

WPLYW OPASANIA ROWINGU SZKLANEGO WOKÓŁ TULEI WĘZŁA MOCOWANIA ŁOPATY ŚMIGŁOWCA NA WYTRZYMAŁOŚĆ STATYCZNĄ DŹWIGARA

RADOSŁAW GUZIKOWSKI

Centrum Technologii Kompozytowych, Instytut Lotnictwa, Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa
radoslaw.guzikowski@ilot.edu.pl

Streszczenie

Artykuł opisuje próbę eksperymentalną i analizy przy użyciu Metody Elementów Skończonych (MES) mające na celu zweryfikowanie zasadności stosowania współczynnika obniżającego naprężenia dopuszczalne w miejscu zawijania rowingu szklanego, na przykład na tulejach w nasadzie łopaty wirnika nośnego śmigłowca.

Do przeprowadzenia próby eksperymentalnej zaprojektowano symetryczną próbkę składającą się z dwóch tulei opasanych rowingiem w celu zapewnienia poprawnej pracy układu. W obliczeniowej części próby wykorzystano z oprogramowania MSC PATRAN 2014.1 oraz MSC NASTRAN 2014.1.

Próba polegała na statycznym rozciąganiu próbki w jej osi podłużnej aż do zniszczenia próbki. Badaniom poddano trzy próbki o oznaczeniach S-S1, S-S2 i S-S3. Dla próbek osiągnięto odpowiednio siły niszczące: 139,8 kN, 133,3 kN oraz 146,4 kN, wartość uśredniona wynosi 139,8 kN. Wyniki próby eksperymentalnej są zbliżone do zakładanej siły niszczącej z uwzględnieniem współczynnika ($k=1,396$) wynoszącej 143,3 kN. Różnica wynosi od 2% (dla próbki S-S3) od 7% (dla próbki S-S2). Wszystkie próbki pękły w miejscu przejścia odcinka prostoliniowego w owinięcia.

Następnie przeprowadzono obliczenia MES sprawdzając naprężenia w rowingu przykładając obciążenie równe 140 kN odpowiadające w przybliżeniu sile wyznaczonej w próbie eksperymentalnej. Analizy pokazały, że w przypadku nieuwzględniania współczynnika k maksymalne naprężenia w próbce nie przekraczają naprężeń dopuszczalnych. W przypadku zastosowania współczynnika $k=1,396$ naprężenia na owinięciach wokół tulei przekraczają naprężenia dopuszczalne. Dodatkowo największe naprężenia w próbce występują w strefie przejścia części prostoliniowej w owinięcia, co pokrywa się z miejscami pęknięć próbek.

Przeprowadzone analizy potwierdziły słuszność stosowania i sposób obliczania współczynnika obniżającego wytrzymałość rowingu na rozciąganie na owinięciach.

Słowa kluczowe: analiza MES, rowing, próby wytrzymałościowe, wytrzymałość na rozciąganie

1. WPROWADZENIE

Typowa łopata wirnika nośnego śmigłowca z punktu widzenia wytrzymałości i sztywności zbudowana jest z trzech zasadniczych elementów [1]:

1. dźwigara;
2. kesonu;
3. okucia mocowania do głowicy.

Pokrycie umożliwia wprowadzenie obciążeń aerodynamicznych na struktury wytrzymałościowe łopaty [1].

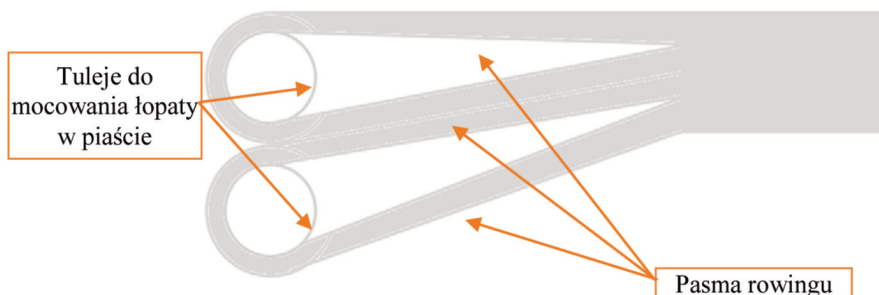
Zastosowane materiały do budowy łopat pozwalają na wyróżnienie łopat [1]:

1. metalowych;
2. mieszanych: metalowy dźwigar oraz kompozytowe pokrycia;
3. kompozytowych.

W przypadku łopat kompozytowych dźwigar może mieć jedną z zasadniczych form:

1. rury wykonanej z tkanin (jedno- lub dwukierunkowych) przesyconych żywicą;
2. wiązek rowingowych uformowanych w dźwigar o przekroju zwartym; lub konstrukcja łącząca obie koncepcje.

Nasadę łopaty projektuje się w taki sposób, aby umożliwiała zamocowanie łopaty w piąście bezpośrednio lub za pomocą okuć. W przypadku dźwigarów rowingowych stosuje się tulejki, na których formuje się nasadę łopaty (Rys. 1).



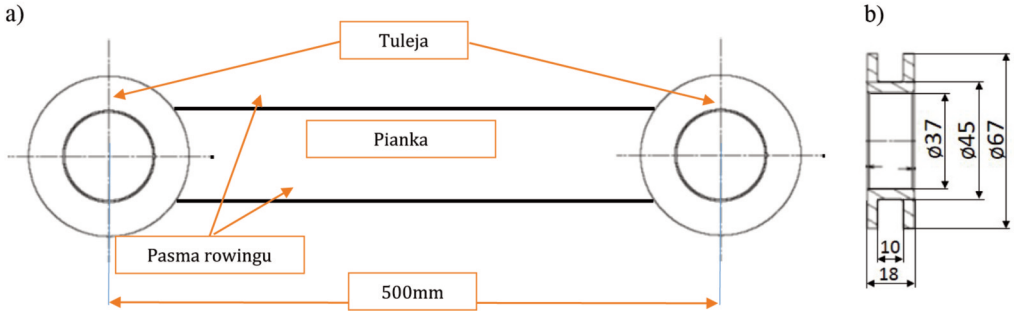
Rys. 1. Przykładowy sposób kształtowania nasady łopaty WN z dźwigarem rowingowym [opracowanie własne, 2016]

Takie rozwiązanie upraszcza konstrukcję, ale powoduje spadek wytrzymałości zarówno statycznej jak i zmęczeniowej dźwigara. W czasie badań zmęczeniowych oraz statycznego rozciągania prowadzonych dla łopaty śmigłowca Boeing AH-64 Apache [2] zauważono, że rowing w miejscu nawijania na tulejach ulega zniszczeniu znacznie wcześniej niż odcinki prostoliniowe. Na podstawie badań eksperymentalnych wyznaczono wzór empiryczny na współczynnik k (1), który obniża naprężenia dopuszczalne w miejscu owijania rowingu na tulejach.

$$k = \frac{1,3 \left(\frac{R}{r} \right)^2 + 0,7}{\frac{R}{r} + 1} \quad (1)$$

gdzie: R – zewnętrzny promień owijania rowingu; r – wewnętrzny promień owijania rowingu (promień tulei).

W celu sprawdzenia możliwości zastosowania wzoru także dla innych geometrii nasady zaproponowano próbę polegającą na statycznym rozciąganiu do zniszczenia próbki zaprojektowanej jako dwie tuleje opasane rowingiem, próbki były symetryczne, co pozwoliło na wprowadzenie równomiernego obciążenia. Szkic próbki oraz wymiary tulei zastosowanych w próbie przedstawia rysunek 2a.



Rys. 2. Szkic próbki do prób statycznego rozciągania: a) szkic ogólny; b) wymiary zastosowanej tulei [opracowanie własne, 2016]

Próbki wykonano z S2-Glass firmy AGY: R-310 – S-2 Glass Roving (449 750); TEX: 675 g/1000 m [3], przesycany żywicą firmy HUNTSMAN: LY 120/ Ren HY 99 [4].

Przekrój pasa rowingowego wykonano jako prostokąt 10x10 mm (12 pasm rowingu) o zawartości żywicy 45% (sumaryczny TEX 11 475 g/1000 m).

Dla zaprojektowanej próbki współczynnik k wynosi:

$$k = \frac{1,3 \left(\frac{R}{r} \right)^2 + 0,7}{\frac{R}{r} + 1} = \frac{1,3 \left(\frac{32,5}{22,5} \right)^2 + 0,7}{\frac{32,5}{22,5} + 1} = 1,39595 \approx 1,396 \quad (2)$$

Dodatkowo na powierzchni próbki zamieszczone były okładziny wykonane z kompozytu szklano-epoksydowego.

Współczynnik k wynikający z próby można obliczyć zgodnie z zależnością (3):

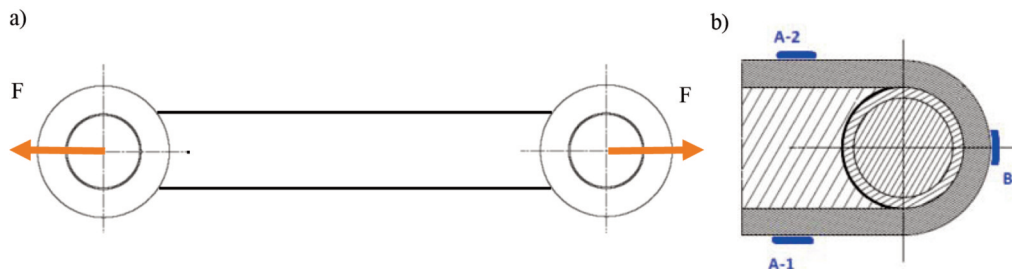
$$\sigma_{NISZCZACE} = k \times \sigma_{DOP} \quad (3)$$

2. PRZEBIEG PRÓBY STATYCZNEGO ROZCIĄGANIA

W próbie statycznej, przeprowadzonej w Centrum Badania Materiałów i Konstrukcji Instytutu Lotnictwa [5], zamocowany obiekt został rozciągany siłą w jego osi podłużnej zgodnie ze schematem na rysunku 3a. Odkształcenia były mierzone za pośrednictwem tensometrów rozmieszczonych zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 3b.

Szacunkowa wartość obciążeń niszczących dla rowingu szklanego S2-Glass (zakładane naprężenia dopuszczalne na rozciągania 1 000 MPa [6]):

1. bez uwzględnienia współczynnika empirycznego wynikającego z owijania rowingu na tulei: 200 kN;
2. z uwzględnieniem współczynnika empirycznego (1.396) wynikającego z owijania rowingu na tulei: 143,3 kN.



Rys. 3. Schemat przykładania obciążenia w próbie statycznej [opracowanie własne, 2016]

Na podstawie tensometrów umieszczonych na rowingu w miejscu owijania na tulejach (tensometry B) oraz naprężeń niszcących z próby wyznaczono moduł Young'e'a wzdłuż włókien dla przesyconego rowingu (udział żywicy 46%).

Wykorzystując pomiary odkształceń dla tensometrów A-1 oraz A-2 wyznaczono naprężenia odpowiadające sile niszczącej poza obszarem owijania rowingu na tulejach. Zestawienie wyników zawiera tabela 1.

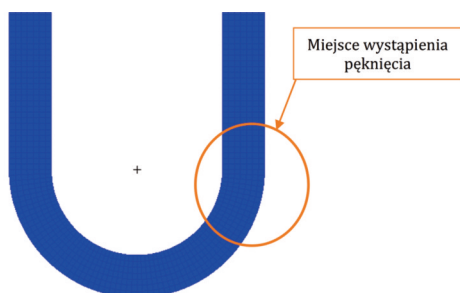
Tab. 1. Zestawienie wyników próby statycznego rozciągania [opracowanie własne, 2016]

Nr próbki	Siła niszcząca, kN	Wartość średnia siły niszczącej, kN	Naprężenia w miejscu pęknięcia, MPa		Odształcenia dla tensometrów, $\mu\epsilon$			Moduł Young'a, MPa	Naprężenia poza obszarem uszkodzenia, MPa			
					A1	A2	B		E1 (B)	A1	A2	Średnie
S-S1	139,8	139,83	699	699,167	14748	-	11060	63200,723	932,08	-	831,06	
S-S2	133,3		666,5		13834	12811	11376		58588,256	810,51		750,57
S-S3	146,4		732		-	-	12189		60054,147	-		-

Jeżeli przyjąć jako obowiązujący współczynnik k obliczony zgodnie z wzorem 2 (1,396) naprężenia dopuszczalne zgodnie ze wzorem 3 w rowingu wynoszą:

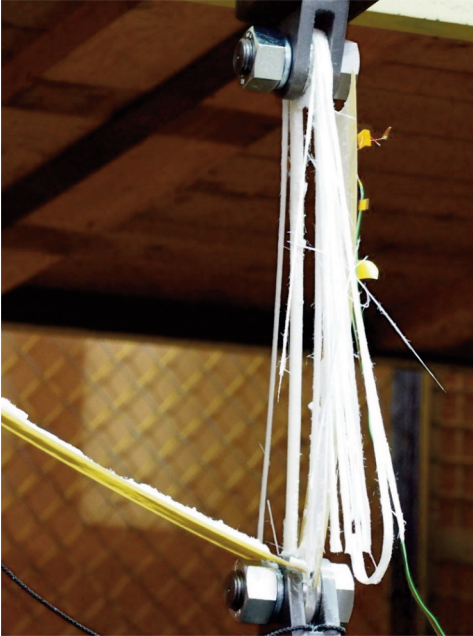
1. naprężenia uśrednione: $\sigma_{DOP} = 976,04$ MPa;
2. naprężenia dopuszczalne dla próbki S-S1: $\sigma_{DOP} = 975,80$ MPa;
3. naprężenia dopuszczalne dla próbki S-S2: $\sigma_{DOP} = 929,04$ MPa;
4. naprężenia dopuszczalne dla próbki S-S3: $\sigma_{DOP} = 1021,87$ MPa.

Pęknięcia próbek przebiegały w dwóch etapach. Najpierw pękły okładziny z kompozytu szklano-epoksydowego a następnie pękały pasma rowingu, w miejscu zaznaczonym na rysunku 4.



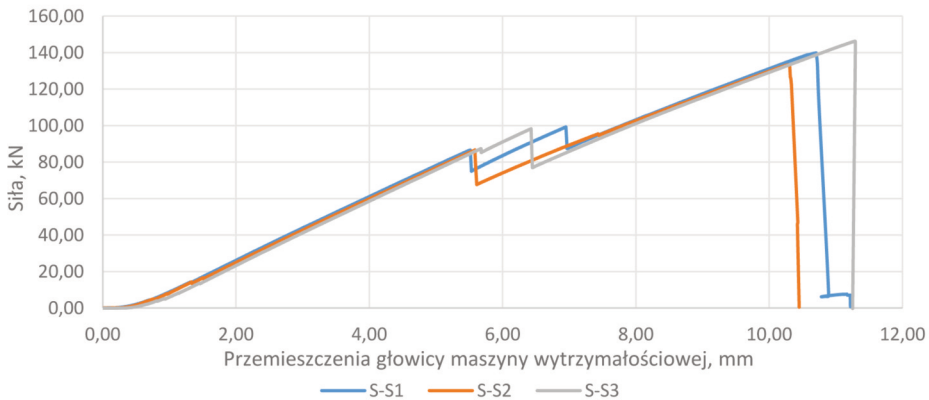
Rys. 4. Miejsce pęknięcia rowingu [opracowanie własne, 2016]

Na rysunku 5 pokazano na przykładzie próbki S-S1 formę zniszczenia próbek.



Rys. 5. Próbką S-S1 po teście statycznego rozciągania [opracowanie własne, 2016]

Przebieg siły w funkcji przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej przedstawia rysunek 6. Moment, w którym pękła okładzina szklano-epoksydowa widoczny jest na wykresach jako uskok siły. Odklejenia okładzin nastąpiły w przedziale siły $85 \div 100$ kN, przy czym dla próbek S-S1 oraz S-S2 siła niszcząca wynosi 100 kN, ale dla próbki S-S1 przemieszczenie głowicy maszyny wytrzymałościowej (a także odkształcenie próbki) jest większe o 0,43 mm (7,13 mm w stosunku do 6,70 mm). W początkowej fazie wykresów widoczny jest przyrost przemieszczenia dla zerowego przyrostu siły, co obrazuje zerowanie luzów układu maszyna wytrzymałościowa - próbka, ale ten zakres jest porównywalny dla próbek. Odkształcenia niszczące jak i siły niszczące dla próbek są różne. Największą siłą niszczącą wynoszącą 146,4 kN zarejestrowano dla próbki S-S3, a najmniejszą dla S-S2 (133,3 kN).



Rys. 6. Porównanie siły w funkcji przemieszczenia dla trzech próbek [opracowanie własne, 2016]

3. ANALIZA MES PRÓBKII

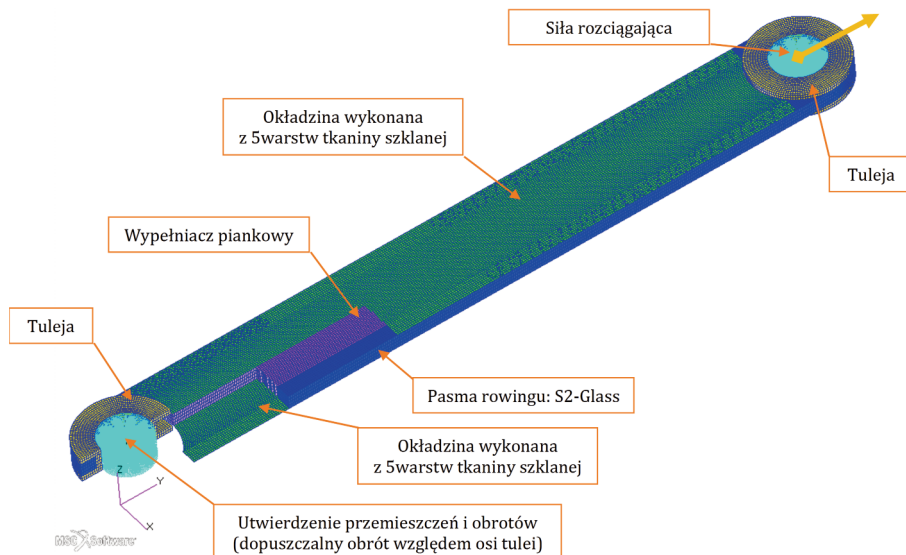
3.1. Opis modelu obliczeniowego

Model zbudowano z użyciem elementów typu [7]:

1. SHELL – okładziny szklano-epoksydowe;
2. SOLID – tuleje, pasma rowingu, wypełniacz piankowy.

Model przedstawiono na rysunku 7 z wygaszoną częścią elementów w celu zaprezentowania podzespołów wchodzących w jego skład.

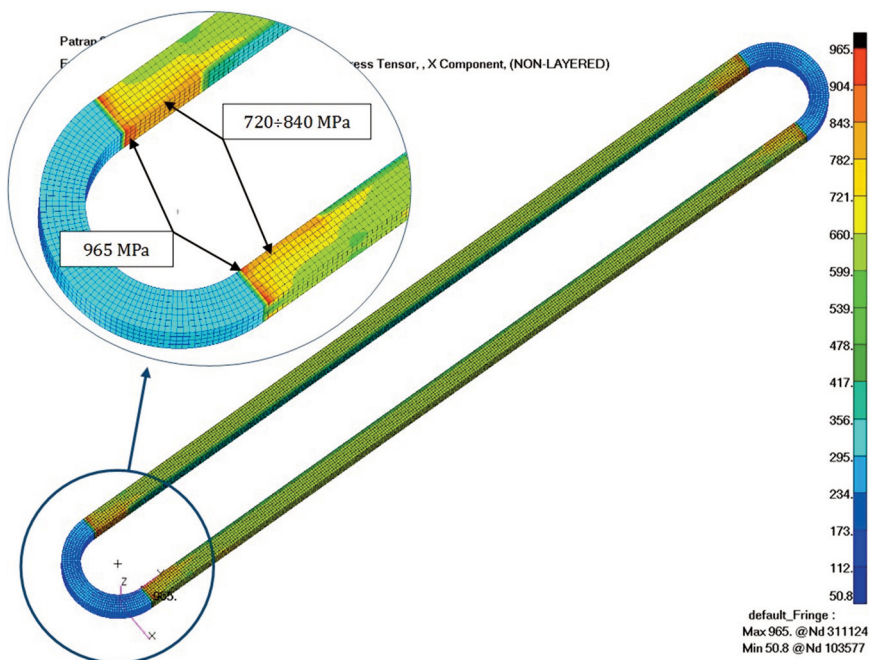
Dane materiałowe użyte do analiz MES przyjęto zgodnie z [6].



Rys. 7. Struktura modelu do analiz MES [opracowanie własne, 2016]

3.2. Wyniki analiz MES

Wyniki analizy MES pokazano dla siły niszczącej 140 kN. Jest to siła, która odpowiada uśrednionej sile niszczącej z prób eksperymentalnych oraz siła, dla której zostaje wyczerpana nośność rowingu.



Rys. 8. Naprężenia w rowingu wzdłuż włókien dla odcinków prostoliniowych [opracowanie własne, 2016]

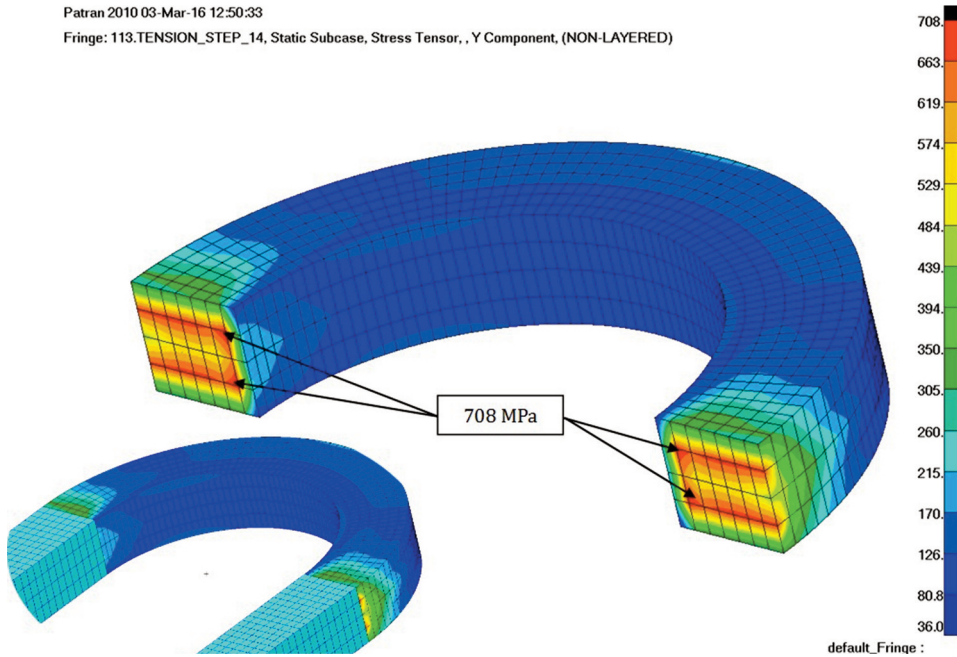
Na rysunku 8 oraz 9 przedstawiono naprężenia w kierunku wzdłuż włókien rowingu, oddzielnie dla odcinków prostoliniowych i owinięć wokół tulei. Jako naprężenia dopuszczalne przyjęto następujące wartości:

1. dla odcinków prostoliniowych: $\sigma_{DOP} = 976$ MPa;
2. dla owinięć na tulejach: $\sigma_{DOP} = 699$ MPa.

Analiza pokazała, że wyniki obliczeń odzwierciedlają wyniki prób eksperymentalnych i nośność rowingu została wyczerpana w strefie przejścia odcinków prostoliniowych w owinięcia. Dodatkowo widoczna jest konieczność stosowania współczynnika obniżającego wytrzymałość rowingu w strefie owinięć, ponieważ bez uwzględnienia współczynnika k naprężenia w rowingu nie przekraczają wartości dopuszczalnej (976 MPa). Najbardziej wyczerpanym obszarem rowingu w odcinku prostoliniowym są obszary przejścia odcinków prostoliniowych w owinięcia, co pokazano na rysunku 8.

Jako zniszczenie (pęknięcie) rowingu w przypadku analiz MES uznaje się przekroczenie dopuszczalnych naprężeń w danym kierunku. W próbce naprężenia dopuszczalne zostały przekroczone tylko w kierunku wzdłuż włókien.

Na rysunku 8 przedstawiono naprężenia w rowingu w odcinkach prostoliniowych, niebieskie obszary wokół tulei zostały wygaszone. Naprężenia dla owinięć pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Naprężenia w rowingu wzdłuż włókien dla owinięć wokół tulei [opracowanie własne, 2016]

Minimalny współczynnik zapasu wytrzymałości statycznej w odcinku prostoliniowym rowingu obliczono zgodnie ze wzorem 4.

$$MS = \frac{\sigma_{DOP}}{\sigma_1} - 1 = \frac{976 \text{ MPa}}{965 \text{ MPa}} - 1 = 0,0114 \approx 0,01 \quad (4)$$

Minimalny współczynnik zapasu wytrzymałości statycznej dla owinięć rowingu wokół tulei obliczono zgodnie ze wzorem 5.

$$MS = \frac{\sigma_{DOP}}{\sigma_1} - 1 = \frac{699 \text{ MPa}}{708 \text{ MPa}} - 1 = -0,0127 \quad (5)$$

4. WNIOSKI

Analizy MES oraz próby eksperymentalne doprowadziły do następujących wniosków:

1. Dla założonych naprężeń dopuszczalnych na rozciąganie dla rowingu oraz po uwzględnieniu współczynnika obniżającego wytrzymałość rowingu w miejscu zawijania na tulejach ($k=1,396$) obliczono siłę niszczącą równą 143,3 kN (naprężenia dopuszczalne 1000 MPa).
2. Średnia siła niszcząca z próby wynosi 139,83 kN (maksymalna siła niszcząca wynosi 146,4 kN, a najmniejsza – 133,3 kN). Dla takiej siły niszczącej naprężenia dopuszczalne w miejscu pęknięcia próbek wynoszą 699,167 MPa. Pęknięcia próbek wystąpiły na części rowingu owiniętej na tulejach lub w strefie przejścia owinięcia w odcinki prostoliniowe, dlatego można przyjąć, że wyznaczone naprężenia są to naprężenia niszczące dla rowingu owiniętego na tulei. Stosując współczynnik k (1,396) naprężenia dopuszczalne dla rowingu wynoszą 976,04 MPa (wartość uśredniona).
3. Dla obciążenia próbki 85 kN doszło do odklejenia okładzin wykonanych z kompozytu wzmocnianego włóknem szklanym, co obrazuje spadek siły w tym obszarze na wykresach zależności przyłożonego obciążenia od przemieszczeń głowicy maszyny wytrzymałościowej.
4. Rozbieżności w siłach niszczących dla poszczególnych próbek (od 133,3 kN do 146,4 kN) mogą wynikać z nierównomierniej siły naciągu poszczególnych pasm rowingu w czasie wykonywania próbek. Spowodowało to wprowadzenie wstępnych naprężeń rozciągających próbkę, co obniża wytrzymałość statyczną. Dodatkowo nierównomierne naciąganie pasm rowingu mogło spowodować, że próbki nie pracowały w sposób symetryczny, dlatego pęknięcie wystąpiło z jednej strony próbki.
5. W analizie MES sprawdzono naprężenia w rowingu dla siły niszczącej wyznaczonej w próbie eksperymentalnej. Maksymalne naprężenia w rowingu w kierunku wzdłuż włókien dla odcinka prostoliniowego wynoszą 965 MPa, natomiast dla owinięć 708 MPa. Dla owinięć naprężenia w rowingu przekraczają naprężenia dopuszczalne z uwzględnieniem współczynnika k . W przypadku niestosowania współczynnika k naprężenia w próbce nie przekraczają dopuszczalnych. To porównanie potwierdza konieczność stosowania współczynnika obniżającego wytrzymałość rowingu wynikającą z owijania go na tulejach.
6. Porównanie wyników próby eksperymentalnej oraz analiz MES dla takich samych sił niszczących przedstawia tabela 2.

Tab. 2. Porównanie wyników próby eksperymentalnej oraz analizy MES [opracowanie własne, 2016]

Siła, kN		Naprężenia					
		Odcinek prostoliniowy			Zawinięcie		
Próba	MES	Próba, MPa	MES, MPa	Różnica, %	Próba, MPa	MES, MPa	Różnica, %
139.83	140	965	976.04	-1.14 % ¹⁾	699.167	708	-1.26 % ¹⁾

¹⁾ „-„, oznacza, że wartość naprężeń w analizie MES jest większa od naprężeń uzyskanych w próbie.

Z porównania wynika, że naprężenia maksymalne w analizie MES są większe od naprężeń wyznaczonych z próby eksperymentalnej. Naprężenia w miejscu naklejenia tensometrów A-1 oraz A-2 są większe niż naprężenia obliczone w analogicznym miejscu z wykorzystaniem MES.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Szablewski K., Jancelewicz B., Łucjanek W., 1995, „Wstęp do konstrukcji śmigłowców”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- [2] Kiraly R., Head R.E., 1983, „Manufacturing Methods and Technology (MANTECH) Program: Manufacturing Techniques for Composite Main Rotor Blade for the Advanced Attack Helicopter”, United States Army Aviation Research and Development Command, St. Louis, MO
- [3] www.agy.com (2016 r.).
- [4] <http://www.huntsman.com/corporate/a/Home> (2016 r.).
- [5] Wiśniowski W., 2014, „Specjalizacje Instytutu Lotnictwa – przegląd i wnioski”, Prace Instytutu Lotnictwa, Vol. 235(2), s. 7-16.
- [6] Kaddour A.S, Hinton M.J., 2012, „Input data for for test cases used in benchmarking triaxial failure theories of composites, Journal of Composite Materials”, No. 19-20/vol. 46; 2295-2312.
- [7] Quick Reference Guide: MSC Nastran, 2013.

EFFECT ON BELTED GLASS ROVING AROUND THE MOUNTING BUSHING ON THE STATIC STRENGTH OF ROTOR BLADE SPAR

Abstract

The article describes the test and analysis using Finite Element Method (FEM) to verify the legitimacy of the coefficient of allowable stress in place winding glass roving, for example bushing at the base of the rotor blades of the helicopter.

For test was designed symmetrical sample of two roving belted bushing in order to ensure correct operation of the system. In the computational part of the test used a software MSC PATRAN 2014.1 and MSC NASTRAN 2014.1.

The test was a static stretching of the sample in its longitudinal axis until failure of the sample. Three samples were tested, labeled S1-S, S-S-S2 and S3. For samples achieved force, respectively: 139.8 kN, 133.3 kN and 146.4 kN averaged value is 139.8 kN. Experimental results of the test are similar to the expected breaking force (corrected for $k=1.396$) of 143.3 kN. The difference ranges from 2% (sample S-S3) to 7% (sample S-S2). All samples were broken at the transition of straight in the bushing.

The tension in the roving was checked by FEM calculation by applying a load equal to 140 kN corresponding to approximately the force determined in the experimental test. Analysis showed that in the case of not taking account of the safety factor k the maximum stress in the specimen do not exceed the allowable stress. If a coefficient $k=1.396$ is in used, stresses around the bushing exceed the allowable stress. In addition, the highest stresses in the sample are present in the transition zone of the rectilinear portion of the wrapper which coincides with the destinations cracks samples.

The conducted analysis confirmed the validity of the use and method of calculation of lowering tensile strength in roving in wrappers.

Keywords: FEM analysis, roving, strength tests, tensile strength