



## Identyfikacja stałych materiałowych hybrydowych kompozytów typu Fibre Metal Laminates z wykorzystaniem metody homogenizacji

Jan GODZIMIRSKI, Agata PIETRAS

*Institut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa,  
Wojskowa Akademia Techniczna,  
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa*

**Streszczenie.** Przeprowadzono próbę obliczenia metodą elementów skończonych stałych materiałowych ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$ ,  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yx}$ ) kompozytu polimerowego wzmocnionego tkaniną szklaną na podstawie znajomości właściwości fizycznych (gęstości) i mechanicznych ( $E$ ,  $\nu$ ) komponentów kompozytu oraz ich udziałów objętościowych. Obliczone wartości modułów sprężystości wzdłużnej okazały się o około 15% większe od określonych eksperymentalnie, co można wyjaśnić idealizacją modeli obliczeniowych, które nie uwzględniały wad strukturalnych rozpatrywanego materiału. Przeprowadzono również próbę obliczenia MES modułu sprężystości wzdłużnej materiału kompozytowego typu Fibre Metal Laminat. W tym przypadku wyniki obliczeń numerycznych były bliskie wynikom badań eksperymentalnych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że metoda homogenizacji może być przydatna jedynie do przybliżonego szacowania właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych. Określenie rzeczywistych wartości stałych materiałowych wymaga przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

**Słowa kluczowe:** inżynieria materiałowa, materiały kompozytowe, właściwości mechaniczne

## 1. WSTĘP

Hybrydowe materiały kompozytowe FML (*Fibre Metal Laminats*) są to laminaty zbudowane najczęściej z cienkich warstw blach metalowych i kompozytu polimerowego wzmocnianego włóknami: szklanymi, aramidowymi lub węglowymi [1]. Badania nad takimi materiałami zostały zapoczątkowane w 1945 roku przez przemysł holenderski i kontynuowane są przez m.in. Uniwersytet Delaft w Holandii. Ich właściwości są ściśle związane z właściwościami materiałów, z których są zbudowane. Dzięki wprowadzaniu w ostatnich dziesięcioleciach innowacyjnych technik badawczych dokonano wielu interesujących odkryć dotyczących właściwości tych materiałów. Należy do nich m.in. korzystna cecha, jaką jest mała szybkość propagacji pęknięć w warstwach takich laminatów. Dodatkowo FML w porównaniu z materiałami metalowymi charakteryzuje lepsza tolerancja uszkodzeń, pod względem ich wpływu na trwałość zmęczeniową i odporność na korozję materiału oraz lepsza udarność. Pozytywne oddziaływanie warstwowej budowy FML można również zauważyć w ich odporności na wyładowania ładunków elektrycznych (atmosferycznych) oraz odporności na przenikanie płomienia w głąb materiału (ognioodporność). W porównaniu z kompozytami polimerowymi FML wykazują lepszą wytrzymałość, udarność i odporność na kruche pękanie. Pomimo wielu bardzo dobrych właściwości, FML wykazują również mniej korzystne cechy związane z występowaniem zjawiska, jakim jest możliwość delaminacji materiału [2].

Pierwszym z grupy FML był laminat o nazwie Arall (*Aramid Aluminium Laminat*), zbudowany z cienkich warstw blachy aluminiowej i kompozytu epoksydowego wzmocnionego włóknami aramidowymi. Kolejną generacją FML był Glare (*Glass-Reinforced*) zbudowany z warstw stopu aluminium oraz kompozytu epoksydowego wzmocnionego włóknami szklanymi. W porównaniu z Arallem wykazywał on zwiększoną wytrzymałość na skupione obciążenia dynamiczne. Dodatkowo wykazywał zwiększoną wytrzymałość zmęczeniową i zwiększoną zdolność przenoszenia obciążeń ściskających [3]. Możliwość modyfikacji właściwości FML stwarza wiele nowych problemów badawczych. Łącząc różne materiały, można uzyskać różne własności kompozytu w zależności od jego przeznaczenia. Metody prowadzące do poprawy własności nowych materiałów konstrukcyjnych muszą jednak uwzględniać aktualne możliwości techniczne i koszty produkcji.

Do obliczenia dużych struktur, w których występują tego typu materiały, wskazane jest zastąpienie ich hipotetycznym materiałem jednorodnym, o uśrednionych właściwościach mechanicznych. Reakcje części wykonanych z takiego jednorodnego materiału pod wpływem wymuszeń powinny być równoważne z zachowaniami części wykonanej z materiału niejednorodnego.

Celem przedstawionych obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych było sprawdzenie możliwości oszacowania stałych materiałowych hybrydowych kompozytów włóknistych typu FML na podstawie znajomości właściwości mechanicznych materiałów stosowanych do ich wytwarzania. Badania obejmowały wyznaczenie objętościowej zawartości włókien i żywicy w badanym kompozycie polimerowym, zbudowanie modeli numerycznych kompozytów o określonej zawartości włókien, wyznaczenie stałych materiałowych takiego materiału poprzez zastosowanie metody homogenizacji, próby wytrzymałościowe na rozciąganie i zginanie badanych materiałów oraz porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych.

## **2. MATERIAŁY WYKORZYSTANE W BUDOWIE HYBRYDOWEGO LAMINATU**

Obiektem badań był kompozytowy materiał wielowarstwowy zbudowany z cienkich blach ze stopu aluminium AW 2024T3 i tkaniny szklanej E81 połączonych ze sobą za pomocą spoiwa klejowego w postaci żywicy epoksydowej L418 z utwardzaczem H418.

### **2.1. Blacha ze stopu aluminium 2024-T3**

Materiałem zastosowanym do wytwarzania kompozytu warstwowego był stop aluminium 2024-T3, w postaci cienkiej blachy o grubości 0,29 mm. Stop ten zawiera ok. 5% Cu oraz inne dodatki stopowe. Jego niska gęstość wynosząca  $2,77 \text{ Mg/m}^3$  oraz wytrzymałość doraźna na rozciąganie wynosząca 450 MPa sprawiają, że jest to bardzo dobry materiał konstrukcyjny stosowany powszechnie w konstrukcjach lotniczych. Moduł sprężystości stopu aluminium 2024T3 wynosi 72 GPa. Dodatkową zaletą jest jego dostateczna odporność na korozję (z wyjątkiem korozji wżerowej) [4].

### **2.2. Tkanina szklana E81**

Kompozyt polimerowy zastosowany do wytwarzania hybrydowego kompozytu warstwowego był oparty na tkaninie szklanej E81, zaliczanej do grupy tkanin technicznych, przeznaczonych do wytwarzania kompozytów polimerowych. Jest to tkanina o splocie płóciennym, wytworzona z włókien szklanych o module sprężystości równym 72 GPa. Gramatura tkaniny wynosi  $\beta = 101 \text{ g/m}^2$  [4, 5].

### 2.3. Syciwo L418/H418

Syciwo to jest stosowane do przesycania laminatów epoksydowych z włókien szklanych. Jest to mieszanina żywicy epoksydowej otrzymanej z bisfenolu A i epichlorohydryny o średniej masie cząsteczkowej  $\leq 700$  oraz styrenu. Gęstość żywicy w temperaturze pokojowej wynosi 1,11-1,15 g/cm<sup>3</sup>. Utwardzana jest chemicznie za pomocą utwardzacza H418 [6].

## 3. OKREŚLENIE UDZIAŁU OBJĘTOŚCIOWEGO SZKŁA W KOMPOZYCIE POLIMEROWYM

Zbudowanie modelu numerycznego kompozytu szklano-epoksydowego wymagało znajomości udziału objętościowego komponentów w kompozycie. W celu określenia tych udziałów wytworzono z tkaniny E81 siedmiowarstwowy i dwudziestowarstwowy laminat przesycony żywicą L418. Laminowanie realizowano na mokro. Kompozyt utwardzano w temperaturze 80°C w czasie 8 godzin pod naciskiem 1,3 N/cm<sup>2</sup>. Wymiary i masę próbek oraz właściwości szkła i żywicy zastosowanych do ich wykonania przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Wymiary próbek z laminatu szklano-epoksydowego

Table 1. Dimension of specimens made of glass-epoxy composite

Materiał	Masa [g]	Długość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość [mm]	$A_t$ [m <sup>2</sup> ]
Laminat 7	41,1	213,5	147,5	1,012	0,22
Laminat 20	138,9	241	152	2,632	0,733

gdzie:  $A_t$  – sumaryczna powierzchnia tkaniny szklanej

Tabela 2. Własności komponentów laminatu szklano-epoksydowego [4, 6]

Table 2. Properties of components of glass-epoxy composite [4, 6]

Kompozyt szklano-epoksydowy na bazie tkaniny E81	Gęstość $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Moduł Younga E [GPa]	Współczynnik Poissona $\nu$
Szkło	2,5	72	0,23
Żywica	1,13	3,5	0,35

Wiedząc, że masa 1 m<sup>2</sup> powierzchni tkaniny E81 wynosi 101 g [5], znając powierzchnię próbek z badanych laminatów, liczbę warstw tkaniny oraz gęstość włókien  $\rho_w$  i osnowy  $\rho_o$ , obliczono udziały masowe włókien ( $m_w$ ) i osnowy ( $m_o$ ):

$$m_w = \frac{\beta \cdot A_t}{M_k} \quad (1)$$

$$m_o = 1 - m_w$$

gdzie:  $M_k$  – masa kompozytu,  $A_t$  – sumaryczna powierzchnia tkaniny szklanej,  $\beta$  – gramatura tkaniny (masa 1 m<sup>2</sup>).

Objętość włókien w kompozycie opisuje zależność:

$$V_w = \frac{M_k \cdot m_w}{\rho_w} \quad (2a)$$

i podobnie objętość osnowy:

$$V_o = \frac{M_k \cdot m_o}{\rho_o} \quad (2b)$$

Objętość kompozytu jest równa sumie objętości włókien i osnowy:

$$V_k = V_w + V_o = \frac{M_k \cdot m_w}{\rho_w} + \frac{M_k \cdot m_o}{\rho_o} \quad (3)$$

Uwzględniając, że udział objętościowy włókien:

$$f_w = \frac{V_w}{V_k} \quad (4)$$

po odpowiednich podstawieniach i przekształceniach otrzymujemy:

$$f_w = \frac{\frac{M_k \cdot m_w}{\rho_w}}{\frac{M_k \cdot m_w}{\rho_w} + \frac{M_k \cdot m_o}{\rho_o}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_w}{\rho_o} \left( \frac{1}{m_w} - 1 \right)} \quad (5)$$

Obliczone udziały masowe i objętościowe siedmiowarstwowego laminatu (laminat 7) oraz dwudziestowarstwowego laminatu (laminat 20) z tkaniny E81 przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyznaczone wartości udziałów masowych ( $m$ ) i objętościowych ( $f$ ) włókien szklanych i osnowy w kompozycie polimerowym

Table 3. Mass fraction ( $m$ ) and volume fraction ( $f$ ) of glass fiber and matrix in glass-epoxy composite

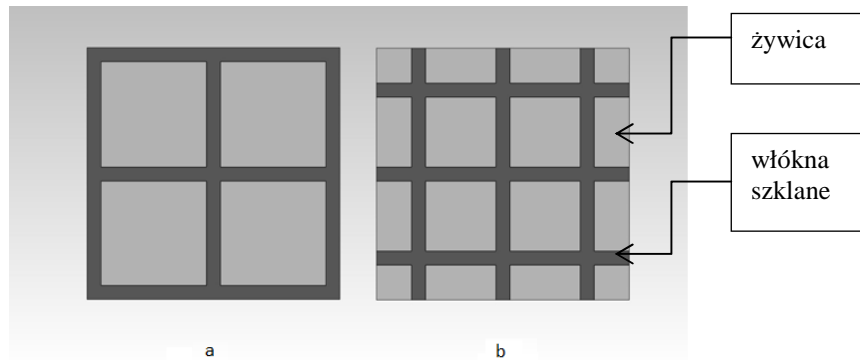
Rodzaj próbki	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]		Kompozyt szklano-epoksydowy			
	$\rho_w$	$\rho_o$	$m_w$	$m_o$	$f_o$	$f_w$
Laminat 7	1,13	2,5	0,540	0,460	0,35	0,65
Laminat 20	1,13	2,5	0,533	0,467	0,34	0,66

#### 4. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Obliczenia numeryczne przeprowadzono w celu wyliczenia wartości stałych materiałowych kompozytu polimerowego wzmocnianego tkaniną szklaną oraz wartości modułu sprężystości wzdłużnej kompozytu typu Glare. Obliczenia prowadzono w programie Ansys.

##### 4.1. Dobór modelu numerycznego kompozytu polimerowego o znanym udziale objętościowym włókien szklanych

Analizowano dwa modele kompozytu polimerowego wzmocnionego tkaniną o splocie płóciennym (rys. 1).



Rys. 1. Modele kompozytu warstwowego z tkaniny szklanej E81

Fig. 1. Models of laminated E81 glass fabric composite

Dla modelu kompozytu przedstawionego na rysunku 1a, przy założeniu, że  $a$  jest długością boku modelowanego wycinka kompozytu, a  $b$  szerokością włókna, obowiązuje zależność:

$$\frac{3a \cdot b + 6 \left[ \left( \frac{a-3b}{2} \right) b \right]}{4 \left[ \frac{a-3b}{2} \right]^2} = \frac{f_w}{f_o} \quad (6)$$

Zakładając 30% udział objętościowy włókien w kompozycie oraz przyjmując  $a = 234$  mm, obliczono wymiar  $b = 13$  mm.

W przypadku modelu przedstawionego na rys. 1b, przy założeniu, że  $a$  jest długością boku warstwy żywicy zawartą pomiędzy włóknami kompozytu, a  $b$  szerokością włókna wyliczono, dla przyjętego wymiaru osnowy  $a = 65$  mm, z zależności:

$$\frac{18a \cdot b + 9b^2}{9a^2} = \frac{f_w}{f_o} \quad (7)$$

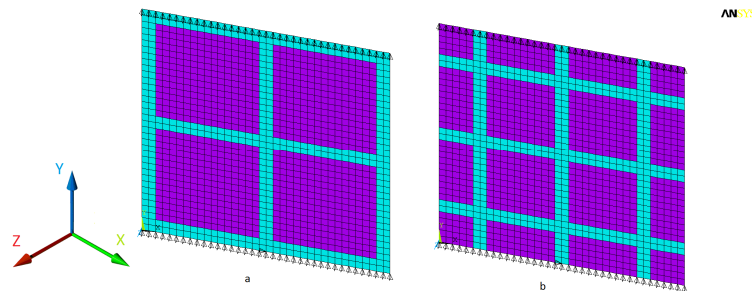
obliczono wymiar  $b = 13$  mm.

## 4.2. Numeryczne określanie stałych materiałowych kompozytu polimerowego wzmocnionego włóknami szklanymi

Stalymi materiałowymi laminatów traktowanych jak powłoki lub cienkie płyty są moduły sprężystości  $E_x$ ,  $E_y$  i  $G_{xy}$  oraz współczynniki Poissona  $\nu_{xy}$  oraz  $\nu_{yx}$ . W celu określenia stałych materiałowych badanego kompozytu, przewidywanego jako komponent FMLa typu Glare, zastosowano metodę homogenizacji, badając numerycznie modele przedstawione na rysunku 1. Celem metody homogenizacji jest zastąpienie ośrodka niejednorodnego równoważnym mu w sensie „średniego zachowania” środkiem ciągłym [7].

### 4.2.1. Próba rozciągania i ścinania modelu 2D tkaniny szklanej E81

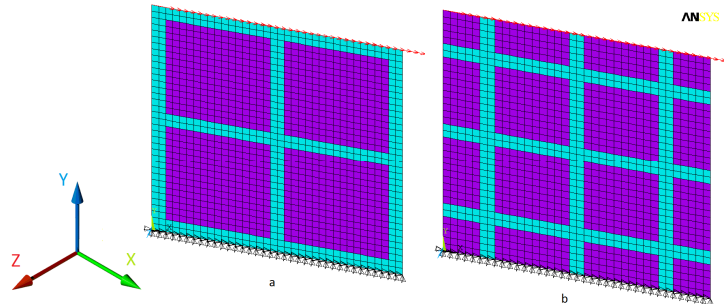
W próbach rozciągania modele kompozytu przedstawione na rysunku 1 zostały podzielone na elementy skończone i utwierdzone na kierunku  $y$ . Dodatkowo wszystkie stopnie swobody odebrano na środkowych węzłach dolnej krawędzi. Modele obciążono przemieszczeniem o wartości 1 mm na kierunku  $y$ . Sposób utwierdzenia i obciążenia modelu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Sposób utwierdzenia i obciążenia modeli 2D (a) i (b) kompozytu szklano-epoksydowego przy rozciąganiu

Fig. 2. Anchoring and loading method of 2D models (a) and (b) of fiber glass-epoxy composite for tension

W próbach ścinania modele kompozytu zostały utwierdzone wzdłuż dolnej krawędzi na kierunku  $xy$ . Modele obciążono siłą o wartości 1000 N na kierunku  $x$ . Sposób utwierdzenia i obciążenia modeli przedstawia rysunek 3.

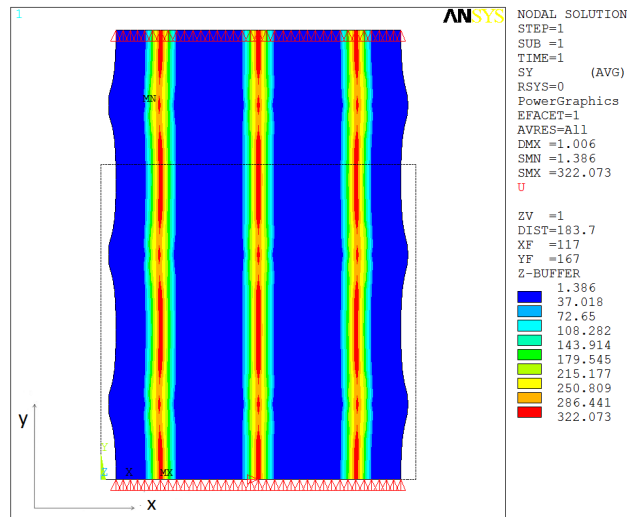


Rys. 3. Sposób utwierdzenia i obciążenia modeli 2D (a) i (b) kompozytu szklano-epoksydowego przy ścinaniu

Fig. 3. Anchoring and loading method of 2D models (a) and (b) of fiber glass-epoxy composite for shear

W przypadku rozciągania, odczytano wartości naprężeń  $\sigma_y$  w skrajnych elementach górnej krawędziach modeli (rys. 4) i obliczono naprężenia średnie. Dzieląc te naprężenia przez zadane odkształcenia ( $\epsilon = 1/234$ ), obliczono wartość modułu sprężystości wzdłużnej na kierunku  $y$ . Podobnie dla przyjętego obciążenia odczytano przemieszczenia węzłów bocznych krawędzi, co pozwoliło obliczyć ich średnią wartość i wartość współczynnika Poissona  $\nu$ . Ze względu na przyjętą symetrię rozpatrywanego kompozytu można przyjąć, że  $E_x = E_y$  oraz  $\nu_{xy} = \nu_{yx}$ .





Rys. 4. Naprężenia i odkształcenia modelu kompozytu szklano-epoksydowego (rys. 1a) obciążonego przemieszczeniem

Fig. 4. Stresses and strains of glass-epoxide composite model loaded by displacement (Fig. 1a)

W przypadku ścinania odczytano wartości przemieszczeń  $u_x$  skrajnych górnych węzłów modeli i obliczono kąt odkształcenia postaciowego na kierunku  $x$ . Dzieliąc wartość przyłożonej siły przez powierzchnie poszczególnych modeli, obliczono wartość naprężenia stycznego na kierunku  $x$ . Dzieliąc te naprężenia przez kąt odkształcenia postaciowego  $\gamma$  obliczono wartość modułu sprężystości poprzecznej  $G_{xy}$ . Otrzymane wyniki dla obu modeli laminatu szklano-epoksydowego zostały przedstawione w tabeli 4.

Tabela 4. Stałe materiałowe kompozytu wykonanego na bazie tkaniny szklanej E81

Table 4. Constant components of composite made of E81 glass fabric

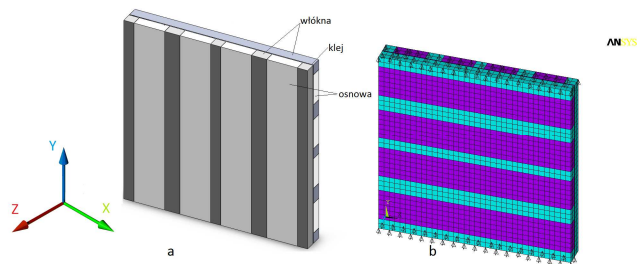
Materiał	$E_x = E_y$ [GPa]	$\nu_{xy} = \nu_{yx}$	$G_{xy}$ [GPa]
Model a	15	0,16	1,7
Model b	15	0,16	1,5

Stwierdzono zależność wartości modułu sprężystości postaciowej od przyjętego modelu kompozytu.

#### 4.2.2. Modele 3D kompozytu szklano-epoksydowego

W modelach płaskich włókna szklane zostały połączone ze sobą na stałe w miejscach krzyżowania się. W rzeczywistości łączy je cienka warstwa kleju.

Przeprowadzono dodatkowe obliczenia numeryczne dla modelu 3D. Celem obliczeń było porównanie wartości stałych materiałowych obliczonych dla modelu 3D z wynikami dla modelu płaskiego. Analizując model 3D, oszacowano wpływ połączenia włókien przez warstwę kleju na wartości stałych materiałowych. Zbudowany model, przy założeniu około 30% udziału objętościowego włókien szklanych, został podzielony na elementy skończone, oraz odebrano mu stopnie swobody w węzłach dolnej płaszczyzny na kierunku y. Model 3D obciążono podobnie jak 2D. Model 3D kompozytu oraz sposób jego utwierdzenia i obciążenia przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Model 3D kompozytu szklano-epoksydowego (a), sposób utwierdzenia i obciążenia (b)

Fig. 5. 3D model of the glass-epoxide composite (a), anchoring and load method (b)

Dalsze obliczenia zostały przeprowadzone w taki sam sposób jak dla dwuwymiarowego modelu kompozytu. Wyniki otrzymane dla modelu 3D przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Stałe materiałowe kompozytu szklano-epoksydowego

Table 5. Material constants of glass-epoxy composite

Model 3D	Udział objętościowy szkło/żywica 30/70	$E_x = E_y$ [GPa]	$G_{xy}$ [GPa]	$\nu_{xy} = \nu_{yx}$
		15	1,3	0,19

Uwzględnienie połączenia krzyżujących się włókien poprzez warstwę kleju miało wpływ na wartość współczynnika Poissona oraz wartość modułu sprężystości poprzecznej.

#### 4.2.3. Określenie modułu sprężystości podłużnej kompozytu Glare 5/6

Wytworzono materiał kompozytowy typu Glare składający się z sześciu warstw blachy gatunku 2024T3 oraz pięciu warstw tkaniny E81 przesyconej syciwem L418. Obliczono metodą elementów skończonych wartość modułu sprężystości wykonanego materiału kompozytowego Glare 5/6.

Zmierzono grubość poszczególnych warstw (tab. 6) oraz przypisano im właściwości mechaniczne wynikające z obliczeń numerycznych (kompozyt polimerowy) i danych literaturowych (stop 2024T3). Do obliczeń zastosowano dwuwymiarowy model, którego wymiary oraz stałe materiałowe komponentów zostały przedstawione w tabeli 6. Model został podzielony na elementy skończone oraz zostały mu odebrane wszystkie stopnie swobody na lewej płaszczyźnie. Model obciążono siłą na kierunku  $x$ . Z próby rozciągania odczytano wyniki przemieszczeń  $u_x$  w skrajnych elementach bocznej płaszczyzny modelu. Na ich podstawie obliczono odkształcenie  $\varepsilon_x$  oraz moduł sprężystości podłużnej  $E$ . Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 6.

Tabela 6. Wymiary, stałe materiałowe komponentów modelu oraz obliczona wartość modułu Younga Glare 5/6

Table 6. Dimension and material constants of model components and calculated Young's modulus of Glare 5/6 composite

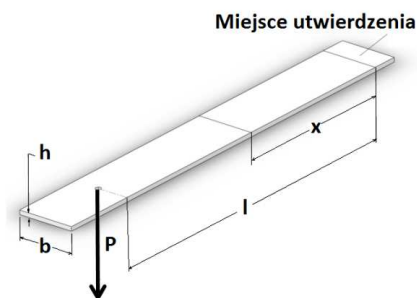
Komponenty	Liczba warstw	Grubość [mm]	$E$ [GPa]	$\nu$	Glare 5/6		
					$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon_x$	$E$ [GPa]
Tkanina szklana E81	5	0,142	15	0,16	332,6	$0,742 \cdot 10^{-4}$	55,43
Stop aluminium 2024-T3	6	0,29	72	0,30			

## 5. BADANIA EKSPERYMENTALNE KOMPOZYTÓW

W celu przeprowadzenia weryfikacji wartości stałych materiałowych obliczonych numerycznie zostały przeprowadzone próby wytrzymałościowe kompozytu wytworzonego z tkaniny szklanej E81 przesyconej syciwem L418 oraz badania kompozytu warstwowego Glare 5/6.

### 5.1. Zginanie kompozytu szklano-epoksydowego

Badano dwudziestowarstwowy laminat zbudowany z tkaniny szklanej E81 połączonej ze sobą za pomocą spoiwa epoksydowego L418. Płaskie próbki o wymiarach  $230 \times 34 \times 2,59$  mm zostały jednostronnie utwierdzone i poddane działaniu skupionej siły działającej prostopadle do powierzchni próbki. Dla znanego obciążenia odczytywano ugięcie próbki w odległości  $x$  od krawędzi utwierdzenia za pomocą czujnika zegarowego z dokładnością 0,01 mm. Wymiary próbki oraz sposób przyłożenia siły do punktu pomiarowego przedstawiono schematycznie na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat obciążenia próbki z laminatu na zginanie

Fig. 6. Diagram of laminate specimen subjected to bending

Wartości dziesięciu pomiarów strzałki ugięcia zostały uśrednione oraz wykorzystane do wyznaczenia wartości modułu Younga zgodnie z zależnością [8]:

$$E = \frac{P \cdot l \cdot x^2}{6I_y} \left( 3 - \frac{x}{l} \right) \quad (8)$$

gdzie:  $I_y$  – moment bezwładności przekroju poprzecznego próbki.

Uzyskane wyniki pomiarów oraz obliczonych wartości modułów zostały przedstawione w tabeli 7.

Tabela 7. Moduł sprężystości wzdłużnej kompozytu szklano-epoksydowego

Table 7. Modulus of elasticity of glass-epoxy composite

Model	$x$ [mm]	$y_{sr}$ [mm]	$l$ [mm]	$P$ [kN]	$E$ [GPa]
Laminat 20	150	1,99	200	0,981	12
	100	1,38	200	0,981	17

Ze względu na duże rozrzuty wartości modułu badanego materiału określono również jego wartość w próbie rozciągania.

## 5.2. Rozciąganie kompozytu szklano-epoksydowego

Badana metodą zginania próbka została poddana następnie próbie rozciągania w maszynie wytrzymałościowej po naklejeniu na niej foliowego tensometru rezystancyjnego typu TF-10. Dla dwóch wartości obciążenia badanego materiału odczytywano wartości odkształceń. Wartości modułu sprężystości podłużnej  $E$  obliczono z zależności [9]:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta P}{A \cdot \Delta\varepsilon} \quad (9)$$

Wyniki pomiarów i obliczeń przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Wartości modułu sprężystości wzdłużnej obliczone z próby rozciągania kompozytu szklano-epoksydowego

Table 8. Modulus of elasticity values calculated from tension test of glass-epoxy composite

Laminat 20	$P$	$\varepsilon$	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon$	$E$ [MPa]
	[kN]		[MPa]		
Próba 1	7,1	0,0067	56,8	0,00484	11,73
	2,1	0,00186			
Próba 2	8,00	0,00764	67,56	0,00578	11,68
	2,05	0,00186			

Moduł sprężystości tej samej próbki wyznaczono również w próbie rozciągania jej siłą 5 kN w maszynie wytrzymałościowej Instron, mierząc jej wydłużenia ekstensometrem mechanicznym na bazie 50 mm. W trzech pomiarach uzyskano wyniki:  $E = 11727$ ;  $11789$ ;  $11798$  MPa, a więc porównywalne z uzyskanymi w badaniach z wykorzystaniem tensometru rezystancyjnego. Stwierdzono małą dokładność metody wyznaczania modułu sprężystości laminatów polimerowych w próbie zginania.

Wyznaczone wartości modułów sprężystości kompozytów szklano-epoksydowych istotnie różniły się od wyliczonych numerycznie – okazały się mniejsze o około 15%. Przyczyny tego należy szukać w nieuwzględnieniu wad kompozytu w postaci pustek (pęcherzyków powietrza) oraz ułożeniu włókien tkaniny, które w rzeczywistości nie są idealnie równoległe do kierunków jej wstęgu i osnowy.

### 5.3. Badania kompozytu warstwowego Glare 5/6

Z wykonanego kompozytu warstwowego (Glare 5/6) wycięto próbkę o wymiarach  $200 \times 40 \times 2,45$  mm. Przygotowana próbka została poddana próbom zginania i rozciągania. Z pomiarów uzyskanych w trakcie zginania próbki wyliczono wartości jej modułu sprężystości  $E = 49$  GPa. W próbie rozciągania w maszynie wytrzymałościowej Instron uzyskano wyniki:  $E = 49928$ ;  $50145$ ;  $49855$  MPa, a więc porównywalne z uzyskanymi w próbie zginania.

Wartość modułu sprężystości wzdłużnej uzyskana z obliczeń okazała się większa od wartości wyznaczonych w badaniach eksperymentalnych o około 10%.

Określono również wytrzymałość na rozciąganie materiału Glare 5/6 na próbce o wymiarach  $160 \times 40 \times 2,45$  mm. Wartość siły niszczącej podczas próby rozciągania wyniosła 32,6 kN. Obliczona wartość średnich naprężeń niszczących wyniosła 332,65 MPa i była mniejsza od wytrzymałości doraźnej materiału 2024T3. Zniszczenie materiału polegało na pęknięciu zewnętrznej warstwy metalowej i delaminacji materiału, co świadczy o tym, że próbka wykonana z takiego materiału poddana próbie rozciągania nie jest równomiernie obciążona w całym przekroju.

## 6. WNIOSKI

1. Znając wartości stałych materiałowych komponentów materiałów kompozytowych oraz ich udziały objętościowe i sposób ułożenia włókien, można oszacować stałe materiałowe zbudowanego z nich kompozytu przy zastosowaniu obliczeń numerycznych z dokładnością kilkunastu procent.
2. Obliczone wartości modułów sprężystości wzdłużnej kompozytów polimerowych wzmocnianych tkaninami nie były praktycznie zależne od przyjętych modeli obliczeniowych. Obliczone wartości modułu sprężystości postaciowej i wartości współczynników Poissona różniły się, co wynika z tego, że trudno jest zbudować idealny model numeryczny dla czystego ścinania.
3. Obliczone wartości modułów sprężystości kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami są zawyżone ze względu na to, że modele obliczeniowe takich materiałów są wyidealizowane – nie uwzględniają ich wad materiałowych i strukturalnych.
4. Metoda homogenizacji wydaje się przydatna do przybliżonego szacowania właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych, jednak określenie rzeczywistych wartości stałych materiałowych wymaga badań eksperymentalnych.

## LITERATURA

- [1] Surowska B., Materiały funkcjonalne i złożone w transporcie lotniczym, *Maintenance and Reliability*, nr 3, Polska, 2008.
- [2] Vlot A., *Glare history of the development a new aircraft material*, Kluwer Academic Publishers, New York, 2004.
- [3] Vlot A., Willem Gunnink J., *Fibre Metal Laminates an introduction*, Kluwer Academic Publishers, Holandia, 2001.
- [4] Ochelski S., *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, WN-T, Warszawa, 2004.

- [5] Czaplicki J., *Analiza możliwości stosowania żywic epoksydowych zbrojonych włóknem szklanym do napraw metalowych pokryć samolotów w warunkach polowych*, rozprawa doktorska, Warszawa, 1976.
- [6] [www.havel-composites.com/](http://www.havel-composites.com/)(2011).
- [7] Łydźba D., *Zastosowanie metody asymptotycznej homogenizacji w mechanice gruntów i skał*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.
- [8] Jakubowicz A., Orłoś Z., *Wytrzymałość materiałów*, WN-T, Warszawa, 1978.
- [9] Bąk R., Burczyński T., *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*, WN-T, Warszawa, 2009.

## **Constants Material Identification of Hybrid Composites Classed with Fibre Metal Laminates by Homogenization Method Using**

Jan GODZIMIRSKI, Agata PIETRAS

**Abstract.** The attempt was undertaken for FEM calculation of material constants ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$ ,  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yx}$ ) of polymer–matrix composite reinforced by glass fabric. The calculations were conducted on the basis of knowledge of physic properties (density), mechanic properties (Young's modulus, Poisson's coefficient) of components and weight in weight concentration of components. Calculated values of Young's modulus were in 15% bigger in comparison with experimentally determined one. It may be explained by idealization of computational models whose don't consider the structural defects of composite material. The attempt was undertaken also for FEM calculation of Young's modulus of Fibre Metal Laminat. In this case result of calculation was near to experimental one. On the basis of conducted investigations it was certified that homogenization method may be useful for approximate estimate of composite materials properties. However the determination of true values of material constants require of experimental tests.

**Keywords:** material engineering, composite materials, mechanical properties

