

**OPTIMALIZACJA KOMPUSEROWA KONSTRUKCJI
WYKONANYCH Z KOMPOZYTU GFRP**J. KONIECZNY¹, L.A. DOBRZAŃSKI²Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny
Technologiczny, Politechnika Śląska w Gliwicach, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice
W. HUFENBACH³, A. CZULAK⁴Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Technische Universität Dresden,
Dürerstrasse 26, D-01062 Dresden, GermanyP. HORNAK⁵Department of Materials Science, Technical University of Košice,
Park Komenskeho 12, 042 00 Košice, Slovakia

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych materiału kompozytowego zbudowanego z włókien szklanych w osnowie żywicy epoksydowej GFRP (glass fibre reinforced plastic). Statyczna próba rozciągania przeprowadzona dla różnego kąta ułożenia włókien szklanych kompozytu względem działającej siły rozciągającej. Następnie zamodelowano statyczną próbę rozciągania kompozytu Metodą Elementów Skończonych (MES) w celu optymalizacji potencjalnych konstrukcji wykonanych z kompozytu GFRP. Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych porównano z wynikami symulacji komputerowej. W wyniku przeprowadzonej symulacji uzyskano rozkład naprężeń w kompozycie CFRP poddanych statycznej próbie rozciągania w zależności od kąta ułożenia włókien względem rozciągające siły.

Key words: GFRP composites, mechanical properties, computer simulation, FEM

¹ dr inż., jaroslaw.konieczny@polsl.pl

² dr h.c. prof. zw. dr hab. inż., leszek.dobrzanski@polsl.pl

³ prof. zw. dr hab. inż., wh@ilk.mw.tu-dresden.de

⁴ mgr inż., acz@ilk.mw.tu-dresden.de

⁵ dr hab. inż., peter.hornak@tuke.sk

1. WSTĘP

Kompozyty o osnowie polimerowej stanowią największą pod względem masowym grupę materiałów kompozytowych. Stosowane są nie tylko w przemyśle maszynowym [1], budownictwie [2], przemyśle lotniczym i kosmonautycznym [3, 4] ale również w medycynie [5, 6]. Podstawowymi materiałami osnowy są żywice epoksydowe i poliestrowe, żywice fenolowo-formaldehydowe, mocznikowe i melaminowe oraz termoplasty: poliamidy i polipropylen [7, 8].

W dwufazowym kompozycie, zadaniem osnowy jest związanie poszczególnych włókien ze sobą. Ponieważ włókna mają większą wytrzymałość na rozciąganie niż osnowa, wytrzymałość na rozciąganie kompozytu rośnie wraz ze wzrostem zawartości włókien, zgodnie z prawem mieszanin. Zależność ta jest prawdziwa jedynie do pewnej zawartości włókien, powyżej której należy jeszcze uwzględnić dodatkowy czynnik, jakim jest stopień zwilżenia włókien przez osnowę. Przy dużej zawartości włókien stopień zwilżenia jest zbyt mały, aby połączyć włókna i wytrzymałość kompozytu zaczyna maleć [8-10]. Według kryterium tensorowego Tsai-Wu powierzchnię wytrzymałości w naprężeniach określa się równaniem:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (1)$$

gdzie: $i, j = 1 \dots 6$,

F_i, F_j – tensor wytrzymałości odpowiednio drugiego i czwartego rzędu,

$\sigma_4 = \tau_{23}, \sigma_5 = \tau_{31}, \sigma_6 = \tau_{12}$

Wytrzymałość kompozytów zbrojonych włóknem ciągłym w postaci tkanin, mat ułożonych najczęściej symetrycznie pod różnymi kątami stosuje się następującą zależność:

$$\sigma_k = \eta[\sigma_w V_w + \sigma_o(1 - V_w)] \quad (2)$$

gdzie: σ_w – naprężenia we włóknach, σ_o – naprężenia osnowy,

V_w – objętość włókien,

η - współczynnik efektywności wykorzystania włókien.

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu kąta ułożenia włókien laminatu $(0,90,0,90)_s$ na własności wytrzymałościowe kompozytów włóknistych, oraz porównanie wyników prób laboratoryjnych i wyników z symulacji przy użyciu komputerowych metod symulacji i MES, do analizy próby rozciągania kompozytów włóknistych.

2. METODYKA BADAŃ

Statyczną próbę rozciągania tworzyw sztucznych przeprowadzono zgodnie z normami [11-13]. Próbę przeprowadzono na programowalnej, dwuosiowej, serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej MTS 858 Mini Bionik w temperaturze $\sim 20^\circ\text{C}$.

Proces wytwarzania tworzywa i obróbki mechanicznej materiału kompozytowego GFRP przeprowadzono zgodnie z normą [14] zawierającą wytyczne obróbki mechanicznej płyty kompozytu oraz opis warunków utwardzania kompozytu w autoklawach. Próbkę do statycznej próby rozciągania wykonano wg [10] oraz norm [15-18].

W statycznej próbie rozciągania zbadano własności mechaniczne materiału kompozytowego o symbolu GFRP. Kompozyt składa się z włókien szklanych (Spectra 1000) w osnowie żywicy epoksydowej.

3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki statycznej próby rozciągania potwierdziły, że największą wytrzymałością na rozciąganie R_m charakteryzuje się kompozyt GFRP (0,90,0,90)_s o kącie ułożenia włókien 0° w stosunku do siły rozciągającej natomiast najmniejszą wartość wykazuje kompozyt o kącie ułożenia włókien 45° (Tablica 1.). Przy czym najmniejsza wartość odchylenia standardowego występuje dla kąta 45° (2,6% wartości średniej) a największa dla kąta 60° (7,1% wartości średniej). Natomiast dla kąta 0° odchylenie standardowe stanowi 4,1% wartości średniej.

Tabela 1. Wyniki statycznej próby rozciągania kompozytu CFRP o różnym kącie ułożenia włókien
Table 1. Results of tensile stress test of composite CFRP with a different angle of fibres orientation

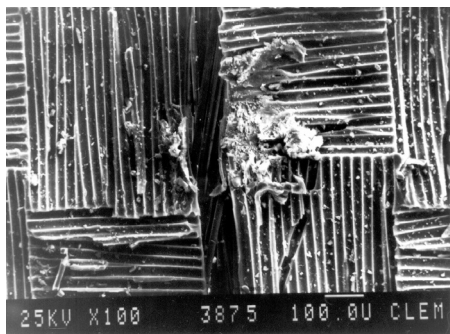
	Maksymalne naprężenia σ_{max} [MPa] dla kąta ułożenia włókien		
	0°	45°	60°
Średnia	514,94	62,92	133,8
Odchylenie standardowe	21,17	1,64	9,59
Wartość minimalna	474,81	60,1	119,95
Wartość maksymalna	536,5	65,31	150,36

Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzono, że rozerwanie próbki z kompozytu, którego włókna ułożone są pod kątem 0° w stosunku do siły rozciągającej następuje na granicy zakładki grupy włókien (rys. 1.). Natomiast dla kąta 45° i 60° rozerwanie próbki następuje poprzez włókna i matrycę wzdłuż kierunku działania siły (rys. 2.).

3.1. Symulacja komputerowa statycznej próby rozciągania

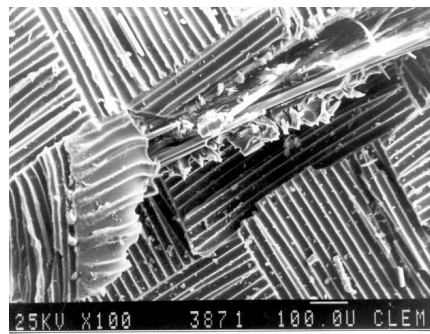
W dalszej części pracy zamodelowano statyczną próbę rozciągania materiału kompozytowego GFRP za pomocą programu komputerowego IDEAS określając warunki brzegowe za pomocą metody elementów skończonych (MES).

Styczna próbę rozciągania zamodelowano w programie IDEAS wykorzystując moduł Simulation. Zamodelowano próbkę do badań o wymiarach: długość $l=250$ mm, szerokość $d=25$ mm, grubość $g=8$ mm.



Rys. 1. Powierzchnia zewnętrzna w miejscu zerwania kompozytu GFRP dla kąta ułożenia włókien 0° , mikroskop skaningowy.

Fig. 1. Outsider surface in the position of composite GFRP crack for angle fibres orientation 0° , scanning microscope.



Rys. 2. Powierzchnia zewnętrzna w miejscu zerwania kompozytu GFRP dla kąta ułożenia włókien 60° , mikroskop skaningowy.

Fig. 2. Outsider surface in the position of composite GFRP crack for angle fibres orientation 60° , scanning microscope.

Jeden koniec próbki utwierdzono na stałe blokując wszystkie stopnie swobody, a na przeciwległej krawędzi zaczepiono siłę o wartości 100 [N/mm]. W kolejnym etapie zdefiniowano siatkę metody elementów skończonych. Siatka do badań MES składała się z 20 elementów na szerokości próbki, 200 na długości i 6 na grubości próbki.

W module Simulation za pomocą narzędzia Laminatem utworzono laminat 0-90-0-90s w określając materiał wyjściowy dla każdej warstwy, kąt orientacji włókien, grubość warstwy, symetryczność zabudowanej warstwy, symetryczność całego laminatu, określono układ odniesienia oraz dokonano wyboru kryterium względem, którego zostaną obliczone własności mechaniczne laminatu.

Jako materiał wybrano utworzony laminat, a następnie za pomocą funkcji Material Orientation określono kąt ułożenia włókien laminatu względem osi X próbki.

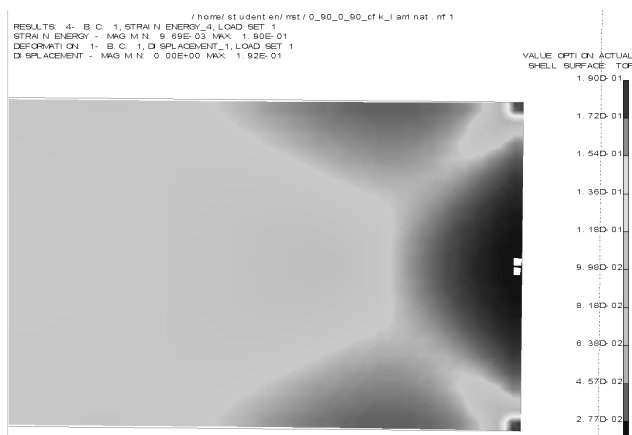
W module Simulation wybrano narzędzie Model Solution. Przeprowadzono symulacje próby statycznego rozciągania próbek, gdzie kąt ułożenia włókien wg. osi X próbki wynosił odpowiednio: 0° , 45° , i 60° . Otrzymane wyniki przedstawia tablica 2.

Tabela 2. Wyniki symulacji próby statycznego rozciągania
 Table 2. Results of computer simulation of tensile stress test

Kąt ułożenia włókien	Wydłużenie [mm]	Naprężenia w kompozycie [MPa]	Energia naprężeń [Pa]	Siły we włóknach [MPa]	Naprężenia we włóknach [MPa]
0°	0,425	12200	13,4	1730	1140
45°	2,17	1890	178	1030	347
60°	2,17	1660	175	1150	273

3.2. Wnioski z analizy

- wielkość naprężeń w próbkach zależy od kąta ułożenia włókien,
- ułożenie włókien pod kątem 45° jest korzystniejsze z punktu wytrzymałości na rozciąganie niż pod kątem 60°,
- na podstawie rozkładu pól naprężeń przedstawionego na rys. 3 i 4 stwierdzono, że korzystniejszy rozkład naprężeń występuje w materiale GFRP gdy siła rozciągająca przyłożona jest pod kątem 45° w stosunku do włókien kompozytu.



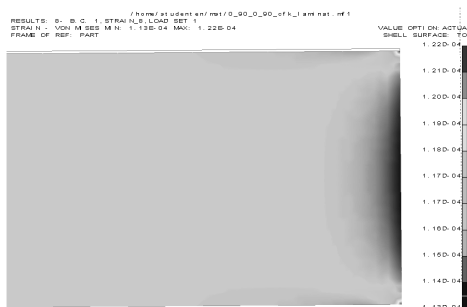
Rys. 3. Rozkład energii naprężeń w kompozycie CFRP o kącie ułożenia włókien 45° względem rozciągającej siły.
 Fig. 3. Distribution of stress energy in composite CFRP for angle orientation 45° with respect to tension force.



Rys. 4. Rozkład energii naprężeń w kompozycie CFRP o kącie ułożenia włókien 60° względem rozciągającej siły.

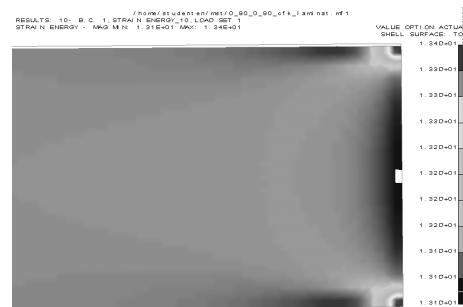
Fig. 4. Distribution of stress energy in composite CFRP for angle orientation 60° with respect to tension force.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono uzyskane wyniki dla kąta ułożenia włókien 0° .



Rys. 5. Rozkład naprężeń w kompozycie GFRP o kącie ułożenia włókien 0° względem rozciągającej siły.

Fig. 5. Distribution of stress in composite GFRP for angle orientation 0° with respect to tension force.



Rys. 6. Rozkład energii naprężeń w kompozycie GFRP o kącie ułożenia włókien 0° względem rozciągającej siły.

Fig. 6. Distribution of stress energy in composite GFRP for angle orientation 0° with respect to tension force.

4. WNIOSKI

Zebrane w tabelicy 3 wyniki przeprowadzonych symulacji potwierdziły wyniki prób laboratoryjnych. Najwyższą wytrzymałość na rozciąganie charakteryzuje się próbka o kącie ułożenia włókien 0° , w której włókna ułożone są wzdłuż linii działania siły.

Tabela 3. Porównanie wyników badań laboratoryjnych i symulacji komputerowych dla próbek z o różnym kącie ułożenia włókien względem osi X próbki
Table 3. Comparison of laboratory investigation and computer simulations for samples with angle fibres orientation with respect to X axis of sample

Kąt ułożenia włókien	Własność	Wynik próby laboratoryjnej	Wynik symulacji komputerowej	Różnica* [%]
0°	Siła zerwania	12 644,8	12 200	3,5
45°	F_u [N]	1612,4	1550	3,8
60°		3410,8	3485	2,1
* różnica pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych a wynikami symulacji komputerowej				

Porównanie wyników przeprowadzonej symulacji komputerowej statycznej próby rozciągania oraz uzyskanych wyników laboratoryjnych dowodzi, że można z powodzeniem wykorzystywać systemy komputerowego wspomaganie do badań własności mechanicznych laminatów stosowanych na różne konstrukcje. Poprawnie prowadzona symulacja pozwala na znaczną redukcję kosztów badań, skrócenie ich czasu oraz możliwość przeprowadzenia szerszego zakresu badań.

Średnia różnica porównanych wyników badań laboratoryjnych oraz wyników symulacji komputerowej wynosi 3,13 % (tablica 3) a największa różnica 3,8 % dla laminatu o kącie ułożenia włókien względem siły rozciągającej 45° nie przekracza granicy błędu statystycznego.

LITERATURA

- [1] M.S. Founda, J.R. Lamba, P. Moorea, M.W. Jones, Composites: Part A 36 (2005) 197–203
- [2] S. Sawietcki, Reinforced Plastics, vol. 42, Issue 3, March 1998, 44-45, 47
- [3] R. Zimmermann, R. Rolfes, Air & Space Europe, Volume 3, Issue 3-4, May-August 2001, 129-131
- [4] K. Morioka, Y. Tomita, K. Takigawa, Materials Science and Engineering A319–321 (2001) 675–678
- [5] W. Saringer, I.Nöbauer-Huhmann, E. Knosp, Acta Neurochir (2002) 144: 1193–1203
- [6] H.J. Früh, R. Ascherl, E. Hipp, Orthopäde (1997) 26: 152–159

- [7] Śleziona J.: *Podstawy technologii kompozytów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [8] F. Wojtku, J. P. Sołncew, *Materiały specjalnego przeznaczenia*, Politechnika Radomska, Radom, 2001.
- [9] K. Puciłkowski, *Projektowanie właściwości kompozytów*, CPBR 2.4, Nowe materiały i ich technologie, Politechnika Warszawska, Warszawa 1990
- [10] S. Ochlewski, *Główne problemy w pomiarach mechanicznych właściwości kompozytów włóknistych*, Inżynieria materiałowa, Nr 1 (2003) I-II, s. 14.
- [11] S. Ochelski, *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 2004.
- [12] PN-EN ISO 527-1.
- [13] PN-EN ISO 527-2.
- [14] ASTM D 5687.
- [15] PN-C-89064:1986, ISO 2818:1994,
- [16] PN-C-89011:1992, ISO 293:1986,
- [17] PN-C-89012:1988, ISO 294:1995,
- [18] PN-C-89010:1979, ISO 295:

COMPUTER OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION PERFORM WITH COMPOSITE GFRP

SUMMARY

The project included analysis of strain and cracking of composite material CFRP (glass fibre reinforced plastics) for different angle fibres orientation. Simulation results were collected and compared with the laboratory static tensile strength tests results. Simulation was carried out with IDEAS software package employing the finite element method.

Recenzował: prof. Jan Szajnar.