

Badanie wpływu właściwości geometrycznych mikrostruktury na moduł sprężystości poprzecznej kompozytu rowingowego w procesie produkcji odpowiedzialnych konstrukcji nośnych

Proces produkcji odpowiedzialnych konstrukcji nośnych

PIOTR WOLSZCZAK

W procesie produkcji odpowiedzialnych konstrukcji nośnych, wykonywanych z kompozytów rowingowych, ważnym problemem jest nadzorowanie jakości części kompozytowych. Obecnie stosowanymi miarami w ocenie jakości takich kompozytów są średnica włókien i objętość względna włókien wzmacniających. Pomijana jest równomierność rozmieszczenia włókien wzmacniających. W pracy przedstawiono wyniki badań z użyciem miar przydatnych do prognozowania wytrzymałości i ich związku z wytrzymałością próbek pochodzących z procesu produkcji dźwigarów łopat śmigłowych.

W budowie maszyn interesującą grupę materiałów stanowią kompozyty zbudowane z włókien ciągłych (szklanych, węglowych) o przekroju kołowym, ułożonych jednokierunkowo i zatopionych w osnowie żywicy epoksydowej. Dzięki zatopieniu twardych, kruchych włókien w żywicy epoksydowej o znacznie niższej wytrzymałości na zniszczenie niż wytrzymałość włókien, uzyskuje się kompozyt o budowie anizotropowej. Jego wytrzymałość zależy od: kierunku przyłożenia obciążenia w stosunku do osi włókna, wytrzymałości składników, połączenia tych składników oraz objętości względnej składników i równomierności ułożenia włókien wzmacniających. Równomierne ułożenie włókien zależy z kolei od procesu wytwarzania kompozytów [1, 2, 3, 4].

Standardowo według literatury przedmiotu ocenę rozmieszczenia składników wzmacniających dokonuje się na podstawie obrazów mikrostruktur. Podstawą oceny są: ilość, wielkość, kształt i rozmieszczenie każdego ze składników [5, 6]. Wielkości te charakteryzowane są wskaźnikami globalnymi oraz lokalnymi (średnimi). Wymieniane są następujące metody charakteryzowania niejednorodności struktury materiałów wielofazowych [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]:

- za pomocą elementów testowych (sieczone), za pomocą elementów testowych rozmieszczanych systematycznie, wykorzystujące: skaniny systematyczne (pola siatki, otwarte kształty krzywoliniowe, funkcję kowariancji (równoległe sieczone), funkcję rozkładu radialnego (pierścieniowe elementy testowe);
- pomiar odległości i kąta pomiędzy sąsiadującymi włóknami;

- przez pomiar właściwości wieloboków będących wynikiem teselacji, obejmujące: pole (A_i), obwód (B_i) i liczbę boków wieloboku, grubość osnowy pomiędzy włóknami wzmacniającymi oraz współczynnik kształtu (q_i), określony wzorem (1),

$$q_i = 4\pi (A_i / p_i^2); \quad (1)$$

- z wykorzystaniem entropii topologicznej oraz funkcji charakteryzujących lokalne koncentracje.

Przytaczane w literaturze wyniki badań dotyczą obiektów modelowych, a nie rzeczywistych, które mogą charakteryzować się znaczną losowością [7].

Materiał i metodyka

Testy wytrzymałościowe przeprowadzono z użyciem próbek pochodzących z procesu produkcji dźwigarów łopat śmigłowych. Dla 81 próbek przygotowano wykłady i wykonano ponad 1400 obrazów mikroskopowych. Pomiary i obliczenia

przeprowadzono przy użyciu komputerowego, wizyjnego systemu pomiarowego opracowanego przez autora [14].

Wynikami pomiarów geometrycznych były: zbiory wartości współrzędnych środków włókien i ich średnic oraz lokalizacje i powierzchnie wad (wtrąceń i porów gazowych). Na tej podstawie obliczono objętości względne szkła i porów gazowych, a także miary charakteryzujące równomierność rozmieszczenia włókien.

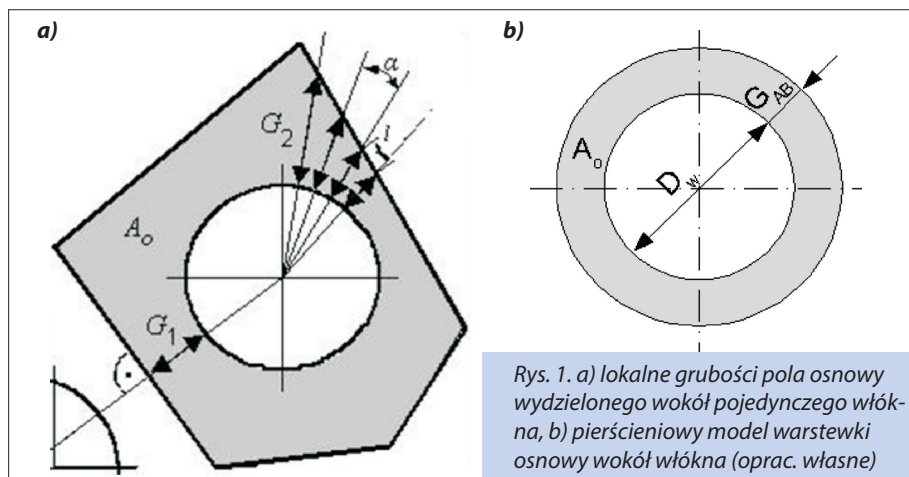
Poza miarami charakteryzującymi makrobudowę kompozytu i założeniami projektowymi (objętość względna szkła U_{sz} [%], średnica włókien – D [μm]), rozpatrywano także: objętość względną pęcherzy gazowych U_p [%], wzajemne położenie włókien określone przez: entropię topologiczną S i minimalną odległość między sąsiadującymi włóknami $G_{\min}$ [μm].

Zgodnie z rys. 1 grubość warstewki osnowy otaczającej pojedyncze włókno, może być definiowana przez: G_1 , G_2 , G_{AB} , G_{AD} [μm], gdzie:

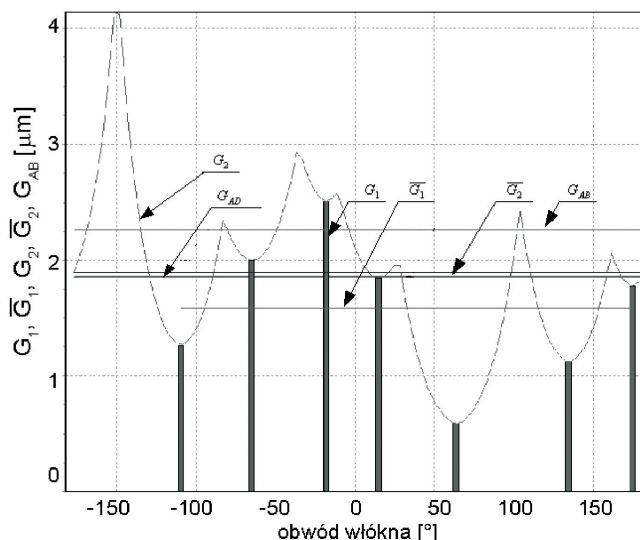
G_1 – odstęp pomiędzy sąsiadującymi włóknami – lokalne grubości warstewki mierzone na odcinkach łączących sąsiednie włókna,

G_2 – lokalne grubości warstewki mierzone w stałych odstępach wzdłuż obwodu,

G_{AD} – średnia grubość warstewki G_{AD} obliczana wg wzoru:



Rys. 2. Grubość warstwy osnowy otaczającej pojedyncze włókno wzdłuż jego obwodu (kąt $\pm 180^\circ$ na osi poziomej) wyrażona miarami: $G_1, \bar{G}_1, G_2, \bar{G}_2$ i G_{AB} (oś pionowa) (oprac. własne) [15]



$$G_{AD} = \frac{\sqrt{D_w^2 + 4 \frac{A_o}{\pi}} - D_w}{2} \quad (2)$$

G_{AB} – proporcja pola wydzielonej osnowy A_o do obwodu włókna B_w , według wzoru:

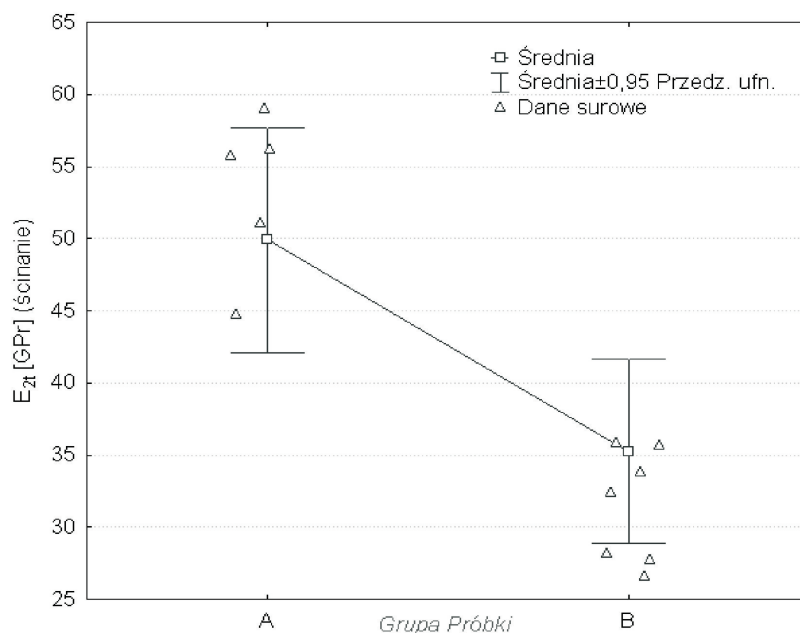
$$G_{AB} = \frac{A_o}{\pi D_w} \quad (3)$$

Rysunek 1 definiuje także rozpatrywane w literaturze wielkości wieloboków teselacji, takie jak: liczba boków, długość obwodu i pole powierzchni wieloboku. Analizując rys. 1 określić również można: proporcję pól powierzchni wieloboku i włókna, która nawiązuje do objętości względnej szkła [13].

Dla zilustrowania wzajemnego położenia średnich opisujących grubość warstewki osnowy na rys. 2 linią przerywaną koloru czerwonego, przedstawiono rozwiniecie wydzielonej warstewki osnowy wzdłuż obwodu przykładowego włókna B_w wraz z naniesionymi lokalnymi grubościami G_1, G_2 i G_{AB} oraz średnimi $\bar{G}_1$ i $\bar{G}_2$.

Analiza wyników

Analizując wyniki serii próbek trudno w sposób bezpośredni dostrzec wpływ równomierności rozmieszczenia włókien wzmacniających na wyniki testów wytrzymałościowych. Przyczyną jest wysoka jakość materiałów otrzymywanych w procesach produkcyjnych przemysłu lotniczego, wynikająca z poziomu kontroli jakości. Jednak analizując szereg próbek, uporządkowanych rosnąco według wartości modułu sprężystości poprzecznej E_{2t} , wyróżniono dwie grupy próbek zlokalizowane po przeciwnych stronach skali E_{2t} . Półki te sygnalizują istnienie wpływu nierównomierności rozmieszczenia na wartość E_{2t} . Zróznicowanie wartości współczynnika sprężystości takich dwu kategorii próbek (grupy A i B), potwierdzone testem t-Studenta przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Uśrednione ($\square$) wartości modułu sprężystości poprzecznej w dwu grupach próbek-świadeków A i B, dane surowe (Δ) oraz przedział ufności oznaczony „wąsami” (L/T) (wyniki własne)

Pojawił się zatem problem wymagający wyjaśnienia: dlaczego występuje wyraźne zróznicowanie E_{2t} i jakie wielkości są tego powodem. W pierwszej kolejności dokonano analizy znaczenia średnic włókien D_w oraz znaczenia objętości względnej szkła U_{sz} [%].

Kolejnym etapem była analiza dyskryminacyjna, za pomocą której usiłowano określić znaczenie wytypowanych czynników [16].

Na podstawie kolejnych etapów analizy korelacyjnej z ogólnej grupy 13 miar charakteryzujących budowę mikrostruktur próbek wyróżniono:

- umowną grubość warstewki osnowy wokół pojedynczego włókna

$$G_{AB} = A_o / \pi D_w;$$

- minimalną grubość osnowy wokół pojedynczego włókna G_{1min} – wyznaczana jest na linii biegnącej przez środki rozpatrywanego włókna i najbliższego

sąsiada (jest to połowa dystansu do krawędzi najbliższego włókna),

- objętość względną szkła U_{sz} .

Położenie punktów charakteryzujących grupy próbek, w przestrzeni zdefiniowanej przez wyróżnione w analizie korelacyjnej zmienne, przedstawia rys. 4.

Uzyskane wyniki upoważniły do sklasyfikowania próbek grup A i B, scharakteryzowanych wektorami $[U_{sz}, G_{AB}, G_{1min}]$ za pomocą następującej funkcji dyskryminacyjnej:

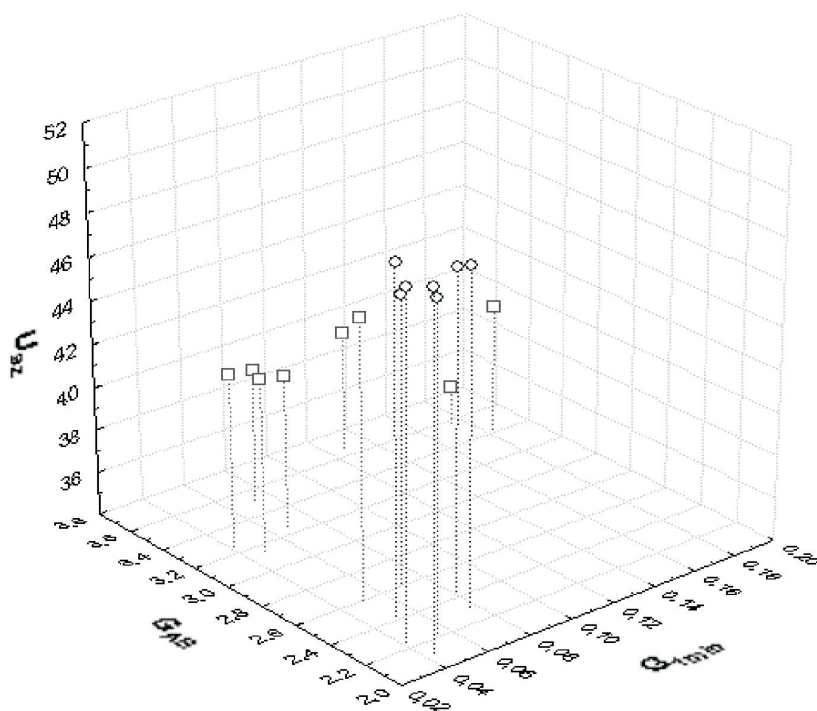
$$D_1 = 14,357 + 1,649 G_{AB} - 16,944 G_{1min} - 0,396 U_{sz} \quad (4)$$

Poziom jej istotności, określony w teście chi-kwadrat, wyniósł $p = 0,0001$. Wysoka wartość korelacji kanonicznej

$R = 0,9151$ wskazuje na silne powiązanie grup A i B oraz funkcji dyskryminacyjnej [17-22]. Funkcja pozwala na klasyfikację przynależności próbek do grup A lub B.

Zastosowana analiza dyskryminacyjna (dla kryterium różnicowania próbek A i B) wskazała jako znaczące następujące charakterystyki geometryczne: G_{AB}, G_{1min}, U_{sz} . Ten zestaw wielkości geometrycznych z pewnością należy uzupełnić o D_w i V_{SGab} (V_{SGab} – średnie odchylenie grubości G_{AB}). Dlatego też przeprowadzono weryfikację wpływu tych charakterystyk na wartość poprzecznego modułu sprężystości E_{2t} . Weryfikacja została przeprowadzona przy użyciu metody analizy regresji wielorakiej.

Celem tej analizy było ostateczne rozstrzygnięcie czy wybrane w trakcie analizy dyskryminacyjnej charakterystyki jednoznacznie i wyczerpująco określają budowę kompozytu, w sposób umożliwiający określenie wartości poprzecznego modułu sprężystości E_{2t} .



Rys. 4. Wartości U_{sz} , G_{AB} i G_{1min} próbek podgrup A (○) i B (□) (wyniki własne)

Analiza ta polega na obliczeniu współczynników funkcji $E_{2t}(G_{1min}, G_{AB}, U_{sz})$, ich interpretacji oraz weryfikacji wyników otrzymanych z jej użyciem w odniesieniu do wyników eksperymentalnych.

Liniowe równanie regresji uzyskało następującą postać:

$$E_{2t} = 93,82 - 20,52 G_{AB} + 77,74 G_{1min} - 0,0076 U_{sz} \pm 6,47 \quad (5)$$

(115,4) (13,7) (50,9) (1,7)

Poniżej równania, w nawiasach wymieniono błędy standardowe szacowania wartości E_{2t} . Uzyskany model wyjaśnia 74,39% zmienności E_{2t} w rozpatrywanych próbkach kompozytu (wartość procentową podano na podstawie wartości wielokrotnej $R_2 = 0,74389$).

Analizując zależność (5) należy zwrócić uwagę, że w rozpatrywanej zmienności materiału badawczego największy wpływ na E_{2t} ma wartość średniej grubości warstewki osnowy G_{AB} . Uwzględniając, że charakterystyki budowy kompozytu są ze sobą powiązane, znaczenie wartości współczynników w równaniu liniowym jest proste w interpretacji i zgodne obserwacjami poczynionymi w trakcie analizy dyskryminacyjnej.

Wnioski

Wykazano, że wytrzymałość kompozytów rowingowych rozpatrywana według wartości modułu sprężystości poprzecznej E_{2t} w zakresie zmienności badanych próbek, klasyfikowana jest na odmienne grupy przez: średnią grubość warstewki G_{AB} , minimalną grubość osnowy G_{1min}

i względną objętość szkła U_{sz} . W zakresie rozpatrywanych czynników wymienione wielkości tworzą liniową funkcję umożliwiającą prognozowanie modułu sprężystości poprzecznej E_{2t} . Największe znaczenie w wymienionej prognozie odgrywa średnia grubość warstewki osnowy otaczającej pojedyncze włókno G_{AB} .

Stwierdzone eksperymentalnie znaczenie właściwości mikrogeometrycznych budowy kompozytu, wyrażone głównie przez G_{AB} , dla właściwości wytrzymałościowych kompozytu oznacza, że w przypadkach występowania obciążenia poprzecznego, materiał ten nie powinien być traktowany jak homogeniczny, a w obliczeniach wytrzymałościowych należy uwzględnić zmienność wielkości G_{AB} .

Literatura

- [1] Ochelski S.: Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych, Warszawa, WNT Warszawa 2004.
- [2] Ślęziona J.: Podstawy technologii kompozytów, WPŚ, Gliwice 1998.
- [3] German J.: Podstawy mechaniki kompozytów włókniastych, PK Kraków 2001.
- [4] Kelly A., Zweben, C.: Comprehensive Composite Materials, Elsevier Science 2000.
- [5] Rudawska A.: Swobodna energia powierzchniowa i struktura geometryczna powierzchni wybranych kompozytów epoksydowych, Polimery, 2008, 53, 452.
- [6] Siejka-Kulczyk J., Lewandowska M., Kurzydłowski K.J.: Effect of particle size and particle surface pretreatment of fillers on selected properties of model

ceramic-polymer composites used as dental fillings, Polimery 2008, 53, 208

- [7] Pyrz R., Bochenek B.: Topological disorder of microstructure and its relation to the stress field, Int. J. Solids Structures 1998, 19, 2413-2427.
- [8] Roźniatowski K.: Metody charakteryzowania niejednorodności struktury materiałów wielofazowych, PTS Katowice 2001.
- [9] Kurzydłowski K. J., Ralph B.: The quantitative description of the microstructure of materials, CRC Press USA 1995.
- [10] Kołosow A., Kljawnin W.: Determinowanie parametrów geometrycznej modeli struktury orientacyjnie armowanych włókniastych kompozytów, Mechanika kompozytowych materiałów 1987, 6, 990-998.
- [11] Gusev A. A., Hineb P. J., Ward, I. M.: Fiber packing and elastic properties of a transversely random unidirectional glass/epoxy composite, Compos. Sci. Technol. 2000, 60, 535-541.
- [12] Missoum-Benziane D., Ryckelynck D., Chinesta F.: Micro-Macro approach for mechanical problems involving microstructure, 10 ESAFORM Conference on Material Forming (pod red. Cueto E. i Chinesta F.) 2007, 1342-1347.
- [13] Krywult B.: Wybrane problemy technologiczne i badawcze z zakresu przetwórstwa tworzyw wzmocnionych włóknom, Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych, Częstochowa 2002, 136-140.
- [14] Wolszczak P.: Automatyzacja komputerowej analizy obrazów mikrostruktur, Przegląd Mechaniczny. 2006, 65s, 150-153.
- [15] Płaska S. i Wolszczak P.: Pomiar i ocena rozmieszczenia równolegle ułożonych włókien wzmacniających tworzywa, Materiały polimerowe i ich przetwórstwo. Częstochowa 2004, 65-74.
- [16] Płaska S.: Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi, PL Lublin 2000.
- [17] Stanisław A.: Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem Statistica PL na przykładach z medycyny. Tom 3. Analizy wielowymiarowe, Statsoft Kraków 2007.

Artykuł był publikowany w czasopiśmie POSTĘPY NAUKI I TECHNIKI (ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY) – 2011, nr 8, s. 93-100

dr inż. Piotr Wolszczak
Politechnika Lubelska
Katedra Automatykacji

p.wolszczak@pollub.pl