

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Analiza numeryczna stateczności i nośności cienkościennych konstrukcji kompozytowych o przekroju kwadratowym

Błażej Czajka¹

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

STRESZCZENIE: Niniejsze badania poświęcone są analizie numerycznej ściskanych cienkościennych słupów kompozytowych o przekroju kwadratowym skupiającej się na stateczności oraz nośności konstrukcji. W analizie zaimplementowane zostały jednocześnie progresywna analiza zniszczenia (PFA) oraz model stref kohezyjnych (CZM) stosowane globalnie, dla całego obszaru badanego elementu. Analizy przeprowadzone zostały z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Badane elementy wykonane zostały z właściwościami materiałowymi odpowiadającymi laminatowi CFRP w dwóch różnych układach warstw. Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie możliwości jednoczesnego i globalnego zastosowania modeli PFA oraz CZM dla przekrojów zamkniętych oraz wpływu układu warstw na stateczność i nośność takich konstrukcji. Przeprowadzone analizy wykazały znaczące różnice dla stateczności, inicjacji uszkodzenia, ewolucji zniszczenia, delaminacji oraz nośności poszczególnych układów warstw.

SŁOWA KLUCZOWE: metoda elementów skończonych (MES), kompozyt, analiza powyboczeniowa, delaminacja, struktura cienkościenna

1. Wstęp

Konstrukcje cienkościenne od wielu lat są bardzo często stosowanym rodzajem ustrojów nośnych w wielu gałęziach przemysłu. Jedną z nich, wymagającą wysokiej odpowiedzialności jest lotnictwo. Elementy nośne o przekrojach otwartych oraz zamkniętych stosowane są do wytwarzania m. in. łopat śmigłowców, kadłuba, czy też podwozia [1]. Wiele z nich wykonywane jest z materiałów kompozytowych, a w znacznej mierze z laminatu polimerowego wzmacnianego ciągłymi włóknami węglowymi (CFRP). Charakteryzuje się on korzystnym stosunkiem masy do wytrzymałości, a ponadto wysoką wytrzymałością zmęczeniową, odpornością chemiczną oraz korozyjną [2].

Cienkościenne elementy nośne w trakcie eksploatacji powinny być wykorzystywane w zakresie statecznym [3, 4]. Działanie obciążenia ściskającego może doprowadzić bowiem do wyboczenia konstrukcji [5], a co za tym idzie do pracy konstrukcji w zakresie pokrytycznym oraz przyspieszonego zniszczenia. Jak pokazują dotychczasowe badania [6, 7], podczas stabilnej pracy, konstrukcje te posiadają dużą rezerwę nośności, o ile wyboczenie ma charakter sprężysty, a pokrytyczna ścieżka równowagi zachowuje charakter stateczny. Determinuje to konieczność badania w pełnym zakresie obciążenia, aż do zniszczenia konstrukcji [8] oraz opis zjawiska inicjacji i ewolucji zniszczenia.

Progresywna analiza zniszczenia (PFA) stosowana jest w analizach numerycznych w celu obserwacji zjawisk inicjacji i ewolucji zniszczenia konstrukcji kompozytowych. Do opisu zjawiska delaminacji stosowany

jest zazwyczaj model stref kohezyjnych (CZM), jednak często tylko w wybranych obszarach konstrukcji.

Niniejsza praca poświęcona jest analizie numerycznej z globalnym zastosowaniem obydwu zaawansowanych metod numerycznych jednocześnie (PFA oraz CZM). Ponadto większość dotychczasowych prac poświęcona jest analizie konstrukcji o przekrojach otwartych, podczas gdy w prezentowanych badaniach skupiono się na przekrojach kwadratowych.

2. Przedmiot i zakres pracy

Niniejsza praca obejmuje wyłącznie analizę numeryczną stateczności, inicjacji uszkodzenia, ewolucji uszkodzenia, delaminacji oraz nośności cienkościennych struktur kompozytowych o przekroju kwadratowym. W przyszłości planowane są badania eksperymentalne w celu walidacji uzyskanych wyników.

Przedmiotem badań były cienkościenne słupy kompozytowe o przekroju zamkniętym w kształcie kwadratu wykonane w dwóch różnych układach warstw.

3. Opis badanego układu i metodologia badań

Badane słupy posiadały przekrój kwadratowy o wymiarach 40 x 40 mm oraz wysokość 250 mm. Uwzględniono zaokrąglenie naroża o promieniu równym 0,5 mm. Słupy wykonane były z 4 warstw laminatu CFRP, każda o grubości 0,1 mm. Przeprowadzono analizy dwóch różnych układów warstw: P1 – [90/0/0/90] oraz P2 – [45/0/0/45].

Analizy numeryczne przeprowadzone zostały w programie Abaqus z wykorzystaniem metody elementów

skończonych (MES). Słupy kompozytowe ściskane były za pomocą nieodkształcalnych płyt umieszczonych na obydwu końcach, w celu lepszego odwzorowania rzeczywistego ściskania elementu na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej. Analizy prowadzono w pełnym zakresie obciążenia, aż do utraty nośności. W badaniach wykorzystano progresywną analizę zniszczenia (PFA) oraz model stref kohezyjnych (CZM) w celu obserwacji zjawisk inicjacji oraz ewolucji zniszczenia, a także delaminacji.

4. Modelowanie numeryczne i symulacja

W celu wykonania symulacji przygotowano modele słupów kompozytowych w dwóch układach warstw. Do każdego z modeli przytwierdzono dwie nieodkształcalne płyty, jedną u dołu, a drugą u góry. Dolna z płyt została całkowicie utwierdzona, górnej zaś pozostawiono możliwość przemieszczania się wzdłuż wysokości kompozytowego słupa. Do górnej płyty przyłożono również obciążenie ściskające badaną próbkę. Następnie dokonano dyskretyzacji modelu.

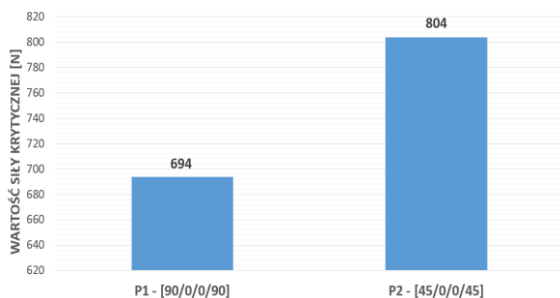
W badanych słupach zastosowano materiał CFRP. Przyjęto wartości właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych zbliżone do odnalezionych w literaturze [9].

Symulacje prowadzone były w dwóch etapach. Początkowo rozwiązano zagadnienie własne w celu analizy wyboczenia próbki. Następnie dokonano analizy w pełnym zakresie obciążenia na wstępnie wyboczonej elemencie.

5. Wyniki symulacji i ich analiza

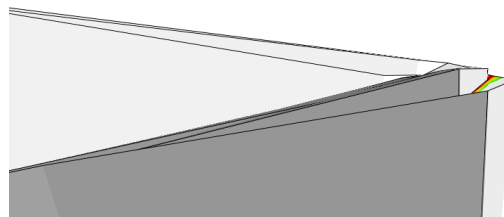
Wyniki przeprowadzonych symulacji wykazały znaczące różnice w zależności od zastosowanego układu warstw kompozytu. Widoczne są one zarówno w obszarach występowania zjawiska jak i w wartości siły przy osiągnięciu stanów granicznych przez próbki.

Analiza zjawiska wyboczenia wykazała znaczące różnice w ilości oraz ułożeniu półfal dla poszczególnych układów warstw. Dla konfiguracji P1 wystąpiło aż 9 półfal na każdej ze ścian słupa. Były one ułożone poziomo oraz symetrycznie względem płaszczyzny poziomej przechodzącej przez środek słupa oraz płaszczyzn pionowych przechodzących przez środki przeciwległych boków przekroju poprzecznego. W konfiguracji P2 zaobserwowano po 5 półfal na dwóch ścianach oraz po 7 półfal na pozostałych dwóch ścianach. Półfale ułożone były pod kątem 45 stopni. Przeprowadzone badania wykazały znaczącą różnicę w wartości siły krytycznej dla badanych układów warstw (rys. 2). Uzyskana siła krytyczna dla kompozycji P2 (804 N) była o ponad 15% wyższa niż dla P1 (694 N).



Rys. 2. Wykres wartości sił krytycznych

Zastosowanie modelu stref kohezyjnych pozwoliło na obserwację zjawiska delaminacji. Poniższa ilustracja (rys. 3) przedstawia delaminację naroża elementu wykonanego w konfiguracji P1.



Rys. 3. Delaminacja naroża elementu w konfiguracji P1

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania są wyłącznie wstępem do analizy stateczności i nośności cienkościennych struktur kompozytowych o przekrojach zamkniętych. Pozwoliły one jednak na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) w przypadku konstrukcji cienkościennych o przekroju kwadratowym układ warstw kompozytu ma znaczący wpływ na stateczność oraz nośność konstrukcji,
- 2) liniowa analiza metodą elementów skończonych pozwala na badanie stanów krytycznych konstrukcji kompozytowych o przekrojach zamkniętych,
- 3) zastosowanie modelu stref kohezyjnych pozwala na obserwację zjawiska delaminacji kompozytów.

Główne elementy nowatorskie w niniejszej pracy to jednocześnie zastosowanie progresywnej analizy zniszczenia oraz modelu stref kohezyjnych globalnie, dla całego badanego elementu oraz przeprowadzenie z ich wykorzystaniem analizy profili o przekrojach zamkniętych.

Badania zostały sfinansowane w ramach projektu z Narodowego Centrum Nauki o numerze 2021/41/B/ST8/00148.

Literatura

- [1] Freeman W.T., *The use of composites in aircraft primary structure*, Compos. Part B – Eng. 3, 1993, 767-775.
- [2] Chung D.D.L., *Carbon Fiber Composites*, Butterworth-Heinemann, Boston, 1994.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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.; Wysmulski, 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.
- [9] Różyło P.; Dębski H.; Wysmulski P.; Falkowicz K., *Numerical and experimental failure analysis of thin-walled composite columns with a top-hat cross section under axial compression*, Composite Structures, 204, pp. 207-216, 2019.