

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Czułość ściskanych słupów kompozytowych na nieosiowość przyłożenia obciążenia

Paweł Wysmulski

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki
Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska
email: p.wysmulski@pollub.pl

STRESZCZENIE: Przedmiotem badań były krótkie, cienkościenne słupy o przekroju ceowym wykonane z laminatu węglowo-epoksydowego. zbudowane z 8 warstw laminatu o konfiguracji symetrycznej względem płaszczyzny środkowej. Badane słupy poddano obciążeniu ściskającemu z uwzględnieniem nieosiowości siły ściskającej względem środka ciężkości przekroju poprzecznego słupa. Do badań przyjęto warunki brzegowe odpowiadające swobodnemu przegubowemu podparciu przekrojów końcowych ceownika. Zakres badań obejmował analizę wpływu wartości mimośrodu obciążenia na postać wybożenia, wartość siły bifurkacyjnej (konstrukcja idealna) oraz obciążenie krytyczne (konstrukcja z imperfekcjami wstępnymi). Wartość obciążenia krytycznego konstrukcji rzeczywistej wyznaczono z wykorzystaniem metod aproksymacyjnych na podstawie wyznaczonych eksperymentalnie pokrytycznych ścieżek równowagi konstrukcji. Równolegle prowadzono analizę numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych w programie Abaqus®. W pierwszym etapie analiza numeryczna obejmowała rozwiązanie zagadnienia własnego konstrukcji, prowadzącego do określenia formy utraty stateczności konstrukcji i wyznaczenia odpowiadającej jej wartości obciążenia bifurkacyjnego dla konstrukcji poddanej osiowemu i mimośrodowemu ściskaniu. Drugi etap badań polegał na analizie stanu nieliniowego konstrukcji z ugięciami wstępnymi. Na podstawie numerycznych pokrytycznych ścieżek równowagi konstrukcji wyznaczano obciążenie krytyczne konstrukcji przy zastosowaniu metody aproksymacji. Otrzymane wyniki badań doświadczalnych umożliwiły przeprowadzenie bieżącej walidacji opracowanych modeli numerycznych. Przeprowadzona analiza umożliwiła określenie wpływu wartości nieosiowości obciążenia ściskającego na postać wybożenia i wartość obciążenia krytycznego.

SŁOWA KLUCZOWE: wybożenie, stan krytyczny, nieosiowość obciążenia, konstrukcje cienkościenne, laminaty, MES

1. Wstęp

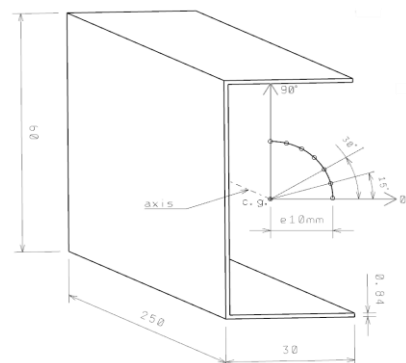
Znajomość wartości obciążenia krytycznego jest niezwykle istotna w procesie projektowania konstrukcji cienkościennych, w celu zabezpieczenia konstrukcji przed zjawiskiem utraty stateczności w zakresie obciążeń eksploatacyjnych. Określenie wartości obciążenia krytycznego konstrukcji rzeczywistej (nie idealnej) jest zagadnieniem skomplikowanym, ze względu na fakt, że doświadczalne metody wyznaczania obciążenia krytycznego nie są jednoznaczne, co w znacznym stopniu utrudnia projektowanie tego typu ustrojów. Do wyznaczenia wartości obciążenia krytycznego badacze sięgają po metody aproksymacyjne, pozwalające w sposób przybliżony wyznaczyć wartość siły krytycznej, na podstawie pokrytycznej ścieżki równowagi konstrukcji, stanowiącej zazwyczaj charakterystykę obciążenie – przemieszczenie na kierunku prostopadłym do ścian profilu. Wartość tego obciążenia uzależniona jest również od wielkości imperfekcji geometrycznych, wynikających zazwyczaj z niedokładności wykonania konstrukcji rzeczywistej, której ściany nie są idealnie płaskie w odróżnieniu od konstrukcji idealnej.

Kolejnym ważnym aspektem podczas projektowania konstrukcji cienkościennych jest uwzględnienie rzeczywistych warunków obciążeń eksploatacyjnych, które w większości przypadków odbiegają od wyidealizowanych warunków teoretycznych. Praca konstrukcji ściskanej

nieosiowo w zasadniczy sposób różni się od warunków idealnego ściskania osiowego. Nieosiowość obciążenia może w takich przypadkach prowadzić do przedwczesnej utraty stateczności, jeszcze w zakresie obciążeń eksploatacyjnych. Przedwczesne wprowadzenie konstrukcji cienkościennej w stan powybożeniowy może i doprowadzić do przyspieszonego zniszczenia elementów nośnych struktury.

2. Obiekt badań

Obiektem badań były krótkie, cienkościenne słupy o ceowym przekroju poprzecznym, poddane próbie osiowego i nieosiowego ściskania.

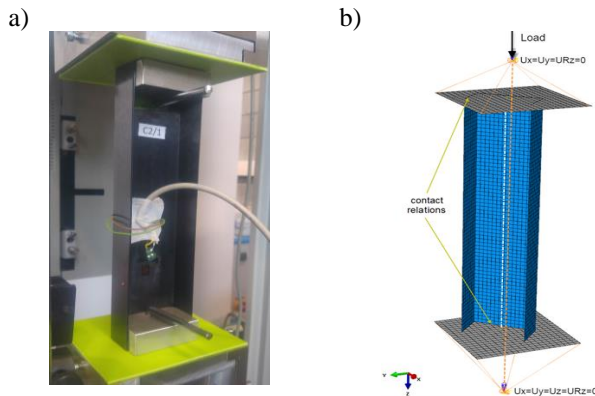


Rys. 1. Model geometryczny analizowanego słupa

Nieosiowość obciążenia realizowano poprzez przesunięcie punktu przyłożenia siły ze środka ciężkości przekroju poprzecznego profilu ceowego w kierunku osi 0° o wartość $e=10$ mm, a następnie obracano słup w zakresie $0^\circ < e=10 \text{ mm} < 90^\circ$ krokowo co 15° względem jego osi – rys. 1. Właściwości mechaniczne materiału pojedynczej warstwy: moduł Young’a w kierunku włókien $E_1 = 143,5$ GPa, moduł Young’a prostopadle do kierunku włókien $E_2 = 5,83$ GPa, liczba Poissona w płaszczyźnie warstwy $\nu_{12} = 0,36$ oraz moduł Kirchhoffa $G_{12} = 3,85$ GPa.

3. Metodyka badań

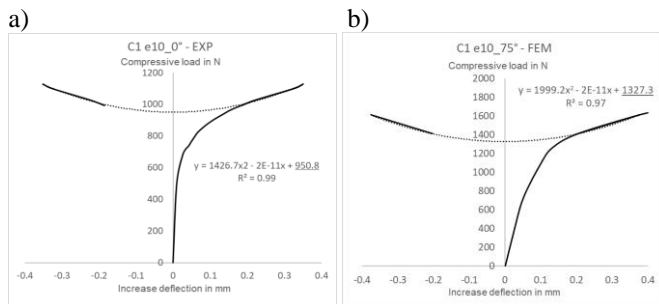
Prowadzone badania dotyczyły analizy stanu krytycznego i słabo pokrytycznego ściskanej osiowo i nieosiowo cienkościennej konstrukcji kompozytowej metodami eksperymentalnymi (rys. 2a) oraz numerycznymi (rys. 2b). Celem prowadzonych badań była analiza stanu krytycznego konstrukcji oraz wyznaczenie charakterystyk pokrytycznych opisujących zależność siła ściskająca – przemieszczenie mierzone w kierunku prostopadłym do ściany profilu w zakresie słabo pokrytycznym. Przeprowadzone badania umożliwiły ocenę wpływu mimośrodowość obciążenia ściskającego na stateczność badanych słupów o przekroju ceowym.



Rys. 2. Metodyka badań: a) stanowisko eksperymentalne, b) model numeryczny

4. Wyniki badań

Wartości obciążenia krytycznego konstrukcji z ugięciami wstępными wyznaczone zostały na podstawie określonych doświadczalnie i numerycznie pokrytycznych ścieżek równowagi w postaci *siła-przemieszczenie*. Wybrane charakterystyki aproksymacyjne dla prób doświadczalnych zaprezentowano na rys. 3.



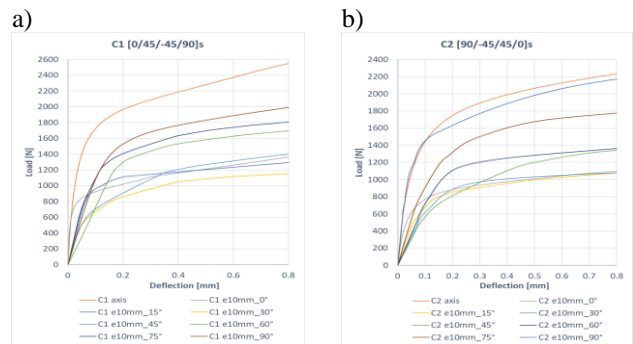
Rys. 3. Wyznaczona wartości obciążenia krytycznego: a) eksperyment C1 e10_0°, b) MES C1 e10_75°

Doświadczalne i numeryczne aproksymacyjne wartości obciążeń krytycznych konstrukcji z ugięciami wstępными wykazują wysoką zbieżność – tab. 1. Należy zauważyć, że doświadczalne siły krytyczne stanowią dolne oszacowanie obciążenia krytycznego względem obciążenia uzyskanego z MES, co wynika z bardziej wyidealizowanego charakteru modelu numerycznego w stosunku do konstrukcji rzeczywistej.

Tabela. 1. Zestawienie wartości obciążeń krytycznych [N]

	Axis	e10_0°	e10_15°	e10_30°	e10_45°	e10_60°	e10_75°	e10_90°
C1_FEM		2141	954	964	986	1057	1198	1327
C1_EXP		2123	951	-	-	-	-	1649
Diference		0.84%	0.31%	-	-	-	-	0.96%
C2_FEM		2145	912	871	934	979	1095	1301
C2_EXP		2126	887	-	-	-	-	1576
Diference		0.89%	2.74%	-	-	-	-	2.17%

Analizę stanu pokrytycznego przeprowadzono na podstawie porównania doświadczalnych oraz numerycznych pokrytycznych ścieżek równowagi konstrukcji. Otrzymane przebiegi posiadają zbliżony, stateczny charakter pracy, co potwierdza zdolność konstrukcji do dalszego przenoszenia obciążenia w zakresie pokrytycznym. Otrzymane wyniki wykazują tendencję zmniejszania się sztywności pokrytycznych charakterystyk konstrukcji słupów C1 i C2, spowodowaną wprowadzeniem mimośrodowość obciążenia – rys. 4.



Rys. 4. Wpływ nieosiowości obciążenia na stan słabo pokrytyczny konstrukcji: a) C1, b) C2

5. Podsumowanie

Otrzymane wyniki badań umożliwiły przeprowadzenie jakościowej i ilościowej oceny wpływu mimośrodowość obciążenia na wartość obciążenia krytycznego oraz pokrytyczne ścieżki równowagi konstrukcji. W badanych przypadkach zaobserwowano wyraźny wpływ wartości mimośrodowość obciążenia na wartość siły krytycznej poszczególnych słupów. Dla słupa C1 stwierdzono znaczący spadek wartości siły bifurkacyjnej w przypadku mimośrodowość e10mm_0° wynoszący 55% w porównaniu do przypadku ściskania osiowego. Natomiast w przypadku słupa C2 wpływ nieosiowości przyłożenia obciążenia ściskającego był jeszcze większy – maksymalny spadek wartości siły bifurkacyjnej wyniósł 57% dla wartości mimośrodowość oznaczonej jako C2 e10mm_15°. Oznacza to, że występowanie nieosiowości obciążenia ściskającego w badanych przypadkach może doprowadzić do przedwczesnej utraty stateczności konstrukcji i znacząco osłabić możliwość dalszego przenoszenia przez nią obciążenia.