

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TK12022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Badania wpływu nieosiowości obciążenia ściskającego na stateczność i nośność cienkościennych profili kompozytowych

Hubert Dębski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
email: h.debski@pollub.pl

**STRESZCZENIE:** W pracy prowadzono badania eksperymentalne ściskania cienkościennych profili kompozytowych o otwartych kształtach przekroju poprzecznego, charakteryzujących się symetrycznym układem warstw laminatu. Głównym celem badań było określenie wpływu nieosiowości obciążenia ściskającego na stateczność oraz nośność badanych profili. Badano wpływ układu warstw laminatu oraz kształtu przekroju poprzecznego profilu na wartość obciążenia krytycznego, pokrywającą ścieżkę równowagi oraz siłę niszczącą ściskanych konstrukcji. Badania eksperymentalne prowadzono na próbkach stanowiących krótkie słupy wykonane z kompozytu CFRP z wykorzystaniem techniki autoklawowej. Konstrukcje ściskano aż do całkowitej utraty nośności słupa, rejestrując parametry próby, umożliwiające opracowanie pokrywających ścieżek równowagi w pełnym zakresie obciążenia. Do oceny momentu inicjacji uszkodzenia materiału kompozytowego wykorzystano metodę emisji akustycznej. Zastosowana procedura badawcza umożliwiła przeprowadzenie opisu zagadnienia nieliniowej stateczności oraz nośności ściskanych konstrukcji.

**SŁOWA KLUCZOWE:** profile cienkościenne, laminaty, wyboczenie, zniszczenie kompozytów

#### 1. Wprowadzenie

Konstrukcyjnymi elementami nośnymi współczesnych cienkościennych struktur lotniczych, czy motoryzacyjnych są cienkościenne profile o zróżnicowanych kształtach przekroju poprzecznego. Elementy te pełnią funkcję usztywnienia cienkiego pokrycia konstrukcji, przenosząc zazwyczaj obciążenie osiowe oraz zginanie. W najnowszych rozwiązaniach konstrukcyjnych cienkościenne profile usztywniające wykonywane są z nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych – kompozytów.

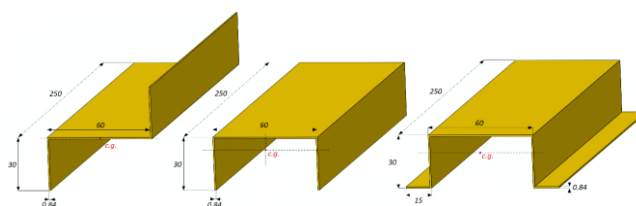
Projektowanie cienkościennych profili nośnych wiąże się z koniecznością uwzględnienia zagadnień stateczności tych elementów, które w wielu przypadkach stanowią zagadnienie wymiarujące w eksploatacji konstrukcji cienkościennych. W przypadku tych elementów konstrukcyjnych utrata stateczności może prowadzić do przedwczesnego, nieprzewidzianego na etapie projektowania zniszczenia konstrukcji [1]. Jednakże, jak wykazują dotychczasowe badania [2], utrata stateczności profili cienkościennych nie wyczerpuje nośności tych elementów, które są zdolne do dalszego przenoszenia obciążenia w stanie pokrywającym. Elementy te posiadają wysoki zapas nośności, począwszy od momentu wyboczenia, do całkowitego zniszczenia struktury kompozytu [3] w przypadku, gdy pokrywająca charakterystyka konstrukcji jest stateczna, a utrata stateczności miała charakter sprężysty.

Powyższe zagadnienia są ściśle związane z prognozowaniem i analizą uszkodzenia struktury materiału kompozytowego, stwarzając potrzebę identyfikacji poziomów obciążenia, przy których następuje

inicjacja uszkodzenia materiału kompozytowego, a także obciążenia niszczącego, przy którym następuje całkowita utrata nośności konstrukcji [4, 5].

#### 2. Metodyka badań

Badania prowadzono na krótkich cienkościennych słupach kompozytowych wytworzonych z kompozytu CFRP. Badane profile kompozytowe wytwarzano w trzech kształtach przekroju poprzecznego: profile o przekroju zetowym, ceowym oraz omegowym – rys. 1.

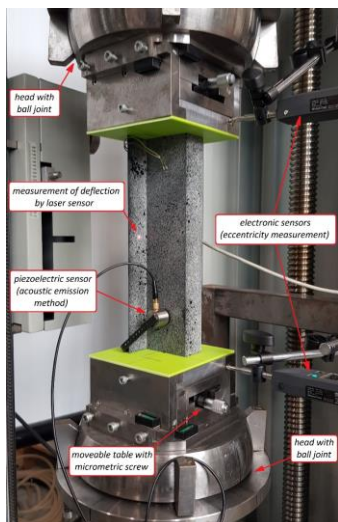


Rys. 1. Badane profile cienkościenne

Badane profile poddawano nieosiowemu ściskaniu w pełnym zakresie obciążenia – do zniszczenia. Nieosiowość obciążenia ściskającego realizowano w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, odcierając wartość mimośrodowość obciążenia od środka ciężkości przekroju poprzecznego słupa w kierunku  $e_1$  – równoległym do średnicy profilu oraz kierunku  $e_2$  – prostopadłym do średnicy profilu.

Badania eksperymentalne realizowano w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej typu ZWICK 100 – rys. 2. Nieosiowość obciążenia ściskającego realizowano za pomocą specjalnie

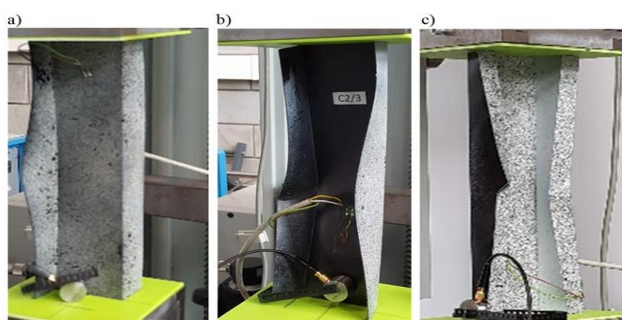
zaprojektowanych stołów, napędzanych śrubą mikrometryczną. W trakcie badań rejestrowano przebieg siły obciążającej w czasie oraz skrócenie słupa.



Rys. 2. Stanowisko do badań eksperymentalnych

### 3. Wyniki badań

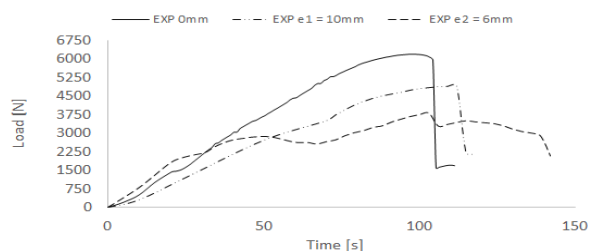
Ze względu na krótką długość badanych słupów, obserwowana utrata stateczności ściskanych konstrukcji miała charakter lokalnego wyboczenia środników i ścian poszczególnych profili, charakteryzujących się powstawaniem różnej ilości półfal na kierunku wzdłużnym słupa. Ze względu na stateczny charakter pokrytycznych ścieżek równowagi ściskane słupy były w stanie przenosić obciążenie ściskające, pomimo ich wyboczenia, jak również obserwowanej inicjacji uszkodzenia materiału kompozytowego. Moment inicjacji uszkodzenia materiału kompozytowego nie wyczerpywał nośności konstrukcji rzeczywistej, potwierdzając tym samym znaczny zapas nośności konstrukcji kompozytowej. Dalsze obciążanie konstrukcji prowadziło w efekcie do jej zniszczenia, które następowało zazwyczaj w sposób gwałtowny na skutek kruchej pęknięcia materiału, prowadzącego do całkowitej utraty nośności słupa – rys. 3.



Rys. 3. Formy zniszczenia ściskanych konstrukcji kompozytowych

W prowadzonych badaniach stwierdzono, że utrata nośności poszczególnych słupów kompozytowych ma charakter lokalnego uszkodzenia struktury kompozytu, występującego na ściankach profilu lub w pobliżu przekrojów końcowych słupa. Graficzną reprezentację wyników badań stanowią opracowane na podstawie

rejestracji maszyny wytrzymałościowej pokrytyczne ścieżki pracy *siła – czas*, stanowiące charakterystykę konstrukcji w pełnym zakresie obciążenia. Przykładowe charakterystyki pracy dla słupa o przekroju zetowym przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Pokrytyczne ścieżki pracy słupa o przekroju zetowym

Poddając analizie wyznaczone charakterystyki I wartości obciążeń niszczących można zauważyć, że najwyższe wartości tych obciążeń występują w przypadku ściskania osiowego – charakterystyki te cechują się jednocześnie najkrótszą długością, co oznacza, że ściskane słupy zachowują dużą sztywność w całym zakresie obciążenia. Realizacja mimośrodowego obciążenia ściskającego w kierunkach  $e_1$  i  $e_2$  powodowała – w przypadku słupów o przekroju zetowym – spadek wartości obciążenia niszczącego. Otrzymywane wyniki różniły się w zależności od kształtu profilu oraz konfiguracji warstw laminatu, charakteryzujących się różną sztywnością konstrukcji.

### 4. Podsumowanie

Otrzymane wyniki badań wykazały, że występowanie nieosiowości obciążenia ściskającego w kierunku równoległym do środnika ściskanych profili wpływa niekorzystnie zarówno na utratę stateczności, jak również utratę nośności konstrukcji. Natomiast występowanie nieosiowości obciążenia ściskającego w kierunku prostopadłym do środnika badanych profili może w niektórych przypadkach mieć korzystne skutki, prowadząc do wzrostu wartości obciążeń krytycznych oraz niszczących (słupy o przekroju ceowym). Takie przypadki prowadzą do zwiększenia odporności konstrukcji na utratę stateczności oraz nośności.

*The research was conducted under project No. UMO-2021/41/B/ST8/00148, financed by the National Science Centre, Poland.*

### Literature

- [1] Bazant, Z.P. and Cedolin, L. Stability of Structures. Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories. Oxford University Press, UK, 2010.
- [2] Debski 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 2016;136:593-601.
- [3] Rozylo P., Debski H., Wyslowski P., Falkowicz K. Numerical and experimental failure analysis of thin-walled composite columns with a top-hat cross section under axial compression. Composite Structures 2018;204:207-216.
- [4] Turvey GJ, Zhang Y. A computational and experimental analysis of the buckling, postbuckling and initial failure of pultruded GRP columns. Composite Structures 2006;84:1527-37.
- [5] Talreja R, Singh CV. Damage and failure of composite. Cambridge University Press, 2012.