

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Doświadczalno-numeryczna analiza wpływu otworu na stateczność płyty kompozytowej

Paweł Wymuński, Hubert Dębski

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

STRESZCZENIE: W pracy zbadano wpływ otworu na stateczność ściskanej płyty wykonanej z warstwowego kompozytu węglowo-epoksydowego. Badania doświadczalno-numeryczne umożliwiły na szczegółowy opis płyty kompozytowej w stanie krytycznym i pokrytycznym (do 150% wartości obciążenia krytycznego). Doświadczalnie postać wyboczenia określono za pomocą bezkontaktowego systemu pomiarowego ARAMIS, natomiast wartość obciążenia krytycznego wyznaczono na podstawie ścieżki pracy przy użyciu metody aproksymacyjnej. Badania eksperymentalne zostały zweryfikowane numerycznie z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W tym celu opracowano model MES reprezentujący rzeczywiste warunki brzegowe, który został poddany analizie w stanie liniowym oraz nieliniowym. Pozwoliło to na określenie obciążenia krytycznego i odpowiadającej mu postaci wyboczenia modelu numerycznego płyty. Nowością tego artykułu jest opracowanie metodyki badawczej opartej na interdyscyplinarnych metodach badawczych, umożliwiających opis wpływu otworu na stateczność ściskanych płyt kompozytowych. Do analizy numerycznej wykorzystano system ABAQUS.

SŁOWA KLUCZOWE: wyboczenie, obciążenie krytyczne, kompozyty, MES

1. Wstęp

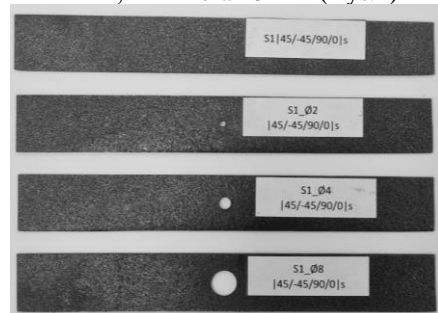
Ważnym zagadnieniem w projektowaniu cienkościennych konstrukcji nośnych jest możliwość wystąpienia utraty stateczności i nośności przez elementy konstrukcji, a w szczególności znajomość obciążenia krytycznego i sztywności konstrukcji w stanach pokrytycznych [1-3]. Wiedza ta stała się ważna oraz niezbędna, ponieważ istnieją prace, w których obciążenie krytyczne odpowiadające wyboczeniu konstrukcji jest uważane za obciążenie graniczne [4,5].

Konieczność wykonania otworu w elementach cienkościennych jest nieunikniona ze względów konstrukcyjnych. Zastosowanie otworu osłabia konstrukcję i wpływa na jej wytrzymałość [6,7]. Zostało to opisane w wielu artykułach w kontekście materiałów izotropowych. Brakuje jednak prac poświęconych badaniu wpływu otworu na wytrzymałość konstrukcji wykonanych z kompozytów. Występowanie otworu w kompozytach warstwowych staje się złożonym zagadnieniem, ponieważ w laminatach właściwości materiału zmieniają się z warstwy na warstwę. Biorąc pod uwagę powyższe sformułowano problem badawczy dotyczący wpływu otworu na wyboczenie ściskanej płyty kompozytowej.

2. Obiekt badań

Płyty zostały wykonane z kompozytu warstwowego zbrojonego włóknem węglowym w osnowie polimerowej. Próbkę kompozytową charakteryzowały się trzema standardowymi układami włókien: S1 [45|-45|90|0]s S2 [0|-45|45|90]s oraz S3 [0|90|0|90]s. Obiekt badań charakteryzowały się wymiarami: szerokość 20 mm, długość 140 mm i grubość 1,048 mm.

Płytę osłabiono poprzez wykonanie w niej centralnego otworu przelotowego. Dla wszystkich konfiguracji kompozytu przygotowano serię próbek z otworami o średnicach: 2 mm, 4 mm oraz 8 mm (Rys.1)

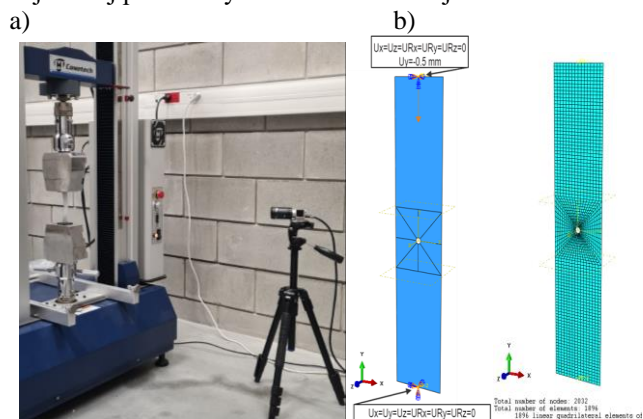


Rys. 1. Seria próbek o konfiguracji S1

3. Metodyka badań

Analizę wpływu otworu na stateczność ściskanej płyty kompozytowej przeprowadzono przy wykorzystaniu dwóch niezależnych metod badawczych: eksperymentalnie na rzeczywistym obiekcie i numerycznie przy użyciu metody elementów skończonych (MES). Zakres badań polegał na analizie stany krytycznego oraz pokrytycznego do 150% wartości obciążenia krytycznego płyty. Bezkontaktowy system ARAMIS został wykorzystany do identyfikacji postaci wyboczenia, podczas gdy odpowiadająca mu wartość obciążenia krytycznego została określona przy użyciu metody aproksymacyjnej. Przeprowadzona niezależna symulacja numeryczna polegała na opracowaniu adekwatnego modelu MES. Wyboczenie modelu uzyskano poprzez rozwiązanie liniowego zagadnienia własnego, natomiast rozwiązanie nieliniowego problemu stateczności

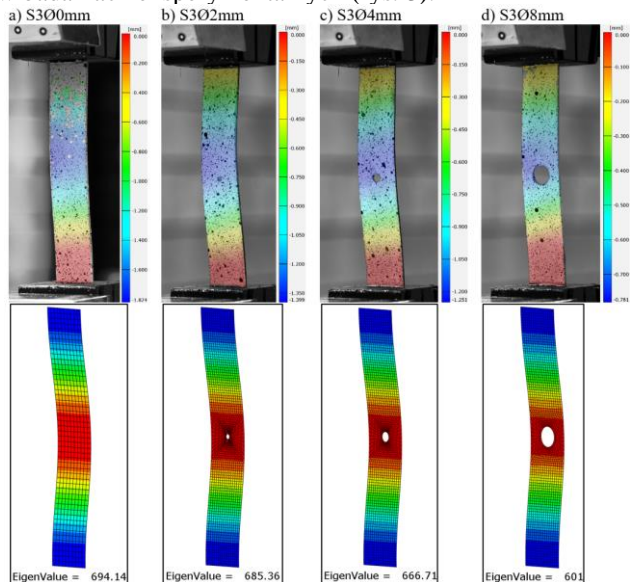
oparto na obliczeniach przeprowadzonych na modelach z zainicjowaną imperfekcją geometryczną odpowiadającą najniższej postaci wybočenja konstrukcji.



Rys. 2. a) Stanowisko eksperymentalne, b) Model MES

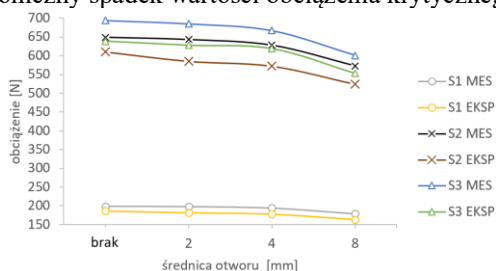
4. Wyniki badań

Analiza jakościowa wyników potwierdza zgodność symulowanych numerycznie postaci wybočenja płyty cienkościennej z postacią odkształcenia uzyskaną w badaniach eksperymentalnych (rys. 3).



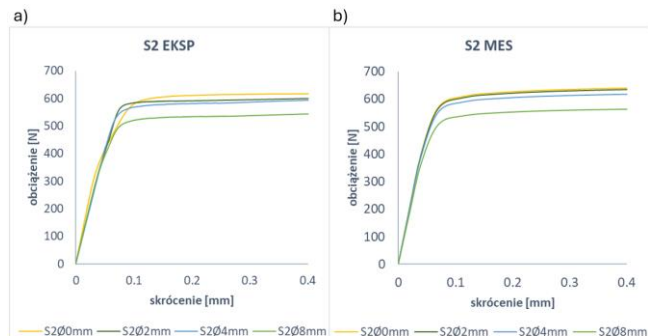
Rys. 3. Wpływ otworu na postać wybočenja płyty S3

Wpływ wielkości otworu na krytyczne zachowanie ściskanej płyty kompozytowej przedstawiono na rysunku 4. Dla wszystkich badanych płyt rozmiar otworu wpłynął na monotoniczny spadek wartości obciążenia krytycznego.



Rys. 4. Wpływ otworu na obciążenie krytyczne

Dla wszystkich płyt zaobserwowano zmianę sztywności charakterystyki pokrywyczej wraz ze wzrostem średnicy otworu w płycie (Rys.5).



Rys. 5. Wpływ otworu na ścieżkę pokrywyczej płyty S2

5. Wnioski

- 1) Nie zaobserwowano wyraźnego wpływu wielkości otworu oraz układu włókien na formę wybočenja płyty. We wszystkich przypadkach powstała jedna lokalna półfała.
- 2) Maksymalny spadek wartości obciążenia krytycznego równy 14% uzyskano dla płyty z układem włókien S2, podczas gdy minimalny spadek wyniósł 13% dla płyty S1. Jednocześnie błąd względny między wartościami numerycznymi i eksperymentalnymi obciążenia krytycznego nie przekraczał 9%.
- 3) Dla wszystkich analizowanych płyt zaobserwowano zmianę sztywności charakterystyki pokrywyczej wraz ze wzrostem rozmiaru otworu, maksymalny równy 14% uzyskano dla płyty o układzie S1, a minimalny równy 10% uzyskano dla płyty o układzie S3.
- 4) Zaobserwowano, że płyta S1 o konfiguracji włókien [45|-45|90|0]s miała ponad 3-krotnie niższą wytrzymałość w porównaniu do płyt S2 [0|-45|45|90]s i S3 [0|90|0|90]s. Świadczy o tym przesunięcie najszywniejszej warstwy z układem [0] do płaszczyzny symetrii, osłabiając w ten sposób płytę S1.
- 5) Analiza numeryczna charakteryzowała się wyższymi wartościami w porównaniu do eksperymentalnej. Świadczy o tym fakt, że analiza numeryczna w porównaniu do eksperymentu zapewnia idealne warunki brzegowe. Jednocześnie zgodność wyników potwierdza adekwatność opracowanego modelu numerycznego, który w symulowanym przypadku odtwarza zachowanie rzeczywistej płyty z otworem.

Literatura

- [1] B. S. Jayashankarbabu, Karisiddappa. Stability Of Square Plate With Concentric Cutout 2014. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1337071>.
- [2] Bazant ZP, Cedolin L, World Scientific (Firm). Stability of structures: elastic, inelastic, fracture and damage theories. Singapore; Hackensack, N.J.: World Scientific Pub. Co.; 2010.
- [3] Timoshenko S, Gere JM. Theory of elastic stability. 2nd ed., Dover ed. Mineola, N.Y: Dover Publications; 2009.
- [4] Banat D, Mania RJ. Comparison of failure criteria application for FML column buckling strength analysis. Composite Structures 2016;140:806–15. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.024>.
- [5] Teter A, Debski H, Samborski S. On buckling collapse and failure analysis of thin-walled composite lipped-channel columns subjected to uniaxial compression. Thin-Walled Structures 2014;85:324–31. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.09.010>.
- [6] Higuchi R, Warabi S, Yoshimura A, Nagashima T, Yokozeki T, Okabe T. Experimental and numerical study on progressive damage and failure in composite laminates during open-hole compression tests. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2021;145:106300. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106300>.
- [7] Wang C, Nagashima T. Damage propagation analysis of CFRP laminate by quasi-3D XFEM using hexahedral elements. Composite Structures 2023;316:117024.