

## WPLYW SPRZEŻENIA STANU BŁONOWEGO WYSTĘPUJĄCEGO W LAMINATACH WŁÓKNISTYCH NA ZACHOWANIE POKRYTYCZNE ŚCISKANEGO SŁUPA

Z. KOŁAKOWSKI

Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji, Politechnika Łódzka  
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

A. TETER, D. PASIERBIEWICZ

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20–618 Lublin

Laminaty włókniste to kompozyty zbudowane z długich włókien wzmacniających oraz osnowy. W ogólnym przypadku włókniste warstwy laminatu mogą być ułożone w dowolny sposób. Stosując klasyczną teorię laminowanych płyt zależności pomiędzy siłami wewnętrznymi  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{M}$ , a odkształceniami błonowymi  $\boldsymbol{\varepsilon}$  oraz krzywizny  $\boldsymbol{\kappa}$  można zapisać w ogólnej postaci macierzowej [1]:

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \boldsymbol{\kappa} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

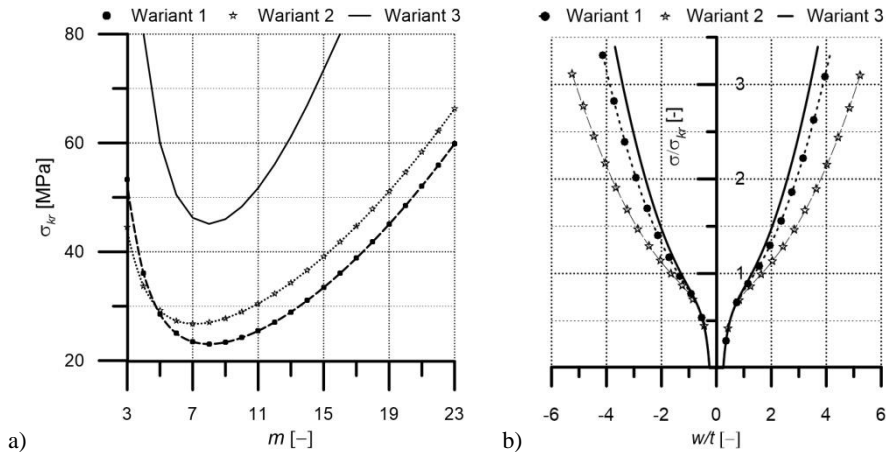
Macierz  $\mathbf{A}$  opisuje stan błonowy, macierz  $\mathbf{D}$  - stan zgięciowy, zaś macierz  $\mathbf{B}$  - sprężenia zachodzące pomiędzy stanem błonowym oraz zgięciowym. Znane są takie ułożenia warstw laminatu np.  $[60/-60_2/0_3/60_2/0/-60/60_2/-60_3/0_2/60]_T$  [2], że możliwe jest pełne rozprężenie stanu błonowego oraz zgięciowego (tzw. niesprężony laminat). Dla laminatów o dowolnym układzie warstw zachodzą różne przypadki sprężeń [1-3]. Ze względów praktycznych szczególnie interesujący jest przypadek sprężenia stanu błonowego, o którym decydują niezerowe wyrazy  $A_{16}$  oraz  $A_{26}$  macierzy  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ & A_{22} & A_{26} \\ \text{Sym.} & & A_{66} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = 0; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ & D_{22} & 0 \\ \text{Sym.} & & D_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Jeżeli  $A_{16}=A_{26}=0$  to stany: błonowy oraz zgięciowy są niesprężone. W przeciwnym przypadku występuje sprężenie błonowe. Laminaty ze sprężeniem błonowym można wytwarzać nowoczesnymi technologiami (technologią autoklawową) w podwyższonych temperaturach, ponieważ wytworzone elementy nie ulegają paczeniu w procesie chłodzenia. Nie ma więc konieczności korekty wynikającej z dylatacji termicznej. Przykładem laminatu wykazującego sprężenie stanu błonowego może być laminat o układzie warstw:  $[45/0/-45/45/-45_3/(0/-45)_3/45_2/-45]_T$  [2].

Szczegółowe obliczenia przeprowadzono dla słupa o przekroju kwadratowym o wymiarach 250 mm oraz długości 2000 mm, swobodnie podpartego na obu końcach. Przyjęto, że słup wykonano z wielowarstwowego kompozytu IM7/8552 o

właściwościach mechanicznych:  $E_1=161$  GPa,  $E_2=11.38$  GPa,  $G_{12}=5.17$  GPa,  $\nu_{12}=0.38$  [2] oraz grubości warstwy 0.14 mm. Jako przypadek referencyjny (Wariant 1) przyjęto laminat niesprężony o układzie 18 warstw:  $[60/-60_2/0_3/60_2/0/-60/60_2/-60_3/0_2/60]_T$ . Laminat wykazujący sprężenie błonowe to  $[45/0/-45/45/-45_3/(0/-45)_3/45_2/-45]_T$  (Wariant 2). Ugięcia wstępne wynoszą:  $w_0=0.25$  mm. Dodatkowo przedstawiono wyniki dla słupa izotropowego (Wariant 3), przyjmując stałe materiałowe:  $E_1=161$  GPa,  $\nu_{12}=0.38$ .



Rys. 1. Stan krytyczny (a) oraz pokrytyczna ścieżka (b) dla analizowanego słupa

Z analizy stanu krytycznego wynika, że najniższe naprężenia krytyczne  $\sigma_{kr}$  odpowiadające wyboczeniu lokalnemu dla słupa wykonanego z kompozytu wykazującego efekt sprężenia (Wariant 2 - Rys. 1a) wynoszą: 26.8 MPa dla  $m=7$ , zaś dla słupa referencyjnego (Wariant 1 - Rys. 1a) odpowiednie naprężenia wynoszą 23,1 MPa dla  $m=8$ . W przypadku słupa izotropowego otrzymano odpowiednio: 45.1 MPa dla  $m=8$ . Obserwujemy zarówno różnicę ilościową jak i jakościową wynikającą ze zmiany długości półfali wyboczenia. Pokrytyczne zachowanie dla analizowanych wariantów przedstawiono na Rys. 1b, gdzie  $\sigma$  - naprężenie ściskające,  $w$  - ugięcie oraz  $t$  - grubość laminatu. Wszystkie wyznaczone ścieżki pokrytyczne są stateczne oraz symetryczne.

*Praca została dofinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2013/11/B/ST8/04358.*

## LITERATURA

- [1] Jones R.M., Mechanics of composite materials, Taylor & Francis, Inc., Philadelphia, 1999.
- [2] York C.B., On extension–shearing coupled laminates, Composite Structures, 120, 2015, pp. 472–482.
- [3] York C.B., Coupled quasi-homogeneous orthotropic laminates, Mechanics of Composite Materials, 47, (4), 2011, pp. 405-426.