

Andrzej KOMOREK¹
Paweł PRZYBYŁEK²

PROCEDURY BADAWCZE DO OKREŚLENIA WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH KOMPOZYTU WARSTWOWEGO O ZRÓŻNICOWANYM MATERIALE NA WZMOCNIENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości wytrzymałościowych kompozytów warstwowych (laminatów) wykonanych na bazie osnowy żywicy epoksydowej z różnymi rodzajami wzmocnienia włóknistego. Oceniono wpływ rodzaju materiału użytego do wzmocnienia na właściwości mechaniczne kompozytu. Warunki eksploatacji statków powietrznych sprawiają, że struktury kompozytowe są narażone na działanie poprzecznych obciążeń udarowych, których wizualne efekty są często niewidoczne, a jednak powodują znaczne osłabienie materiału. Specyficzne cechy laminatów sprawiają, że materiały te wymagają opracowania nowych metod oceny ich przydatności do pracy w warunkach stwarzających zagrożenie wystąpienia uszkodzeń udarowych. Zaprezentowano sposób badania wpływu obciążeń udarowych na właściwości mechaniczne, oraz algorytm, uwzględniający, że delaminacja i pękanie są głównymi przyczynami spadku wytrzymałości laminatu po obciążeniu udarowym.

THE TEST PROCEDURES TO DETERMINING STRENGTH PROPERTIES OF PLIED COMPOSITE WITH DIFFERENT REINFORCEMENT

The paper presents experimental results tests of selected mechanical properties (tensile strength, flexural strength, impact strength) of plied composites made of epoxy resin and different reinforcement fibers. Aircraft's usage conditions bring about exposing composite structures to low-energy-level impacts. Effects of the impact are usually invisible during macroscopic observation but they cause a crucial decrease in material strength. Specific properties of laminates make that the materials require to work out new methods of evaluation their suitability for work in conditions propitious to appear low-energy-level impacts. The paper presents an investigation method of influence low-energy-level impact on mechanical properties and an investigational programme providing that delamination and cracking are main reasons of laminate strength reduction after impact.

¹ Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania, Dęblin,
e-mail: komman@op.pl

² Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Katedra Płatowca i Silnika, Dęblin, e-mail: sqcdr@wp.pl

1. WSTĘP

Lotnictwo jest dziedziną, w której wykorzystuje się najnowocześniejsze materiały, ze względu na specyfikę zastosowań dokładnie badane pod względem spełniania bardzo rygorystycznych norm. Materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych muszą zapewnić wyrobom niską masę, wytrzymałość, sztywność przy jednocześnie wysokiej niezawodności, czy odporności na zmęczenie, korozję, itp. Nowoczesne konstrukcje płatowców są budowane przy wykorzystaniu materiałów kompozytowych, lekkich stopów metali. Wybór właściwego materiału często zależy od przeznaczenia i charakteru zadań jakie musi realizować statek powietrzny.

Od lat 60-tych ubiegłego stulecia, systematycznie zwiększa się udział materiałów kompozytowych w konstrukcjach lotniczych. Początkowo wytwarzano z nich jedynie części nieobciążone, przeznaczone głównie do nadania kształtów aerodynamicznych elementom płatowców statków powietrznych. Wraz z opracowaniem nowych, doskonalszych materiałów kompozytowych w coraz większym stopniu projektanci i konstruktorzy zaczęli stosować je w aplikacjach lotniczych, nawet do budowy odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych dużych samolotów pasażerskich (np. stateczniki poziome samolotu Boeing 737-200) oraz wojskowych (struktura płatowca bombowca B-2). Podstawowe znaczenie ma w tym przypadku fakt, że wysokie parametry wytrzymałościowe tych materiałów występują łącznie z ich małą gęstością co w konsekwencji umożliwia uzyskanie małej masy wytwarzanych z nich elementów konstrukcyjnych.

Obecnie również konieczność ekonomicznego uzasadnienia zastosowania i coraz większa uwaga skupiona na ochronie środowiska naturalnego zmusza naukowców do poszukiwania alternatywnych materiałów do zastosowania w przemyśle lotniczym.

Wykorzystywanie przez lotnictwo, najnowocześniejsze, często nowo opracowane materiały, ze względu na specyfikę zastosowań muszą być dokładnie badane pod względem spełniania bardzo rygorystycznych norm.

W doświadczalnych badaniach właściwości mechanicznych kompozytów, przeważnie określa się:

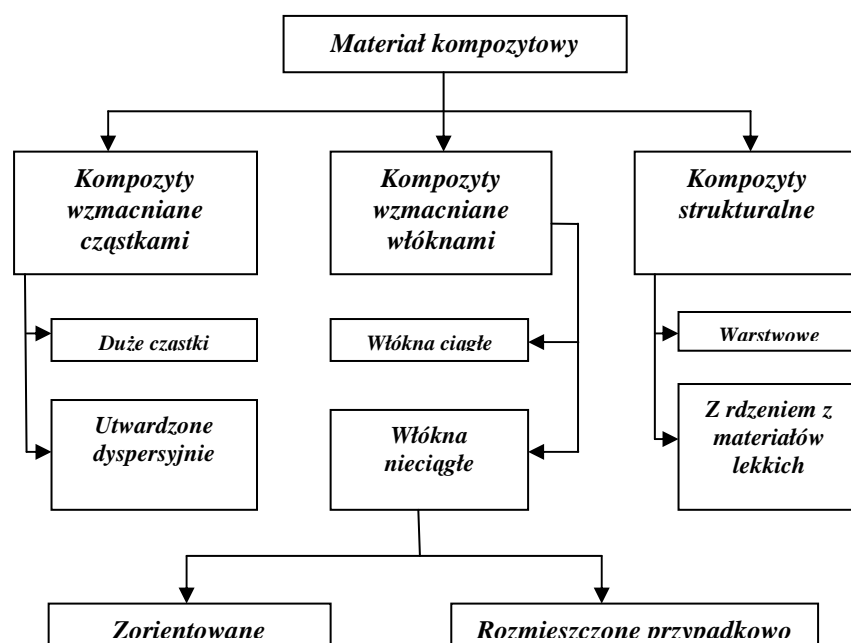
- naprężenia niszczące (wytrzymałość) podczas rozciągania, ściskania, ścinania, zginania i w złożonych stanach naprężenia,
- właściwości sprężyste: moduł sprężystości wzdłużnej, moduł sprężystości poprzecznej i współczynnik Poissona,
- odporność na obciążenia okresowo zmienne (zmęczenie),
- odporność na obciążenia udarowe,
- odporność na pękanie,
- odporność na odkształcenia wywołane długotrwałym działaniem obciążenia statycznego (pełzanie),
- odporność na pełzanie pod wpływem zmiennych naprężeń,
- relaksację naprężeń,
- właściwości lepkosprężyste,
- właściwości tłumiące,
- twardość i ścieralność,
- wpływ warunków otoczenia na właściwości mechaniczne [1].

2. MATERIAŁY KOMPOZYTOWE

Większość materiałów kompozytowych jest zbudowana z dwóch faz - fazy ciągłej zwanej osnową, otaczającej fazę drugą, tzw. fazę rozproszoną (zbrojenie, wzmocnienie). Wypadkowe własności kompozytu są zależne od własności faz składowych, ich ilości w ogólnej objętości kompozytu, sposobu rozmieszczenia fazy rozproszonej w osnowie, a także cech geometrycznych fazy rozproszonej [2].

W zależności od rodzaju fazy rozproszonej, materiały kompozytowe można podzielić na kompozyty:

- zbrojone cząstkami,
- zbrojone dyspersyjnie,
- zbrojone włóknami.



Rys.1 Podział kompozytów ze względu na rodzaj materiału na wzmocnienie [3]

2.1. Kompozyty zbrojone cząstkami

Do kompozytów zbrojonych cząstkami należą takie kompozyty, w których w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych bierze udział zarówno osnowa, jak i faza rozproszona w postaci cząstek. Sztywność i twardość takich kompozytów jest większa od twardości i sztywności otaczanej przez nie matrycy. Mechanizm wzmocnienia „dużymi cząstkami” polega na ograniczeniu odkształceń matrycy w rejonie położonym w bliskiej odległości od każdej cząstki. Aby wzmocnienie było skuteczne, cząstek powinno być odpowiednio dużo (powyżej 20% objętości kompozytu, niekiedy nawet 90%) oraz powinny być równomiernie rozłożone w kompozycie, a także mieć takie same wymiary we wszystkich kierunkach i posiadać odpowiednie rozmiary (ok. 1 μm)

2.2. Kompozyty zbrojone włóknami

Kompozyty zbrojone włóknami to kompozyty, w których w charakterze fazy wzmacniającej wykorzystywane są różnego rodzaju włókna. Podstawowym elementem nośnym w tych kompozytach są włókna, natomiast osnowa służy jako spoiwo łączące włókna, zapewnia rozdział obciążenia zewnętrznego między włókna, a także chroni je przed czynnikami zewnętrznymi. W niewielkim natomiast stopniu uczestniczy osnowa w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych. Kompozyty zbrojone włóknami (kompozyty włókniste) są najbardziej efektywnymi spośród materiałów kompozytowych, w tym sensie, że wykazują najlepsze własności mechaniczne i wytrzymałościowe przy najmniejszym ciężarze właściwym. Głównym powodem stosowania włókien jest ich duża sztywność i wytrzymałość, wyznaczone na podstawie badań materiału w postaci masowej. Zestawienie własności włókien szklanych, organicznych oraz grafitowych zostało przedstawione w tabeli 1.

Pod względem materiału, włókna można podzielić na:

- pochodzenia naturalnego (włókna roślinne np. celulozowe, włókna pochodzenia zwierzęcego np. jedwab),
- pochodzenia sztucznego, gdzie możemy wyróżnić:
 - włókna szklane,
 - włókna karbonizowane,
 - włókna polimerowe,
 - włókna aramidowe.

Tab.1. Zestawienie porównawcze podstawowych właściwości włókien [2]

cechy	Rodzaj włókna		
	szklane	grafitowe	Aramidowe
Wytrzymałość właściwa	++	++	+++
Moduł właściwy	+	+++	++
Wytrzymałość na pełzanie	+	++	++
Odporność na rozszerzalność cieplną	+	++	+++
Odporność zmęczeniowa	+	++	+++
Odporność udarowa	+++	+	++

Makroskopowe zachowanie się kompozytu zależy w oczywisty sposób od jego budowy mikroskopowej, a w szczególności od położenia geometrycznego (orientacji) włókien, ich rozmieszczenia w przekroju kompozytu i jednorodności własności włókna. Niezależnie od rodzaju osnowy i włókien, wszystkie kompozyty włókniste mają pewne wspólne cechy, z których najważniejsze to:

- wyraźna zależność własności mechanicznych od procesu technologicznego produkcji kompozytu,
- duży rozrzut wartości charakterystyk mechanicznych (sztywnościowych i wytrzymałościowych) dla tego samego kompozytu, zależność charakterystyk mechanicznych (sztywnościowych i wytrzymałościowych) od budowy geometrycznej kompozytu [2]

3. PROCEDURY BADAWCZE

Różnorodność materiałów stosowanych do wytwarzania kompozytów warstwowych oraz stały wzrost ich właściwości mechaniczne powodują, iż obecnie powstaje coraz więcej nowych materiałów kompozytowych o właściwościach kształtowanych w celu spełnienia wymagań narzuconych przez projektantów i konstruktorów. Pomysł tworzenia „baz danych” materiałów kompozytowych spowodował, iż pojawiły się próby unormowania procedur badawczych służących do określania właściwości kompozytów. Dokumenty normatywne[7], które określają rodzaj, ilość i zakres badań, których przeprowadzenie jest wymagane aby można było zastosować materiał kompozytowy w lotnictwie, przewidują dla nowopowstałych kompozytowych materiałów wielowarstwowych badania takie, jak

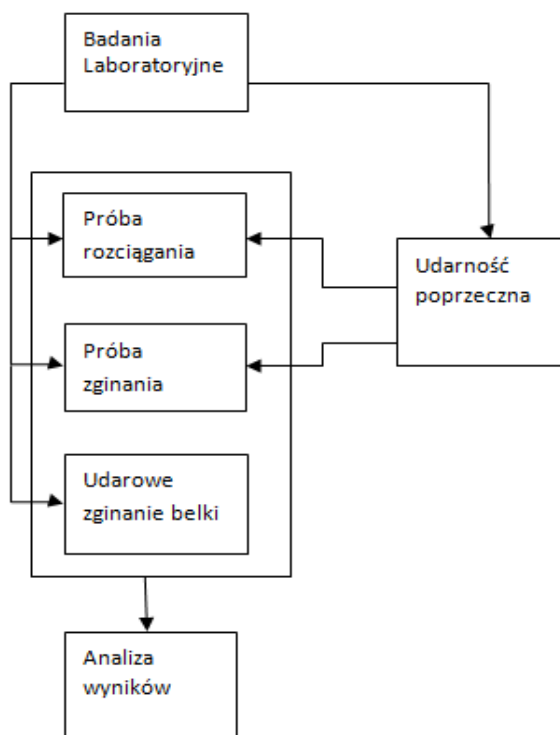
- jednoosiowe badania statyczne, wykonywane w celu wyznaczenia właściwości mechanicznych
 - wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie, ścinanie, zginanie,
 - odporność na pękanie,
- jednoosiowe próby zmęczeniowe,
- wieloosiowe badania statyczne,
- badania właściwości lepkosprężystych.

Ze względu na znaczną liczbę doświadczalnych metod badań właściwości mechanicznych kompozytów, zarówno przedstawionych w literaturze technicznej, jak i ujętych w normach, istnieje potrzeba dokonania ich krytycznej oceny. Aby uzyskać jak najbardziej wiarygodne wyniki badań, trzeba nie tylko wybrać odpowiednią metodę, ale i rygorystycznie przestrzegać zawartych w niej założeń i uwarunkowań.

W celu oceny wpływu rodzaju materiału użytego do wzmocnienia kompozytu na właściwości mechaniczne wykonano następujące badania:

- próba rozciągania,
- próba zginania,
- udarowe zginanie belki.

Ocena podatności polimerowych kompozytów konstrukcyjnych na powstawanie uszkodzeń udarowych stanowi ważny problem praktyczny. Klasyczne próby udarności (Charpy, Izod, Dynstat, itp.) stosowane w badaniach metali i tworzyw sztucznych okazały się mało przydatne do oceny kompozytów o strukturze warstwowej. Specyficzne cechy laminatów sprawiają, że materiały te wymagają opracowania nowych metod oceny ich przydatności do pracy w warunkach stwarzających zagrożenie wystąpienia uszkodzeń udarowych [4]. Dlatego opracowano rozszerzony program badań w celu oceny wpływu niskoenergetycznego obciążenia udarowego na właściwości mechaniczne materiału kompozytowego, w postaci laminatu (rys. 2).



Rys.2. Plan badań doświadczalnych

3.1 wyniki badań właściwości wytrzymałościowych

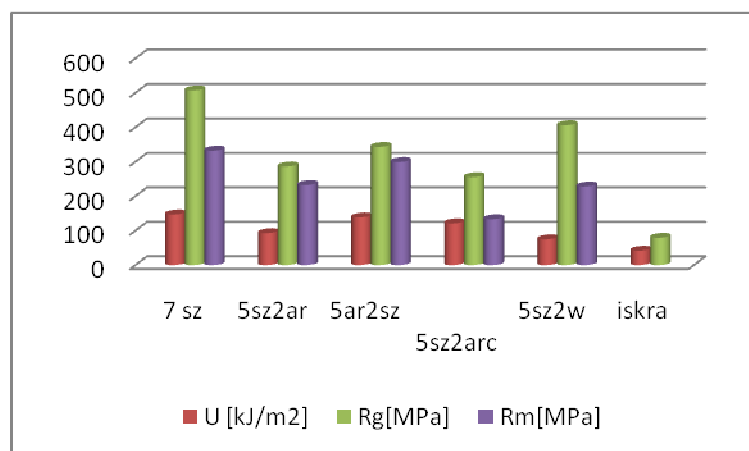
Badanie wytrzymałości na rozciąganie oraz wytrzymałości na zginanie przeprowadzono za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej ZWICK/ROELL Z100. Udarowe zginanie belki zrealizowano z zastosowaniem młota udarowego „Galdabini Impact 25” z wykorzystaniem metody Charpy’ego,. Badaniu zostało poddanych 5 serii próbek kompozytów o składzie:

- 7 warstwy włókna szklanego, (7sz),
- 2 warstwy włókna aramidowego, 5 warstw włókna szklanego, (5sz2ar),
- 5 warstw włókna aramidowego, 2 warstwy włókna szklanego, (5ar2sz),
- 5 warstw włókna szklanego 2 warstwy włókna aramidowego ciętego, (5sz2arc),
- 5 warstw włókna szklanego, 2 warstwy włókna węglowego, (5sz2w).

Ponadto dodatkowo pobrano próbki z materiału stosowanego na elementy poszycia samolotu TS-11 „Iskra”. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2 i na rysunku 3.

Tab.2. Wyniki badań wytrzymałościowych

Nr próbki	L [J]	U [kJ/m ²]	R _g [MPa]	R _m [MPa]	E [MPa]
1 7 sz	5,17	146,767	507	332	29100
2 5sz2ar	3,46	92,585	286	232	20200
3 5ar2sz	7,1	138,197	343	299	22800
4 5sz2arc	5,34	121,047	255	133	14900
5 5sz2w	1,96	74,5	406	228	19800
iskra	0,73	41,638	79,07		



Rys.3. Właściwości wytrzymałościowe badanych laminatów

Uzyskane wyniki dają niepełny obraz odporności badanych laminatów na najczęściej spotykane uszkodzenia. W zastosowaniach lotniczych nawet niewielkie nieciągłości struktury kompozytu mogą drastycznie obniżyć margines bezpieczeństwa konstrukcji. Uszkodzenia w kompozytach wzmacnianych włóknami bardzo często są niezwykle trudne do wykrycia, ponieważ najczęściej nie są inicjowane na powierzchni poddanej obciążeniu udarnościowemu, a na stronie przeciwnej powierzchni obciążonej udarowo lub wewnątrz struktury materiału (laminaty) [5, 6]. W tego typu uszkodzeniach, zmniejszenie wytrzymałości może być efektem uderzenia upuszczonego narzędzia, ciał obcych wyrzucanych spod kół samolotu podczas startu, uderzenia ptaka w trakcie lotu, itp. W celu odtworzenia warunków działania poprzecznych obciążeń udarowych i zbadania ich wpływu na właściwości wytrzymałościowe, zostało skonstruowane stanowisko badawcze (rys. 4). Stanowisko posiada możliwość regulacji energii udaru poprzez zmianę wysokości zawieszenia młota spadowego z końcówką udarową lub poprzez zmianę wartości obciążenia. W celu określenia wpływu niskoenergetycznego obciążenia udarowego na właściwości mechaniczne materiału kompozytowego próbki z wcześniej przygotowanych laminatów zostały poddane działaniu obciążenia udarowego o energiach: 2,5 J; 5 J i 10 J.



Rys.4. Model wraz ze stanowiskiem do obciążenia uderowego

W kolejnym etapie, próbki z każdej serii zostaną poddane próbie, w celu określenia wpływu przyłożonego obciążenia uderowego na wytrzymałość badanego materiału kompozytowego na zginanie, co pozwoli określić zmianę wytrzymałości i potencjalną przydatność materiału kompozytowego do budowy elementów lotniczych w aspekcie niskoenergetycznych obciążeń uderowych.

4. WNIOSKI

Podczas realizacji pracy, udało się sformułować następujące wnioski dotyczące przydatności opracowanego i zastosowanego algorytmu badań kompozytów:

1. Podstawowe badania wytrzymałościowe zestawione w zaproponowany algorytm umożliwiają szerszą i bardziej szczegółową analizę właściwości wytrzymałościowych materiałów kompozytowych, niż wynikałoby z badań ocenianych oddzielnie.
2. Wykonanie badań eksperymentalnych próbki wyciętej z dużej płyty pozwala na wstępną ocenę jakości wykonania całej płyty materiału.
3. Jako podstawowe badania materiału kompozytowego, wytypowano: próbę rozciągania, próbę zginania trójpodporowego, uderowe zginanie belki.
4. Niektóre maszyny (przyrządy, stanowiska) do badania właściwości mechanicznych materiałów mogą być w prosty sposób wykonane samodzielnie i mogą pełnić rolę pełnowartościowych maszyn (przyrządów) do badań wytrzymałościowych.
5. Rozszerzenie programu badań o badanie z zastosowaniem poprzecznego obciążenia uderowego zrealizowane na samodzielnie wykonanym stanowisku pozwala na określenie wpływu tego typu obciążeń na wcześniej określone właściwości

mechaniczne oraz wybór materiału kompozytowego najmniej podatnego na obciążenia udarowe.

Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań:

1. Właściwości wytrzymałościowe silnie zależą od materiałów użytych do tworzenia kompozytów. Na przykładzie przeprowadzonych prób można stwierdzić, że pomimo tego iż wszystkie kompozyty były zbudowane z siedmiu warstw, ich właściwości były bardzo zróżnicowane, a wynikało to z zastosowania różnych materiałów wzmacniających w badanych kompozytach.
2. Laminaty oparte na tej samej osnowie różniące się jedynie postacią wzmocnienia włóknistego (włókno aramidowe cięte oraz tkanina z włókien aramidowych) posiadają inne właściwości wytrzymałościowe. Wytrzymałość na rozciąganie R_m w przypadku laminatu ze wzmocnieniem w postaci tkaniny jest o 43% wyższa niż dla laminatu z włóknem ciętym. Natomiast wytrzymałość na zginanie R_g analogicznie jest wyższa jedynie o 11 %. Podczas udarowego zginania belki, laminat z włóknem ciętym uzyskano o 24 % wyższą udarność. Na podstawie tych wyników można stwierdzić, iż, postać materiału wzmacniającego ma istotny wpływ na właściwości wytrzymałościowe kompozytu.
3. Wykorzystanie materiałów składowych o lepszych właściwościach nie zawsze skutkuje wzrostem parametrów wytrzymałościowych gotowego materiału. Przykładowo, po zamianie 2 warstw szklanych na węglowe nastąpił wzrost modułu sprężystości zgodnie z oczekiwaniami wynikającymi z właściwości włókien. Po zbadaniu podobnego kompozytu z dwoma warstwami aramidowymi, których dodatek powinien również zwiększyć wartość modułu, stwierdzono spadek jego wartości. Obserwacje te dowiodły, że nie zawsze możliwe jest wnioskowanie o własnościach kompozytu na podstawie właściwości składników.
4. Zaproponowany algorytm badań można w prosty sposób rozszerzać o nowe badania różnorodnych właściwości. Zrodzi to jednak konieczność dużo szerszej, opartej o specjalistyczne oprogramowanie analizy statystycznej, otrzymanych wyników badań, będzie przedmiotem dalszej pracy.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Ochelski, *Metody Doświadczalne Mechaniki Kompozytów Konstrukcyjnych*, Warszawa, WNiT, 2004
- [2] J. German, *Podstawy Mechaniki Kompozytów Włóknistych*, Politechnika Krakowska, 2001
- [3] W. Kucharczyk W. Żurowski, *Przetwórstwo tworzyw sztucznych dla mechaników*, Radom, Wydanie II. Politechniki Radomskiej, 2005
- [4] A. Bełzowski, Z. Rechul, J. Stasińko, *Uszkodzenia udarowe w laminacie wzmocnionym tkaniną szklaną*, Kompozyty 5/2002
- [5] L. Holloway, *Current development In materials technology and engineering-pultrusion*, Rapra. review No 3, 1989, 2(3)
- [6] R. Mayer, *Handbook of Pultrusion Technology*, Chapman and Hall, London 1985
- [7] *Composite Materials Handbook*. Department of Defense Handbook. USA 2002