

Piotr Jaśkowski¹, Mirosław Rodzewicz², Anna Boczkowska³

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa

Krzysztof J. Kurzydłowski⁴

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

OTRZYMYWANIE, STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWE WŁÓKNISTYCH KOMPOZYTÓW WĘGLOWO-EPOKSYDOWYCH Z PRZEZNACZENIEM DO KONSTRUKCJI LOTNICZYCH

Badano kompozyty węglowo-epoksydowe przeznaczone do konstrukcji lotniczych. Przedstawiono wymagania, jakie muszą spełniać kompozyty stosowane w konstrukcjach lotniczych. Porównano wybrane właściwości składników kompozytu podawane przez producentów z wynikami badań własnych. Dla potrzeb niniejszej pracy zaprojektowano i wykonano sycidło do przesycania rovingu węglowego, a następnie przeprowadzono jego kolejne modyfikacje w celu ujednorodnienia struktury otrzymanego kompozytu włóknistego. Zbadano strukturę i właściwości wytrzymałościowe wykonanych próbek po kolejnych modyfikacjach budowy sycidła. Wyznaczono wybrane stałe materiałowe kompozytu węglowo-epoksydowego na podstawie odkształceń przy zginaniu i skręcaniu. Przeprowadzono badania wytrzymałości otrzymywanych kompozytów na ściskanie w funkcji temperatury i sposobów mocowania próbek. Stwierdzono wpływ temperatury, konstrukcji sycidła, jak i sposobu mocowania próbek węglowo-epoksydowych na wyniki badań wytrzymałościowych.

Słowa kluczowe: kompozytowe konstrukcje lotnicze, kompozyty węglowo-epoksydowe, właściwości wytrzymałościowe kompozytu

MANUFACTURING, STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF UNIDIRECTIONAL CARBON-EPOXY COMPOSITES FOR AIRCRAFT CONSTRUCTIONS

In the paper are presented the results of investigations of unidirectional carbon-epoxy composites intended to be used in aircraft constructions. The requirements for such composites are presented. Parameters defining some selected properties of composite components specified by the manufactures were compared with the results of authors' experimental investigation. For this purpose roving impregnation device (RID) for carbon fiber were designed and constructed, being then modified to make the fiber composite homogeneous. Structures and mechanical properties of composite specimens after RID modification were examined. Selected material constants of the carbon-epoxy composite subject to a bending load were determined. The strength properties under compression as a temperature function and specimen fixing method were investigated. The influence of RID construction, testing temperature as well as fixing method upon the results obtained was proved.

Key words: composite structure of aircraft, carbon-epoxy composites, mechanical properties of composites

WPROWADZENIE

Kompozyty polimerowe znalazły zastosowanie w konstrukcjach lotniczych głównie ze względu na ich małą gęstość i wysoką wytrzymałość właściwą. Polska przez długie lata była jednym z głównych światowych producentów szybowców. W latach 70. w Szybowcowych Zakładach Doświadczalnych (SZD) w Bielsku-Białej z powodzeniem wdrożono technologię kompozytów epoksydowo-szklanych, bazując w dużej mierze na materiałach krajowych. Po likwidacji SZD w latach 90., ośrodkiem w którym projektuje się nowe konstrukcje szybowców jest Politechnika Warszawska. Działalność biura projektowego PW zaowocowała powstaniem szybowca PW-5 - zwycięzcy konkursu FAI w kategorii World Class Glider - oraz dwumiejscowego szybowca szkolno-treningowego PW-6. Są to konstrukcje wykona-

ne z kompozytów szklano-epoksydowych. W ostatnich

latach nastąpił rozwój nowej klasy wysoko wyczynowych szybowców zawodniczych, tzw. klasy 18-metrowej. Szybowce tej klasy, przy rozpiętości skrzydeł 18 metrów, dorównują osiągnięciami szybowcom klasy otwartej (o rozpiętości skrzydeł dochodzącej do 30 metrów) przy niższych kosztach wytwarzania. Jest to możliwe dzięki najnowszym osiągnięciom w zakresie aerodynamiki i zastosowaniu nowoczesnych materiałów kompozytowych, zwłaszcza kompozytów węglowo-epoksydowych. Prognozowany dalszy wzrost popularności szybowców klasy 18-metrowej (rozgrywane są w tej klasie liczne zawody, w tym o randze Mistrzostw Świata) oraz zdominowanie rynku przez konstrukcje niemieckie wywołało wśród pracowników i studen-

^{1,2,3} dr inż., ⁴ prof. dr hab. inż.

tów Politechniki Warszawskiej duże zainteresowanie i chęć uczestniczenia we współzawodnictwie o prymat w nowej klasie szybowców. Wejście w domenę klasy 18-metrowej otwiera nowe możliwości w dziedzinie interdyscyplinarnych działań naukowych w zakresie inżynierii materiałowej i rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych. W grę wchodzi bowiem nowe standardy konstrukcyjne, związane z zastosowaniem kompozytów zbrojonych włóknem węglowym, co wiąże się z koniecznością wykonania wielu badań podstawowych w zakresie wytrzymałości statycznej i trwałości zmęczeniowej różnych struktur kompozytowych, jak również badań nad optymalizacją struktury konstrukcyjnej cienkich skrzydeł, metod ich łączenia itd. Przeniesienie na ten grunt doświadczeń wynikających z zastosowania kompozytów szklano-epoksydowych jest niewystarczające, gdyż nie zapewnia optymalnego wykorzystania możliwości stwarzanych przez kompozyty węglowo-epoksydowe.

Niniejsza praca stanowi przyczynek do stworzenia własnej bazy danych materiałowych, związanych z zastosowaniem konkretnej technologii oraz metodyki badań stosowanych w PW, i przedstawia wyniki badań własnych kompozytów zbrojonych rovingiem węglowym. Wyniki badań odnoszone są do norm konstrukcyjnych zawartych w przepisach technicznych budowy szybowców.

Obowiązujące w Europie przepisy techniczne budowy szybowców i motoszybowców JAR22 [1], opierające się na badaniach niemieckich wytwórni szybowcowych [2], podają akceptowalne poziomy naprężeń dopuszczalnych w konstrukcji (czyli takich, jakie mogą wystąpić w locie). Stosowanie się do nich zwalnia konstruktora z przeprowadzenia długotrwałych i kosztownych badań zmęczeniowych. W strukturach typu UD (uni-directional, czyli o jednokierunkowym ułożeniu włókien), zbrojonych rovingiem szklanym, jest to poziom 250 MPa. W strukturach zbrojonych rovingiem węglowym poziom ten wynosi 400 MPa. W warunkach technicznych dopuszczenia do użytkowania dźwigarów skrzydła szybowca PW-5 zapisane jest, że wyniki ściskania tzw. próbek świadków dla pasów dźwigara nie mogą być niższe niż 500 MPa.

Próba taka przeprowadzana jest w temperaturze 54°C. Powyższe liczby ilustrują jedno z kryteriów zdolności lotniczej, które oznaczają, że akceptowany przez państwowy nadzór lotniczy poziom naprężeń niszczących przy ścisnaniu próbki w 54°C musi być co najmniej dwukrotnie większy od poziomu naprężeń dopuszczalnych w pasie dźwigara. Przenosząc to kryterium w domenę konstrukcji węglowo-epoksydowych, oznacza to, że wymagany poziom naprężeń niszczących w temperaturze 54°C dla próbek zbrojonych rovingiem węglowym musi wynosić min. 800 MPa.

Z tym wiąże się cel opisanych poniżej badań, który polega na sprawdzeniu, czy przy zastosowaniu opraco-

wanych w PW technologii wartość ta jest możliwa do osiągnięcia. Wyniki badań kompozytów zbrojonych rovingiem węglowym odniesiono do wyników uzyskanych w tych samych warunkach dla kompozytów zbrojonych rovingiem szklanym.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Do badań użyto materiałów, które posiadają wymagane atesty lotnicze. Jest to roving węglowy firmy Tenax typu 5631 HTS oraz roving szklany ER 3005 produkcji Huty Szkła w Krośnie. Dane producentów wg [3] i [4] oraz wyniki badań własnych dotyczące texu rovingu zamieszczono w tabeli 1.

TABELA 1. Właściwości włókien węglowych i szklanych
TABLE 1. Properties of carbon and glass fibers

	Tenax 5631 HTS	ER3005
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	4155	3400
Moduł Younga przy rozciąganiu, GPa	236,8	73
Wydłużenie przy zerwaniu, %	1,65	3,5
Gęstość, g/cm ³	1,76	2,55
Średnica włókien, μm	7	11
Tex nominalny, g/km	1600	2400
Tolerancja texu, %	0,7	7
Tex zmierzony, g/km	1595	2357

Jako osnowę zastosowano żywicę epoksydową L 285 produkcji niemieckiej firmy MGS GmbH, która jest stosowana dla szybowca PW-5. W celach porównawczych zastosowano żywice epoksydowe Epidian 52 i Epidian 53 produkcji Zakładów Chemicznych „Organica-Sarzyno” w Nowej Sarzynie.

Opracowanie i wykonanie sycidla

W celu wykonania próbek do badań struktury i właściwości wytrzymałościowych kompozytów węglowo-epoksydowych opracowano specjalne sycidło próżniowe (rys. 1), oznaczone jako R. Sycidło to dostosowane było do jednego pasma rovingu, gdyż, wytwarzając próbki z pojedynczych pasm rovingu, uzyskuje się większą kontrolę nad równoległością włókien na całej długości próbki.

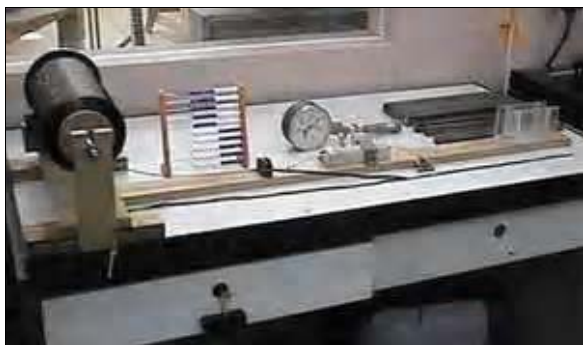
Podczas badań prowadzone były różne modyfikacje sycidla typu R związane z dążeniem do jak najlepszego spełnienia wymogu dobrego przesylenia i odpowietrzenia wiązki rovingu. W kolejności wykonano:

Rys. 1. Schemat działania sycidła typu R1

Fig. 1. Operating scheme of roving impregnating device

- sycidło z komorą sycącą w formie prostej rury - wariant R1 (wykorzystując przy syceniu wyłącznie efekt próżni);
- sycidła z komorami sycącymi w formie rury zagiętej - dwa warianty różniące się promieniami krzywizny, oznaczone jako R2, R3 (wykorzystując przy syceniu zarówno efekt próżni, jak i klina smarnego);
- optymalizację średnicy otworu dławnicy w celu poprawienia jakości otrzymywanych kompozytów.

Schemat działania sycidła oraz wygląd stanowiska do przesycania rovingu i jego kolejne modyfikacje pokazano na rysunkach 1-4.



Rys. 2. Widok ogólny sycidła typu R1

Fig. 2. View of roving impregnation device (RID)



Rys. 3. Sycidło z komorą sycącą o małym promieniu krzywizny (wariant R2)

Fig. 3. Impregnating pipe with small radius of curvature (RID type R2)



Rys. 4. Sycidło z komorą sycącą o dużym promieniu krzywizny (wariant R3)

Fig. 4. Impregnating pipe with big radius of curvature (RID type R3)

W każdym wariacie sycidła komora sycąca była odcinkiem przezroczystego, elastycznego przewodu PVC o średnicy wewnętrznej 5 mm.

W wariacie R1 rurka komory sycącej była prosta (rys. 2). Podciśnienie w rurce pierwotnie regulowane było zaciskiem, umieszczonym bezpośrednio na niej. Zbyt silne zaciśnięcie rurki powodowało łamanie się włókien w rovingu i zapychanie przewodu. Przeniesienie regulacji ciśnienia na zawór pompy próżniowej pozwoliło na rezygnację z regulacji przepływu zaciskiem i dało lepsze efekty.

Pierwsze wyniki ścisania próbek kompozytu wykonanego za pomocą sycidła z prostą komorą sycącą wypadły poniżej oczekiwań i skłoniły do przypuszczenia, że przyczyną jest słabe przesycenie rovingu, który oprócz odpowietrzenia powinien być jeszcze przeformowany. Doprowadziło to do powstania kolejnych wersji sycidła z różnymi rodzajami zagięć przewodu elastycznego, na których tworzy się klin smarny, wspomagający sycenie. Zbyt małe promienie zagięć prowadziły do powstania dużego tarcia pomiędzy włóknem i przewodem, a przez to kruszenia rovingu i zapychania przewodu. Efektem obserwacji działania

sycidla były kolejne modyfikacje toru wiązki rovingowej o coraz większych promieniach i mniejszym kącie opasania, tak aby zmniejszyć odcinek styku rovingu ze ścianką przewodu, a przez to tarcie. Po wykonaniu serii próbek zbrojonych rovingiem szklanym na sycidle R3 (rys. 4) i potwierdzeniu jego dobrej użyteczności wykonano serię próbek zbrojonych rovingiem węglowym.

Wykonanie próbek do badań

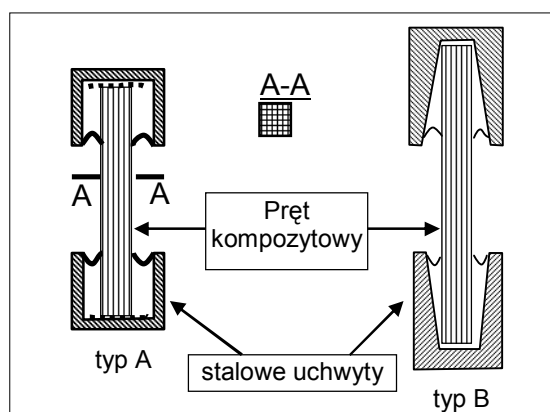
Próbki kompozytu zbrojonego rovingiem do badania wytrzymałości na ściskanie zostały wykonane według [5]. Próbkę tworzy odcinek pręta kompozytowego, którego końce utwierdzone są w stalowych uchwytach, pozwalających na ustawienie próbki na maszynie wytrzymałościowej i równomierne rozłożenie siły obciążającej na powierzchni czołowej próbki.

Zastosowano dwa rodzaje uchwytów: typ A - z wgłębieniem cylindrycznym (stosowany dotąd do badania próbek szklano-epoksydowych) i typ B - z wgłębieniem w kształcie ściętego stożka (opracowany w toku badań) (rys. 5).

Wykonując próbki, szczególną uwagę zwrócono na:

- prostopadłość czoła prętów kompozytowych do ich osi podłużnej,
- prostopadłość zamocowania prętów w uchwytach,
- docięnięcie prętów do dna kubeczków (ważne dla uchwytów typu A),
- równoległość podstaw dolnego i górnego uchwytu.

Aby zachować wyżej wymienione warunki, zastosowano specjalne przyrządy pozycjonujące próbki podczas zalewania w uchwytach. W ten sposób zapewniono taką geometrię próbki z uchwytami, która umożliwi osiowe obciążenie pręta kompozytowego siłą ściskającą.



Rys. 5. Próbki do ściskania kompozytu zbrojonego rovingiem
Fig. 5. Specimens for UD composites compression

WYNIKI BADAŃ

Moduł Younga wyznaczono z zastosowaniem metody zginania czteropunktowego.

Dla belki pryzmatycznej o stałym przekroju, obciążonej momentem gnącym o stałej wartości, jej oś obojętna ulega zakrzywieniu, przy czym krzywizna $\rho(x)$ tej osi wynosi

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{M_g(x)}{EI_z}$$

gdzie:

$M_g(x)$ - moment gnący, Nm,

E - moduł Younga, MPa,

I_z - moment bezwładności przekroju, m⁴.

Oś x jest osią podłużną belki.

Natomiast ugięcie $w(x)$ związane jest z momentem zginającym równaniem liniowym

$$EI_z w''(x) = -M_g(x)$$

Znając więc wartość momentu gnącego M_g , ugięcia w oraz momentu bezwładności przekroju I_z - możliwe jest obliczenie modułu E . Uzyskane w ten sposób rezultaty pomiarów modułu Younga dla kolejnych serii kompozytów węglowo-epoksydowych zamieszczono w tabeli 2.

TABELA 2. Wybrane właściwości kompozytu zbrojonego włóknem węglowym

TABLE 2. Selected properties of the carbon-epoxy composite

Numer serii	0	1	2	6
Rodzaj osnowy	L285	L285	Ep52	L285
Gęstość, g/cm ³	1,463	1,458	1,488	1,438
Stopień napełnienia	0,495	0,542	0,530	0,517
Moduł Younga, GPa	131	137	128	112

Próby ściskania wykonano na maszynie wytrzymałościowej typu Instron 1115 (seria 0/a) oraz na maszynie typu ZD-20 (pozostałe serie). Podczas ściskania w podwyższonej temperaturze (54°C) na maszynie instalowana była specjalna osłona termiczna. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3. W każdej serii badano po 8 próbek.

Próbki serii 0/a i 0/b zostały wykonane z tej samej partii kompozytu. Wyniki badań tych serii różnią się jednak, gdyż sposób wprowadzenia siły, realizowany na obu typach maszyn wytrzymałościowych, był różny. Tylko maszyna ZD-20 wyposażona była bowiem w samonastawną głowicę, niwelującą wpływ odchyłek w prostopadłości uchwytów w stosunku do osi próbek. Najmniejsze nawet odchyłki w geometrii próbek mają istotny wpływ na wartości uzyskiwanych wyników badań.

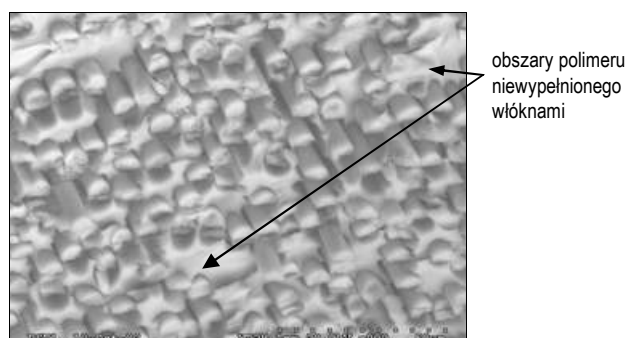
Zastosowanie różnych osnow nie spowodowało znaczącej zmiany wytrzymałości kompozytu. Dla próbek z uchwytami typu A średnia wytrzymałość na ściskanie wynosiła około 750 MPa w temperaturze otoczenia

i około 620 MPa w temperaturze 54°C. Zastosowanie uchwytów typu B wpłynęło na uzyskanie wytrzymałości na ściskanie przekraczających 800 MPa. Dla porównania zamieszczono wartości wytrzymałości na ściskanie kompozytu szklano-epoksydowego wykonanego za pomocą sycidła typu R2, które wynosiły: 758 MPa w temperaturze otoczenia i 567 MPa w temperaturze 54°C (próbki mocowane w uchwytach typu A).

TABELA 3. Wytrzymałość na ściskanie kolejnych serii próbek kompozytów węglowo-epoksydowych
TABLE 3. Compressive strength of carbon-epoxy composites (results in turn of test)

Seria	Osnowa	T	Napężenia średnie	Napężenia maksymalne	Odchylenie standardowe	Typ uchwytu
		°C	MPa	MPa	MPa	
0/a	L285	20	514	614	49	A
0/b	L285	20	716	745	31	A
2/a	Ep52	20	727	856	75	A
2/b	Ep52	54	610	749	82	A
1/a	L285	20	776	853	51	A
1/b	L285	54	638	772	83	A
1/c	L285	54	630	669	30	A
6/a	L285	54	836	926	97	B
6/b	L285	20	999	1070	52	B

Badania struktury kruchych przelomów próbek kompozytów po ścisaniu wykonane zostały za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego HITACHI S-3500N. Typową strukturę przelomu dla kompozytu wykonanego w sycidle typu R1 przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Struktura kompozytu węglowo-epoksydowego wykonanego na sycidle R1

Fig. 6. Structure carbon epoxy composite made in RID type R1

Stwierdzono, iż struktura kompozytów otrzymywanych za pomocą sycidła z prostą komorą sycącą nie jest w pełni jednorodna. Występują w niej niewielkie obszary nierównomiernego rozmieszczenia włókien w osnowie. Mogło być to spowodowane niewystarczającym przeformowaniem pasma rovingu w sycidle. Niejednorodność struktury była prawdopodobną przyczyną uzys-

kania niższych wartości właściwości wytrzymałościowych pierwszych serii próbek. Kolejne modyfikacje sycidła doprowadziły do otrzymania kompozytów w bardziej jednorodnej strukturze.

WNIOSKI

W tematyce wykonywanych badań wyróżnić można dwa ważne obszary problemowe:

- technologię próbek kompozytów węglowo-epoksydowych oraz
- metodę przeprowadzenia badań wytrzymałościowych kompozytów węglowo-epoksydowych.

Oba te zagadnienia mają istotny wpływ na uzyskiwane wyniki badań wytrzymałościowych. Opracowane dotychczas metody i techniki wytwarzania oraz badania kompozytów szklano-epoksydowych nie dają się wprost zastosować do kompozytów zbrojonych włóknem węglowym.

W toku realizacji pracy dopracowano technikę przesycania rovingu węglowego oraz sposób mocowania próbek kompozytu w badaniach wytrzymałości na ściskanie, osiągając wartości wymagane przez przepisy lotnicze. Uzyskano średnie wytrzymałości powyżej 800 MPa w próbach w temperaturze 54°C oraz 1000 MPa w próbach w temperaturze pokojowej. Wyniki te nie odbiegają od danych uzyskanych przez producenta rovingu TENAX w ramach badań kwalifikacyjnych dla niemieckiego nadzoru lotniczego (LBA). Dla stopnia napelnienia 0,5 podaje on wartość 929 MPa.

Dane literaturowe [6], dotyczące badań kompozytów zbrojonych włóknem węglowym dla wyższych stopni napelnienia i innych systemów mocowania próbki, zawierają wartości sięgające 1600 MPa. Wskazuje to na celowość prowadzenia dalszych doświadczeń i standaryzacji metod pomiarowych.

Badania mikroskopowe struktury wykazały pewne nierównomierności rozmieszczenia włókien w osnowie dla próbek otrzymywanych za pomocą pierwszej wersji sycidła i pomogły w jego skutecznej modyfikacji.

Uzyskane wyniki badań zostaną wykorzystane podczas projektowania nowej klasy szybowców kompozytowych.

LITERATURA

- [1] Wspólne Przepisy Lotnicze (Joint Airworthiness Requirements) JAR-22 Szybowce i motoszybowce.
- [2] Opracowanie IDAFLIEG (niemieckiego akademickiego stowarzyszenia lotniczego) na podstawie wytycznych niemieckiego nadzoru lotniczego Dimensionierungsrichtwerte für den Segel- und Motorsegelflugzeugbau.
- [3] Katalog wyrobów firmy MGS GmbH.
- [4] Katalog wyrobów Zakładów Chemicznych Organika-Sarzyna w Nowej Sarzynie.

-
- [5] Patent Polska 106233 Sposób badania wytrzymałości materiałów, zwłaszcza tworzyw sztucznych na ściskanie.
- [6] Blumberg H., Hillermeier K., Scholten E., Tenax Fibers GmbH & Co. KG Carbon fiber status and development 9 Konf. DECHEMA Inorganic technical chemistry 2000.

Recenzent
Zbigniew Bojar