

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Analiza numeryczna oraz doświadczalna ściskanych cienkościennych struktur kompozytowych o przekroju zetowym w pełnym zakresie obciążenia

Błażej Czajka¹

¹Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, Politechnika Lubelska
email: blazej.czajka@pollub.edu.pl

STRESZCZENIE: Przeprowadzone badania obejmowały analizy numeryczne oraz badania doświadczalne cienkościennych słupów kompozytowych o przekroju zetowym poddanych obciążeniu ściskającemu. Badania prowadzono w pełnym zakresie obciążenia, aż do zniszczenia. Praca poświęcona jest w głównej mierze zachowaniu struktur w zakresie pokrytycznym. Analizy numeryczne przeprowadzone zostały z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Próbkę badawczą wykonano z laminatu CFRP w dwóch ośmiowarstwowych symetrycznych układach. Celem badań było odwzorowanie badań doświadczalnych z wykorzystaniem zaawansowanych analiz numerycznych oraz uzyskanie zbieżnych wyników przy użyciu obydwu metod badawczych. Ponadto sprawdzono wpływ układu warstw laminatu na właściwości badanych struktur.

SŁOWA KLUCZOWE: metoda elementów skończonych (MES), kompozyt, struktury cienkościenne, analiza powybozeniowa, utrata nośności

1. Wstęp

Struktury cienkościenne są obecnie szeroko stosowanym rodzajem ustrojów nośnych. Szczególne znaczenie w ostatnich latach mają wśród nich konstrukcje wykonane z materiałów kompozytowych takich jak CFRP – laminat polimerowy wzmocniony włóknami węglowymi. Swoją popularność zawdzięczają szeregowi zalet, nad tradycyjnymi materiałami inżynierskimi, takich jak odporność korozyjna czy chemiczna [1]. Ponadto charakteryzuje je korzystny stosunek wytrzymałości do masy, a także wysoka wytrzymałość zmęczeniowa. Cechy te sprawiają, że kompozytowe materiały cienkościenne są świetnym wyborem w lotnictwie. Z biegiem lat widoczna jest znacząca zmiana i przejście z materiałów tradycyjnych na kompozyty w tej gałęzi przemysłu. Pozwala to na redukcję masy konstrukcji przy spełnieniu wymagań technicznych. Cienkościenne struktury kompozytowe stosowane są do produkcji części takich jak elementy kadłuba, podwozia, czy łopaty śmigłowców [2].

Stosowanie struktur cienkościennych wymaga pozostawania w zakresie statecznym podczas eksploatacji konstrukcji [3, 4], z uwagi na możliwość ich wyboczenia będącego następstwem działania obciążenia ściskającego [5]. Praca konstrukcji cienkościennych w zakresie pokrytycznym prowadzić może do przyspieszonego i niespodziewanego zniszczenia. Badania prowadzone na materiałach kompozytowych pokazują jednak możliwość przenoszenia przez nie obciążenia nawet po wyboczeniu, o ile ma ono charakter sprężysty, a charakter pokrytycznej ścieżki równowagi jest stateczny [6, 7]. Z uwagi na to, zasadne jest badanie cienkościennych konstrukcji kompozytowych w pełnym zakresie obciążenia, aż do

zniszczenia [8], ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk oraz zachowania konstrukcji w zakresie pokrytycznym.

Niniejsze badania poruszają problem zachowania cienkościennych struktur kompozytowych w zakresie pokrytycznym w ujęciu doświadczalnym oraz numerycznym.

2. Przedmiot i zakres pracy

Praca poświęcona jest analizom numerycznym oraz badaniom doświadczalnym cienkościennych słupów kompozytowych poddanych ściskaniu. Przedmiotem badań były kolumny o przekroju zetowym (60 x 30 mm). Wysokość próbek wynosiła 200 mm, a całkowita grubość 0,840 mm. Struktury wykonane zostały z materiału CFRP w dwóch ośmiowarstwowych układach Z1 – [0/-45/45/90]_s oraz Z2 – [90/0/90/0]_s.

Zarówno badania doświadczalne jak i numeryczne prowadzono w pełnym zakresie obciążenia, aż do zniszczenia próbek. Pozwoliło to na wyznaczenie wartości sił nośnych oraz ścieżek równowagi dla badanych próbek. Ponadto w badaniach numerycznych użyte zostały kryteria inicjacji uszkodzenia materiału kompozytowego.

3. Opis i metodologia badań doświadczalnych

Badania doświadczalne przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej. Próbkę były ściskane poprzez jednostajny posuw górnej trawersy maszyny, podczas gdy dolna pozostawała nieruchoma. Podczas badań rejestrowano siłę oraz przesunięcie górnej płyty maszyny. Pozwoliło to na wyznaczenie krzywych skrócenie-obciążenie oraz wartości sił nośnych dla badanych próbek. Dodatkowo w badaniach zastosowana została rejestracja sygnałów emisji akustycznej w celu

weryfikacji zjawisk zachodzących przed zniszczeniem.

Eksperymentom poddane zostały po 3 próbki z każdego układu warstw kompozytu Z1 oraz Z2. Wartość siły nośnej z badań doświadczalnych wyznaczono jako średnią z poszczególnych próbek.

4. Modelowanie numeryczne i symulacja

Analizy numeryczne przeprowadzono w komercyjnym oprogramowaniu Abaqus z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Przygotowane modele odwzorowujące próbki doświadczalne przygotowane zostały jako modele powłokowe. W modelach numerycznych wykorzystano właściwości materiałowe typu „Lamina” oraz technikę modelowania „Layup ply”. Pozwoliło to na uzyskanie odpowiednich właściwości dla poszczególnych układów warstw materiału kompozytowego. Dyskretyzacji modeli próbek dokonano przy użyciu zredukowanych elementów powłokowych czterowęzłowych (S4R).

W celu realistycznego odwzorowania badań doświadczalnych badane modele umieszczono pomiędzy dwoma nieodkształcalnymi płytami. Dolna płyta została całkowicie utwierdzona, a górna poruszała się wzdłuż wysokości próbek generując ściskanie.

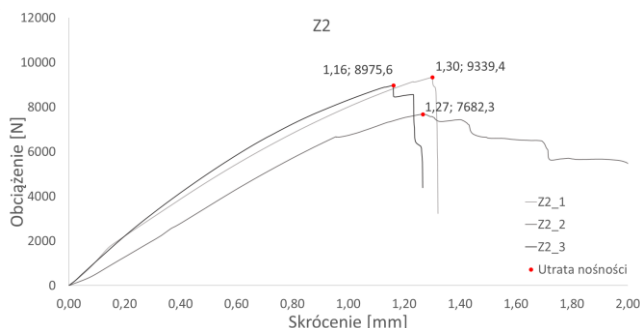
Badania prowadzono w dwóch krokach. Pierwszym z nich było rozwiązanie zagadnienia własnego w celu wyznaczenia sił krytycznych oraz postaci wybożenia próbek. W drugim kroku próbki z zastosowaną imperfekcją geometryczną wynikającą z wybożenia były ściskane aż do zniszczenia, w ramach nieliniowych obliczeń MES.

Wyniki badań pozwoliły na wyznaczenie ścieżek równowagi dla próbek, sił nośnych oraz analizę inicjacji uszkodzenia z wykorzystaniem kryteriów charakterystycznych dla materiałów kompozytowych.

5. Wyniki badań i ich analiza

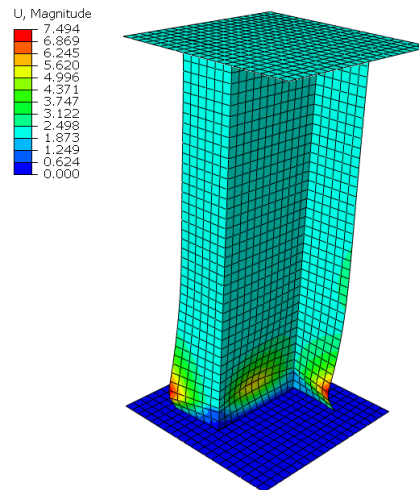
Wyniki uzyskane przy pomocy metod numerycznych są adekwatne do wyników badań doświadczalnych.

Uzyskane w analizach numerycznych ścieżki równowagi dla poszczególnych konfiguracji są zbliżone i dobrze odwzorowują wyniki badań doświadczalnych. Ścieżki uzyskane w badaniach doświadczalnych dla próbki Z2 przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Doświadczalne ścieżki równowagi – układ Z2

Ponadto forma zniszczenia modeli numerycznych odzwierciedla zniszczenia obserwowane podczas badań doświadczalnych. Odształcenia próbki po utracie nośności dla układu Z2, uzyskane w symulacjach numerycznych przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Odształcenia próbki Z2 w analizie numerycznej po zniszczeniu

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie niniejszych wniosków.

- 1) Nieliniowe analizy numeryczne pozwalają w sposób miarodajny odzwierciedlić zjawisko ściskania cienkościennych słupów kompozytowych o przekrojach otwartych, w pełnym zakresie obciążenia.
- 2) Zarówno dla badań doświadczalnych jak i numerycznych konfiguracja Z2 – [90/0/90/0]_s charakteryzowała się wyższymi wartościami siły nośnej niż konfiguracja Z1 – [0/-45/45/90]_s.
- 3) Obydwie badane konfiguracje ulegały zniszczeniu przy zbliżonych wartościach skrócenia.

Głównym elementem nowatorskim w pracy jest nieliniowa analiza numeryczna cienkościennych struktur kompozytowych w pełnym zakresie obciążenia z wykorzystaniem zaawansowanych modeli numerycznych.

Literatura

- [1] Chung D.D.L., Carbon Fiber Composites, Butterworth-Heinemann, Boston, 1994.
- [2] Freeman W.T., The use of composites in aircraft primary structure, Compos. Part B – Eng. 3, 1993, 767–775.
- [3] Berardi, V.P.; Perrella, M.; Feo, L.; Cricri, G., Creep behavior of GFRP laminates and their phases: Experimental investigation and analytical modeling, Composites Part B: Engineering, 122, pp. 136–144, 2017.
- [4] Kubiak, T.; Kołakowski, Z.; Świniarski, J.; Urbaniak, M.; Gliszczyński, A., Local buckling and post-buckling of composite channel-section beams - numerical and experimental investigations, Composites Part B: Engineering, 91, pp. 176–188, 2016.
- [5] Dębski, H.; Teter, A.; Kubiak, T.; Samborski, S., Local buckling, post-buckling and collapse of thin-walled channel section composite columns subjected to quasi-static compression, Composite Structures, 136, pp. 593–601, 2016
- [6] Dębski H, Różyło P, Gliszczyński A, Kubiak T., Numerical models for buckling, postbuckling and failure analysis of predamaged thin-walled composite struts subjected to uniform compression, Thin-Walled Structures, 139, pp. 53–65, 2019.
- [7] Falkowicz, K.; Mazurek, P.; Różyło, P.; Wymuński, P.; Smagowski, W., Experimental and numerical analysis of the compression thin-walled composite plate, Advances in Science and Technology Research Journal, 10, pp. 177–184, 2016.
- [8] Abrate, S., Impact on Composite Structures, Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1998.