

BADANIA NUMERYCZNE CIENKOŚCIENNYCH ELEMENTÓW PŁYTOWYCH PODDANYCH ŚCISKANIU

Streszczenie

W pracy zajmowano się oryginalną koncepcją płytowego elementu cienkościennego z wycięciem, do zastosowania jako element sprężysty lub nośny. Przedmiotem badań były prostokątne płyty z wycięciem o zmiennych parametrach geometrycznych, wykonane ze stali o wysokich właściwościach wytrzymałościowych i poddane równomiernemu ścisnieniu. Badano wpływ parametrów geometrycznych wycięcia na wartość obciążenia krytycznego konstrukcji. Do opracowania modelu dyskretnego i wykonania obliczeń zastosowano komercyjny program ABAQUS wykorzystujący metodę elementów skończonych. Przeprowadzone obliczenia numeryczne stanowiły rozwiązanie zagadnienia własnego ścisnionych konstrukcji.

WSTĘP

Konstrukcje cienkościenne [3] posiadają wiele zalet, wykazując dużą nośność przy stosunkowo niskiej masie i pozwalając przy tym konstruktorowi na dużą swobodę w kształtowaniu postaci konstrukcyjnej. Do takich struktur należą m.in. kadłuby i skrzydła samolotów czy też nadwozia samochodowe. Jednak ze względu na niewielką sztywność na zginanie, mogą przenosić stosunkowo nieduże obciążenia. Gdy są ściskane, utrata stateczności następuje przy niewielkim obciążeniu i ma charakter wyboczenia giętnego [2-4], [6], [8], [9], [11-14]. Projektanci ze względów konstrukcyjnych czy technologicznych zmuszeni są często do wykonywania różnego rodzaju wykrojów w ściankach elementów cienkościennych, co prowadzi do lokalnego osłabienia konstrukcji. W wielu przypadkach taka sytuacja zmusza konstruktorów do stosowania odpowiednich wzmocnień, które prowadzą do znacznej zmiany postaci konstrukcyjnej, a tym samym wzrostu ciężaru stroju cienkościennego.

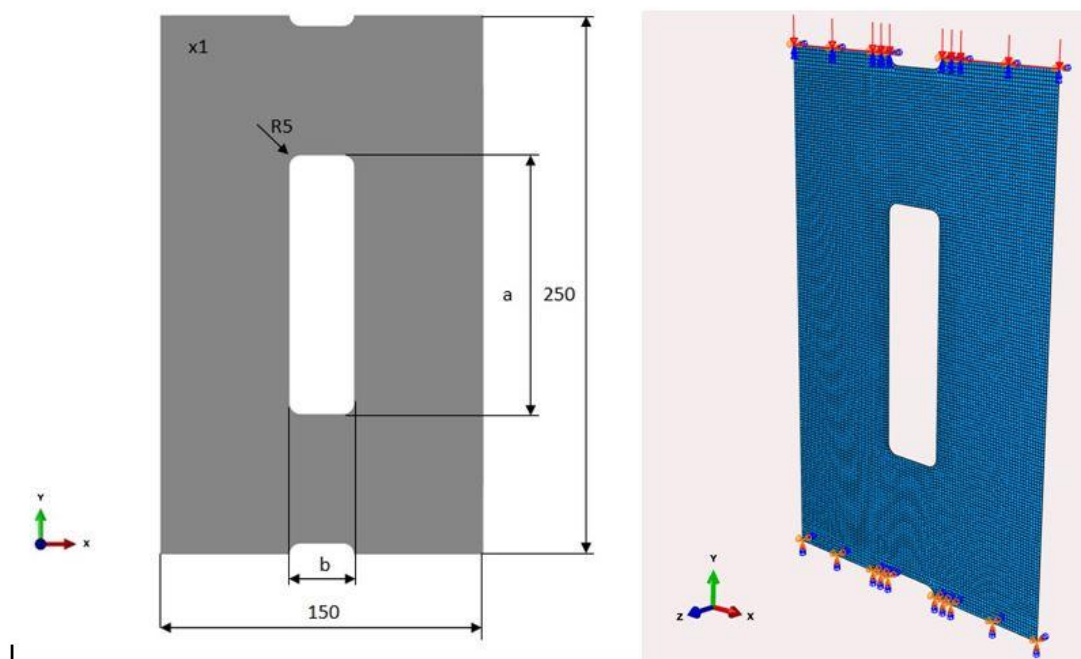
Obniżenie masy jest szczególnie ważne w konstrukcjach lotniczych, gdzie we fragmentach wzmocnień i usztywnień z reguły wykonuje się całe ciągi otworów. Obecność osłabienia konstrukcji

jakim jest wycięcie stanowi wyzwanie zarówno dla naukowców jak i konstruktorów. Powstaje tutaj szereg pytań dotyczących nośności tego typu ustrojów w konkretnych warunkach pracy konstrukcji, a także wpływu wielkości i rodzaju wycięcia na wspomnianą nośność.

W pracy zostanie przedstawiona koncepcja poprawy nośności płyty poprzez wykonanie w niej wycięcia i wymuszenia deformacji według wyższej, giętno-skrętnej postaci wyboczenia.

Zakres pracy obejmuje obliczenia numeryczne stateczności płyt prostokątnych z wycięciami o zmiennych parametrach, zmierzające do wyznaczenia wartości obciążenia krytycznego oraz odpowiadających im postaci utraty stateczności.

Do opracowania modelu dyskretnego i wykonania obliczeń zastosowano komercyjny program ABAQUS [1], [5], wykorzystujący metodę elementów skończonych [7]. W obliczeniach przyjęto płytowy model konstrukcji, wyznaczając wartość obciążenia krytycznego w zależności od zmiennych parametrów wycięcia płyty. Przeprowadzone obliczenia numeryczne stanowiły rozwiązanie zagadnienia własnego ścisnionych konstrukcji.



Rys. 1. a) Wymiary geometryczne płyty z wycięciem b) model dyskretny płyty z centralnym wycięciem [opracowanie własne]

1. METODYKA BADAŃ

Przedmiot badań stanowiła podparta przegubowo, prostokątna płyta z wycięciem o zmiennych parametrach geometrycznych, obciążona siłą ściskającą, rozłożoną równomiernie na górnej krawędzi płyty (rys. 1). Warunki brzegowe modelu odwzorowujące przegubowe podparcie płyty zdefiniowano poprzez zablokowanie kinematycznych stopni swobody węzłów znajdujących się na górnej i dolnej krawędzi płyty. Przegubowe podparcie narzuca na poziome krawędzie warunki umożliwiające obrót względem osi x . Ponadto krawędź górna, która jest obciążona, może przemieszczać się wzdłuż osi y .

Dla wszystkich badanych przypadków wymiary gabarytowe płyty były stałe i wynosiły odpowiednio: wysokość płyty 250 mm, szerokość płyty 150 mm oraz grubość $g=1$ mm. Zakres przyjętych parametrów geometrycznych wycięcia wynosił odpowiednio: wysokość wycięcia $a = 80 \div 220$ mm oraz szerokość wycięcia $b = 10 \div 50$ mm, co prowadziło do analizy 35 przypadków geometrycznych płyty. Płyty wykonano ze stali sprężynowej 50HS, dla której przyjęto następujące właściwości materiałowe: moduł Younga $E=210000$ MPa, liczba Poissona $\nu=0.3$, granica plastyczności $R_e=1180$ MPa oraz granica wytrzymałości $R_m=1320$ MPa.

Zakres badań obejmował analizę numeryczną zagadnienia liniowej stateczności ściskanej równomiernie płyty. Zastosowanym narzędziem numerycznym był komercyjny pakiet obliczeniowy wykorzystujący metodę elementów skończonych - program ABAQUS [1], [5].

Obliczenia numeryczne obejmowały analizę stanu krytycznego prostokątnych płyt z wycięciem. Rozwiązanie zagadnienia własnego dotyczyło określenia wartości obciążenia krytycznego oraz odpowiadającej mu postaci utraty stateczności.

W każdym przypadku wyznaczono trzy najniższe postaci wyboczenia, co pozwoliło na identyfikację postaci giętno-skrętnej, zapewniającej stateczny charakter pracy konstrukcji po wyboczeniu (rys. 2).

Analizując postaci wyboczenia przedstawione na rys. 2 zauważamy, że dla pierwszej i drugiej postaci utrata stateczności ma charakter giętny. Poszczególne przekroje poziome przemieszczają się niejako równoległe wzdłuż osi y oraz z . Postaci te charakteryzuje ponadto symetria w płaszczyźnie pionowej oraz to, że pionowa oś symetrii ulega deformacji. Przy czym postać giętna nie ma w tym

przypadku znaczenia praktycznego. Dla trzeciej postaci utrata stateczności ma charakter giętno-skrętny. Poszczególne przekroje oprócz przemieszczania wzdłuż osi y doznają obrotu względem pionowej osi symetrii płyty, równoległej do tejże osi. Postać trzecią charakteryzuje także antysymetria względem osi pionowej, która to oś nie ulega deformacji. Oś ta dzieli płytę na połówki.

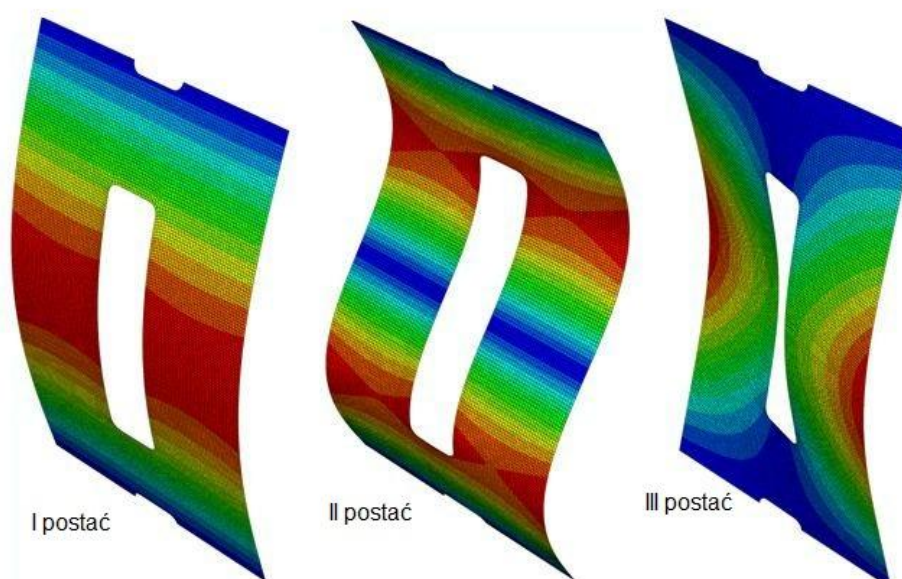
2. WYNIKI

Przeprowadzone obliczenia numeryczne stanowiły podstawę do wyznaczenia siły krytycznej w analizowanym układzie w zależności od parametrów geometrycznych wycięcia — wysokości a oraz szerokości b (tab. 1).

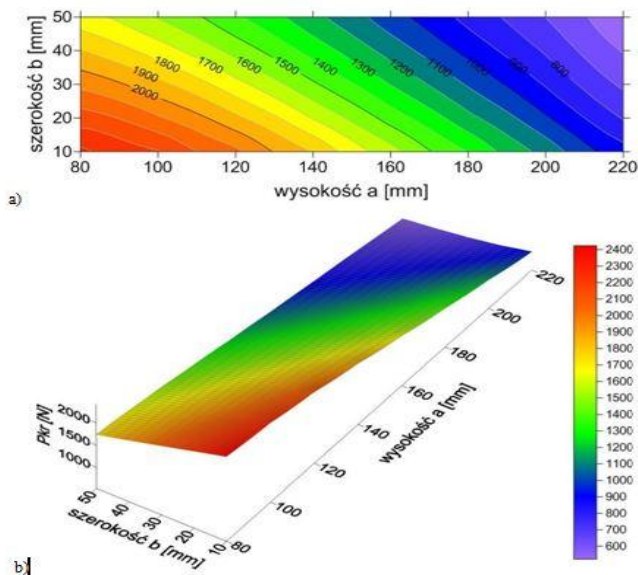
Tab. 1. Wartości siły krytycznej w zależności od wymiarów a oraz b określających wielkość wycięcia w płycie [opracowanie własne]

Wysokość wycięcia a [mm]	Szerokość wycięcia b [mm]				
	10	20	30	40	50
80	2422,7	2249,7	2074,6	1902,6	1740,6
100	2307	2112,6	1926,9	1752,5	1592,4
120	2126,7	1919,5	1733,2	1565,3	1414,4
140	1895,9	1690,7	1515,7	1361,7	1225,5
160	1644,1	1454,7	1296,9	1161	1041,3
180	1398,2	1228,6	1089,3	970,68	867,02
200	1166,6	1013,9	890,8	787,21	698,59
220	938,19	793,58	682,1	594,05	521,47

Wyniki obliczeń przedstawiono również na wykresie przestrzennym (rys. 3), którego forma znakomicie wizualizuje zależność obciążenia krytycznego od parametrów geometrycznych wycięcia.



Rys. 2. Postacie utraty stateczności przykładowej płyty z wycięciem uzyskane w programie ABAQUS (od lewej: postać pierwsza, postać druga i postać trzecia: giętno-skrętna) [opracowanie własne]



Rys. 3. Zależność siły krytycznej od parametrów geometrycznych wycięcia a i b : a) wykres w formie warstwicy, b) wykres przestrzenny [opracowanie własne]

3. Dyskusja wyników

Siła krytyczna jest ważnym parametrem wytrzymałościowym ustrojów ściskanych. Przeprowadzone badania w zakresie numerycznej analizy MES stanu krytycznego dla różnych parametrów geometrycznych wycięcia, zmieniając wysokość a oraz szerokość b wycięcia przy zachowaniu tych samych wymiarów gabarytowych płyty, wykazały istotny wpływ wymiarów wycięcia na wartość obciążenia krytycznego. Dotyczy to w szczególności wysokości wycięcia, dla którego maksymalna różnica wartości obciążenia krytycznego przy stałej szerokości wycięcia wynosiła 1484,51 N i dotyczyło to płyt o szerokości 10 mm. Otrzymane wyniki potwierdzają możliwość kształtowania parametrów sztywnościowych badanych elementów w dosyć szerokim zakresie, przy zachowaniu stałych wymiarów gabarytowych konstrukcji.

Na rys. 3 i w tab. 1 widać, że zmieniając wymiary określające wycięcie w płycie można wpływać na wielkość siły krytycznej. Najlepsze własności wytrzymałościowe, jeżeli chodzi o obciążenie krytyczne, wykazują płyty, których wycięcie charakteryzuje niewielka szerokość b oraz stosunkowo mała wysokość wycięcia a .

Na podstawie otrzymanych wyników możemy zaobserwować, że wraz ze wzrostem parametru a maleje wartość obciążenia krytycznego. Podobna sytuacja ma miejsce przy wzroście szerokości wycięcia b .

Wyniki obliczeń siły krytycznej pokazują, że zmieniając parametry geometryczne wycięcia możemy wpływać na jej nośność.

Wnioski

W pracy zaprezentowano numeryczną analizę liniowej stateczności niejednorodnych płyt poddanych ściskaniu. Otrzymane wyniki wykazały duże możliwości wpływania na nośność badanego elementu poprzez zmianę parametrów geometrycznych wycięcia. Potwierdza to ilościowa analiza wyników zwłaszcza w odniesieniu do wartości maksymalnych siły krytycznej, zawierających się w przedziale 521,47-2422,7 N.

Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej można sformułować następujące wnioski:

1. Parametry geometryczne wycięcia w sposób istotny wpływają na wartość obciążenia krytycznego - dotyczy to w szczególności wysokości wycięcia;

2. Praktyczne znaczenie dla elementów sprężystych w formie płyty z wycięciem ma w tym przypadku wyższa postać wybożenia: giętno-skrętna;
3. Dla postaci giętno-skrętnej w zależności od wielkości parametrów wycięcia a i b otrzymano zakres obciążenia krytycznego od 521,47 N do 2422,7 N;
4. W przypadku postaci giętno-skrętnej w ściskanej płycie można wyróżnić pasy pionowe poddane zginaniu oraz pasy poziome poddane zginaniu i skręcaniu;
5. Przeprowadzona analiza numeryczna stanowi wstępny etap badań dotyczących pracy konstrukcji w zakresie pokrytycznym sprężystym z wymuszoną giętno-skrętną postacią utraty stateczności.

Bibliografia

1. Abaqus HTML Documentation.
2. Bazant Z.P., Cedolin L., *Stability of structures. Elastic, inelastic, fracture and damage theories*. Oxford University Press, 1991.
3. Cambell F.C., *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. Elsevier.
4. Coan J.M. 1951. *Large-Deflection Theory for Plates With Small Initial Curvature Loaded in Edge Compression*, ASME. Journal of Applied Mechanics 18:143-151, 2006.
5. Hibbit, Karlsson & Sorensen, *Abaqus Theory Manual version 5.8*, 1998.
6. Królak M. and Mania R.J. 2011 (eds.). *Statics, dynamics and stability of structures. Stability of thin-walled plate structures*. Series of monographs. Łódz: Technical University of Lodz 2011.
7. Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T., *Advanced Finite Element Method in stability construction*. Wrocław University of Technology Press, 2000 (in Polish).
8. Simitses G.J., Hodges D.H., *Fundamentals of structural stability*. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006.
9. Singer J., Arbocz J., Weller T., *Buckling Experiments. Experimental methods in buckling of thin-walled structure. Basic concepts, columns, beams, and plates*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998.
10. Singer J., Arbocz J., Weller T., *Buckling Experiments. Experimental methods in buckling of thin-walled structure. Shells built-up structures, composites and additional topics*. New York: John Wiley & Sons Inc. 2002.
11. Spencer H.H. Walker A.C., *Techniques for Measuring The Critical Loads of Column and Plates*. SESA Spring Meeting, 1974.
12. Tereszowski Z., *An experimental method for determining critical loads of plates*. Archive of mechanical engineering 3: 485-493, 1970.
13. Van der Heijden A. M. A. (red.), W.T. Koiter's. *Elastic Stability of Solids and Structures*. Cambridge University Press, 2009.
14. Venkataramaiah, K.R., Roorda, J., *Analysis of local plate buckling experimental data*. Sixth international specialty conference on cold-formed steel structures. St. Louis: Missouri S&T: formerly the University of Missouri - Rolla, 45-74, 1982.

NUMERICAL STUDIES OF THIN-WALLED PLATE ELEMENT SUBJECTED TO COMPRESSION

Abstract

The study dealt the original conception of thin-walled plate element with a cut-out for use as a spring element or carrying element. The subject of the study were rectangular plates with a cut-out and with variable geometrical parameters, made of steel about high strength properties and subjected to uniform compression. The influence of cut-out geometrical parameters on the value of the critical load of the structure was researched. To develop a discrete model and perform the calculation used a commercial program - ABAQUS that uses finite element method. The performed numerical calculations constituted a solution of the eigenvalue problem of compressed construction.

Autorzy:

Falkowicz Katarzyna, Wysmulski Paweł, Różyło Patryk - Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
k.falkowicz@pollub.pl, p.wysmulski@pollub.pl, p.rozylo@pollub.pl