

PIOTR WOLSZCZAK

## WYBÓR WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCYCH MIKROBUDOWĘ KOMPOZYTÓW WŁÓKNISTYCH

Stosowanymi obecnie właściwościami budowy mikrogeometrycznej kompozytów włóknistych epoksyd-szkło są: objętość względna szkła oraz średnia średnica włókien. Natomiast równomierność rozmieszczenia włókien nie jest uwzględniana w trakcie projektowania kompozytów, mimo że wielkość ta decydująco wpływa na właściwości mechaniczne kompozytu. W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu wyznaczenie miar rozmieszczenia charakteryzujących równomierność rozmieszczenia włókien.

**Słowa kluczowe:** miara rozmieszczenia, kompozyty jednokierunkowe, teselacje

### WPROWADZENIE

Kompozyty włókniste epoksyd-szkło zbudowane są z równoległych pasm włókien szklanych lub węglowych zatopionych w żywicy epoksydowej lub poliestrowej, zwanej osnową i stosowane m.in. w konstrukcjach lotniczych. Stosowne kojarzenie właściwości mechanicznych składników kompozytu i proporcji ich objętości oraz projektowanie właściwości geometrycznych, pozwalają uzyskiwać materiał o zadanych właściwościach mechanicznych.

Objętość względna elementów wzmacniających oraz średnica przekroju włókien są obecnie uwzględniane na etapie projektowania kompozytów. Wielkość pola powierzchni włókien, na której następuje połączenie składników, jej charakter i jakość uważa się za szczególnie istotne dla pożądaných właściwości mechanicznych kompozytu [1], [2], [3], [4]. Wady budowy mikrostrukturalnej kompozytu zmniejszają wartość pola powierzchni włókien przez co obniżają wytrzymałość połączenia składników. Z tego powodu istotne wydaje się monitorowanie równomierności rozmieszczenia włókien wzmacniających w procesie produkcyjnym. Jednak wielkość ta nie jest uwzględniana w obliczeniach i nie jest monitorowana w procesie wytwarzania kompozytów [5].

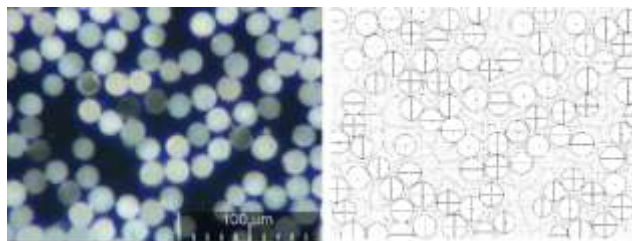
Ocena równomierności rozmieszczenia włókien powinna umożliwiać szacowanie całkowitych właściwości wytrzymałościowych kompozytu. Celem badań autora jest dążenie do wyboru miary rozmieszczenia włókien, która wykazywałaby związek z wartością poprzecznego modułu sprężystości.

### METODYKA

Przedmiotem badań były próbki pochodzące z procesu produkcji dźwigarów łopat śmigłowcowych (81 sztuk) wykonane z ciągłych, ułożonych równolegle włókien szklanych (szkło typu E) o średnicy nominalnej 10 i 16 [ $\mu\text{m}$ ], zatopionych w żywicy epoksydowej z dodatkiem utwardzacza, które utwardzono w podwyższonej temperaturze.

Próbki poddano testom wytrzymałościowym na ścinanie metodą krótkiej belki wyznaczając całkowity współczynnik sprężystości poprzecznej  $E_{2t}$ . Następnie dokonano przekrojów próbek w części nie uszkodzonej i wykonano obserwacje mikroskopowe rozmieszczenia włókien. Obrazy mikroskopowe zostały przetworzone przy użyciu opracowanego przez autora systemu komputerowego, w którym zastosowano m.in. algorytm teselacji. W wyniku otrzymano obrazy geometryczne mikrostruktur zawierające współrzędne środków  $X$ ,  $Y$ , średnice włókien  $D_w$  oraz pola powierzchni  $A_p$  i lokalizacje pęcherzy gazowych.

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono rozkłady średnic włókien, objętości względne szkła, a także obliczono miary rozmieszczenia włókien, do których należały m.in.: entropia topologiczna, odległości pomiędzy pojedynczymi włóknami, grubości warstewek osnowy otaczających poszczególne włókna. Przykładowy obraz mikroskopowy oraz wyniki przetwarzania i analizy obrazu przedstawia rys. 1.



Rys. 1: Mikroskopowy oraz geometryczny obraz przekroju próbki kompozytu włóknistego (epoksyd-szkło, średnica nominalna włókien – 10  $\mu\text{m}$ ) z wydzielonymi wielobokami teselacji (obrazy uzyskano przy pomocy systemu komputerowego opracowanego przez autora)

Fig. 1: Microscope picture of fiber composite cross-section (glass-epoxy, diameter 10  $\mu\text{m}$ ) and geometrical model with tessellation (author's study)

Dla wydzielonego, pojedynczego pola osnowy wokół włókna, zdefiniowano kilka charakterystycznych wielkości, do których należą:

- odstępy pomiędzy sąsiadującymi włóknami ( $G_1$ ),
- lokalne grubości warstewki mierzone na obwodzie wieloboku ( $G_2$ ),
- średnia grubość warstewki ( $G_{AB}$ ,  $G_{AD}$ ).

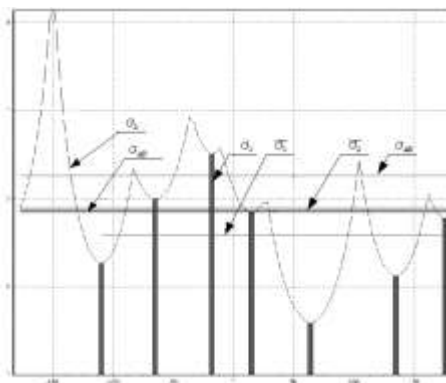
Wartość średniej grubości warstewki obliczona może być na podstawie pomiaru pola osnowy  $A_o$  i średnicy włókna  $D_w$  zawartej w wieloboku wg wzoru:

$$G_{AD} = \frac{-D_w + \sqrt{D_w^2 + 4 \frac{A_o}{\pi}}}{2}. \quad (1)$$

Natomiast wskaźnik  $G_{AB}$ , normuje pole wydzielonej osnowy przez obwód włókna. Wyrażony jest on przez iloraz pola powierzchni wydzielonej osnowy wokół włókna  $A_o$  i długości jego obwodu  $\pi D_w$ :

$$G_{AB} = \frac{A_o}{\pi D_w}. \quad (2)$$

Na rys. 2 przedstawione zostało rozwinięcie wzdłuż obwodu włókna  $B_w = \pi D_w$  wydzielonej warstwy osnowy przykładowego włókna wyrażonej wielkościami  $G_1, \bar{G}_1, G_2, \bar{G}_2, G_{AB}, G_{AD}$ .



Rys. 2: Grubość warstwy osnowy otaczającej pojedyncze włókno wzdłuż jego obwodu wyrażona miarami:  $G_1, \bar{G}_1, G_2, \bar{G}_2, G_{AB}, G_{AD}$  [6] (oprac. własne)

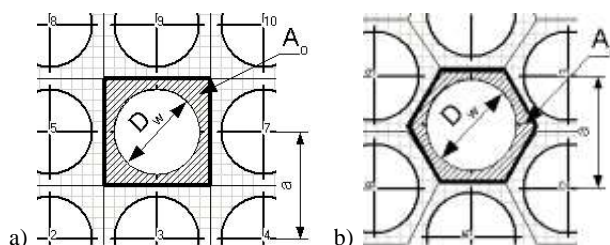
Fig. 2: Thickness of matrix around one example fiber along its perimeter described by measurements:  $G_1, \bar{G}_1, G_2, \bar{G}_2, G_{AB}, G_{AD}$  [6] (author's study)

Stosowanie każdej z wymienionych, uśrednionych dla pojedynczego włókna miar:  $\bar{G}_1$ ,  $\bar{G}_2$  i  $G_{AB}$  oznacza przyjęcie modelu kompozytu, w którym osnowa przedstawiona jest w postaci pierścienia o podanych grubościach.

## WYNIKI

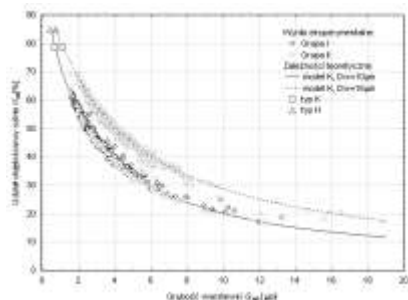
Na podstawie przeprowadzonych analiz wyróżniono miarę równomierności rozmieszczenia włókien w postaci wskaźnika  $G_{AB}$  określonego wzorem (2), który określa umowną grubość warstewki osnowy otaczającej pojedyncze włókno. W trakcie analiz porównywano wpływ grubości warstewki osnowy obliczonej różnymi metodami. Wpływ wskaźnika określonego wzorem (2) na poprzeczny moduł sprężystości  $E_{2t}$  był najbardziej istotny statystycznie. Jednocześnie wskaźnik ten pozostawał w bardzo silnej korelacji z innymi miarami grubości warstewki osnowy.

W literaturze przedmiotu rozpatrywane są dwa podstawowe modele mikrogeometrii kompozytu [7]: typu K (kwadratowy) i typu H (heksagonalny) – rys. 4. W modelach tych przyjmuje się stałą średnicę włókien  $D_w = \text{const}$  oraz jednakowe odległości między środkami włókien.



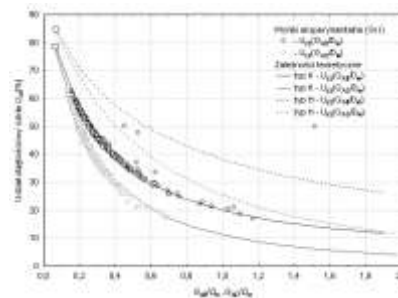
Rys. 3: Podstawowe układy włókien w modelach teoretycznych: a) K, b) H (oprac. własne)  
 Fig. 3: Simple theoretical models of distribution of fibers: a) K, b) H (author's study)

Na rys. 4 przedstawiono zależność objętości względnej szkła  $U_{sz}$  od średniej grubości warstewki osnowy  $G_{AB}$ . Za pomocą krzywych naniesione zostały zależności obliczone dla teoretycznych modeli H i K dla średnicy włókien  $D_w = 10 \mu m$  (linia ciągła) oraz  $D_w = 16 \mu m$  (linia kreskowa). Punkty startowe krzywych teoretycznych dla tych modeli oznaczono znacznikami (trójkąt i kwadrat). Kształt krzywych teoretycznych nie zależy od przyjętego typu modelu. Dodatkowo na rys. 4 zaznaczone zostały wyniki eksperymentalne próbek grupy I (średnica  $D_w = 10 \mu m$ ) oraz grupy II ( $D_w = 10$  lub  $16 [\mu m]$ ). W przypadku danych eksperymentalnych grupy I najwyższe wartości  $U_{sz}$ , do około 63 %, osiągały tylko pojedyncze próbki. Wiązała się z tym minimalna grubość warstewki osnowy  $\sim 1,6 \mu m$ . Wyniki eksperymentalne, w szczególności dla próbek grupy I, są zgodne z wynikami teoretycznymi.



Rys. 4: Zależność objętości względnej szkła  $U_{sz}$  i średniej grubości warstewki osnowy otaczającej pojedyncze włókno  $G_{AB}$  (wyniki własne)

Fig. 4: Glass volume as a function of mean value of matrix thickness around single fiber (author study)



Rys. 5: Zależność objętości względnej szkła  $U_{sz}$  i proporcji  $G_{AB}/D_w$  oraz  $G_{AD}/D_w$  danych rzeczywistych oraz modeli teoretycznych typu K i H;  $D_w=10\mu m$  (wyniki własne)

Fig. 5: Glass volume as a function of proportions  $G_{AB}/D_w$  and  $G_{AD}/D_w$  for empirical results and theoretical model K and H types (author study)

Na rys. 5 przedstawiono zależność  $U_{sz}$  od grubości otoczki  $G_{AB}$  i  $G_{AD}$  unormowanych przez średnicę włókna  $D_w$ . Oprócz wyników pomiarów struktur rzeczywistych na rys. 5 zaprezentowano zależności  $U_{sz}(G_{AB}/D_w)$  oraz  $U_{sz}(G_{AD}/D_w)$  dla modeli teoretycznych typów K i H. Krzywe modeli teoretycznych zostały przygotowane przy założeniu stałej średnicy włókien  $D_w=10[\mu m]$ . Zgodnie z wynikami przedstawionymi na rys. 5, model teoretyczny typu kwadratowego dosyć dokładnie odwzorowuje zależność struktury rzeczywistej w badanej grupie próbek.

## PODSUMOWANIE

Przedmiotem badań były próbki pochodzące z procesu produkcji odpowiedzialnych części lotniczych. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że do właściwości geometrycznych kompozytu włóknistego opisujących w sposób wyczerpujący jego budowę należą: minimalna grubość warstewki osnowy otaczającej pojedyncze włókno  $G_{1min}$  [ $\mu m$ ] i jej rozkład, średnia umowna grubość warstewki osnowy otaczającej pojedyncze włókno  $G_{AB}$  [ $\mu m$ ] i jej rozkład, objętość względna szkła  $U_{sz}$  [%], średnica włókien  $D_w$  [ $\mu m$ ], odchylenie średnie  $S_{VGab}$  grubości  $G_{AB}$  [ $\mu m$ ].

Zbiór ten znacząco rozszerza zakres stosowanych dotychczas właściwości do opisu mikrogeometrii kompozytów włóknistych. Istotne znaczenie wśród tych wielkości odgrywa równomierność rozmieszczenia włókien, wyrażona jako

średnia  $G_{AB}$ . Szczególną cechą tego zbioru jest ich ilościowy charakter, który ułatwia jego zastosowanie w środowisku wytwórczym.

Rzeczywista budowa kompozytu rowingowego, rozpatrywana z punktu widzenia zależności objętość względna szkła unormowana przez średnicę włókien ( $U_{sz}/D_w$ ) a średnia grubość osnowy  $\bar{G}_{AB}$  lub  $\bar{G}_{AD}$ , odpowiada modelowi teoretycznemu typu K (kwadratowy). Model teoretyczny typu H (heksagonalny) dostarcza wyniki rozbieżne.

### LITERATURA

- [1] Królikowski W.: *Tworzywa wzmocnione i włókna wzmacniające*, WNT, Warszawa 1988
- [2] Nairn J.A., Liu Y.C., Galiotis C.: *Fiber, Matrix, and Interface Properties* (Spragg C.J., Drzal L.T.), ASTM STP, West Conshohocken, U.S.A. 1996
- [3] Zhao F.M., Takeda N.: *Effect of interfacial adhesion and statistical fiber strength on tensile strength of unidirectional glass fiber/epoxy composites. Part I: experiment results*, "Composites: Part A", nr 31, s. 1203-1214
- [4] Zhao F.M., Takeda N.: *Effect of interfacial adhesion and statistical fiber strength on tensile strength of unidirectional glass fiber/epoxy composites. Part II: comparison with prediction*, "Composites: Part A", nr 31, s. 1215-1224
- [5] Backman B.F.: *Composite Structures, Design, Safety and Innovation*, ScienceDirect, <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780080445458> 2005
- [6] Plaska S., Wolszczak P.: *Pomiar i ocena rozmieszczenia równoległe ułożonych włókien wzmacniających tworzywa*, "Materiały polimerowe i ich przetwórstwo", pr. zbior. pod red. J.Kozskul i E. Bociąga, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2004, s. 65 - 74
- [7] German J.: *Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych*, Politechnika Krakowska, Kraków 2001

Recenzent:

### SELECTION OF CHARACTERISTIC QUANTITIES OF FIBERS COMPOSITES MICROSTRUCTURE

#### S u m m a r y

Common used properties of roving composites microstructure are: relative volume of glass and average diameter of fibers. Whereas the regularity of fibers arranging distribution isn't being taken into account, even though this property is significant for total mechanical properties of composite. In this paper, research results aimed at selection of fibers distribution measure, influencing a total shear modulus  $E_2$ , are presented. The total shear modulus values were appointed in short beam test of epoxy-glass composites samples.

**Keywords:** distribution measure, unidirectional composite, tessellation

**dr inż. Piotr Wolszczak**

Politechnika Lubelska, Katedra Automatykacji, ul. Nadbystrzycka 36a, 20-618 Lublin,  
p.wolszczak@pollub.pl tel. (081) 5384 267, e-mail:pwolszczak@pollub.pl.