

Mirosław Rodzewicz¹

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa, e-mail: miro@meil.pw.edu.pl

Anna Boczkowska², Stefan F. Awietjan³, Krzysztof J. Kurzydłowski⁴

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa, e-mail: abocz@meil.pw.edu.pl, sawietjan@inmat.pw.edu.pl, kjk@inmat.pw.edu.pl

DEGRADACJA WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH WZMACNIANYCH WŁÓKNAMI WĘGLOWYMI POD WPŁYWEM OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH

Przedmiotem badań były kompozyty epoksydowe wzmacniane rovingiem węglowym o ułożeniu jednokierunkowym. Do badań udarnościowych zastosowano metodę Charpy'ego. Przeprowadzono badania ultradźwiękowe z użyciem defektoskopu cyfrowego sprzężonego z komputerem. Udarowe obciążenia poprzeczne spowodowały znaczne różnice w obrazach skanów ultradźwiękowych pomiędzy stanem wyjściowym a końcowym testów. Zależność wytrzymałości resztkowej od energii uderzenia nie wykazuje charakterystyki liniowej, występuje wartość progowa energii. Poza tą granicą obserwuje się szybki spadek wytrzymałości resztkowej CFRP. Największy spadek wytrzymałości resztkowej zaobserwowano w dolnym zakresie przedziału gęstości energii poniżej $0,04 \text{ J/mm}^2$ (przy końcu tego zakresu wytrzymałość była 2 razy niższa od uzyskanej w statycznej próbie ściskania kompozytu). Ustalono optymalny stopień zbrojenia kompozytu CFRP zarówno ze względu na statyczną próbę ściskania, jak i ze względu na wytrzymałość resztkową po obciążeniu udarowym.

Słowa kluczowe: kompozyty węglowo-epoksydowe, badania udarnościowe, wytrzymałość kompozytów, wytrzymałość resztkowa, defektoskopia ultradźwiękowa kompozytów

DEGRADATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON FIBRE REINFORCED COMPOSITES UNDER DYNAMIC LOADS

Increasing application of the CFRP in the high-loaded constructions is observed during the last period. The high-performance competition gliders can be an example. In such application even small damage of the composite structure may excessively decrease a safety margin. It was the reason for undertaking the works aimed on investigation the CFRP composites vulnerability on impact loads. The interest was focused on the composites with uni-directional (UD) structure. Such composites are used in the wing spar flanges (cups). They are the most loaded elements of the gliders structure. The specimens for compression tests (Fig. 2) were applied in investigations, as the compressive strength is the critical parameter, having an important influence on the wing spar dimensions. The ultrasonic structural tests were performed on the immersion stand, equipped with ultrasonic flaw detector Panametrics 9100 connected to the PC (Fig. 1). The Charpy method was used for impact tests. The impact transverse loads had caused significant differences of the ultrasonic A-scans taken in the initial and the final stadium of the tests (Fig. 4). Relation of the residual strength to the impact energy has non-linear characteristics, with existence of the threshold value (Fig. 5). Beyond this limit a quick residual strength degradation of the CFRP can be observed. The biggest drop of the residual strength was observed in the range of energy density from 0.01 up to 0.04 J/mm^2 (Fig. 6) (at the end of this range the residual strength was 2-times lower than the static compression strength of CFRP). Optimal volume fraction of the CFRP has been estimated (at around 0.5) - both for post-impact residual strength and for static compression strength of the CFRP composites. The influence of pressure applied during CFRP beams forming on the static strength and the residual post-impact strength has also been investigated. The results are shown in Figure 10. Quasi-layered structure of obtained composites, caused by the fabrication method, has no significant effect on impact sensitivity of material on parallel and perpendicular direction relative to impact direction (Fig. 11).

Keywords: carbon-epoxy composites, impact tests, composite strength, residual strength, ultrasonic flaw detection in composites

WPROWADZENIE

W ostatniej dekadzie zaobserwowano zwiększone zainteresowanie wysokoobciążonymi kompozytami polimerowymi zbrojonymi włóknami węglowymi (CFRP). Rozwój wyczynowych szybowców zawodniczych może posłużyć za ilustrację tej tendencji. W tego typu zastosowaniach nawet niewielkie uszkodzenie struktury kom-

pozytu może drastycznie obniżyć margines bezpieczeństwa konstrukcji [1]. Mając to na względzie, przeprowadzono badania, których celem było zbadanie podatności kompozytów węglowo-epoksydowych na uszkodzenia w wyniku obciążeń udarowych. Stanowią one część szer-

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

szych badań tego typu kompozytów, opisanych w [2-4]. Skupiono się na kompozytach wzmacnianych włóknami ciągłymi (rovingiem) o ułożeniu jednokierunkowym (UD). Tego typu materiały stosuje się w pasach dźwigara. Są to najbardziej obciążone elementy konstrukcji szybowca. Badania udarowe przeprowadzono na próbkach, które następnie wykorzystano do badań wytrzymałości na ściskanie. Obciążenia ściskające są parametrem krytycznym, mającym wpływ na wymiary pasów dźwigara skrzydła.

Do badań udarnościowych zastosowano metodę Charpy'ego. Przeprowadzono zanurzeniowe ultradźwiękowe badania strukturalne z użyciem defektoskopu ultradźwiękowego Panametrics 9100 połączonego z komputerem.

W badaniach udarowych kompozytów CFRP skupiono się na:

- ocenie ilościowej wpływu siły uderzenia na wytrzymałość kompozytu,
- badaniu wpływu stopnia zbrojenia kompozytu na podatność na uszkodzenia udarowe,
- wpływie technologii wykonywania kompozytów na wytrzymałość resztkową, a w szczególności:
 - wpływie metody wykonywania próbek (z dociskiem lub z formowaniem swobodnym),
 - wpływie quasi-laminarnej struktury kompozytów zbrojonych rovingiem węglowym (spowodowanej sposobem wytwarzania kompozytów),
- obserwowaniu zmian w obrazach skanów ultradźwiękowych pod wpływem obciążeń dynamicznych.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały i metodyka badań

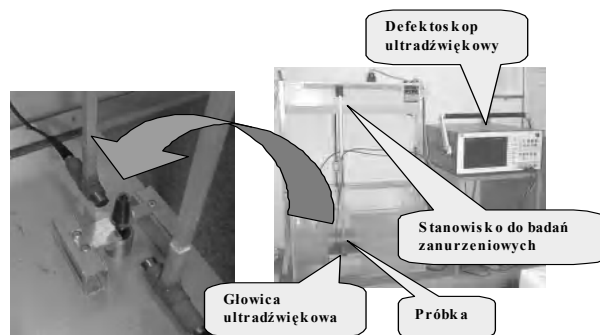
W przeprowadzonych badaniach używano materiałów stosowanych w lotnictwie, posiadających wymagane atesty. Do wykonania próbek kompozytów jako wzmocnienie zastosowano roving węglowy Tenax 5631 HTS o apreturze na bazie prepolimeru poliuretanowego. Właściwości rovingu zamieszczono w [3]. Jako osnowę zastosowano żywicę epoksydową L285, produkowaną przez firmę Martin Scheufler. Żywica ta jest wykorzystywana do produkcji szybowca PW-5, zwycięskiej konstrukcji w konkursie FAI w kategorii World Class Glider. Zastosowano następujący cykl utwardzania: 24 godziny w temperaturze pokojowej, a następnie 15 godzin w 60°C.

Do badań użyto próbek w postaci belek kompozytu węglowo-epoksydowego (CFRP). Wymiary próbek wynosiły 80×7×7 mm. Wytworzono próbki o następującym udziale objętościowym zbrojenia: 0,36; 0,46; 0,6. Technika wykonywania próbek została opisana w pozycjach [2, 3].

W badaniach udarnościowych zastosowano metodę Charpy'ego, wykorzystując urządzenie firmy CEAST

z młotkiem produkcji VEB Verkssoffprof Maschinen. Układ był dostosowany do zmian energii uderzenia oraz rejestracji komputerowej.

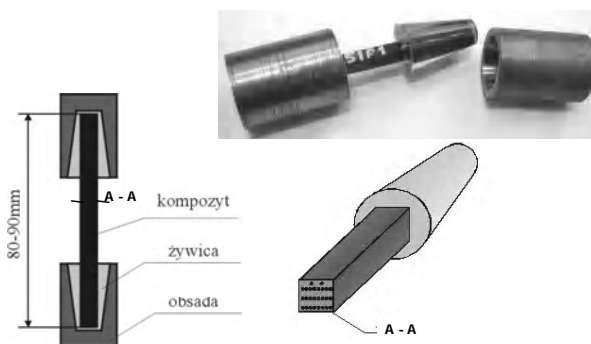
Badania ultradźwiękowe przeprowadzono na stanowisku do badań zanurzeniowych wyposażonym w defektoskop ultradźwiękowy Panametrics 9100 podłączony do komputera (rys. 1).



Rys. 1. Widok stanowiska do badań ultradźwiękowych

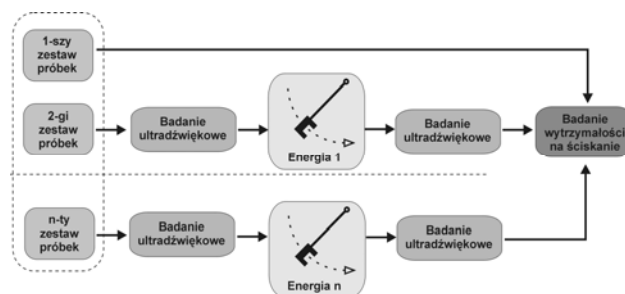
Fig. 1. View of the ultrasonic tests stand

Po uderzeniu młotem i badaniach ultradźwiękowych belki mocowano w stalowych uchwytach, a następnie badano ich wytrzymałość na ściskanie. Próbki do badania wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rysunku 2, a schemat blokowy przeprowadzonych badań na rysunku 3.



Rys. 2. Próбка w uchwytach do badania wytrzymałości na ściskanie

Fig. 2. Specimen used for static compression tests



Rys. 3. Schemat blokowy badań udarnościowych

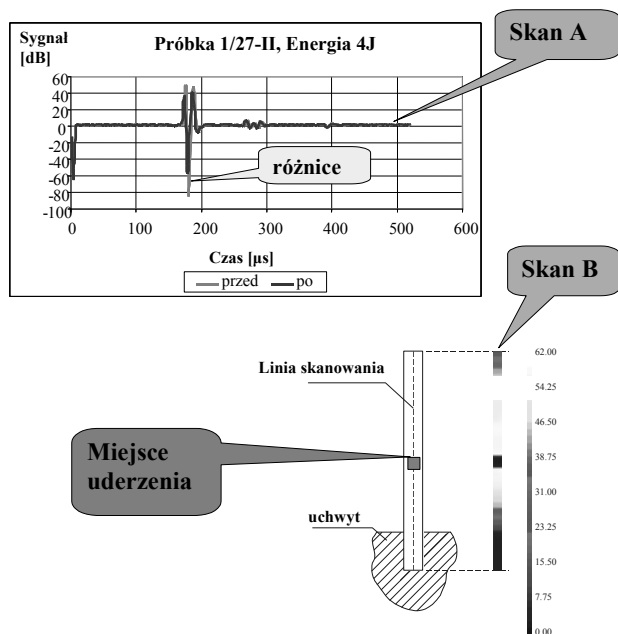
Fig. 3. Block-scheme of impact tests

Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZD-20, wyposażonej w komputerowy system kontroli obciążenia.

WYNIKI BADAŃ

Defektoskopia ultradźwiękowa

Przyłożenie do próbek kompozytowych poprzecznych obciążeń uderowych spowodowało wystąpienie znacznych różnic w obrazach skanów ultradźwiękowych typu A, co widoczne jest przy porównaniu skanów próbek przed i po uderzeniu (rys. 4).



Rys. 4. Obrazy skanów typów A i B próbki poddanej działaniu obciążenia uderowego o energii 4 J

Fig. 4. Assembly of the A-scans and the B-scan of the specimen effected by the impact of 4 J energy

Dodatkowo zamieszczono wynik skanowania liniowego typu B z łatwo zauważalnym miejscem uderzenia młotka. Techniki badań nieniszczących kompozytów opisano szerzej w [1, 5]. Warto nadmienić, iż miejsce uderzenia kompozytów węglowo-epoksydowych, w przeciwieństwie do kompozytów szklano-epoksydowych, jest trudne do zaobserwowania metodami wzroko-wymi.

Badania wytrzymałości na ściskanie po uderzeniach uderowych

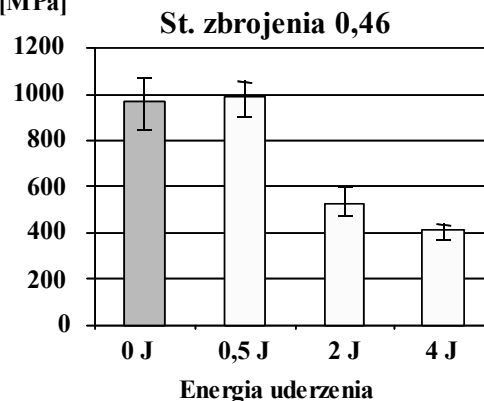
Wyniki zaprezentowano za pomocą wykresów. Na rysunku 5 widoczny jest wpływ energii uderzenia na resztkową wytrzymałość na ściskanie. Zamieszczono tam również wynik uzyskany w próbie ściskania dla kompozytu niepoddanego działaniu obciążeń uderowych. Charakterystyczne dla wykresu jest występowanie war-

tości progowej energii uderzenia, poniżej której kompozyt jest niewrażliwy na działanie obciążeń uderowych.

Kolejny wykres (rys. 6) przedstawia zależność wytrzymałości resztkowej od powierzchniowej gęstości energii (energii przypadającej na powierzchnię przekroju próbki).

Wytrzymałość na ściskanie

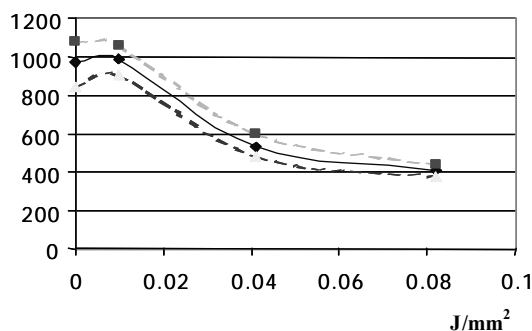
[MPa]



Rys. 5. Wpływ energii uderzenia na wytrzymałość resztkową

Fig. 5. Influence of impact-energy on a residual strength

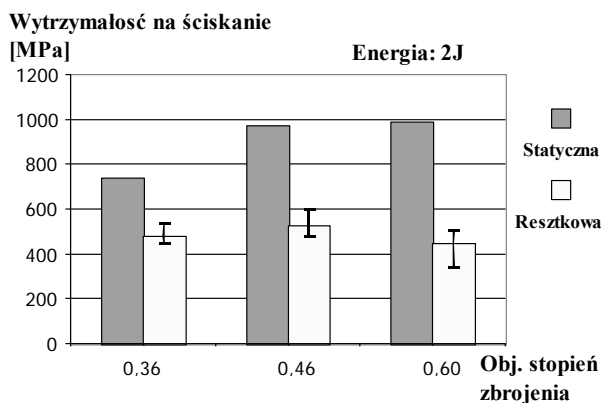
Wytrzymałość resztkowa [MPa]



Rys. 6. Wytrzymałość resztkowa w funkcji gęstości energii uderu

Fig. 6. Function of residual strength and surface density of impact energy

Dla wartości energii uderu wynoszącej 2 J przedstawiono zależność wytrzymałości od objętościowego stopnia zbrojenia kompozytu (dla porównania zaprezentowano wartości wytrzymałości dla próbek niepoddanych działaniu obciążeń uderowych) - rysunek 7.



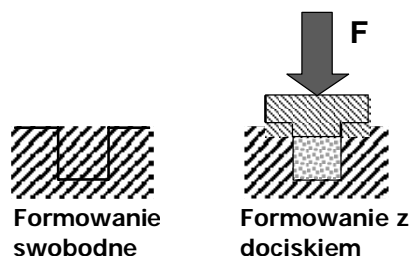
Rys. 7. Porównanie wytrzymałości statycznej i resztkowej po uderzeniu z energią 2 J dla różnych stopni zbrojenia

Fig. 7. Influence of the volume fracture on a residual strength of the specimen impacted with 2 J on the background of static strength

Z rysunku 7 wynika, że wytrzymałość kompozytu na uderzenia jest najwyższa dla udziału objętościowego zbrojenia około 0,5. Z wcześniejszych badań [2] wiadomo, iż taka wartość udziału objętościowego zbrojenia jest korzystna dla kompozytów węglowo-epoksydowych wytwarzanych bez docisku. Tego typu metoda wytwarzania jest często stosowana w praktyce.

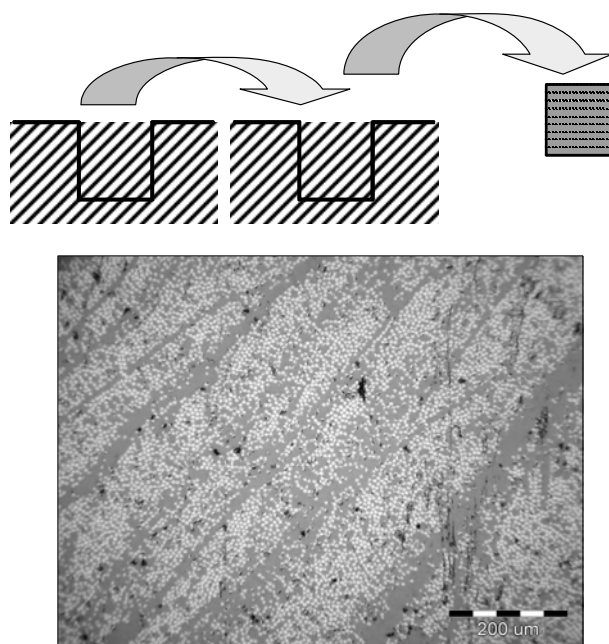
Wpływ aspektów technologicznych

Porównywano resztkową wytrzymałość na ściskanie kompozytów formowanych z dociskiem oraz formowanych swobodnie (rys. 8). Kolejnym zagadnieniem jest wpływ quasi-laminarnej struktury uzyskiwanych kompozytów zbrojonych rovingiem węglowym. Występowanie typu struktury spowodowane jest sposobem formowania belek (wiązki przesyconego żywicą rovingu są umieszczane i ściskane w formie warstwa po warstwie). Pomimo rozmieszczenia włókien wzmacniających wzdłuż osi belek na zdjęciach z mikroskopu świetlnego widać niewielkie niejednorodności w strukturze (quasi-warstwy) - rysunek 9.



Rys. 8. Formowanie próbek bez i z dociskiem

Fig. 8. Free and pressure forming of samples

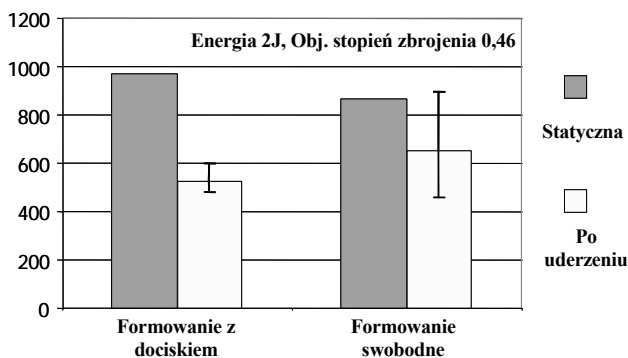


Rys. 9. Przyczyna powstawania i obraz mikroskopowy quasi-warstwowej struktury kompozytu

Fig. 9. Genesis and microscopic image of quasi-layers

Chcąc sprawdzić, czy ukierunkowanie uderzenia w stosunku do kierunku quasi-warstw ma wpływ na resztkową wytrzymałość na ściskanie, przeprowadzono dodatkową serię badań. Wyniki przedstawiono na rysunku 10.

Wytrzymałość na ściskanie [MPa]



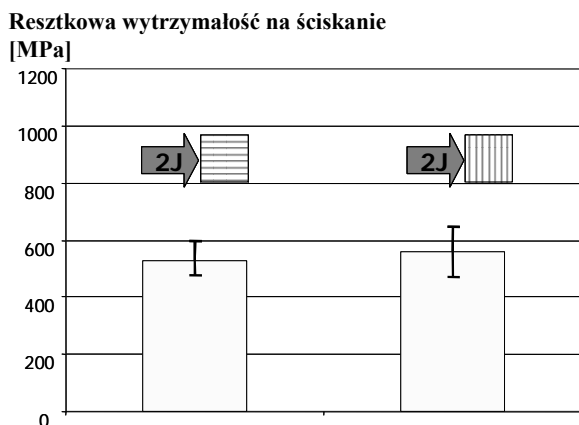
Rys. 10. Wpływ technologii wytwarzania kompozytów węglowo-epoksydowych na wytrzymałość statyczną i resztkową

Fig. 10. Influence of pressure applied during CFRP beams forming on the static strength and the residual post-impact strength

Z analizy wykresu na rysunku 10 nasuwa się wniosek, iż brak docisku podczas formowania belek kompozytowych powoduje znaczne obniżenie wytrzymałości statycznej. Z kolei próbki swobodnie formowane wykazują się wyższą wytrzymałością resztkową. Niektóre wyniki wytrzymałości resztkowej osiągnęły poziom wytrzymałości statycznej. Prawdopodobnym tego powodem jest większe rozpraszanie energii uderzenia w strukturze wytworzonej bez docisku ze względu na jej

dużą niejednorodność (aglomeraty żywicy czy mikro-pęcherze powietrza).

Jak wynika z wykresu (rys. 11), niejednorodność strukturalna, w postaci quasi-warstw, nie ma znaczącego wpływu na czułość kompozytów węglowo-epoksydowych na udary.



Rys. 11. Czუłość kompozytów węglowo-epoksydowych na udary (wyrażona wytrzymałością resztkową) ze względu na orientację wobec quasi-warstwowej struktury

Fig. 11. Impact-sensitivity (expressed by the residual strength) in relation to quasi-layers orientation in the CFRP beam

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zależność wytrzymałości resztkowej od energii uderzenia nie wykazuje charakterystyki liniowej, gdyż występuje wartość progowa energii. Po przekroczeniu tej wartości obserwowany jest szybki spadek wytrzymałości resztkowej kompozytów. W opisanych powyżej badaniach największy spadek wartości wytrzymałości resztkowej zaobserwowano w przedziale gęstości energii od 0,01 do 0,04 J/mm² (pod koniec tego przedziału wytrzymałość była 2 razy niższa od statycznej wytrzymałości na ściskanie kompozytu CFRP).

Za optymalny udział objętościowy zbrojenia uznano zbliżony do 0,5 - zarówno ze względu na poudarowe naprężenia własne, jak i na wytrzymałość na ściskanie

kompozytów węglowo-epoksydowych formowanych bez docisku.

Quasi-warstwowa struktura uzyskanych kompozytów, spowodowana procesem wytwarzania, nie wpływa na czułość materiału na udary na kierunkach równoległym i prostopadłym do kierunku uderzenia.

Uderzenie poprzeczne ponadprogowej wartości energii daje wyraźny sygnał na skanie ultradźwiękowym próbki. Świadczy to o lokalnym uszkodzeniu struktury kompozytowej w miejscu uderzenia (pomimo tego, iż w przypadku kompozytów węglowo-epoksydowych uszkodzenia tego nie można wykryć metodami wzrokowymi). Potwierdzają to również wyniki badań wytrzymałościowych.

Praca finansowana ze środków KBN w ramach projektu badawczego nr 4 T08E 063 25.

LITERATURA

- [1] Reid S.R, Zhou G., Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures, Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2000.
- [2] Rodzewicz M., Jaśkowski P., Boczkowska A., Awietjan S., Kurzydłowski K.J., Wytrzymałość kompozytów węglowo-epoksydowych (CFRP) w kontekście technik wytwarzania i warunków eksperymentu, KARBO 2004, 4, 182-188.
- [3] Rodzewicz M., Jaśkowski P., Boczkowska A., Kurzydłowski K.J., Badania kompozytu węglowo-epoksydowego o strukturze typu UD, Kompozyty (Composites) 2004, 4, 12, 414-420.
- [4] Jaśkowski P., Rodzewicz M., Boczkowska A., Kurzydłowski K.J., Otrzymywanie, struktura i właściwości wytrzymałościowe włóknistych kompozytów węglowo-epoksydowych z przeznaczeniem do konstrukcji lotniczych, Kompozyty (Composites) 2003, 3, 7, 198-202.
- [5] Lewińska-Romicka A., Badania nieniszczące; podstawy defektoskopii, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.

Recenzent
Andrzej P. Wilczyński