

## Analiza stanów krytycznych i pokrytycznych ściskanych słupów kompozytowych

Paweł Wysmulski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, Politechnika Lubelska  
email: p.wysmulski@pollub.pl

**STRESZCZENIE:** Przedmiotem badań jest cienkościenny ceowy słupek, wykonany z kompozytu węglowo-epoksydowego, poddany osiowemu ściskaniu. Zakres badań obejmował analizę stanu krytycznego i słabo pokrytycznego metodami doświadczalnymi i numerycznymi. W wyniku badań prowadzonych na fizycznym modelu konstrukcji wyznaczono pokrytyczną ścieżkę równowagi, na podstawie której z wykorzystaniem metod aproksymacyjnych określono wartość obciążenia krytycznego. Równolegle prowadzono obliczenia numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Zakres obliczeń obejmował liniową analizę zagadnienia własnego, w wyniku której określono wartość obciążenia krytycznego dla modelu numerycznego konstrukcji. Drugi etap obliczeń obejmował nieliniową analizę stanu słabo pokrytycznego, dla konstrukcji z zainicjowaną imperfekcją geometryczną, odpowiadającą najniższej postaci wybożenia konstrukcji. Wyniki obliczeń numerycznych porównano z wynikami badań doświadczalnych, potwierdzając adekwatność opracowanego modelu numerycznego konstrukcji. Zastosowanym narzędziem numerycznym był program ABAQUS®.

**SŁOWA KLUCZOWE:** metoda elementów skończonych, stateczność konstrukcji, kompozyty, obciążenie krytyczne, konstrukcje cienkościenne

### 1. Wstęp

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. Wadą tego typu konstrukcji jest możliwość utraty stateczności nawet w warunkach obciążeń eksploatacyjnych. W przypadku, gdy wybożenie elementu cienkościennego ma charakter lokalny oraz sprężysty, nie prowadzi to do zniszczenia konstrukcji, a element konstrukcyjny może bezpiecznie pracować w stanie pokrytycznym. W związku z powyższym znajomość wartości obciążenia krytycznego, przy którym następuje utrata stateczności konstrukcji cienkościennej, należy do zagadnień o pierwszorzędym znaczeniu w warunkach eksploatacyjnych. Niestety metody wyznaczania wartości obciążenia krytycznego nie są jednoznaczne, co dodatkowo komplikuje proces racjonalnego projektowania tego typu ustrojów. W takich przypadkach alternatywnym narzędziem, umożliwiającym wyznaczenie wartości obciążenia krytycznego są analizy numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych [2, 3, 5]. Taka procedura umożliwia opracowanie adekwatnych modeli dyskretnych, pozwalających analizować złożone zagadnienia utraty stateczności oraz pracy konstrukcji cienkościennych w zakresie pokrytycznym [1, 4].

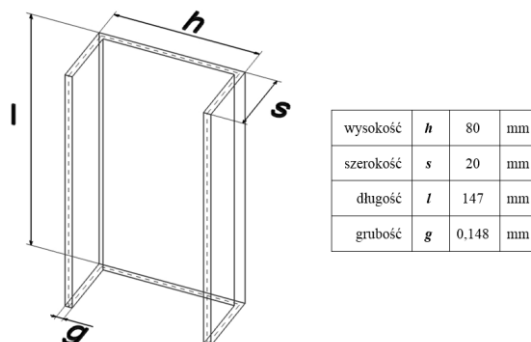
W nowoczesnych konstrukcjach cienkościennych, dotyczących zaawansowanych technologicznie konstrukcji m.in. lotniczych czy motoryzacyjnych, tradycyjne materiały inżynierskie (metale) są zastępowane nowoczesnymi materiałami kompozytowymi. Materiały te cechuje przede wszystkim wysoka wytrzymałość w stosunku do ciężaru własnego, co decyduje o ich zastosowaniu w strukturach nośnych. Dodatkową zaletą materiałów kompozytowych jest możliwość kształtowania ich właściwości mechanicznych, poprzez określony dobór cech materiałowych oraz zastosowanie odpowiedniej konfiguracji ułożenia warstw laminatu.

Przedmiotem badań w niniejszej pracy jest analiza stanu krytycznego oraz zachowania w stanie słabo pokrytycznym

ściskanego osiowo słupa ceowego, wykonanego z kompozytu węglowo-epoksydowego. Badania obejmują wyznaczenie wartości obciążenia krytycznego konstrukcji rzeczywistej, oraz analizy stanu krytycznego i pokrytycznego z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Przeprowadzone badania pokazują metodykę postępowania, prowadzącą do rozwiązania zagadnienia wybożenia oraz nieliniowej stateczności cienkościennych elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiałów kompozytowych.

### 2. Przedmiot badań

Przedmiot badań stanowił cienkościenny słupek ceowy, poddany próbie osiowego ściskania. Analizowana konstrukcja stanowiła typową strukturę cienkościenną, składającą się z prostokątnych ścian, stanowiących płaskie elementy płytowe, połączone na dłuższych krawędziach [1]. Struktura kompozytu złożona była z 8 warstw w symetrycznym układzie względem płaszczyzny środkowej o konfiguracji [0/90/0/90]<sub>s</sub>. Wymiary gabarytowe profilu ceowego  $h \times s$ , grubość ścian  $g$  oraz długość profilu  $l$  przedstawiono na rysunku (rys.1).



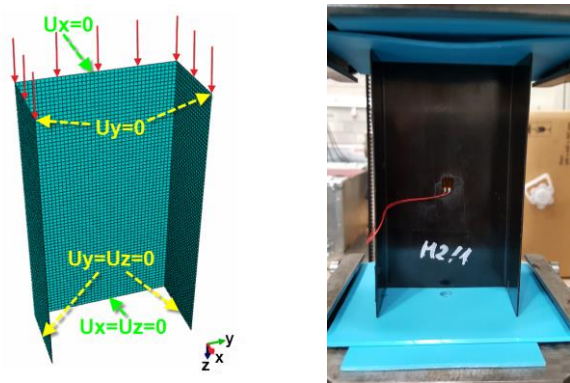
Rys. 1. Model geometryczny słupa o przekroju ceowym wraz z wymiarami

Dla wytworzonego materiału kompozytowego wyznaczono eksperymentalnie podstawowe właściwości mechaniczne wg normy ISO, przedmiotowej w tym zakresie. Określone doświadczalnie właściwości mechaniczne kompozytu węglowo-epoksydowego umożliwiają definicję

modelu materiału o właściwościach ortotropowych w płaskim stanie naprężenia: moduł Younga  $E_1$  w płaszczyźnie  $0^\circ$ : 130,71 [GPa],  $E_2$  w  $90^\circ$ : 6,36 [GPa], liczba Poissona  $\nu_{12}$ : 0,32, moduł Kirchhoffa  $G_{12}$  w płaszczyznach  $\pm 45^\circ$ : 4,18 [GPa].

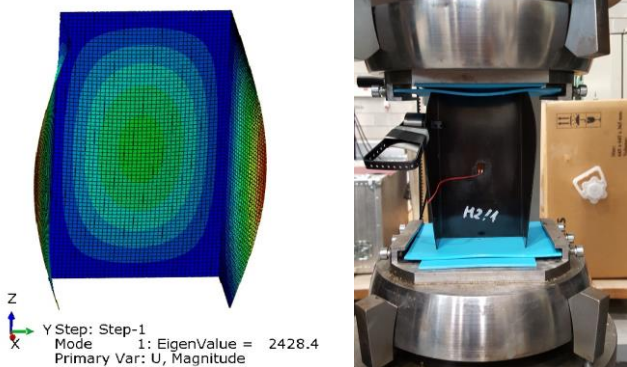
### 3. Metodyka badań

Prowadzone badania dotyczyły analizy stanu krytycznego oraz słabo pokrytycznego ściskanej cienkościenniej konstrukcji kompozytowej metodami eksperymentalnymi i numerycznymi – rys.2.



Rys. 2. Próbką badawczą z nadanymi warunkami brzegowymi: a) model dyskretny, b) rzeczywisty słupek

Badania eksperymentalne na wytworzonych cienkościennych słupkach kompozytowych umożliwiły obserwację rzeczywistego zachowania się konstrukcji w stanie krytycznym oraz jej pracy po utracie stateczności. Prowadzone równoległe symulacje numeryczne miały na celu opracowanie adekwatnych modeli MES zweryfikowanych doświadczalnie, umożliwiających modelowanie zagadnienia stateczności (stanu krytycznego) kompozytowych konstrukcji cienkościennych, w wierny sposób odwzorowujących zachowanie konstrukcji rzeczywistej – rys.3.

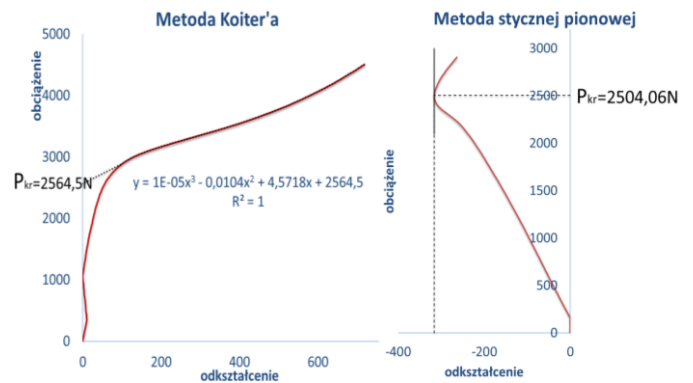


Rys. 3. Najniższa postać wybożenia słupa: a) analiza numeryczna, b) badania doświadczalne

### 4. Wyniki badań

Otrzymane wyniki badań umożliwiają dokonanie jakościowej i ilościowej analizy stanu dokrytycznego oraz krytycznego w oparciu o zarejestrowane parametry próby. Identyfikację stanu krytycznego przeprowadzono na podstawie uzyskanej postaci wybożenia oraz odpowiadającej jej wartości obciążenia krytycznego. Wyznaczone w sposób doświadczalny wartości krytyczne (rys.1)

stanowiły podstawę weryfikacji wyników obliczeń numerycznych MES.



Rys. 4. Doświadczalne wyznaczenie siły krytycznej: a) metoda Koiter'a, b) metoda stycznej pionowej

Otrzymane siły krytyczne, przy których zachodzi zjawisko wybożenia ceownika, charakteryzują się wysokim poziomem zbieżności. Maksymalne różnice nie przekraczają 5,3% (tab. 1) i zapewniają one wysoką zgodność ilościową zastosowanych metod badawczych, potwierdzając jednocześnie poprawność zaproponowanej procedury określania wartości obciążenia krytycznego konstrukcji rzeczywistej.

Tabela 1. Wartości obciążenia krytycznego

MES [N]	Metoda Koiter'a [N]	Różnica Koiter/MES [%]	Metoda stycznej pionowej [N]	Różnica stycznej pionowej/MES [%]
2428,4	2564,5	5,3	2504,6	3

### 5. Podsumowanie

Prowadzone badania wykazały wysoką jakościową oraz ilościową zgodność wyników badań eksperymentalnych z wynikami obliczeń numerycznych. Dotyczy to zarówno postaci utraty stateczności konstrukcji, wartości obciążenia krytycznego, jak również pokrytycznych ścieżek równowagi w zakresie słabo pokrytycznym. Otrzymane wyniki dostarczają zatem istotnych informacji, dotyczących techniki modelowania cienkościennych struktur wykonanych z materiałów kompozytowych, potwierdzając jednocześnie adekwatność opracowanych modeli numerycznych, zarówno w obliczeniach zagadnienia własnego, jak i nieliniowej analizie statycznej w zakresie pokrytycznym.

### Literatura

- [1] Bloom F, Coffin D. Handbook of thin plate buckling and postbuckling. CHAPMAN & HALL/CRC Boca Raton, London, New York, Washington, D.C. 2001.
- [2] Debski H, Sadowski T. Modelling of microcracks initiation and evolution along interfaces of the WC/Co composite by the finite element method. Computational Materials Science 2014; 83: 403–411.
- [3] Debski H, Teter A, Kubiak T. Numerical and experimental studies of compressed composite columns. Composite Structures 2014; 118: 28–36.
- [4] Falkowicz K, Ferdynus M, Debski H. Numerical analysis of compressed plates with a cut-out operating in the geometrically nonlinear range. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2015; 17(12): 222–227.
- [5] Kolakowski Z, Mania RJ. Semi-analytical method versus the FEM for analyzing of the local post-buckling of thin-walled composite structures. Composite Structures 2013; 97: 99–106.