

Najbardziej niekorzystne imperfekcje geometryczne stalowych powłok sferycznych

Paweł Błażejowski¹, Jakub Marcinowski²

^{1,2} Instytut Budownictwa, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski,
e-mail: ¹P.Blazejewski@ib.uz.zgora.pl; ²J.Marcinowski@ib.uz.zgora.pl

Streszczenie: Stalowe powłoki sferyczne obciążone ciśnieniem zewnętrznym narażone są na utratę stateczności, która najczęściej decyduje o ich nośności. Występujące w tego typu konstrukcjach imperfekcje geometryczne mogą znacząco wpłynąć na obniżenie nośności powłoki. Analizowane dotychczas formy imperfekcji, w postaci pierwszej i drugiej formy wyboeczeniowej, nie wyczerpują możliwych do zaobserwowania w rzeczywistości niedoskonałości geometrycznych. Zestawienie i porównanie innych, spotykanych w praktyce imperfekcji geometrycznych pozwoli określić najbardziej niekorzystną z nich. Dodatkowe uwzględnienie normowych amplitud imperfekcji, dla każdej z form, pozwoliło określić przedziały amplitud, w których dana forma jest rzeczywiście najbardziej niekorzystna. Taka informacja pozwoli inżynierom uniknąć błędnego przyjęcia najbardziej niekorzystnej imperfekcji dla założonej klasy wykonania powłoki sferycznej.

Słowa kluczowe: powłoki sferyczne, utrata nośności, MES, imperfekcje geometryczne

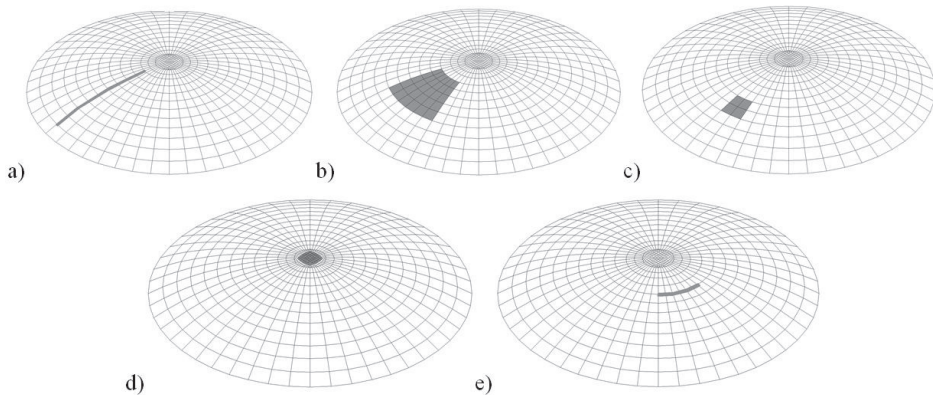
1. Wprowadzenie

Głównym kryterium określającym nośność stalowych powłok sferycznych obciążonych równomiernie rozłożonym ciśnieniem zewnętrznym, jest ich stateczność. Zapisy zawarte w [1] dokładnie określają jakich procedur należy użyć w celu wyznaczenia granicznego stanu niestateczności LS3. Procedury te, bazujące na zaawansowanych analizach numerycznych, wymuszają na inżynierach znajomość złożonych zagadnień MES. Dlatego też autorzy w pracy [2] zaproponowali zastosowanie łatwych w użyciu wzorów określających krytyczną nośność wyboeczeniową powłoki p_{Rcr} oraz plastyczną nośność powłoki p_{Rpl} . Wyznaczenie ich jest pierwszym podstawowym krokiem do oszacowania końcowej nośności wyboeczeniowej. Kolejnym równie ważnym zagadnieniem jest określenie nośności wyboeczeniowej powłoki uwzględniającej nieliniowość materiałową i geometryczną. Nośność tę można uzyskać z analiz GMNIA definiując w numerycznym modelu obliczeniowym wstępne imperfekcje geometryczne powłoki oraz wprowadzając nieliniowy model materiałowy. Procedurę tę przedstawiono również w pracy [2], a szerzej opisano w pracy [3].

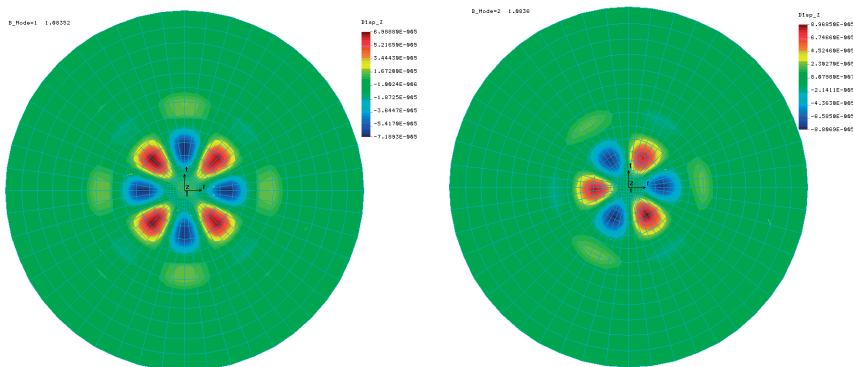
Prrowadzone dotychczas badania, bazujące na analizach GMNIA, uwzględniały jedynie imperfekcje geometryczne w postaci pierwszej i drugiej formy wyboeczeniowej otrzymanej z analizy LBA. Nie rozpatrywano innych, mogących wystąpić w rzeczywistości, form imperfekcji. Dlatego też autorzy niniejszej pracy postanowili poddać wnikliwej analizie 7 różnych form imperfekcji o amplitudach w zakresie $0,01t - 2,0t$. Przeprowadzenie tego typu porównania pozwoli określić, która forma imperfekcji w największym stopniu wpływa na redukcję końcowej nośności wyboeczeniowej i w jakim zakresie amplitudy ona występuje.

2. Rodzaje rozpatrywanych imperfekcji

W pracy rozpatrywanych będzie siedem różnych form imperfekcji o zmiennej amplitudzie. W pierwszej kolejności analizie poddane zostaną imperfekcje wynikające z możliwości pojawienia się niedoskonałości, związanych z jakością i technologią wykonania powłok sferycznych, a następnie imperfekcje w postaci pierwszej i drugiej formy wybozczeniowej analizowanego układu.



Rys. 1. Rozpatrywane formy imperfekcji



Rys. 2. Pierwsza i druga forma wybozczeniowa

Pierwszą badaną imperfekcją geometryczną jest imperfekcja w postaci liniowego południkowego zakłębnięcia, odpowiadająca ewentualnym niedoskonałościom powstałym przy pracach spawalniczych. Zakłębnięcie to rozciąga się na prawie całej długości tworzącej powłoki (Rys 1a). Druga imperfekcja odpowiada zakłębnięciu powierzchniowemu powłoki sferycznej. Zakłębnięcie to roboczo nazwane DIMPLE znajduje się w 2/3 długości tworzącej, a jego powierzchnia wynosi około $2,10 \text{ m}^2$ dla powłoki o powierzchni $65,63 \text{ m}^2$. (Rys. 1b). Trzecią imperfekcją jest również zakłębnięcie powierzchniowe, tym razem o mniejszej powierzchni oddziaływania, około $0,40 \text{ m}^2$ (Rys. 1c). Czwarta imperfekcja zlokalizowana jest na szczycie powłoki. Ma ona postać zakłębnięcia powierzchniowego o powierzchni około $0,12 \text{ m}^2$ (Rys. 1d). Piątą imperfekcją odpowiada liniowemu zakłębnięciu równoleżnikowemu i podobnie jak pierwsza symulować ma niedoskonałości spowodowane pracami spawalniczymi. Rozciąga się ona na długość około jednego metra (Rys. 1e). Dwie ostatnie z rozpatrywanych imperfekcji (6 i 7) odpowiadają pierwszej i drugiej formie

wyoboczeniowej analizowanej powłoki. Były one przedmiotem rozważań zawartych w pracach [2] i [3]. Przedstawiono je na rysunku 2.

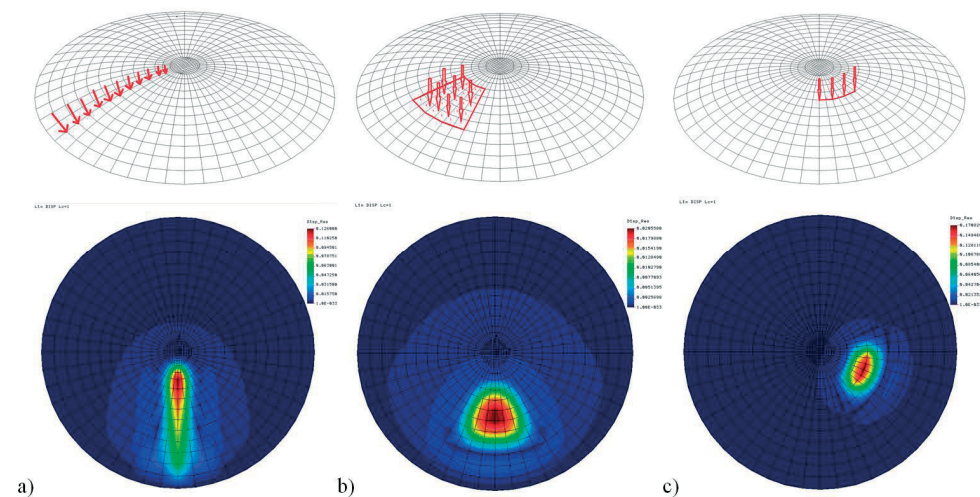
3. Tworzenie geometrii na potrzeby analizy GMNIA

W celu stworzenia wyjściowych geometrii powłok sferycznych, uwzględniających zakładane formy imperfekcji, posłużono się systemem COSMOS/M bazującym na metodzie elementów skończonych [4]. W modelu dyskretnym składającym się z 720 elementów skończonych o łącznej liczbie 4182 stopni swobody, wykorzystano powłokowe czterowęzłowe elementy skończone o nazwie SHELL 4.

Prowadzone dotychczas prace obejmują swym zakresem jedną rodzinę powłok sferycznych o ustalonych parametrach: promień $R = 8000$ mm, grubość $t = 16$ mm, granica plastyczności materiału $f_{yk} = 235$ MPa, moduł Young'a $E = 205$ GPa, współczynnik Poissona $\nu = 0,3$, połówkowy kąt rozwarcia powłoki $\varphi = 30^\circ$, sztywne zamocowanie określane symbolem BC2 w [1]. Przedmiotem rozważań są powłoki obciążone równomiernie rozłożonym ciśnieniem zewnętrznym.

Przystępując do analiz GMNIA dodatkowo zdefiniowano materiał biliniowy o niewielkim module wzmocnienia wynoszącym $E_T = 205$ Pa oraz wprowadzono kolejno różne formy imperfekcji geometrycznych o zmiennych amplitudach.

Kształty poszczególnych form imperfekcji uzyskano wykonując sprężyste analizy statyczne powłok obciążonych w sposób pokazany na rysunkach 3a-c. Wynikiem tych analiz były przemieszczenia (Rys. 3a-c), które po znormalizowaniu do żądanej wielkości amplitudy (w zakresie $0,1t$ do $2,0t$) nakładano na geometrię wyjściową. Ten stan był wolny od naprężeń początkowych.

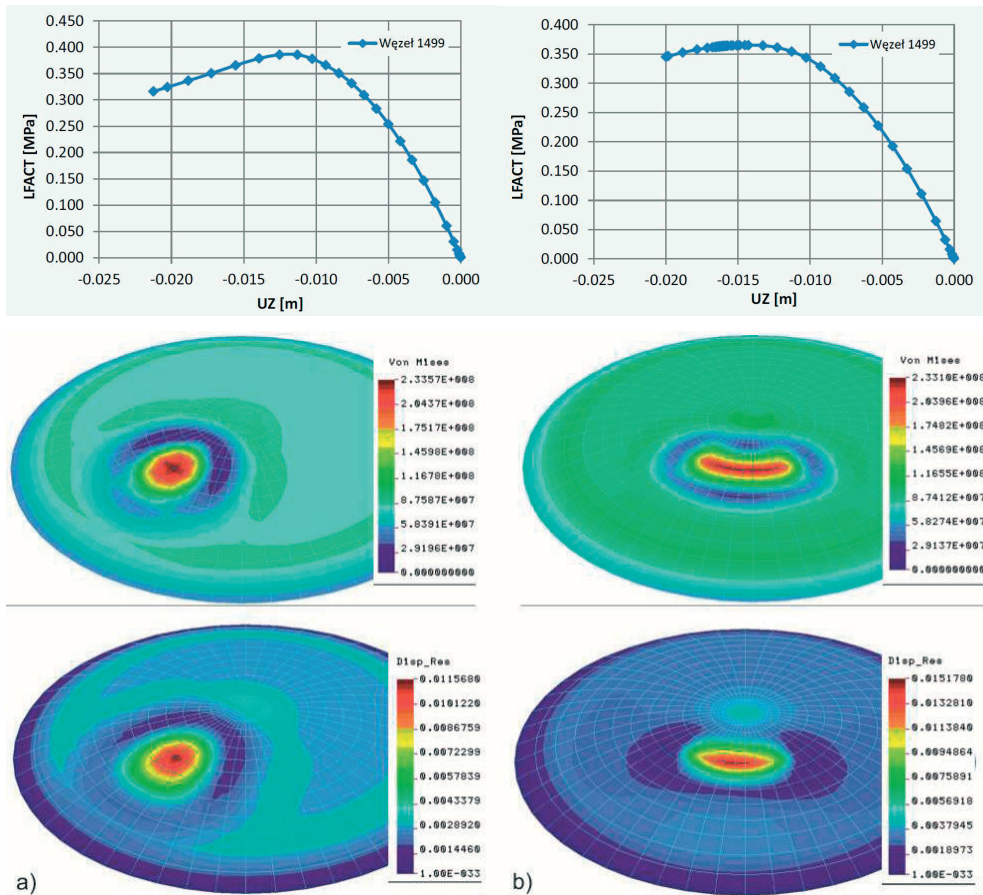


Rys. 3. Schematy obciążenia powłok sferycznych i odpowiadające im przemieszczenia

4. Analizy GMNIA

Stworzenie geometrii poszczególnych form imperfekcji o żądanych amplitudach oraz zdefiniowanie materiału biliniowego było podstawą do rozpoczęcia analiz GMNIA dla rozpatrywanej rodziny powłok sferycznych. W analizach tych za ostateczny poziom wyczerpania nośności wyoboczeniowej uznawano wartość obciążenia, przy którym dochodzi

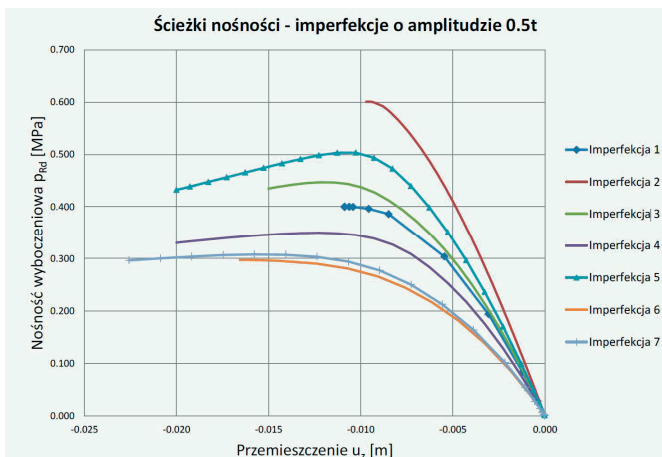
do całkowitego uplastycznienia. Za tę wartość uznawano moment, gdy wykres krzywej nośności dla analizowanego węzła wyraźnie się przelamywał lub przybierał postać linii poziomej, nie wykazując tendencji do wzmocnienia. Przykładowe wyniki z analizy GMNIA pokazano poniżej na rysunku 4, gdzie podpunkt *a* przedstawia imperfekcję 2, a podpunkt *b* – imperfekcję 5. Na rysunkach tych widać wykresy krzywych nośności jak i formy odkształcenia powłoki w chwili całkowitego wyczerpania nośności wyobczeniowej oraz zakres i wartość naprężeń uogólnionych wynikających z hipotezy Hubera-Misesa-Hencky’ego.



Rys. 4. Analiza GMNIA dla powłok z imperfekcją 2 i 5 o amplitudzie równej $1,0t$

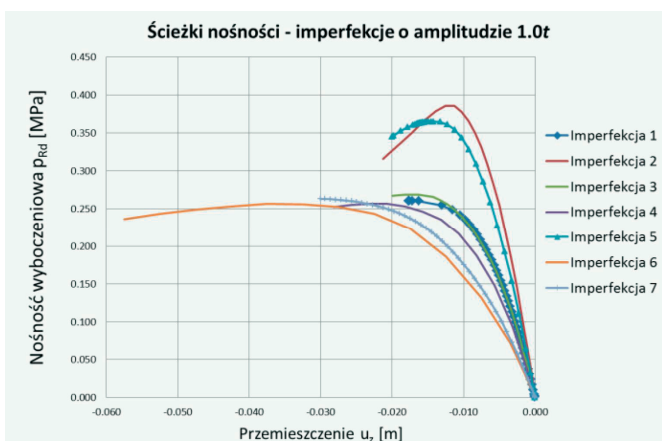
Jak można zaobserwować na powyższych wykresach, przedstawiających ścieżki nośności powłoki sferycznej, nie ma żadnych wątpliwości co do określenia poziomu ciśnienia powodującego wyczerpanie nośności analizowanego układu. Z kolei forma odkształceń w końcowym momencie przybiera spodziewany kształt, zgodny z zadeklarowaną imperfekcją.

Przydatnym zabiegiem, przy określaniu najbardziej niekorzystnej formy imperfekcji, jest zestawienie na jednym wykresie ścieżek nośności analizowanych geometrii o tej samej wartości amplitudy. Zestawienie takie pozwoli jednoznacznie określić którą formę imperfekcji obciążona analizowaną wielkością amplitudy jest w tym momencie najbardziej niekorzystna dla rozpatrywanego układu.



Rys. 5. Nośność wybojeniowa p_{Rd} w funkcji przemieszczenia. Amplituda imperfekcji wielkości $0,5t$

Na rysunku 5, który przedstawia ścieżki nośności powłok sferycznych z zadanymi imperfekcjami o jednakowej amplitudzie, wynoszącej $0,5t$, doskonale widać, która z form jest najbardziej niekorzystna. Jest to imperfekcja 6 w postaci pierwszej formy wybojeniowej rozpatrywanego układu. Wystąpienie tego rodzaju imperfekcji prowadzi do obniżenia końcowej nośności wybojeniowej powłoki do wartości $p_{Rd} = 297$ kPa. Z kolei formą imperfekcji, która w najmniejszym stopniu wpływa na spadek nośności rozpatrywanej powłoki jest imperfekcja 2 w postaci powierzchniowego zakłębienia zajmującego około $2,10$ m². Powłoka sferyczna z taką imperfekcją o amplitudzie $0,5t$ charakteryzuje się nośnością $p_{Rd} = 601$ kPa. Należy również zwrócić uwagę na wartość przemieszczenia u_z w chwili wyczerpania nośności w poszczególnych przypadkach. Najmniejszą wartością przemieszczenia u_z przy której powłoka nie wykazuje zdolności do dalszego przenoszenia obciążenia jest wartość $u_z = -0,009$ m. Ma to miejsce przy drugiej imperfekcji o kształcie dużego powierzchniowego zakłębienia. Imperfekcje 6 i 7 najbardziej obniżają nośność układu lecz ma to miejsce przy znacznie większym przemieszczeniu.

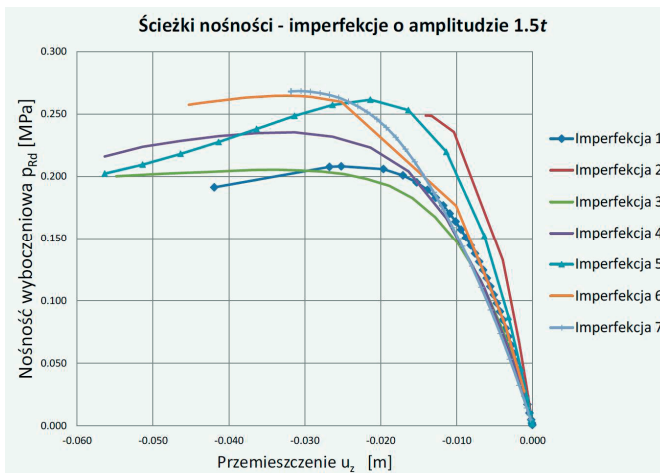


Rys. 6. Nośność wybojeniowa p_{Rd} w funkcji przemieszczenia. Amplituda imperfekcji wielkości $1,0t$

Zwiększenie amplitudy imperfekcji do wartości $1,0t$ powoduje zmianę przebiegu ścieżek równowagi (Rys. 6). Uwidaczniają się dwie grupy ścieżek: pierwsza grupa wykazująca wyższą nośność powłoki wynoszącą $p_{Rd} = 365-386$ kPa, obejmuje imperfekcje 2 i 5.

Nośności te uzyskiwane są przy małym dopuszczalnym przemieszczeniu u_z . Druga grupa krzywych, które wykazują bardzo zbliżony poziom nośności zawiera w sobie dotychczas najbardziej niekorzystne imperfekcje 6 i 7 oraz imperfekcje 1, 3, 4. Nośność ich zawiera się w przedziale $p_{Rd} = 255-265$ kPa. W drugim przypadku wyczerpanie nośności nastąpi przy różnych wartościach przemieszczenia u_z , od $-0,011$ aż do $-0,038$ m.

Dalsze zwiększenie wielkości amplitudy, do wartości $1,5t$, prowadzi do objawienia się innych najbardziej niekorzystnych imperfekcji analizowanego układu. Zostało to przedstawione na rysunku 7. Wystąpienie imperfekcji 6 i 7, uważanych dotychczas za najgorsze, sprawia że nośność powłoki przybiera wartości najwyższe z rozpatrywanych $p_{Rd} = 268$ kPa. Wyczerpanie nośności zachodzi przy przemieszczeniu około $u_z = -0,030$ m. Przy analizowanej wartości amplitudy za najbardziej niekorzystne formy imperfekcji uważa się imperfekcję 1 w postaci południkowego zakłębienia, oraz imperfekcję 3 w postaci małego powierzchniowego zakłębienia. Najniższa wartość nośności wynosi $p_{Rd} = 205$ kPa.

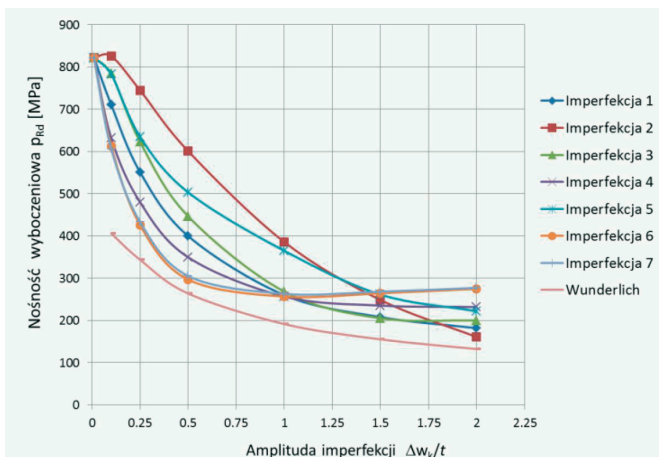


Rys. 7. Nośność wyoboczeniowa p_{Rd} w funkcji przemieszczenia. Amplituda imperfekcji wielkości $1,5t$

Na podstawie przedstawionych powyżej analiz można jednoznacznie stwierdzić jakie formy imperfekcji są najbardziej niekorzystne dla analizowanej rodziny powłok sferycznych. Rysunki 4-6 trafnie ukazują w jaki sposób zmienia się wybór najbardziej niekorzystnej imperfekcji lecz zestawienie wszystkich krzywych nośności na jednym wykresie, na którym uzależnimy nośność wyoboczeniową p_{Rd} od wielkości amplitudy $\Delta w_k/t$ pozwoli spojrzeć na zagadnienie bardziej globalnie. Wówczas łatwiej będzie można określić, które formy są najbardziej niekorzystne i w jakim zakresie amplitud one występują.

Rozpatrując rezultaty analiz GMNIA z różnymi imperfekcjami o zmiennej wartości amplitudy, od $0,01t$ do $2,0t$ można zaobserwować zmianę najbardziej niekorzystnej formy imperfekcji dla badanej powłoki sferycznej (Rys. 8). W zakresie od $0,01t$ do $1,0t$ imperfekcją, która powoduje uzyskanie najniższych wartości nośności wyoboczeniowej powłoki jest imperfekcja w postaci pierwszej i drugiej formy wyoboczeniowej. Następnie w punkcie o amplitudzie równej $1,0t$ dochodzi do zrównania poziomów nośności p_{Rd} w większości przypadków. Widać to także na rysunku 6. Kolejny wyraźny przedział, w którym uwidacznia się najbardziej niekorzystna imperfekcja to przedział pomiędzy $1,0t$ a $1,75t$. W tym zakresie imperfekcje 1 i 3 powodują obniżenie końcowej wartości nośności do najniższych z rozpatrywanych w tym przedziale. Wystąpienie imperfekcji o amplitudzie większej aniżeli $1,75t$ sprawia, iż najbardziej niekorzystną staje się forma odpowiadająca dużemu po-

wierzchniowemu zakłębnięciu. Jest to imperfekcja 2. W tym zakresie wyraźnie widać mocną tendencję spadku wartości nośności wybocheniowej powłoki. Możliwe jest uzyskanie niższych wartości aniżeli te uzyskane za pomocą wzorów rekomendowanych w EDR 5th [5], których autorem jest W. Wunderlich. Krzywą nośności wyznaczoną zgodnie z zapisami zawartymi w [5] pokazano na rysunku 8, a sposób jej wyznaczania przedstawiono w pracy [2]. Krzywa ta ma charakter obwiedni krzywych wyznaczonych przez Autorów. Dla znacznego zakresu amplitud imperfekcji szacuje nośność na poziomie znacznie niższym niż by to wynikało z rozwiązań zaprezentowanych w tej pracy. Oznacza to, że mamy do czynienia z pewnym niedoszacowaniem nośności.



Rys. 8. Nośność wybocheniowa P_{Rd} w funkcji amplitudy imperfekcji

5. Podsumowanie

Próba określenia najbardziej niekorzystnej imperfekcji geometrycznej, występującej w konkretnej rodzinie powłok sferycznych, pozwoliła na zdefiniowanie jej formy, jak również określenie zakresów amplitud w jakich będzie ona występowała. Okazało się, że zmiana wartości amplitudy wpływa znacząco na wybór imperfekcji prowadzącej do największego obniżenia nośności wybocheniowej. Wyszczególniono trzy przedziały: od $0,01t$ do $1,0t$ w którym to najbardziej niekorzystna jest imperfekcja w postaci pierwszej i drugiej formy wybocheniowej; od $1,0t$ do $1,75t$, gdzie najbardziej niekorzystne są imperfekcje w postaci południkowego oraz małego powierzchniowego zakłębnięcia; oraz zakres powyżej $1,75t$, gdzie najbardziej niekorzystne jest duże powierzchniowe zakłębnięcie powłoki. Takie wyszczególnienie, w praktyce, daje inżynierom możliwość konkretnego przyjęcia najbardziej niekorzystnej imperfekcji i jej amplitudy w analizowanym przez siebie zadaniu. Ponadto wyznaczenie powyższych przedziałów może stać się przyczynkiem do dyskusji nad zmianą wartości amplitud w odniesieniu do klasy jakości wykonania stalowych powłok sferycznych. W chwili obecnej obowiązuje podział na trzy klasy jakości wykonania: klasa A (najwyższa), B (wysoka), C (normalna) dla których tolerancje odpowiednio wynoszą: $0,006\text{ m}$; $0,010\text{ m}$; $0,016\text{ m}$. Należy przy tym zauważyć, że nie są one uzależnione od grubości wykonywanej powłoki, a fakt ten może znacząco obniżyć nośność projektowanej konstrukcji.

Literatura

- 1 EN 1993-1-6. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-6: Strength and stability of shell structures.
- 2 Błażejowski P., Marcinowski J. A new approach to the buckling resistance assessment of pressurized spherical shells. Shell Structures, Theory and Applications - SSTA : proceedings of the 10th conference. Gdańsk, Polska, 2013 .- London : Taylor & Francis Group, 2014, s. 179-182.
- 3 Błażejowski P., Marcinowski J. Buckling resistance of steel spherical roofs subjected to an external pressure. Proceedings of stability of structures : XIII-th symposium. Zakopane, Polska, 2012 . Łódź : Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Politechniki Łódzkiej, 2012, s. 185-192.
- 4 COSMOS/M, Finite Element Analysis System, Version 2.5, Structural Research and Analysis Corporation, Los Angeles, California, 1999.
- 5 Buckling of Steel Shells. European Design Recommendations 5th Edition. Eds: J. M. Rotter and H. Schmidt. Published by ECCS, 2008.

Most adverse geometrical imperfections of steel spherical shells

Paweł Błażejowski¹, Jakub Marcinowski²

^{1,2} *Institute of Building Engineering, Civil and Environmental Engineering Faculty,
University of Zielona Góra, e-mail: ¹P.Blazejowski@ib.uz.zgora.pl; ²J.Marcinowski@ib.uz.zgora.pl*

Abstract: Steel, spherical shells subjected to an external pressure are exposed to the loss of stability and such a phenomenon determines the global resistance of such shells. Unavoidable, geometric imperfections present in this class of shells affect significantly global resistance of shells. The imperfection form corresponding to the first and second buckling modes, analysed in previous works of authors, do not cover all possible and observed in reality imperfection modes. The specification and comparison of other imperfections encountered in practice will allow to identify the most adverse ones. Additionally to the imperfection forms also their amplitudes were analysed. Consequently the ranges in which considered imperfection form is in fact the most adverse were determined. On the basis of this knowledge, the designer can choose the most adverse imperfection mode for given quality fabrication class of the shell.

Keywords: spherical shell, geometrical imperfections, FEM, the worst imperfection, buckling resistance, GMNIA.



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Pierwszy z autorów jest stypendystą w ramach Poddziałania 8.2.2 „Regionalne Strategie Innowacji”, Działania 8.2 „Transfer wiedzy”, Priorytetu VIII „Regionalne Kadry Gospodarki” Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Unii Europejskiej i z budżetu państwa