do dłuższej krawędzi uchwytu (rys. 1).

W modelu dyskretnym przyjęto grubość przyklejanej tkaniny równą $g_m = 0,5$ mm i grubość spoiny $g_s = 0,2$ mm. Analizę numeryczną w środowisku Nastran, przyjmując następujące warunki brzegowe w zakresie obciążenia – siła o wartości 1 kN skierowana wzdłuż jednego z boków ucha, w zakresie utwierdzenia warunki odpowiadały warunkom montażu uchwytu. Zdefiniowano również następujące parametry wytrzymałościowe wykorzystywanych materiałów: moduł Younga i liczba Poissona dla tkaniny równe odpowiednio $E = 50$ MPa i $\nu = 0,4$, dla kleju $E = 500$ MPa i $\nu = 0,35$, dla blachy $E = 72000$ MPa i $\nu = 0,3$.

Na rys. 2 przedstawiono rozkład maksymalnych naprężeń głównych w analizowanym modelu. Największe wartości naprężeń występują w miejscu, w którym pasy brezentu tworzące ucho łączą się pasem przyklejonym do powierzchni pokrycia. W tym miejscu obciążenie z uchwytu jest „przekazywane” przez zszyte ze sobą elementy ucha i tkaniny wzmacniającej m.in. do spoiny połączenia klejowego.

Rozkład maksymalnych naprężeń głównych występujących w samej spoinie klejowej przedstawiono na rys. 3.

Widoczne jest nierównomierne rozłożenie naprężeń wzdłuż długości uchwytu. Najbardziej wyężoną strefą spoiny jest część spoiny w pobliżu szwów łączących poszczególne elementy uchwytu. Występowanie lokalnego spiętrzenia naprężeń wskazuje na to, że spoina klejowa jest również obciążona na oddzieranie.



Rys. 2. Rozkład maksymalnych naprężeń głównych w analizowanym fragmencie modelu: a) tkanina chłonna, b) warstwa kleju, c) podstawa

Fig. 2. Distribution of the maximum principal stresses in the analyzed fragment of model: a) absorptive fabric, b) adhesive layer, c) stand



Rys. 3. Rozkład maksymalnych naprężeń głównych w spoinie klejowej

Fig. 3. Distribution of the maximum principal stresses in the adhesiveweld

Tabela 1. Właściwości badanych klejów rozpuszczalnikowych
Table 1. Properties investigated of solvent-based adhesives

Klej	Czas wstępnego utwardzania	Czas pełnego utwardzania	Temperatura aplikacji [°C]
Butapren	2 h	24 h	18...25
Boll	1 h	ok. 7 dni	5...35
Terokal	3 h	24 h	15...25
Scotch Weld	0,5 h	24 h	18...49

Dlatego też do badań eksperymentalnych należało wyselekcjonować kleje jak najmniej podatne na zjawisko oddzierania [1].

Badania eksperymentalne

W badaniach wykorzystano klej Butapren firmy Dragon, stosowany obecnie do mocowania uchwytów do powierzchni pokrycia jako materiał referencyjny oraz trzy kleje, których właściwości, wg danych producentów, wskazują na możliwość ich zastosowania w proponowanym rozwiązaniu. Charakteryzują je krótkie czasy wstępnego wiązania, a ponadto wszystkie tworzą elastyczne spoiny mało podatne na zjawisko oddzierania, są odporne na promieniowanie UV, wilgoć oraz zjawisko pełzania. W tab. 1 przedstawiono podstawowe parametry katalogowe stosowanych materiałów.

Próbki do badań zostały wykonane wg następującej technologii:

- 1) Odtłuszczenie acetonem powierzchni do klejenia.
- 2) Zagruntowanie klejonych powierzchni cienką warstwą kleju i pozostawienie ich do czasu odparowania rozpuszczalnika (wstępne „wyschnięcie” kleju).
- 3) Ponownie pokrycie klejonych powierzchni cienką warstwą kleju. Po odparowaniu rozpuszczalnika powierzchnie zostały dociśnięte przez ok. minutę. Dodatkowo wałkiem usuwano pęcherzyki powietrza.
- 4) Przyklejone uchwyty pozostawiono na 4 dni do całkowitego odparowania rozpuszczalnika.

W pierwszym etapie wykorzystano próbki symetryczne, składające się z blachy wykonanej ze stopu o grubości 1 mm, do której z obydwu jej stron symetrycznie przyklejono uchwyty materiałowe. W celu określenia wytrzymałości spoin klejowych próbki uchwytów zostały poddane rozciąganiu w maszynie wytrzymałościowej HT-2402. Za zniszczenie połączenia klejowego uznano moment wyraźnego i gwałtownego

spadku obciążenia lub moment widocznego oderwania uchwytu od powierzchni blachy. W trakcie wykonywania testów eksperymentalnych okazało się, że niemożliwe jest uzyskanie symetrycznego obciążenia próbki, a zdeformowana blacha „pogłębiała” efekt nierównomiernego wyężenia próbki. Otrzymane wyniki nośności połączeń o wartościach poniżej oczekiwanego poziomu zaprezentowano w tab. 2.

W drugim etapie badań zastosowano próbkę składającą się z blachy ze stopu 2024Ta o grubości 3 mm, zapewniającą odpowiednią dla struktury półskorupowej sztywność i przyklejonego do niej z jednej strony uchwytu. Ponieważ już w pierwszym etapie badań próbki, w których zastosowano klej Butapren i klej Boll, cechowała niewielka nośność, w drugim etapie wykorzystano tylko kleje Terokal i Scotch Weld. Otrzymane wyniki badań próbek jednostronnych zamieszczono w tab. 3.

Próbki w których zastosowano klej Terokal uległy zniszczeniu przy wartościach obciążenia znacznie przekraczających założoną wartość 1 kN (średnio powyżej 50% od przyjętego kryterium zniszczenia). Dodatkowo otrzymane wyniki cechował mniejszy rozrzut. Wyniki testów niszczenia próbek, w których stosowano klej Scotch-Weld, okazały się mniej obiecujące. W przypadku tylko jednej próbki wartość obciążenia niszczącego przekroczyła założoną granicę 1 kN.

Tabela 2. Nośność próbek symetrycznych
Table 2. Load capacity of symmetric samples

Klej	Nośność [N]	Klej	Nośność [N]	Klej	Nośność [N]	Klej	Nośność [N]
Butapren	26	Boll	162	Terokal 2444	420	Scotch Weld	380
	30		151		770		570
	18,5		186		765		520
	0		360		590		-

Tabela 3. Wyniki badań eksperymentalnych próbek jednostronnych
Table 3. Results of experimental tests of unilateral samples

Klej	Długość oddzieranej nakładki [m]	Nośność [N]	Wytrzymałość na oddzieranie [kN/m]
Terokal 2444	0,10	1490	14,90
	0,115	1730	15,04
	0,12	2050	17,08
	0,12	1750	14,58
	0,12	1630	13,58
Scotch Weld	0,155	990	6,39
	0,160	1100	6,88
	0,12	250	2,08
	0,12	560	4,67
	0,12	630	5,25

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i wykonanych testów eksperymentalnych stwierdzono, że:

- w analizowanym węźle montażowym występuje najmniej pożądanym przypadkiem obciążenia spoiny klejowej – oddzieranie,
- założone kryteria uproszczenia sposobu przygotowania powierzchni klejonej (tylko przez jej odtłuszczenie) oraz skrócenia czasu przygotowania spoiny klejowej o 70% – z 14 do 4 dni – okazały się bardzo trudne do spełnienia z wykorzystaniem dostępnych na rynku aplikacji klejowych,
- z otrzymanych rezultatów badań wynika, że jedynie zastosowanie kleju Terokal 2444 umożliwiło przygotowanie węzła montażowego spełniającego przyjęte kryterium nośności.

LITERATURA

- [1] Cagle Ch.V. 1977. „Kleje i klejenie”. Warszawa: WNT.
- [2] Czaplicki J. i in. 1987. „Klejenie tworzyw konstrukcyjnych”. Warszawa: WKŁ.

- [3] Godzimirski J., M. Rośkowicz, S. Tkaczuk. 2010. „Wytrzymałość połączeń klejowych”, Warszawa: WAT.

- [4] Harris, Franklin D. 2011. “Introduction to autogyros, helicopters, and other V/STol aircraft”. NASA.

- [5] Stafiej W. 2000. „Obliczenia stosowne przy projektowaniu szybowców”. Politechnika Warszawska.

dr hab. inż. Marek Rośkowicz – Instytut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: marek.roskowicz@wat.edu.pl

dr inż. Sławomir Tkaczuk – Instytut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: slawomir.tkaczuk@wat.edu.pl

dr inż. Piotr Leszczyński – Instytut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: piotr.leszczynski@wat.edu.pl