

Piotr Wolszczak <sup>1)</sup>

## **BADANIE WPŁYWU WŁAŚCIWOŚCI GEOMETRYCZNYCH MIKROSTRUKTURY NA MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI POPZECZNEJ KOMPOZYTU ROWINGOWEGO W PROCESIE PRODUKCJI ODPOWIEDZIALNYCH KONSTRUKCJI NOŚNYCH**

**Streszczenie:** 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 łopatek śmigłowcowych.

**Słowa kluczowe:** pomiar rozmieszczenia, teselacje, kompozyty rowingowe, rozmieszczenie włókien.

### **WSTĘP**

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]:

---

<sup>1</sup> Katedra Automatykacji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

- za pomocą elementów testowych (sieczne), za pomocą elementów testowych rozmieszczanych systematycznie, wykorzystując: skaniny systematyczny (pola siatki, otwarte kształty krzywoliniowe, funkcję kowariancji (równoległe sieczne), 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 śmigłowców. Dla 81 próbek przygotowano zgłady i wykonano ponad 1400 obrazów mikroskopowych. Pomiar 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 –  $D[\mu\text{m}]$ ), rozpatrywano także: objętość względną pęcherzy gazowych  $U_p[\%]$ , wzajemne położenie włókien określone przez: entropię topologiczną  $S$  i minimalną odległość między sąsiadującymi włóknami  $G_{Imin} [\mu\text{m}]$ .

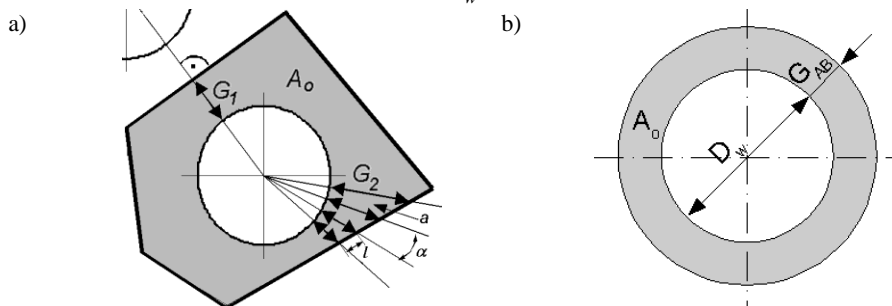
Zgodnie z rys. 1 grubość warstewki osnowy otaczającej pojedyncze włókno, może być definiowana przez:  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_{AB}$ ,  $G_{AD} [\mu\text{m}]$ , gdzie:

- $G_1$  – odstęp między 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:

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

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

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



**Rys. 1.** a) lokalne grubości pola osnowy wydzielonego wokół pojedynczego włókna, b) pierścieniowy model warstewki osnowy wokół włókna (oprac. własne)

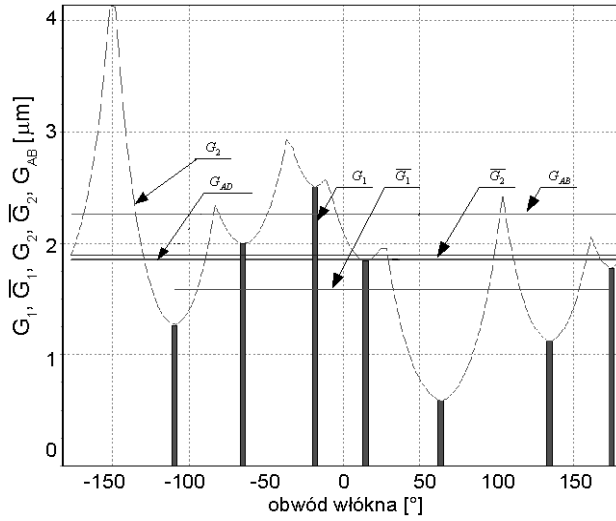
**Fig. 1.** a) local thickness of polygon layer around single fiber, b) ring model of matrix around fiber (author's study)

Rys. 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 rozwinięcie 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  $E_{2t}$ . Próbki te sygnalizują istnienie wpływu nierównomierności rozmieszczenia na wartość  $E_{2t}$ . Zróźnicowanie wartości współczynnika sprężystości takich dwu kategorii próbek (grupy A i B), potwierdzone testem t-Studenta przedstawia rys. 3.

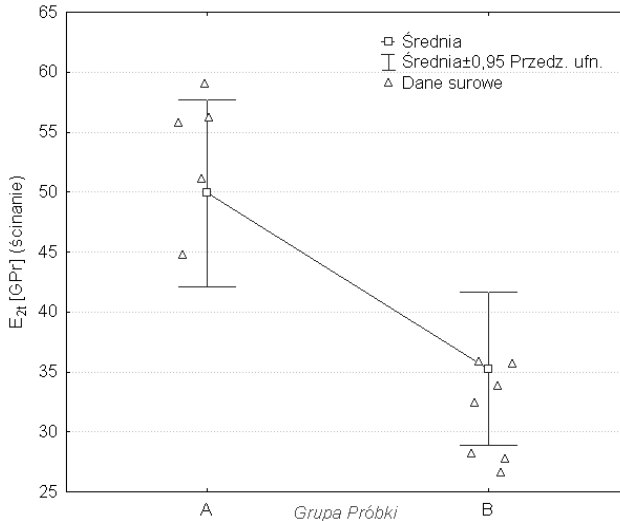


**Rys. 2:** Grubość warstwy osnowy otaczającej pojedyncze włókno wzdłuż jego obwodu (kąt +/- 180° na osi poziomej) wyrażona miarami:

$G_1, \bar{G}_1, G_2, \bar{G}_2, G_{AB}$  (oś pionowa) (oprac. własne) [15]

**Fig. 2:** Thickness of matrix layer circumfluent single fiber along its perimeter (horizontal axis - angle +/-180°) defined as measurement:

$G_1, \bar{G}_1, G_2, \bar{G}_2, G_{AB}$  (vertical axis) (author's study) [15]



**Rys. 3:** Uśrednione ( $\square$ ) wartości modułu sprężystości poprzecznej w dwu grupach próbek-świadków A i B, dane surowe ( $\Delta$ ) oraz przedział ufności oznaczony „wąsami” ( $\perp/\top$ ) (wyniki własne)

**Fig. 3:** Modulus of shear averaged values ( $\square$ ) in two groups of samples, raw data ( $\Delta$ ) and confidence interval ( $\perp/\top$ ) (author's study)

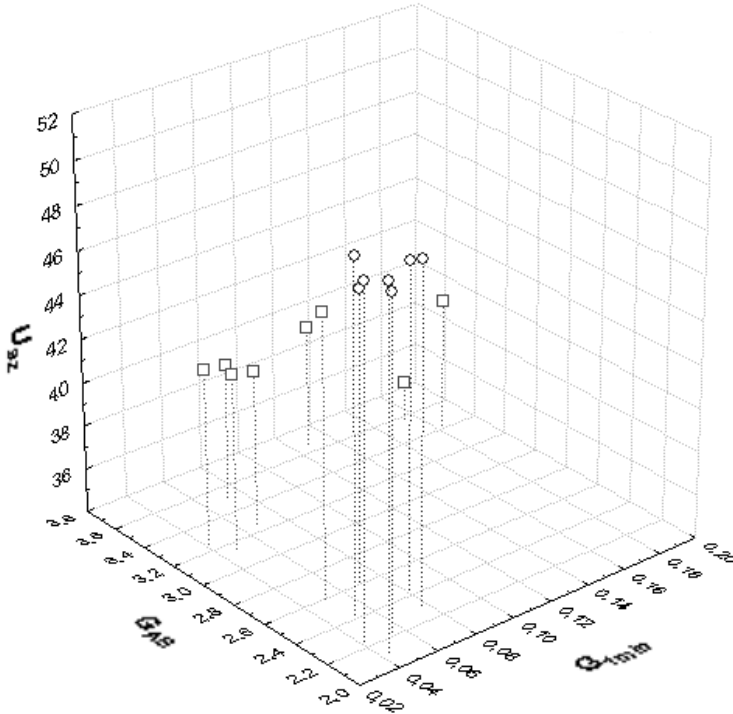
Pojawił się zatem problem wymagający wyjaśnienia: dlaczego występuje wyraźne zróżnicowanie  $E_{2z}$  i jakie wielkości są tego powodem. W pierwszej kolejności dokonano analizy znaczenia średnic włókien  $D_w$  oraz znaczenia objętości względnej szkła  $U_{sz}$  [%].

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<sup>2</sup>  $G_{1min}$ ,
- objętość względną szkła  $U_{sz}$ .

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



**Rys. 4:** Wartości  $U_{sz}$ ,  $G_{AB}$  i  $G_{1min}$  próbek podgrup A(○) i B(□) (wyniki własne)  
**Fig. 4:**  $U_{sz}$ ,  $G_{AB}$  i  $G_{1min}$  values of subsets A(○) and B(□) samples (author's study)

<sup>2</sup>  $G_{1min}$  wyznaczana jest na linii biegnącej przez środki rozpatrywanego włókna i najbliższego sąsiada (jest to połowa dystansu do krawędzi najbliższego włókna).

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

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

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:  $G_{AB}$ ,  $G_{Imin}$ ,  $U_{sz}$ . Ten zestaw wielkości geometrycznych z pewnością należy uzupełnić o  $D_w$  i  $V_{SGab}$ <sup>3)</sup>. 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  $E_{2t}$ .

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

Liniowe równanie regresji uzyskało następującą postać:

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

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

Poniżej równania, w nawiasach wymieniono błędy standardowe szacowania wartości  $E_{2t}$ . Uzyskany model wyjaśnia 74,39%<sup>4)</sup> zmienności  $E_{2t}$  w rozpatrywanych próbkach kompozytu.

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.

<sup>3)</sup>  $S_{VGab}$  - średnie odchylenie grubości  $G_{AB}$ .

<sup>4)</sup> Wartość procentową podano na podstawie wartości wielorakiej  $R_2=0,74389$ .

## 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  $\overline{G_{AB}}$ , minimalną grubość osnowy  $G_{Imin}$  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  $\overline{G_{AB}}$ .

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  $G_{AB}$ .

## PIŚMIENNICTWO

- Ochelski S. „Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych”, Warszawa, WNT Warszawa 2004.
- Ślęziona J. „Podstawy technologii kompozytów”, WPS, Gliwice 1998.
- German J. „Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych”, PK Kraków 2001.
- Kelly A., Zweben, C. “Comprehensive Composite Materials”, Elsevier Science 2000.
- Rudawska A.: “Swobodna energia powierzchniowa i struktura geometryczna powierzchni wybranych kompozytów epoksydowych” Polimery, 2008, 53, 452.
- 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.
- Pyrz R., Bochenek B.: “Topological disorder of microstructure and its relation to the stress field” Int. J. Solids Structures 1998, 19, 2413-2427.
- Roźniatowski K. „Metody charakteryzowania niejednorodności struktury materiałów wielofazowych”, PTS Katowice 2001.
- Kurzydłowski K. J., Ralph B. “The quantitative description of the microstructure of materials”, CRC Press USA 1995.
- Kołosow A., Kljawlin W.: „Determinowanie parametrów geometrycznej modeli struktury orientowanej armowanych włóknistych kompozytów” Mechanika kompozytowych materiałów 1987,6, 990-998.
- 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.
- 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 włóknem” Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych, Częstochowa 2002, 136-140.
14. Wolszczak P. „Automatyzacja komputerowej analizy obrazów mikrostruktur” Przegląd Mechaniczny. 2006, 65, s. 150-153.
15. Płaska S. i Wolszczak P. „Pomiar i ocena rozmieszczenia równoległe 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.

### EXAMINATION OF THE INFLUENCE OF MICRO-GEOMETRICAL PROPERTIES ON TRANSVERSE SHEAR MODULE ROVING COMPOSITES IN PROCESS PRODUCTION OF RESPONSIBLES CONSTRUCTIONS

#### Summary:

Monitoring of quality is an important task in production process of responsible supporting structures, made from roving composites. This paper presents examination results of samples from the production process of girders for helicopter blades, using geometrical measures for prediction of material strength and durability. The connections of geometrical measurement of microstructure with values of elasticity modulus determined in the transverse shear strength test by short beam method, were assessed. Tests of strength and geometric images were prepared for 81 samples. Fig. 2 presents a fragment of a geometric model, determined for the sample, where each circle describes the average thickness of the matrix around every fiber. Circle diameters correspond to different measurements of matrix thickness. To illustrate the relationship between different measurements of matrix thickness, in figure 3, the red dotted line presents layer of matrix around a single fiber along the perimeter  $B_w$ , together with local thicknesses  $G_1$ ,  $G_2$  and  $G_{AB}$  and averages  $\bar{G}_1$  and  $\bar{G}_2$ . During correlation analysis, the following were distinguished: conventional film thickness around a single fiber  $G_{AB}$  (2), minimum local film thickness of the matrix around a single fiber  $G_{1min}$ , relative volume of the glass  $U_{sz}$ .

Fig. 7 presents position of the points characterizing both groups in the space defined by the variables distinguished in the correlation analysis. Samples of groups A and B, characterized by  $[U_{sz}, G_{AB}, G_{1min}]$  vectors, were classified with discriminant function (3). In subsequent stages of the multiple regression analysis, it was decided if selected characteristics clearly and explicitly define the composite micro-construction, so that determination of the value of transverse elasticity modulus  $E_{2t}$  is possible. Linear regression equation obtained the form (4). Analyzing the relationship (4) it should be noted that average thickness  $G_{AB}$  has the greatest impact on value  $E_{2t}$  in case of considered variability of examined material.

**Keywords:** arrangement measuring, tessellations, roving composites, fibers distribution.