

Eksperymentalno-numeryczne badania stateczności kompozytowych słupów o przekroju otwartym poddanych osiowemu ściskaniu

Patryk Różyło¹

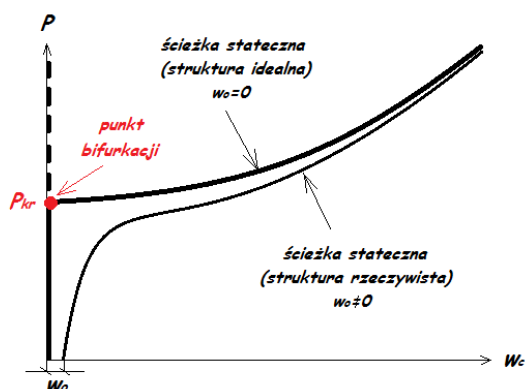
¹Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, Politechnika Lubelska
email: p.rozylo@pollub.pl

STRESZCZENIE: Przedmiotem badań była krótka, cienkościenna struktura, o omegowym przekroju poprzecznym, wykonana z wielowarstwowego laminatu. Cały profil badawczy poddano równomiernemu ściskaniu. W szczegółowych analizach wyznaczono siły krytyczne oraz pokrytyczne ścieżki równowagi. Założono, że słupy są przegubowo podparte na wszystkich krawędziach tworzących ich końce. Badania numeryczne wykonywano metodą elementów skończonych. Rozwiązano zagadnienie własne w odniesieniu do kryterium minimum energii potencjalnej układu oraz nieliniowy problem stateczności konstrukcji. W obliczeniach numerycznych stosowano komercyjny program do skomplikowanych analiz wytrzymałościowych ABAQUS®. Wyniki badań numerycznych zostały następnie zwalidowane drogą doświadczalną w ramach badań wytrzymałościowych na uniwersalnej maszynie. W prezentowanych przypadkach przyjęto, że materiał jest liniowo-sprężysty, a nieliniowość modelu wynika ze stosunkowo dużych przemieszczeń.

SŁOWA KLUCZOWE: stan krytyczny, metoda elementów skończonych, kompozytowe struktury cienkościenne, utrata stateczności.

1. Wprowadzenie

Płytowe struktury cienkościenne stanowią grupę ustrojów nośnych, które charakteryzuje wysoka wytrzymałość oraz sztywność przy niskiej masie własnej. Elementy te często są narażone na występowanie zjawiska utraty stateczności. Pomimo tego możliwa jest dalsza praca struktur nawet po osiągnięciu wyoboczenia, gdyż pokrytyczna ścieżka równowagi jest stateczna i przyrostowi ugięcia ścianek towarzyszy przyrost obciążenia ściskającego (rys. 1, [5]). W odniesieniu do poniższego rysunku (rys. 1) na osi pionowej zaznaczono siłę powodującą równomierne ściskanie (oznaczoną P), zaś na osi poziomej całkowite ugięcie w_c . Dla idealnej struktury płytowej można wyodrębnić trzy etapy pracy: stan dokrytyczny ($P < P_{kr}$), gdzie ścianki są tylko ściskane, a ugięcia w_c są równe zeru, stan utraty stateczności konstrukcji ($P = P_{kr}$) oraz stan zakrytyczny ($P > P_{kr}$), gdzie po przekroczeniu obciążeń krytycznych narastają ugięcia w_c pochodzące od zginania. W przypadku struktury rzeczywistej nie można wprost wyznaczyć siły krytycznej P_{kr} , odpowiadającej bifurkacji. Typowe pokrytyczne ścieżki równowagi dla idealnej struktury oraz struktury rzeczywistej ukazano na poniższym rysunku.



Rys. 1. Porównanie pokrytycznych ścieżek równowagi struktury idealnej oraz rzeczywistej

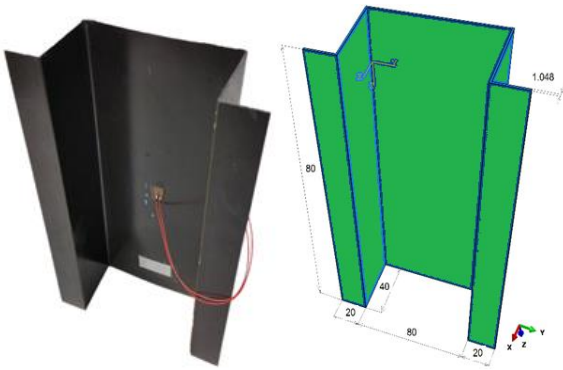
Badania stanów krytycznych, pokrytycznych oraz zjawiska zniszczenia cienkościennych ustrojów wykonanych z materiałów kompozytowych ukazano m.in. w pracach [1,2].

W przypadku badań stateczności struktur rzeczywistych nie można wprost wyznaczyć wartości siły krytycznej, zatem konieczne jest zastosowanie metod aproksymacyjnych, które na podstawie pokrytycznych ścieżek równowagi, umożliwiają oszacowanie wartości tego obciążenia. Problematyką tą w przypadku materiałów kompozytowych zajmowano się w pracy [3].

W pracy podjęto próbę wyznaczenia przybliżonej wartości obciążenia krytycznego dla cienkościennego słupa kompozytowego o przekroju omegowym, poddanego osiowemu ściskaniu. Istnieje wiele metod aproksymacyjnych pozwalających na wyznaczanie obciążeń krytycznych, przy czym w prowadzonych badaniach, do oceny wartości obciążenia krytycznego ściskanych słupów kompozytowych zaproponowano metodykę bazującą na teorii Koiter'a [4] oraz metodzie $P-w_c^2$ [5]. Wyznaczone doświadczalnie wartości obciążenia krytycznego porównano z wynikami obliczeń numerycznych (rozwiązanie zagadnienia własnego), w odniesieniu do metody elementów skończonych.

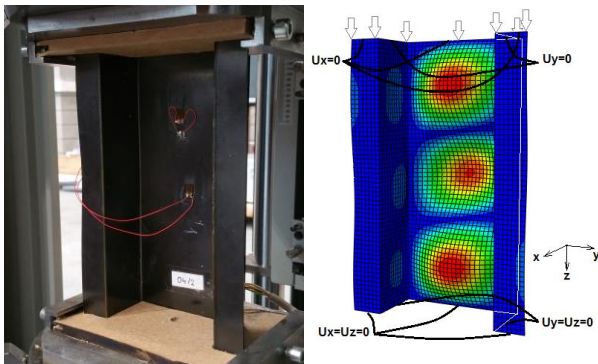
2. Przedmiot i metodyka badań

Przedmiotem badań był cienkościenny profil kompozytowy o przekroju omegowym. Próbkę wykonano z kompozytu węglowo-epoksydowego. Kompozyt składał się z 8 warstw o symetrycznej konfiguracji ułożenia włókien względem płaszczyzny środkowej [45/-45/90/0]_s. Całkowita grubość kompozytu wynosiła niewiele ponad 1 mm. Właściwości mechaniczne pojedynczej warstwy laminatu wynosiły odpowiednio: moduł Young'a w kierunku włókien $E_1 = 130.71$ GPa, moduł Young'a w kierunku prostopadłym do włókien $E_2 = 6.36$ GPa, współczynnik Poissona w płaszczyźnie warstwy $\nu_{12} = 0.32$, moduł Kirchhoffa $G_{12} = 4.18$ GPa. Model rzeczywisty profilu omegowego oraz model geometryczny przedstawia rys.2.



Rys. 2. Próbkę badawczą: a) model rzeczywisty, b) sparometrystyczny model geometryczny

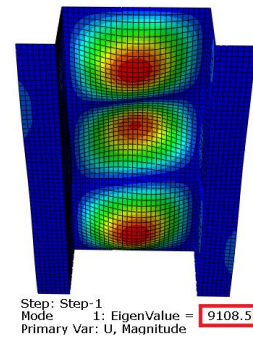
Badania doświadczalne prowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick Z100, celem przeprowadzenia procesu osiowego ściskania próbki. Dzięki przeprowadzonemu badaniu na podstawie otrzymanych charakterystyk obciążeń od odkształceń zarejestrowanych na tensometrach, było możliwe dalsze oszacowanie wartości obciążeń krytycznych dzięki wybranym metodom aproksymacyjnym. Równolegle do badań eksperymentalnych prowadzono analizę numeryczną w oparciu o MES, celem wyznaczenia siły krytycznej w oparciu o rozwiązanie liniowego zagadnienia własnego. Warunki brzegowe próbki rzeczywistej i modelu MES ukazano na rysunku 3.



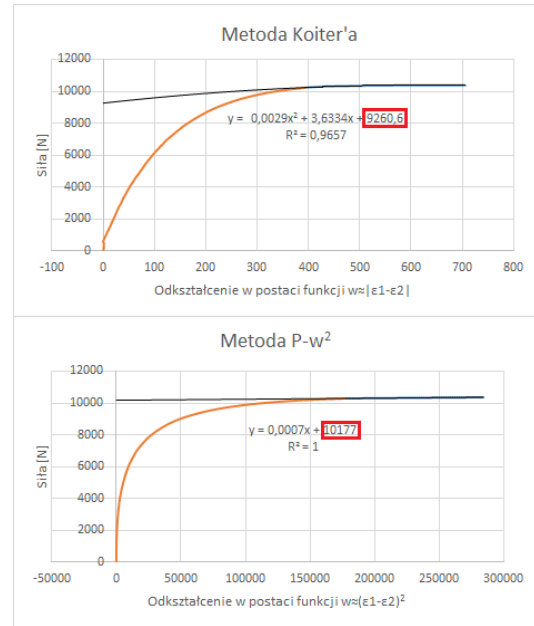
Rys. 3. Warunki brzegowe: a) próbka rzeczywista, b) model numeryczny

3. Wyniki

W ramach przeprowadzonych badań doświadczalnych i numerycznych uzyskano rezultaty badawcze w postaci wyznaczonych wartości sił krytycznych. W przypadku analizy MES w odniesieniu do kryterium – minimum energii potencjalnej układu, wyznaczono parametr obciążenia krytycznego w procesie utraty stateczności struktury. W przypadku badań doświadczalnych wartość obciążenia krytycznego wyznaczono w odniesieniu do dwóch wybranych metod aproksymacyjnych Koiter'a i $P-w^2$. Celem wyznaczenia precyzyjnych wartości obciążeń krytycznych kierowano się zachowaniem możliwie wysokiego współczynnika korelacji R^2 – świadczącego o stopniu dokładności funkcji aproksymującej i pierwotnie aproksymowanej krzywej.



Rys. 4. Numerycznie uzyskana postać wybożenia z rezultatem obciążenia krytycznego



Rys. 5. Doświadczalnie wyznaczone wartości obciążeń krytycznych metodą Koiter'a i $P-w^2$

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono analizę stanu krytycznego i słabo pokrytycznego struktury kompozytowej. Na podstawie wyznaczonych wartości obciążeń krytycznych drogą numeryczną i doświadczalną zauważono bardzo wysoką zbieżność wyników. Analizy MES stanowią doskonałą metodę pozwalającą na odwzorowanie rzeczywistych procesów fizycznych.

Literatura

- [1] Dębski H.: Experimental investigation post-buckling behaviour of composite column with top-hat cross section. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability (2013); 2: 105-109.
- [2] 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 (2016); 136: 593-601.
- [3] Paskiewicz M., Kubiak T.: Selected problems concerning determination of the buckling load of channel section beams and columns. Thin-Walled Structures (2015); vol. 93, p.112-121.
- [4] Van der Heijden AMA.: W.T. Koiter's Elastic Stability of Solids and Structured. Cambridge University Press, 2009.
- [5] Zaraś J., Królak M., Kotelko M.: Metody doświadczalne wyznaczania obciążeń krytycznych i analizy zachowania się elementów konstrukcji w stanie zakrytycznym. X Krajowa Konferencja Wytrzymałości Materiałów i Badania Materiałów, Kudowa-Zdrój 20-22 IX, 2006.