

Analiza stateczności i nośności ściskanych cienkościennych profili wykonanych z kompozytu węglowo-epoksydowego

Hubert Dębski¹ Andrzej Teter², Damian Pasierbiewicz²

¹Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, Politechnika Lubelska
email: h.debski@pollub.pl

²Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Lubelska
email: a.teter@pollub.pl

STRESZCZENIE: Przedmiotem badań jest cienkościenny słup o przekroju otwartym, wykonany z laminatu węglowo-epoksydowego, poddany ściskaniu. Zakres badań obejmował analizę stanów: krytycznego, pokrytycznego oraz granicznego konstrukcji. Szczegółowe badania prowadzono metodami doświadczalnymi oraz numerycznymi stosując metodę elementów skończonych. Do oceny nośności konstrukcji w obliczeniach numerycznych zastosowano dwa kryteria zniszczenia: kryterium Tsai-Wu oraz kryterium Hashina. Badania prowadzono w pełnym zakresie obciążenia. Obliczenia numeryczne wykonano z zastosowaniem komercyjnego pakietu MES - ABAQUS.

SŁOWA KLUCZOWE: metoda elementów skończonych, kompozyty, stateczność, stany graniczne, nośność

1. Wprowadzenie

Konstrukcje cienkościenne należą do grupy ustrojów nośnych, charakteryzujących się wysoką sztywnością oraz wytrzymałością w stosunku do ich masy własnej. Cechy te powodują szerokie zastosowanie cienkościennych elementów konstrukcyjnych w wielu dziedzinach przemysłu, a w szczególności w przemyśle lotniczym czy motoryzacyjnym. Dotyczy to przede wszystkim cienkościennych profili o przekrojach otwartych i zamkniętych, wykorzystywanych jako elementy usztywniające pokrycie. Wadą tego typu konstrukcji jest możliwość utraty stateczności nawet w warunkach obciążeń eksploatacyjnych [1,2]. W przypadku, gdy wyboczenie elementu cienkościennego ma charakter lokalny oraz sprężysty, nie prowadzi to do zniszczenia konstrukcji, a element konstrukcyjny może bezpiecznie pracować w stanie pokrytycznym [2-4]. W związku z powyższym znajomość wartości obciążenia krytycznego, przy którym następuje utrata stateczności konstrukcji cienkościennej, należy do zagadnień o pierwszorzędym znaczeniu w warunkach eksploatacyjnych. Większość konstrukcji cienkościennych charakteryzuje możliwość pracy po lokalnej utracie stateczności (dotyczy to przede wszystkim sprężystego wyboczenia) w tzw. stanie pokrytycznym sprężystym. W takich przypadkach określenie nośności granicznej elementów konstrukcji wymaga ich analizy również w stanie pokrytycznym, aż do momentu zniszczenia ustroju. Badania stanów pokrytycznych i granicznych cienkościennych elementów kompozytowych zostały przedstawione w pracach [1, 5].

Przedmiotem badań w niniejszej pracy była eksperymentalno-numeryczna analiza stanów krytycznych, pokrytycznych oraz granicznych krótkich, ściskanych słupów o przekroju kątownika, wykonanych techniką autoklawową z laminatu węglowo-epoksydowego. Badania obejmowały zagadnienie własne oraz nieliniową analizę pokrytyczną konstrukcji z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz eksperymentalną weryfikację obliczeń MES.

2. Przedmiot i metodyka badań

W pracy zajmowano się cienkościennymi profilami o przekroju kątownika o wymiarach przekroju poprzecznego: 40x40x0,9 mm i długości 300 mm. Ściany badanych profili złożone były z 18 warstw laminatu węglowo-epoksydowego wysokiej gęstości, ułożonych w ogólnej konfiguracji względem środkowej powierzchni układu: [60,-60₂,60,0₅]_A. Właściwości mechaniczne materiału kompozytowego wyznaczono eksperymentalnie zgodnie z normami ISO przedmiotowymi w tym zakresie – Tab.1.

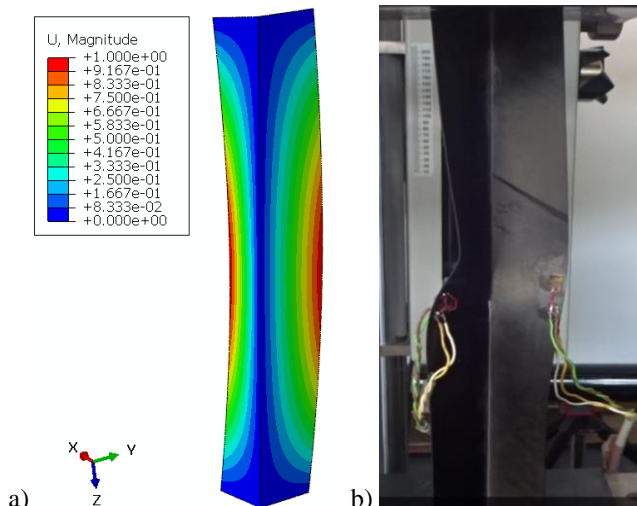
Tabela 1. Właściwości mechaniczne laminatu

Moduły Younga		Liczba Poissona	Moduł Kirchhoffa
E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	ν_{12} [-]	G_{12} [GPa]
143.2	3.1	0.35	3.38

Wyznaczone wartości umożliwiły definicję materiału ortotropowego w płaskim stanie naprężenia wykorzystywanego w obliczeniach numerycznych MES. Wartość obciążenia krytycznego wyznaczono rozwiązując zagadnienie własne, wg kryterium minimum energii potencjalnej układu. Obliczenia nieliniowej stateczności prowadzono na modelach z początkowymi imperfekcjami geometrycznymi, odpowiadającymi najniższej postaci wyboczenia, o amplitudzie wynoszącej 0.1 grubości ścian słupa. Do oceny nośności konstrukcji zastosowano kryterium zniszczenia kompozytu Tsai-Wu oraz kryterium Hashina, do których parametry graniczne materiału wyznaczono w testach niszczących wg norm ISO. Prowadzone obliczenia numeryczne weryfikowano wynikami badań doświadczalnych, prowadzonymi na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej w pełnym zakresie obciążenia – do zniszczenia. Badania doświadczalne prowadzono w temperaturze pokojowej, wykorzystując technikę tensometryczną.

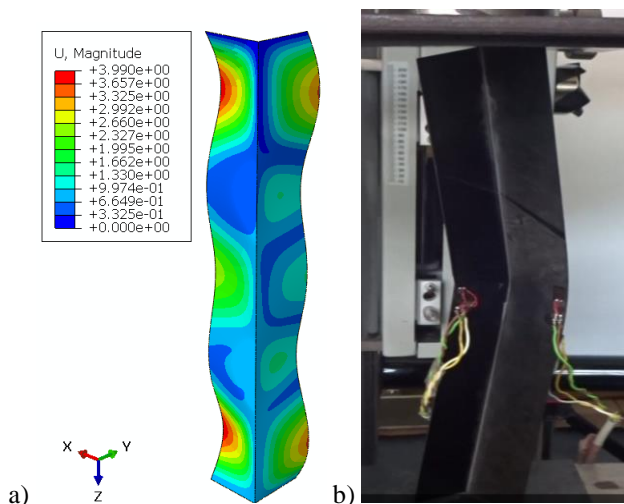
3. Wyniki badań

Wyznaczona numerycznie najniższa postać wybočenja kątownika odpowiadała lokalnej postaci utraty stateczności ścian profilu, przejawiającej się powstaniem jednej półfali na kierunku wzdłużnym. Otrzymana wartość własna, określająca wartość obciążenia krytycznego wyniosła 843 N. Otrzymane wyniki potwierdza stan odkształcenia konstrukcji rzeczywistej, w przypadku której zaobserwowano wybočenje konstrukcji zgodne z wyznaczoną numerycznie postacią wybočenja – rys.1.



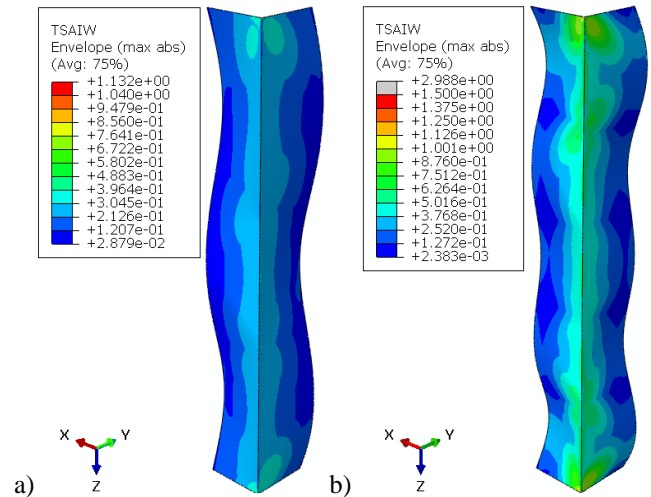
Rys. 1. Najniższa postać utraty stateczności kątownika:
a) obliczenia numeryczne MES,
b) badania eksperymentalne

Przeprowadzone obliczenia w zakresie pokrytycznym umożliwiły wyznaczenie pokrytycznej ścieżki równowagi konstrukcji, określającej zależność obciążenia ściskającego od przemieszczenia węzła ścianki profilu w obszarze maksymalnych ugięć. Pozwoliło to ocenić sztywność konstrukcji w pełnym zakresie obciążenia, aż do osiągnięcia utraty nośności konstrukcji, która w badanym przypadku następowała w wyniku kruchego pęknięcia materiału kompozytowego – rys.2.



Rys. 2. Utrata nośności profilu: a) obliczenia numeryczne MES, b) badania eksperymentalne

Do oceny nośności konstrukcji w obliczeniach numerycznych wykorzystano dwa kryteria zniszczenia, dedykowane do materiałów kompozytowych: kryterium Tsai-Wu oraz kryterium Hashina. Zastosowane kryteria umożliwiły identyfikację zniszczenia pierwszej warstwy kompozytu oraz określenie obciążenia granicznego, odpowiadającego zniszczeniu wszystkich warstw układu. Przykładową mapę parametru zniszczenia wyznaczoną wg tensorowego kryterium Tsai-Wu zaprezentowano na rys. 3.



Rys.3. Mapa parametru zniszczenia wg kryterium Tsai-Wu:
a) zniszczenie pierwszej warstwy,
b) utrata nośności konstrukcji

4. Podsumowanie

Zaprezentowana w pracy metodyka badań umożliwia analizę stanów krytycznych, pracy konstrukcji w zakresie pokrytycznym oraz opis stanów granicznych ściskanych cienkościennych profili kompozytowych. Otrzymane wyniki wykazały, że w przypadku rozważanych konstrukcji zniszczenie pierwszej warstwy kompozytu nie prowadzi do jej zniszczenia, gdyż struktura laminatu zachowuje nadal sztywność w dużym zakresie obciążenia, aż do momentu całkowitej utraty nośności profilu, przejawiającej się gwałtownym pęknięciem materiału kompozytowego.

Przedstawione w pracy wyniki obliczeń numerycznych MES zostały pomyślnie zweryfikowane poprzez wyniki badań doświadczalnych.

Praca została wykonana w ramach projektu DEC-2013/11/B/ST8/04358, finansowanego przez NCN.

Literatura

- [1] Debski H, Teter A, Kubiak T. Numerical and experimental studies of compressed composite columns. *Composite Structures* 2014; 118: 28-36.
- [2] Kopecki T, Bakunowicz J, Lis T. Post-critical deformation states of composite thin-walled aircraft load-bearing structures. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 2016; 54(1): 195-204.
- [3] Bazant ZP, Cedolin L. *Stability of Structures. Elastic, Inelastic. Fracture and Damage Theories.* Oxford University Press UK 2010.
- [4] Singer J, Arbocz J, Weller T. *Buckling experiments. Experimental methods in buckling of thin-walled structure. Basic concepts, columns, beams, and plates.* New York: John Wiley & Sons Inc, Vol. 1, 1998; Vol. 2, 2002.
- [5] Bloom F, Coffin D. *Handbook of thin plate buckling and postbuckling.* CHAPMAN & HALL/CRC Boca Raton, London, New York, Washington, D.C. 2001.