

Mateusz KONIECZNY¹
Grzegorz GASIAK²

BADANIE WPŁYWU ZAMOCOWANIA KOŁOWEJ PŁYTY PERFOROWANEJ NA KONCENTRACJĘ NAPRĘŻENIA W WARUNKACH DZIAŁANIA CIŚNIENIA HYDROSTATYCZNEGO

W pracy zamieszczono wyniki analizy wpływu warunków brzegowych wynikających z zamocowania na lokalizację stref koncentracji naprężenia w kołowej płycie perforowanej. Rozpatrzono dwa przypadki zamocowania, tj. płytę swobodnie podpartą oraz utwierdzoną. Obciążenie przyjęto w postaci ciśnienia hydrostatycznego. Obliczenia numeryczne prowadzono przy użyciu programu metody elementów skończonych Femap. Płyta posiadała otwory rozmieszczone na dziesięciu okręgach. Na pierwszym okręgu wewnętrznym płyta miała otwory o średnicy 3,5 mm, a na dziesiątym zewnętrznym okręgu otwory o średnicy 20,5 mm. Wyniki obliczeń numerycznych dla płyty swobodnie podpartej porównano z wynikami uzyskanymi dla płyty utwierdzonej. W przypadku płyty swobodnie podpartej maksymalna koncentracja naprężenia wystąpiła w strefie siódmej i była równa 182,30 MPa. Z kolei w płycie o brzegach utwierdzonych maksymalną wartość 71,40 MPa odnotowano w strefie 1.

Słowa kluczowe: płyta kołowa, płyta perforowana, swobodne podparcie, utwierdzenie, naprężenie efektywne, obliczenia numeryczne

1. Wprowadzenie

Współczesne konstrukcje inżynierskie, w porównaniu z ich poprzednikami, charakteryzują się mniejszym współczynnikiem bezpieczeństwa. Precyzyjne obliczenie wytrzymałości doraźnej, sztywności i stateczności, w szczególności cienkościennych elementów konstrukcji, ma zatem coraz większe znaczenie – przede wszystkim w takich dziedzinach techniki, jak inżynieria chemiczna. Istnieje wiele zastosowań płyt perforowanych. Są one wykorzystywane w zbiornikach ciśnieniowych czy aparaturze chemicznej na ściany sitowe wymienników ciepła [1].

W literaturze występuje wiele wyników analiz dotyczących płyt zawierających otwory. Spośród nich należy wymienić następujące: wyznaczanie koncen-

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Mateusz Konieczny, Politechnika Opolska, ul. S. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, e-mail: mateuszmarcinkonieczny@wp.pl

² Grzegorz Gasiak, Politechnika Opolska, e-mail: g.gasiak@po.opole.pl

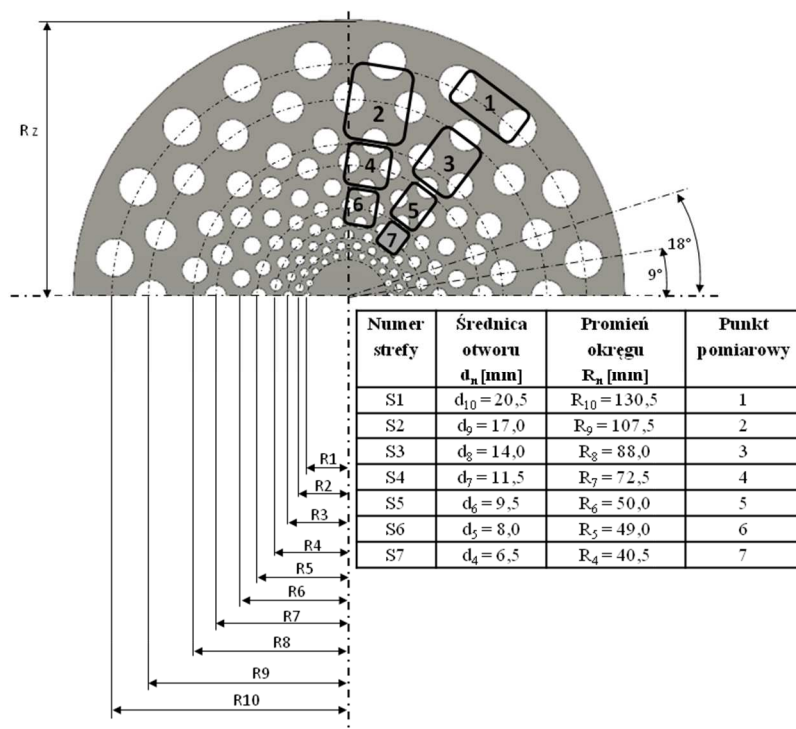
tracji naprężenia, rozkładu ugięcia, stanu odkształcenia, wartości współczynnika koncentracji oraz intensywności naprężenia w płytach perforowanych osłabionych otworami [1-8]. Do oceny zachowania płyt perforowanych pod obciążeniem stosuje się metody: analityczną [2, 4, 5, 9, 10], doświadczalną [11, 12] oraz numeryczną [13-19]. Wykorzystuje się również nowe podejście za pomocą metod numerycznych opierających się na metodzie elementów skończonych (MES). Przykłady stosowania metody elementów skończonych do określenia stanu naprężenia oraz odkształcenia płyt perforowanych podano w pracach [5, 20]. Wykorzystując MES, autorzy publikacji [20] wyznaczyli efektywne, stałe sprężystości, co umożliwiło określenie stanu naprężenia dla dowolnego stanu obciążenia płyty perforowanej. Z kolei w pracy [21] autorzy, zmieniając rozmieszczenie otworów i zwiększając stopniowo obciążenie, określili wartość naprężenia ścinającego dla płyt perforowanych. Przedmiotem badań w pracach [22-24] była numeryczna analiza stanu naprężenia i ugięcia w utwierdzonych oraz swobodnie podpartych, perforowanych płytach prostokątnych, a także kołowych, obciążonych centralnie siłą skupioną. W analizowanych przypadkach uzyskano rozkłady naprężeń na całej powierzchni płyty perforowanej.

Celem pracy jest określenie lokalizacji i wartości maksymalnej naprężenia w kołowej osiowosymetrycznej płycie perforowanej swobodnie podpartej oraz utwierdzonej i obciążonej ciśnieniem hydrostatycznym q_i na całej powierzchni płyty.

2. Materiał i metoda numeryczna

Do obliczeń przyjęto kołową osiowosymetryczną płytę perforowaną o wymiarach: średnica $D = 300$ mm, grubość $h = 5$ mm. Na płycie rozmieszczono 200 otworów o różnych promieniach na 10 okręgach, po 20 otworów na każdym okręgu (rys. 1.). Jako materiał płyty przyjęto blachę stalową gatunku S235JR według PN-EN 1027-1 o następujących parametrach mechanicznych: moduł Younga $E = 200$ GPa, liczba Poissona $\nu = 0,3$. Płytę perforowaną swobodnie podparto oraz utwierdzono na całym obwodzie i obciążono ciśnieniem hydrostatycznym q_i na całej powierzchni płyty (rys. 2. i 3.). Rozpatrzono dwa przypadki płyty obciążonej na powierzchni ciśnieniem hydrostatycznym q_i . W pierwszym przypadku założono warunki brzegowe w postaci swobodnego podparcia na obwodzie płyty. W drugim rozpatrywanym przypadku płytę utwierdzono na obwodzie. Stosowano następujące wartości ciśnienia q_i : $q_1 = 0,01$ MPa; $q_2 = 0,02$ MPa; $q_3 = 0,04$ MPa; $q_4 = 0,06$ MPa; $q_5 = 0,07$ MPa; $q_6 = 0,1$ MPa. Na płycie perforowanej naniesiono siedem stref pomiarowych, tj. S1-S7 (rys. 1.). Obliczenia realizowano za pomocą programu komputerowego Femap [23]. Jest on przeznaczony do zaawansowanych obliczeń numerycznych z użyciem metody elementów skończonych (MES). Bryłę płyty modelowano z zastosowaniem elementu skończonego przestrzennego (3D) pięciościanowego o sześciu węzłach w narożach, tj. Q6

(rys. 4.). Element ten w każdym węźle posiada sześć stopni swobody – trzy przemieszczenia i trzy obroty.

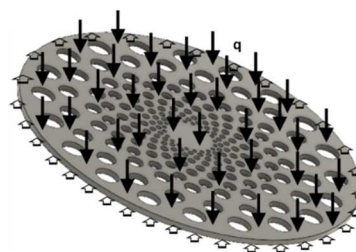


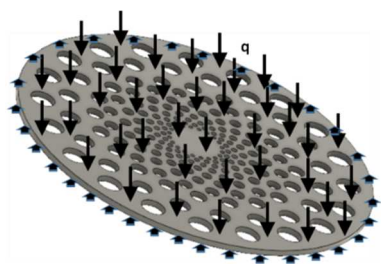
Rys. 1. Model płyty perforowanej z siedmioma strefami pomiarowymi, tj. S1-S7

Fig. 1. Model of perforated plate with seven measuring zones, i.e. S1-S7

Rys. 2. Sposób swobodnego podparcia na całym obwodzie płyty perforowanej oraz wektory ciśnienia hydrostatycznego q_i

Fig. 2. The manner of simply supported the entire perimeter of the perforated plate and distribution of the vectors of hydrostatic pressure q_i

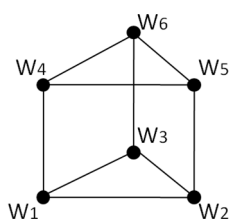




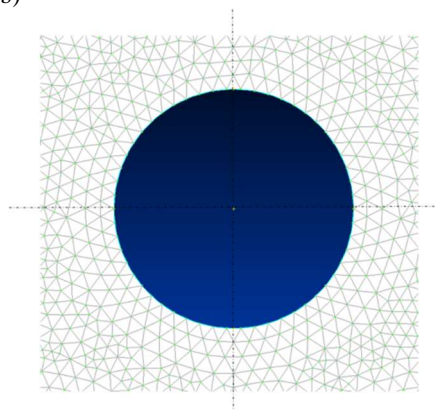
Rys. 3. Sposób utwierdzenia na całym obwodzie płyty perforowanej oraz wektory ciśnienia hydrostatycznego q_i

Fig. 3. The manner of fixing the entire perimeter of the perforated plate and distribution of vectors of the hydrostatic pressure q_i

a)



b)



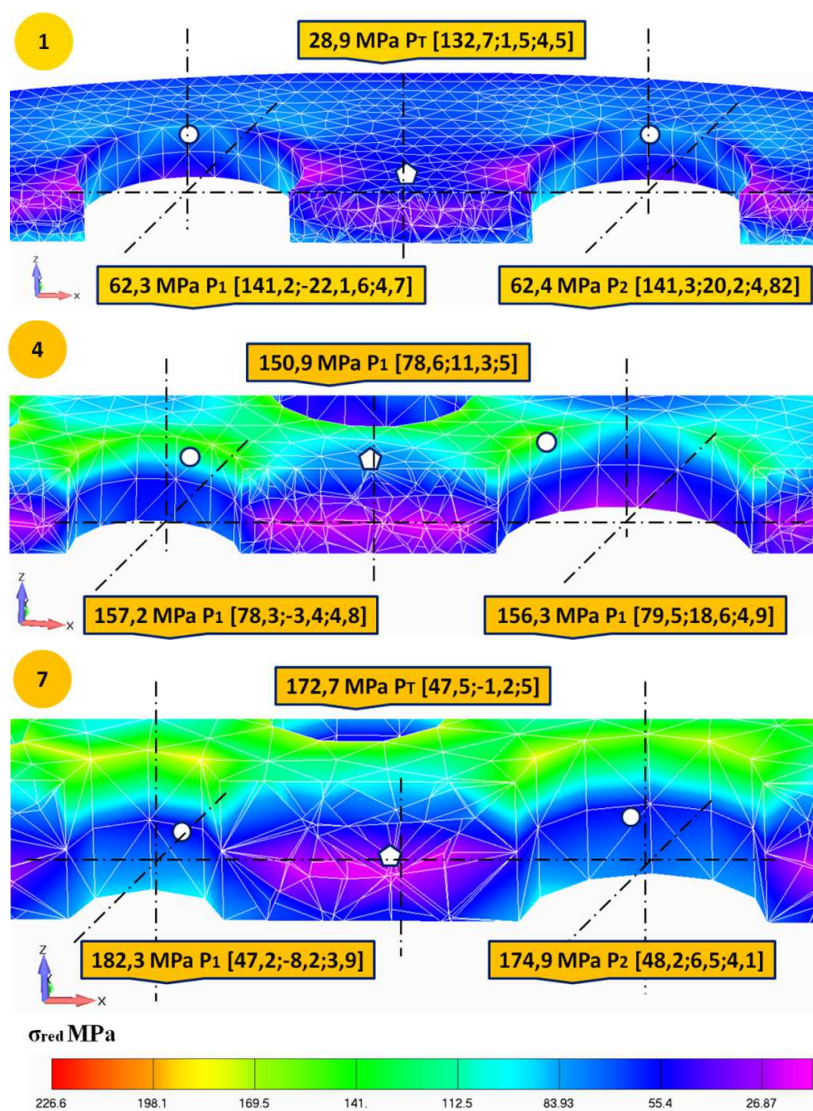
Rys. 4. Element skończony przestrzenny pięciostanowy o sześciu węzłach w narożach od W1 do W6 (a), podział na elementy skończone strefy wokół otworu (b)

Fig. 4. Five-walls spatial finite element with six nodes in the corners, i.e. from W1 to W6 (a), the distribution of finite elements around the hole (b)

3. Wyniki obliczeń

Przedmiotem obliczeń numerycznych był rozkład naprężenia w kołowej osiowosymetrycznej płycie perforowanej, której parametry: wymiar, sposób podparcia oraz sposób obciążenia opisano w pkt 2 (Materiał i metoda numeryczna). W zamieszczonych poniżej wynikach obliczeń numerycznych symbole P_1 i P_2 to miejsca występowania wartości maksymalnych naprężenia efektywnego według hipotezy Hubera-Misesa – oznaczone okręgami z białym wypełnieniem. Punkt P_T jest punktem kontrolnym wyznaczenia wartości naprężenia efektywnego, umiejscowionym na mostku między otworami.

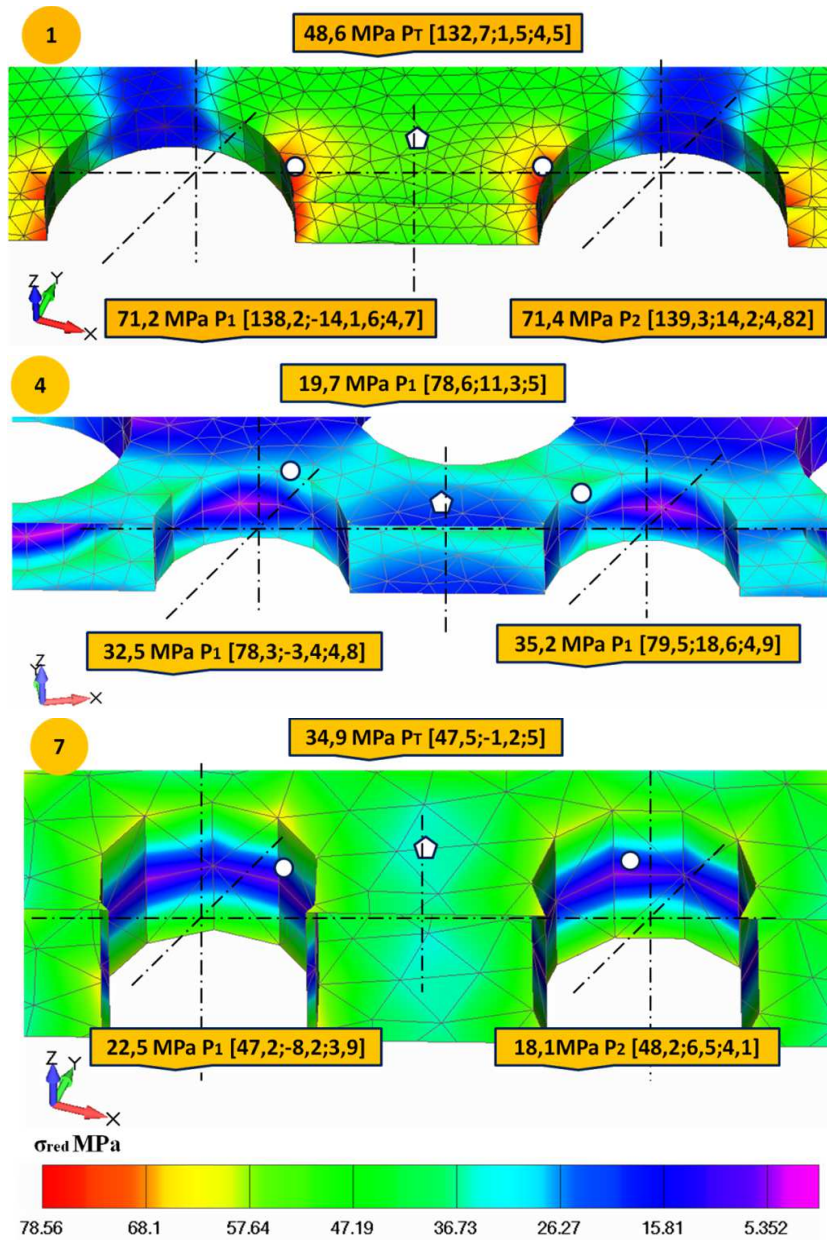
Lokalizację wartości koncentracji naprężenia w wybranych strefach pomiarowych (strefy 1, 4 oraz 7 – rys. 1.) kołowej osiowosymetrycznej płyty perforowanej swobodnie podpartej i obciążonej ciśnieniem $q_6 = 0,1$ MPa przedstawiono na rys. 5. Z kolei lokalizację spiętrzenia naprężeń w wybranych strefach pomiarowych (strefy 1, 4 oraz 7 – rys. 1.) kołowej osiowosymetrycznej płyty perforo-



Rys. 5. Rozkład naprężenia efektywnego według HMM (na rysunkach symbol P_T) w wybranych strefach płyty poddanej działaniu ciśnienia hydrostatycznego o wartości $q_6 = 0,1$ MPa; P_1, P_2 są punktami, w których występują największe wartości rozpatrywanego naprężenia efektywnego

Fig. 5. The HMM equivalent stress distribution (symbol P_T in figures) for the plate subjected to hydrostatic pressure of $q_6 = 0,1$ MPa; P_1, P_2 are the points for the maximal values of the equivalent stress

wanej utwierdzonej i obciążonej ciśnieniem $q_6 = 0,1$ MPa przedstawiono na rys. 6. Wartości naprężenia efektywnego w poszczególnych strefach zestawiono w tab. 1.



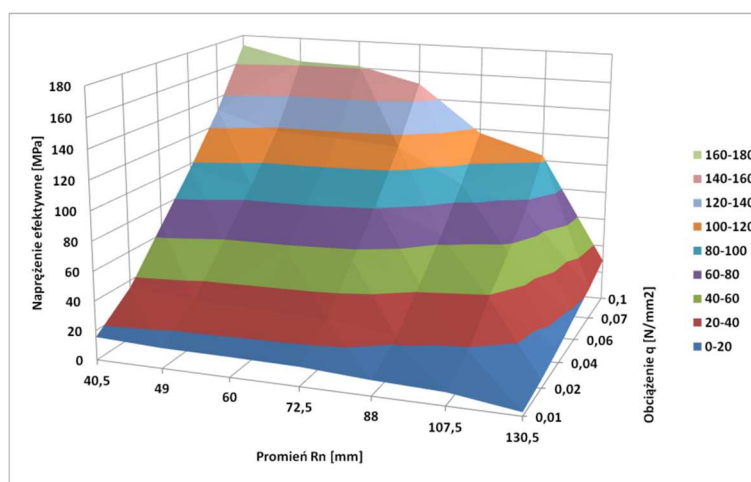
Rys. 6. Rozkład naprężenia efektywnego według HMM (na rysunkach symbol P_T) w wybranych strefach płyty utwierdzonej i obciążonej ciśnieniem hydrostatycznym o wartości $q_6 = 0,1$ MPa; P_1, P_2 są punktami, w których występują największe wartości rozpatrywanego naprężenia

Fig. 6. The HMM equivalent stress distribution (symbol P_T in figures) for the plate fixed and loaded by hydrostatic pressure equal $q_6 = 0,1$ MPa; P_1, P_2 follows points for the maximal values of the stress considered

Tabela 1. Wartości naprężenia efektywnego w strefach pomiarowych
 Table 1. The values of equivalent stress in the measuring zones

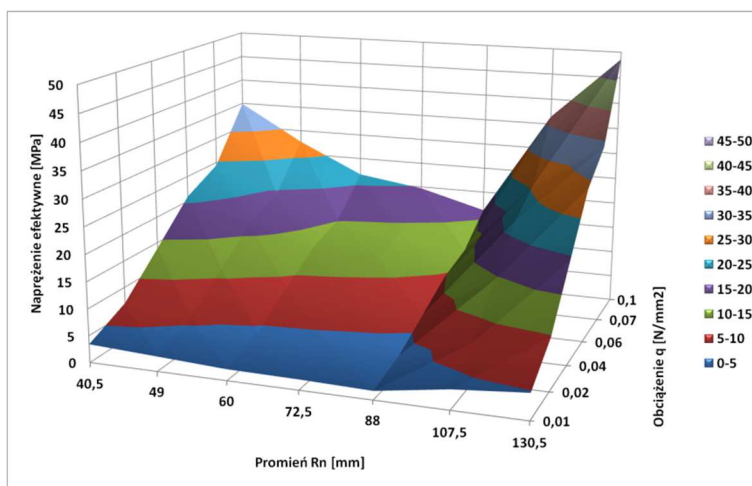
Numer strefy	Wartość naprężenia efektywnego σ_e , MPa	
	σ_e^S dla płyty swobodnie podpartej	σ_e^U dla płyty utwierdzonej
S1	28,90	48,60
S2	103,83	36,50
S3	117,11	16,20
S4	150,90	19,70
S5	161,58	21,60
S6	162,63	27,60
S7	172,70	34,90

Porównanie wartości naprężenia efektywnego według hipotezy Hubera-Misesa, uzyskanych obliczeniowo metodą elementów skończonych w kołowej osiowoosymetrycznej płycie perforowanej swobodnie podpartej oraz utwierdzonej na całym obwodzie i obciążonej ciśnieniem hydrostatycznym q_i na całej powierzchni płyty przedstawiono na rys. 7-9.



Rys. 7. Rozkład naprężenia efektywnego σ_e^S według kryterium wyężeniowego Hubera-Misesa dla kołowej osiowoosymetrycznej płyty perforowanej, swobodnie podpartej i obciążonej ciśnieniem hydrostatycznym q_i , wyznaczony numerycznie, gdzie S – swobodne podparcie

Fig. 7. Distribution of the equivalent stress σ_{eq}^S using the Huber-Mises hypothesis for a circular axisymmetric perforated plate, simply supported and loaded with hydrostatic pressure q_i , numerically determined, where S – simply supported

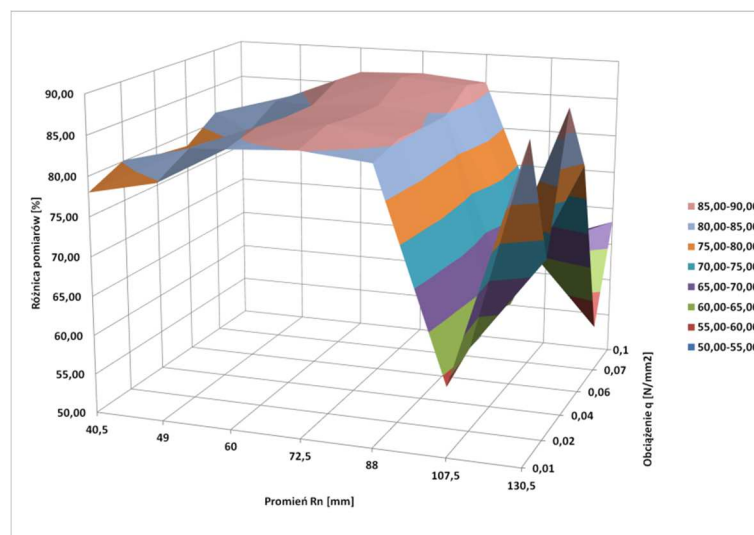


Rys. 8. Rozkład naprężenia efektywnego σ_e^U według kryterium wyężeniowego Hubera-Misesa dla kołowej osiowosymetrycznej płyty perforowanej, utwierdzonej i obciążonej ciśnieniem hydrostatycznym q_i , wyznaczony numerycznie, gdzie U – utwierdzenie

Fig. 8. Distribution of the equivalent stress σ_{eq}^U using the Huber-Misses hypothesis for circular axisymmetric perforated plate, fixed and loaded with hydrostatic pressure q_i , numerically determined, where U – fixed

Uzyskane wyniki obliczeń wskazują, że warunki brzegowe podparcia płyty perforowanej wywierają istotny wpływ na rozkład i wartości naprężenia efektywnego. Swobodne podparcie kołowej osiowosymetrycznej płyty perforowanej na całym obwodzie powoduje znaczne zwiększenie wartości naprężenia w odniesieniu do płyty perforowanej utwierdzonej na całym obwodzie. W przypadku działania ciśnienia o wartościach: $q_1 = 0,01$ N/mm²; $q_2 = 0,02$ N/mm²; $q_3 = 0,04$ N/mm²; $q_4 = 0,06$ N/mm²; $q_5 = 0,07$ N/mm²; $q_6 = 0,1$ N/mm² w strefie siódmej przy promieniu otworu $d_4 = 6,5$ mm i promieniu okręgu, na którym znajduje się otwór $R_4 = 40,5$ mm, różnice między wartościami naprężenia efektywnego przy dwóch wariantach warunków brzegowych wynosiły odpowiednio: $\delta\sigma_e = 78,01\%$, $\delta\sigma_e = 80,11\%$, $\delta\sigma_e = 79,00\%$, $\delta\sigma_e = 78,40\%$, $\delta\sigma_e = 81,34\%$, $\delta\sigma_e = 79,79\%$.

W przypadku swobodnego podparcia płyty perforowanej w pierwszej strefie przy promieniu otworu $d_{10} = 20,5$ mm i promieniu okręgu, na którym znajduje się otwór $R_{10} = 130,5$ mm maksymalna wartość naprężenia efektywnego $\sigma_{e \max} = 62,40$ MPa. W strefie siódmej przy promieniu otworu $d_4 = 6,5$ mm i promieniu okręgu, na którym znajduje się otwór $R_4 = 40,5$ mm (najbliższej centralnej części płyty perforowanej) $\sigma_{e \max}$ było równe 182,30 MPa. W przypadku utwierdzenia płyty perforowanej, w pierwszej strefie przy promieniu otworu $d_{10} = 20,5$ mm i promieniu okręgu, na którym znajduje się otwór $R_{10} = 130,5$ mm maksymalna wartość naprężenia efektywnego $\sigma_{e \max} = 71,40$ MPa. W strefie siódmej przy promieniu otworu $d_4 = 6,5$ mm i promieniu okręgu, na którym znajduje się otwór



Rys. 9. Rozkład procentowej różnicy między wartościami naprężenia efektywnego $\delta\sigma_e$ dla kołowej osiowoosymetrycznej płyty perforowanej, swobodnie podpartej oraz utwierdzonej i obciążonej ciśnieniem hydrostatycznym q_i , wyznaczony numerycznie

Fig. 9. Distribution of the percentage difference between values of the equivalent stress $\delta\sigma_{eq}$ for circular axisymmetric perforated plate, simply supported and fixed under hydrostatic pressure q_i , numerically determined

$R_4 = 40,5$ mm (najbliższej centralnej części płyty perforowanej) wartość naprężenia efektywnego σ_{red} była kilkakrotnie mniejsza niż w innych obszarach. Wynika z tego, że nie tylko warunki brzegowe podparcia płyty mają istotny wpływ na rozkład naprężenia efektywnego w płycie perforowanej, ale również średnica otworu. Znaczne wartości naprężenia efektywnego σ_e są z reguły przyczyną tworzenia się mikropęknięć w strefie otworu. W przypadku działania obciążenia zmiennego cyklicznie mikropęknięcia zaczynają nukleować, rozwijać się, łączyć i w konsekwencji prowadzą do zniszczenia elementu maszyny lub elementu konstrukcji. W związku z tym bardzo istotne staje się wyznaczenie maksymalnej wartości naprężenia oraz miejsca koncentracji.

4. Podsumowanie

Warunki brzegowe podparcia kołowej osiowoosymetrycznej płyty perforowanej oraz średnica otworu mają istotny wpływ na rozkład naprężenia. Najbardziej niebezpiecznym miejscem w kołowej osiowoosymetrycznej płycie perforowanej podpartej swobodnie, charakteryzującym się największą koncentracją naprężenia, jest strefa siódma. W przypadku płyty utwierdzonej miejscem tym jest strefa pierwsza.

Największa różnica procentowa w wartościach naprężenia efektywnego, przy rozpatrywanych dwóch wariantach warunków brzegowych, wyniosła ok. 89%. Ocenę stanów elementów osiowosymetrycznych o charakterystycznej geometrii, poddanej działaniu obciążenia, należy prowadzić na podstawie analizy rozkładu naprężenia i poszukiwania stref jego koncentracji.

Literatura

- [1] Chudzik A., Świnarski J.: Effect of changes in the thickness of a perforated plate of the heat exchanger on its structural stability, *J. Theor. Appl. Mech.*, 42 (2004) 325-334.
- [2] Achtelik H., Gasiak G., Grzelak J.: Strength tests of axially symmetric perforated plates for chemical reactors: Part 1 – The simulation of stress state, *Int. J. Pressure Vessels Piping*, 85 (2008) 248-256.
- [3] Achtelik H., Gasiak G., Grzelak J.: Strength tests of axially symmetric perforated plates for chemical reactors: Part 2 – Experiments, *Int. J. Pressure Vessels Piping*, 85 (2008) 257-264.
- [4] Achtelik H., Gasiak G., Grzelak J.: Wytężenie i nośność płyt perforowanych obciążonych osiowosymetrycznie, *Studia i Monografie*, z. 171, OW PO, Opole 2005.
- [5] Achtelik H., Gasiak G., Sojka M.: Topografia trwałości zmęczeniowej kwadratowych płyt perforowanych przy obciążeniach cyklicznych, *XXI Symp. Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Bydgoszcz 2006, ss. 13-21.
- [6] Chudzik A., Niezgodziński T.: Badania płyt perforowanych z włoczonymi rurkami, *XIX Symp. Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego*, Jachranka 2000, ss. 410-415.
- [7] Niezgodziński M.E.: Obliczanie grubości ścian sitowych w zbiornikach ciśnieniowych, *Przegląd Mechaniczny*, z. 3 (1973) 102-105.
- [8] Niezgodziński M.E., Zwoliński W.: Obliczanie den sitowych usztywnionych przez płaszczyznę zbiornika, *Przegląd Mechaniczny*, z. 8 (1973) 273-275.
- [9] Cepkauskas M., Yang J.: Equivalent properties for perforated plates – an analytical approach, *18th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Beijing, 2005, pp. 1225-1235.
- [10] Meijers P.: Refined theory for bending and torsion of perforated plates. *J. Pressure Vessels Technol.*, 108 (1986) 425-429.
- [11] Ledwoń W., Achtelik H.: Experimental analysis of the state of stress of the axisymmetric perforated plates loaded with hydrostatic pressure, *Proc. 13th Int. Sci. Conf.*, Wrocław 2016, pp. 331-341.
- [12] Marne R.A.: Stress analysis of a perforated plate through experimental and computational methods, *Int. Eng. Res. J.*, 1 (2015) 482-487.
- [13] Baaijens F.P.T., Brekelmans W.A.M., Van Rens B.J.E.: Homogenization of the elastoplastic behavior of perforated plates, *Computer Structures*, 69 (1998) 537-545.

- [14] Dharmin P., Khushbu P.: A Review on stress analysis of an infinite plate with cut-outs, *Int. J. Sci. Res. Publications*, 2 (2012) 2250-3153.
- [15] Minguez J.M., Vogvell J.: Plater with holes under lateral load pressure. *Eng. Failure Analysis*, 4 (1998) 299-315.
- [16] Nakayama Y., Kodama A.: FEM analysis on elastic-plastic deformation of perforated sheets, *Metals Mater.*, 4 (1998) 319-321.
- [17] Purba R., Bruneau M.: Finite-Element investigation and design recommendations for perforated steel plate shear walls, *J. Structural Eng.*, 11 (2009) 1367-1376.
- [18] Shaterzadeh A., Behzad H., Shariyad M.: Stability analysis of composite perforated annular sector plates under thermomechanical loading by finite element method, *Int. J. Structural Stability Dynamics*, 18 (2010) 18501100.
- [19] Wastar S.D., Bharule A.: Stress analysis of finite plate with special shaped cutout, *I. J. Sci. Eng. Res.*, 3 (2014) 2347-3878.
- [20] Al-Hassami T.S., Karami K., Webb D.C.: Use of FEM in performance assessment of perforated plates subject to general loading conditions, *J. Pressure Vesels Piping*, 64 (1995) 137-152.
- [21] Andh U., Chavan S., Kulkarni S., Khurd S.: Stress analysis of perforated plates under uniaxial compression using FEA and photoelasticity, *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 3 (2016) 239-244.
- [22] Gasiak G., Ledwoń W.: Analiza numeryczna stanu naprężenia i ugięcia płyt perforowanych obciążonych siłą skupioną, *Górnictwo odkrywkowe*, Opole 2014, ss. 250-253.
- [23] Gasiak G., Ledwoń W.: Stan naprężenia i przemieszczenia prostokątnych płyt perforowanych poddanych obciążeniu normalnemu, *Konf. Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych*, Zakopane 2014, ss. 69-70.
- [24] Ledwoń W.: Numerical analysis of stress state and sag perforated plates loaded pressure introduction, *Logistyka*, 4 (2014) 9391-9396.

INFLUENCE FIXING MANNOR FOR CIRCULAR PERFORATED PLATES ON STRESS CONCENTRATION HYDROSTATIC PRESSURES

S u m m a r y

The paper presents the influence of boundary conditions on the location of stress concentration zones and theirs values employing a circular axisymmetric perforated plate, simply supported and fixed and loaded with hydrostatic pressure. The finite element method offered by the Femap software was used for numerical calculations. The test plate with diameter $D = 300$ mm had ten holes. On the first inner measuring circle, the plate had openings with diameter $d_1 = 3,5$ mm and holes on the tenth outside circle with diameter $d_{10} = 20,5$ mm. The results of numerical calculations for a plate with simply supported were compared with the results obtained for the fixed plate. In the case of a simply supported plate, the maximum stress concentration occurred in zone 7 and was

represented by value of $\sigma_{eq \max} = 182,30$ MPa. In the case of plate with bounded edges, the maximum value of stress occurred in zone 1 and was equal to $\sigma_{eq \max} = 71,40$ MPa.

Keywords: circular plate, perforated plate, simply supported, fixed, equivalent stress, numerical calculation

DOI: 10.7862/rm.2019.04

Otrzymano/received: 11.01.2019 r.

Zaakceptowano/accepted: 24.06.2019 r.