



Odpowiedź dynamiczna cienkościennych powłok stożkowych obciążonych impulsem ciśnienia

JACEK JANKOWSKI, TOMASZ KUBIAK

Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji,
90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15

Streszczenie. W pracy zajęto się dynamiczną odpowiedzią cienkich powłok stożkowych poddanych impulsowemu obciążeniu ciśnieniem. Wymiary powłok są tak dobrane, aby mogły być stosowane jako pochłaniacze energii — panele stanowiące osłonę przeciwko fali uderzenia od wybuchu. Rozpatrzono również możliwość powstania zjawiska wyboczenia dynamicznego. Założono izotropowy materiał powłok (stal lub kompozyt) o charakterystyce biliniowej. Badano wpływ wstępnych imperfekcji kształtu na mechanizm zniszczenia. Analizy przeprowadzono, wykorzystując metodę elementów skończonych — program ANSYS 11.0.

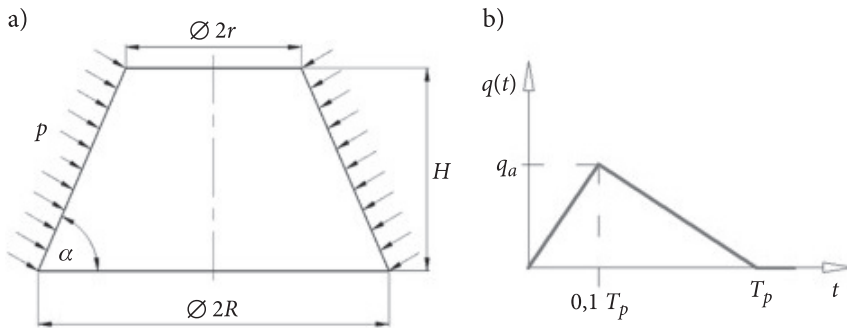
Słowa kluczowe: obciążenie impulsowe, powłoki stożkowe, wyboczenie dynamiczne, dynamiczna odpowiedź, absorbery energii

1. Wprowadzenie

Zjawisko wyboczenia cienkich powłok poddanych impulsowi ciśnienia można znaleźć np. w pracach Volmira [9], Simitses [8], Błachut i Galletly [2] czy też Golzan i Showkati [4], zajmowali się nim także Błachut i Galletly [2]. Porównanie wyników analizy numerycznej z badaniami eksperymentalnymi cienkich powłok stożkowych obciążonych impulsem ciśnienia można znaleźć w pracy [2]. Wyboczenie konstrukcji może być wykorzystane podczas konstruowania absorberów energii [1]. Taki cel postawili sobie również autorzy niniejszej pracy. Zajęto się zbadaniem wpływu geometrii powłoki stożkowej (promień dolnej podstawy i grubość), własności materiałowych oraz imperfekcji kształtu na proces zniszczenia. Analizie poddana została powłoka stożkowa o wymiarach przedstawionych na rysunku 1a,

przy założeniu, że jej wysokość jest stała i wynosi 40 mm. Założenie to determinowane było sposobem wykorzystania konstrukcji, którą stanowiły powłoki stożkowe rozmieszczone blisko siebie, tworzące panelową ochronę przed wybuchem. Taki panel mógłby stanowić użyteczne narzędzie do osłony pojazdów (w szczególności od spodu) jak również obiektów stałych. Atutem konstrukcji cienkościennej jest niewielka masa, łatwy montaż i ewentualna wymiana.

Obciążenie w postaci trójkątnego przebiegu czasowego (rys. 1b) impulsu ciśnienia odpowiadającego obciążeniu pochodzącemu od fali uderzeniowej powstałej po eksplozji, np. materiału wybuchowego, zamodelowano podobnie jak w pracach [3, 7].



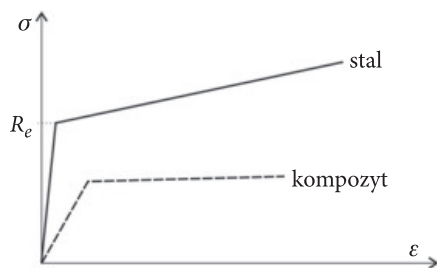
Rys. 1. Powłoka stożkowa: a) wymiary geometryczne i sposób obciążenia; b) przebieg czasowy impulsu obciążenia: $p = q_a$ — amplituda impulsu, T_p — czas trwania impulsu

Z prac [5, 8, 9] wynika, że impuls obciążenia, którego czas trwania jest zbliżony do okresu podstawowych drgań własnych konstrukcji, może powodować wybočenje dynamiczne. Dlatego też w pracy przyjęto, że czas trwania impulsu T_p jest równy okresowi drgań własnych. Przyjęto również, że materiał powłok jest izotropowy, o własnościach odpowiadających stali lub kompozytowi. W obu przypadkach założono charakterystyki biliniowe materiałów (rys. 2), dla których własności liczbowe zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Przyjęte do obliczeń własności materiałowe

Rodzaj materiału	moduł Younga E [MPa]	liczba Poissona ν [-]	moduł styczny E_t [MPa]	granica plastyczności R_e [MPa]	gęstość ρ [kg/m ³]
stal	$2 \cdot 10^5$	0,3	10^3	200	7850
kompozyt	$9 \cdot 10^3$	0,27	10	84	1400



Rys. 2. Charakterystyki materiałowe

Każdą powłokę rozpatrywano jako podpartą przegubowo na krawędzi dolnej podstawy. Obliczenia przeprowadzono metodą elementów skończonych, przy użyciu pakietu ANSYS 11.0. Wyznaczono przebiegi czasowe takich wielkości jak: reakcja podłoża R_y [N], największe naprężenia zredukowane $\sigma_{red\ max}$ [MPa], największe wypadkowe przemieszczenia u_{sum} [mm] oraz energia odkształceń (sprężystych i plastycznych) E [J] dla całej powłoki, w zależności od wielkości wstępnych imperfekcji kształtu, których kształt odpowiadał postaci dla najmniejszej częstości drgań własnych. Wyniki obliczeń dla obciążeń statycznych zweryfikowano z wynikami (metoda analityczno-numeryczna) zamieszczonymi w pracach [6, 9] pod kątem zastosowanego elementu skończonego.

W niniejszej pracy badano także przydatność powłok stożkowych jako absorberów energii [1], pochodzącej od impulsowego oddziaływania ciśnienia, z punktu widzenia zdolności zamiany tej energii na energię odkształceń plastycznych.

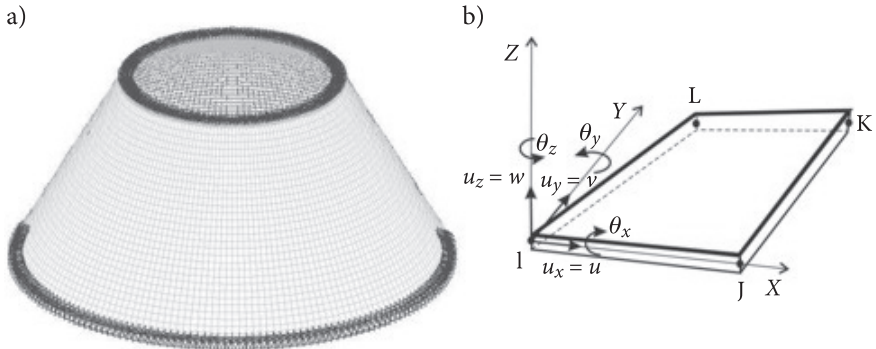
2. Model numeryczny

Obliczenia numeryczne przeprowadzono, wykorzystując komercyjne oprogramowanie ANSYS 11, posługujące się metodą elementów skończonych.

Model numeryczny zbudowano w oparciu o założoną geometrię analizowanej powłoki (rys. 3). Korzystając z wcześniejszych doświadczeń z analizy stateczności oraz wyboczenia dynamicznego [5], gęstość siatki dobrano tak, aby odkształcenia w kierunku normalnym do powłoki mogły być poprawnie odwzorowane. Założono dla jednej półfali sinusoidy, powstającej podczas wyboczenia czy odkształceń pokrywających, 10 elementów skończonych. Starano się tak dobrać siatkę, aby większość elementów miała współczynnik kształtu bliski jedności (stosunek długości boków elementów prostokątnego). Sposób dyskretyzacji przedstawiono na rysunku 3a.

Powłokę stożkową podzielono na elementy powłokowe czterowęzłowe o sześciu stopniach swobody SHELL43 (rys. 3b).

Przegubowy sposób podparcia zrealizowano w ten sposób, że węzłom leżącym w płaszczyźnie dolnej podstawy stożka odebrano możliwość przemieszczenia



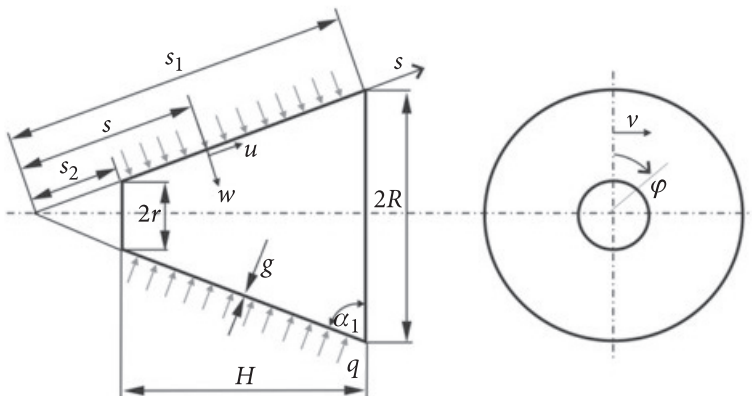
Rys. 3. Model powłoki: a) podzielony na elementy powłokowe; b) element skończony SHELL43

w trzech prostopadłych kierunkach. Natomiast dla węzłów położonych w płaszczyźnie zawierającej górną podstawę stożka przyjęto zerowe wartości przemieszczeń w dwu prostopadłych kierunkach leżących w płaszczyźnie tej podstawy.

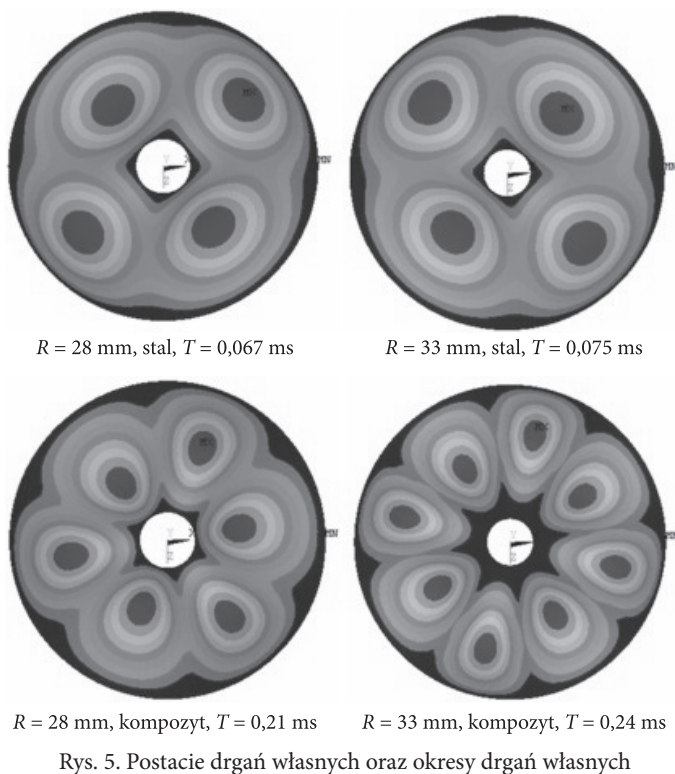
3. Wyniki obliczeń

Obliczenia wykonano dla powłok stożkowych o wysokości $H = 40$ mm, dla dwóch różnych promieni podstawy dolnej $R = 28$ mm lub $R = 33$ mm i jednakowych promieni podstawy górnej $r = 5$ mm. Grubość powłoki zależała od rodzaju materiału — dla kompozytu założono, że grubość wynosi $g = 2,1$ mm, a dla stali $g = 0,5$ mm. Sposób obciążenia i wymiary geometryczne analizowanej powłoki stożkowej przedstawiono na rysunku 4.

W pierwszym etapie obliczeń wyznaczono najniższe częstotliwości drgań własnych i odpowiadające im postacie drgań. Na rysunku 5 przedstawiono postacie drgań podstawowych powłok wraz z odpowiadającymi im okresami drgań własnych T [ms].

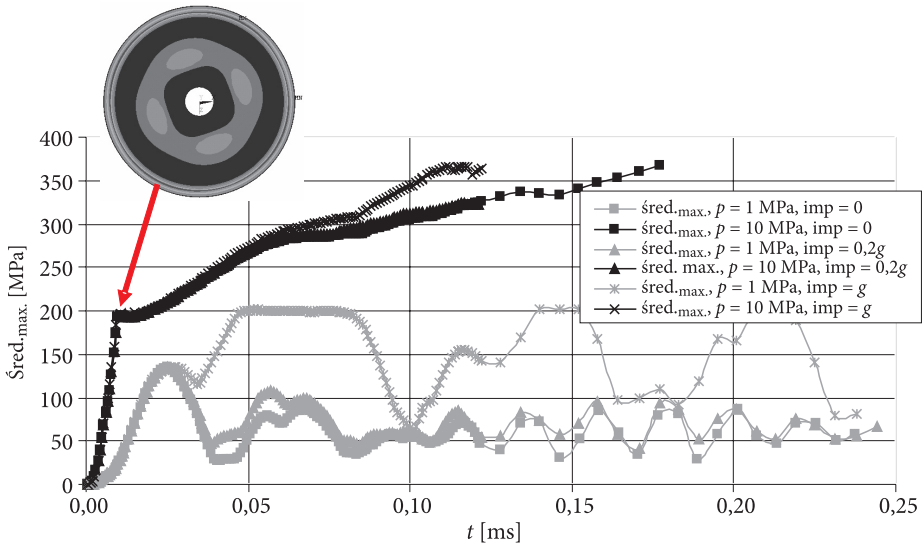


Rys. 4. Powłoka stożkowa — układ współrzędnych, przemieszczenia i sposób obciążenia

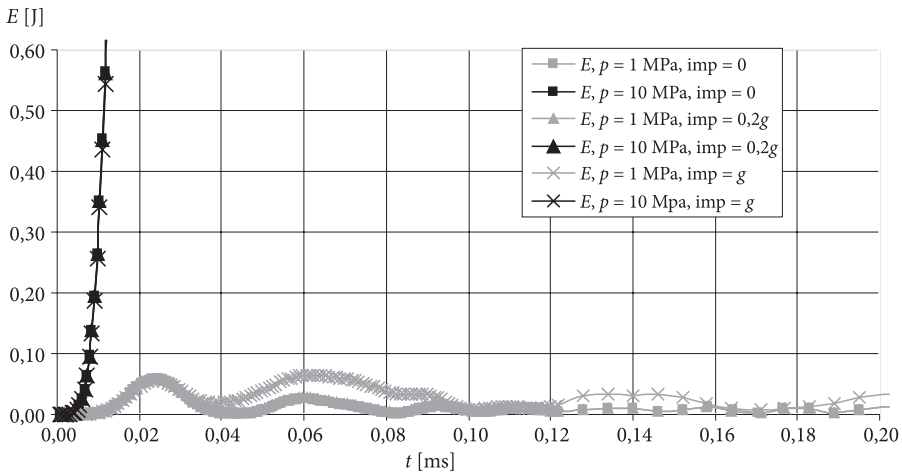


W kolejnym etapie, przy założeniu wstępnych imperfekcji kształtu, odpowiadających postaciom drgań własnych powłok (rys. 5) o amplitudzie równej: 0 (bez imperfekcji), $0,2g$ i g (g — grubość powłoki zależnie od rodzaju materiału) oraz przyjęciu równości okresów drgań własnych z czasem trwania impulsu $T_p = T$, wyznaczono przebiegi czasowe: energii odkształceń powłoki (obliczanej jako iloczyn naprężeń i odkształceń całkowitych w całej objętości powłoki), największych naprężeń zredukowanych Hubera, największych wypadkowych przemieszczeń, reakcji podłoża. Parametry te pozwalają jakościowo ocenić pracę konstrukcji, zwłaszcza w analizie pod obciążeniem zmiennym w czasie i w oparciu o pewne cechy i zjawiska towarzyszące takim obciążeniom. W dalszej części pracy zostaną zaprezentowane i omówione wyniki obliczeń.

Na rysunkach 6-9 przedstawiono przebiegi czasowe wielkości dla powłoki wykonanej z blachy stalowej dla promienia podstawy 33 mm. Wykresy sporządzono przy założeniu amplitudy ciśnienia 1 MPa i 10 MPa oraz przy istnieniu wstępnych imperfekcji kształtu lub ich braku (powłoka idealna). Analizując przebieg czasowy naprężeń zredukowanych, można zauważyć istotny wpływ na przebieg imperfekcji kształtu dla amplitudy ciśnienia 1 MPa. Imperfekcje w tym przypadku zwiększają amplitudę drgań swobodnych. Zjawisko to rozumiane jako zmniejszenie sztywności

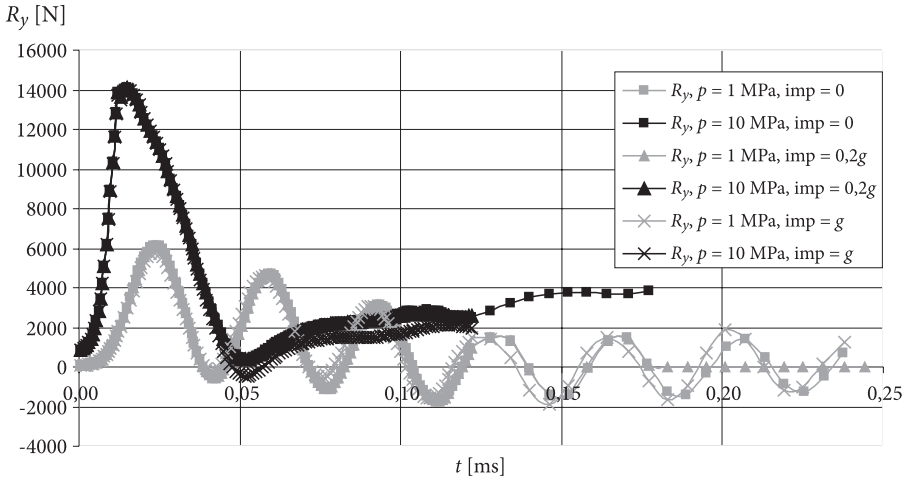


Rys. 6. Przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń zredukowanych wraz z rozkładem stref plastycznych w początkowej fazie uplastycznienia

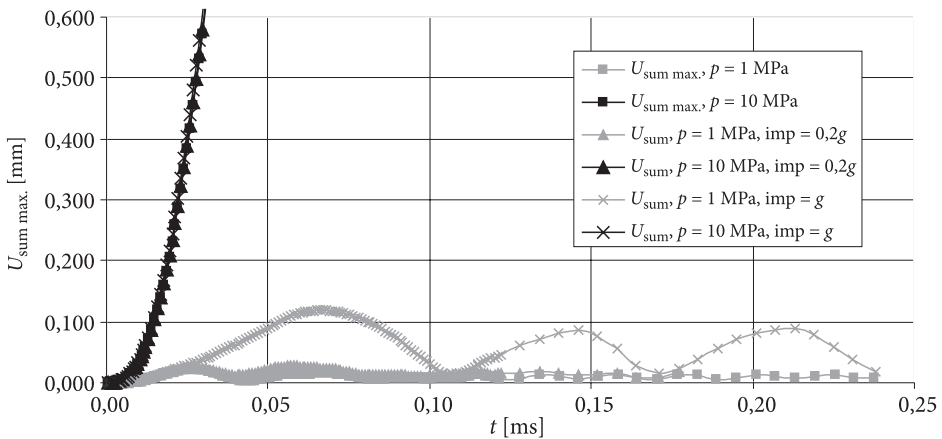


Rys. 7. Przebiegi czasowe energii odkształceń

można tłumaczyć wystąpieniem zjawiska rezonansu — energia powłoki osiąga minimum dla postaci wybozczenia, odpowiadającej najniższej częstotliwości drgań własnych. Pierwsze maksimum na przebiegu czasowym pojawia się w czasie trwania impulsu obciążenia i odpowiada maksimum przebiegu czasowego przy braku imperfekcji. Kolejne maksima osiągają granice plastyczności, która ogranicza dalszy wzrost naprężenia zredukowanego do zniszczenia — konstrukcja jest w stanie częściowego uplastycznienia, o czym świadczy przesunięcie średniej wartości naprężenia



Rys. 8. Przebiegi czasowe reakcji podłoża



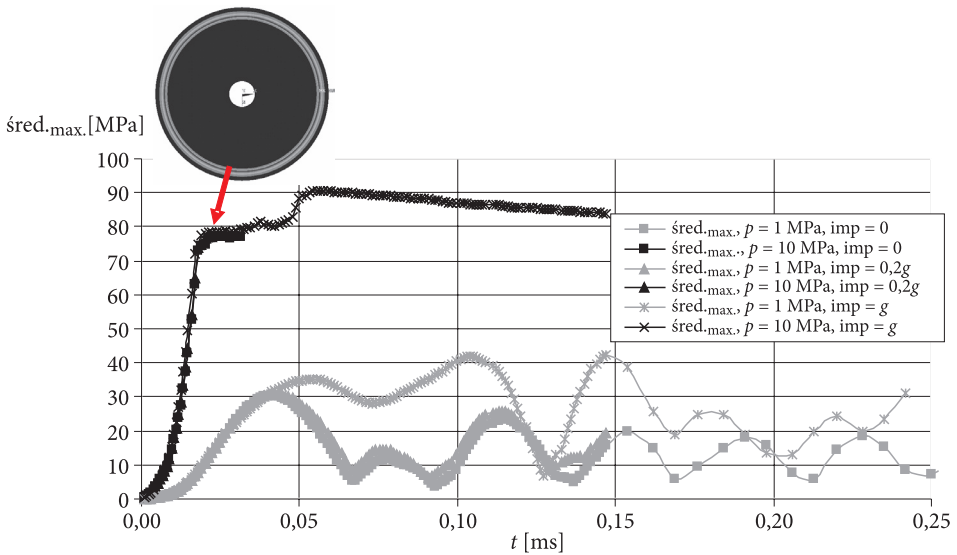
Rys. 9. Przebiegi czasowe największych wypadkowych przemieszczeń

w stosunku do średniej przy braku imperfekcji. Wzrost amplitudy ciśnienia do 10 MPa powoduje propagację naprężeń do zniszczenia, o czym można przekonać się, obserwując przebieg czasowy energii i przemieszczenia (rys. 7, 9). Imperfekcje wstępne nieznacznie przyspieszają to zjawisko. Inicjacja procesu uplastycznienia prowadzącego do zniszczenia rozpoczyna się przy podstawie dolnej (rys. 6). Należy dodać, że konstrukcja po pojawieniu się przegubu plastycznego wciąż przenosi obciążenie aż do zniszczenia.

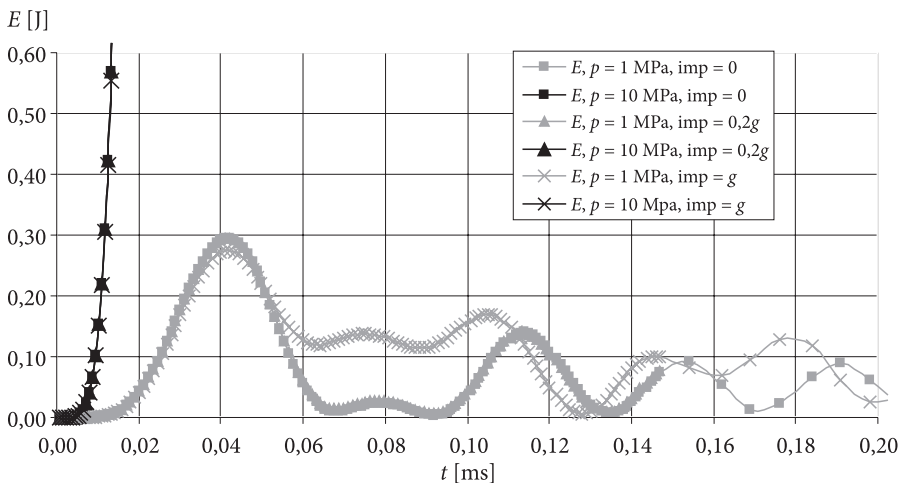
Z przebiegu czasowego reakcji podłoża (rys. 8) można wnioskować, że konstrukcja traci chwilową zdolność do przenoszenia obciążenia w chwili odpowiadającej około 0,05 ms. Zjawisko to jest wynikiem pojawienia się wcześniej przegubu plastycznego przy podstawie. Wpływ imperfekcji na przebiegi czasowe niezależnie

od wartości amplitudy obciążenia nie występuje. Wyklucza to możliwość eksperymentalnego mierzenia imperfekcji przez pomiar siły reakcji.

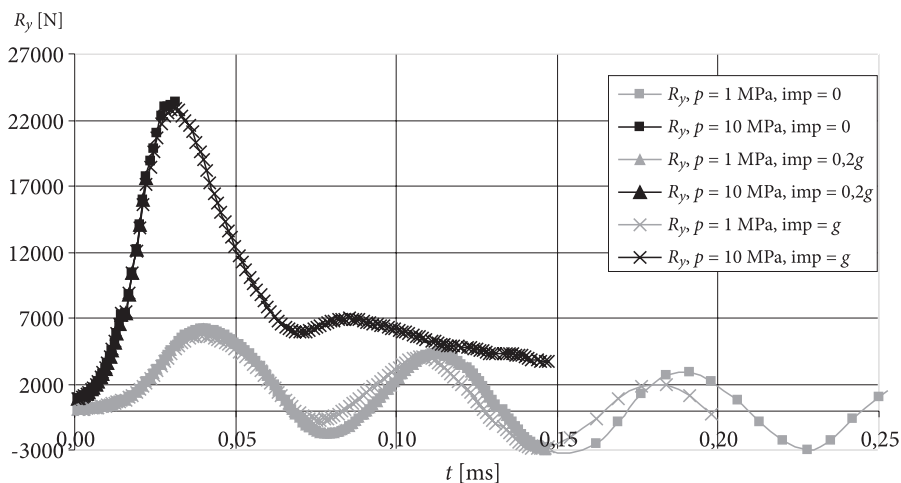
Na rysunkach 10-13 przedstawiono przebiegi czasowe analizowanych parametrów jakościowych dla konstrukcji z materiału kompozytowego. Promień większej podstawy wynosi 33 mm. Na wykresie naprężeń zredukowanych obserwuje się drgania w zakresie sprężystym dla amplitudy impulsu ciśnienia 1 MPa. Pierwsze



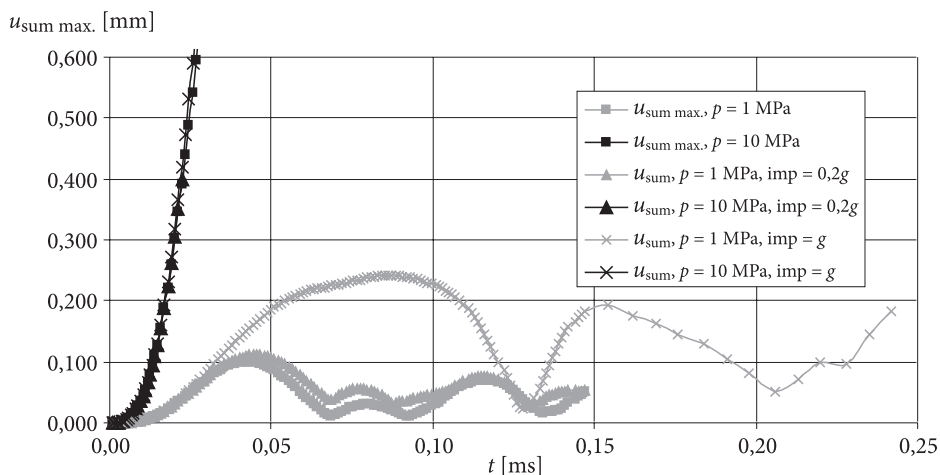
Rys. 10. Przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń zredukowanych — na rysunku pokazano rozkład stref plastycznych



Rys. 11. Przebiegi czasowe energii odkształceń



Rys. 12. Przebiegi czasowe reakcji podłoża



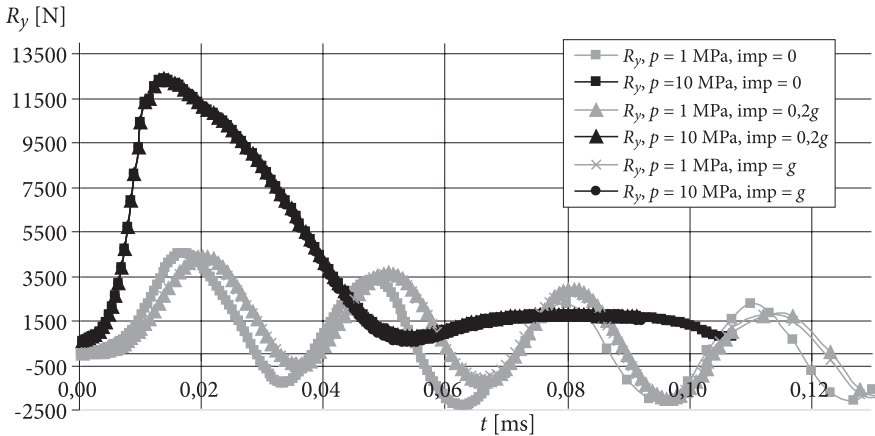
Rys. 13. Przebiegi czasowe największych wypadkowych przemieszczeń

maksimum (występujące najwcześniej) na wykresie wskazuje na naprężenie rzędu 30 MPa niezależnie od wielkości przyjętych imperfekcji. Jednakowa wartość pierwszego maksimum występuje również dla powłoki stalowej. Jednak kolejne wartości naprężenia występujące w maksimach lokalnych mają nieco wyższe wartości o około 34% dla powłoki z imperfekcją, a mniejsza gęstość materiału, mimo niższego modułu sprężystości podłużnej, zmniejsza możliwość wystąpienia naprężeń uplastyczniających. Dla amplitudy impulsu ciśnienia 10 MPa, niezależnie od wielkości przyjętych imperfekcji, konstrukcja zachowuje się jednakowo. W powłoce występuje ten sam mechanizm uplastycznienia. Po czasie trwania impulsu rzędu 0,025 ms powstają odkształcenia plastyczne przy podstawie (rys. 10), naprężenia

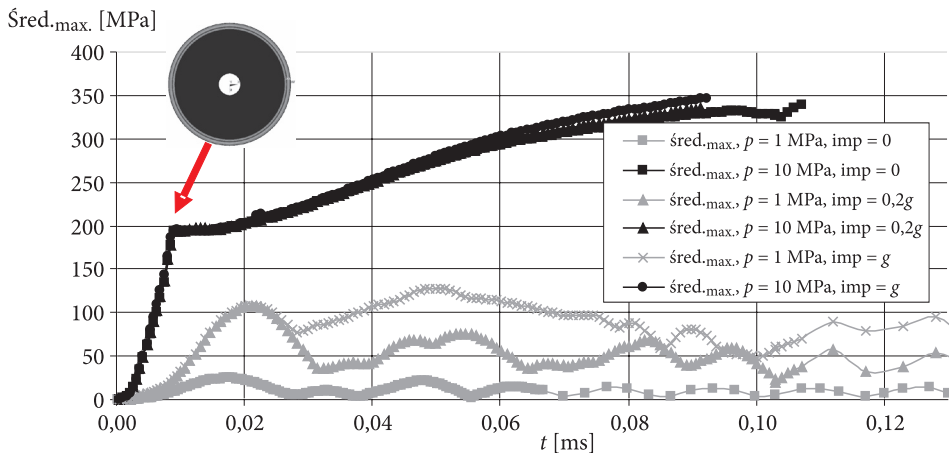
nieznacznie wzrastają, po czym (około 0,05 ms czasu trwania impulsu obciążenia) maleją aż do zniszczenia konstrukcji.

Po wystąpieniu przegubu plastycznego siła reakcji podłoża gwałtownie maleje (rys. 12). Również w tym przypadku nie obserwuje się wpływu imperfekcji na przebieg czasowy.

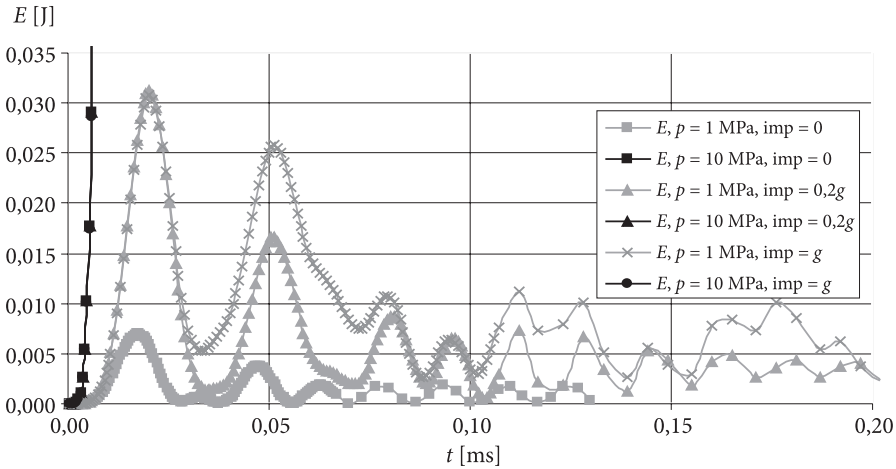
Obliczenia prowadzono dla powłoki o promieniu podstawy dolnej 28 mm. Na rysunkach 14-17 przedstawiono przebiegi czasowe dla powłoki stalowej. Mniejszy promień powłoki powoduje zwiększenie podatności na obciążenie ciśnieniem w aspekcie występowania wstępnych imperfekcji, o czym świadczą przebiegi czasowe naprężeń (rys. 15) oraz energii (rys. 16) i przemieszczeń (rys. 17) dla amplitudy obciążenia 1 MPa.



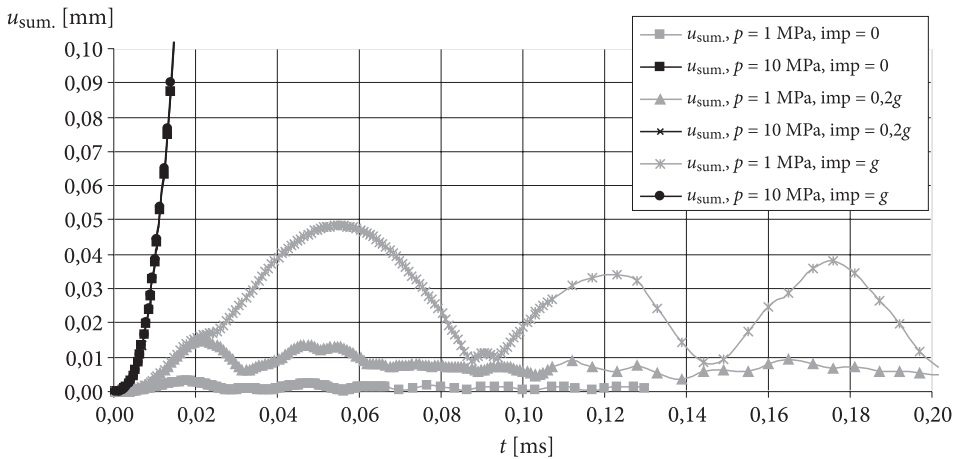
Rys. 14. Przebiegi czasowe reakcji podłoża



Rys. 15. Przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń zredukowanych — na rysunku przedstawiono rozkład stref plastycznych

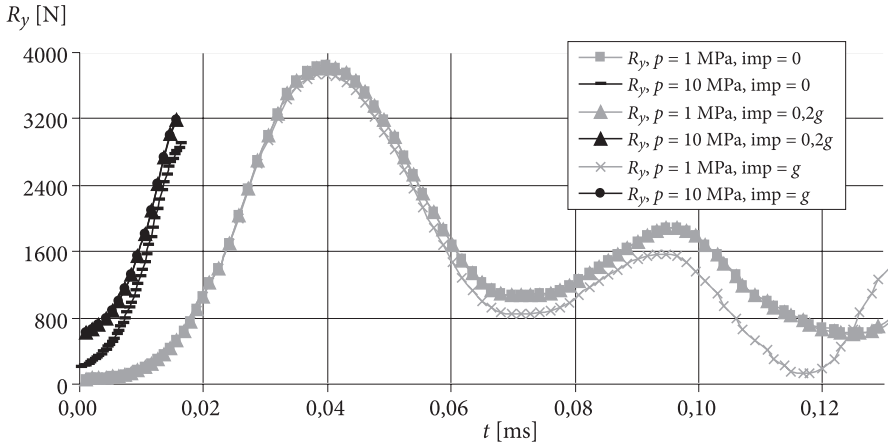


Rys. 16. Przebiegi czasowe energii odkształceń

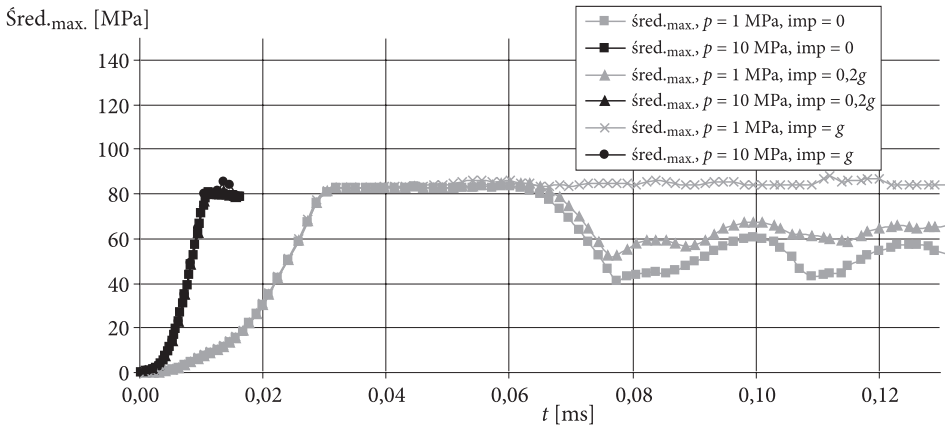


Rys. 17. Przebiegi czasowe największych wypadkowych przemieszczeń

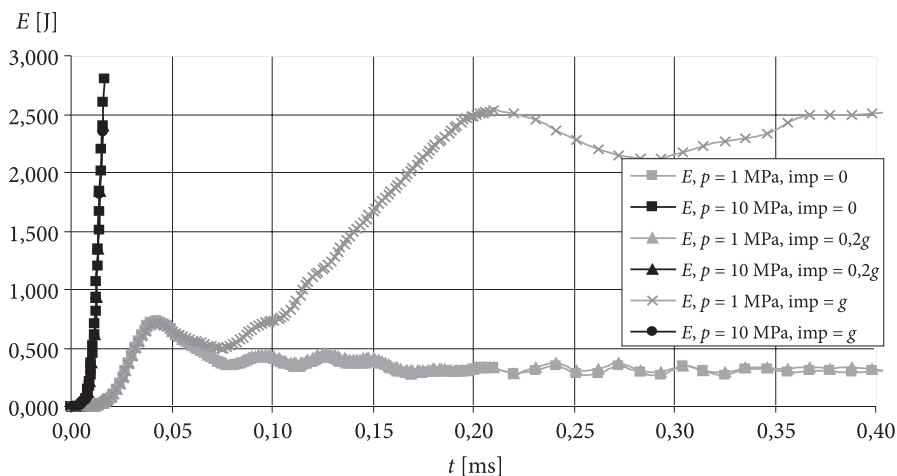
Wpływ promienia podstawy na podatność powłoki stożkowej ujawnia się zwłaszcza dla materiału kompozytowego powłoki (rys. 18-21). Mimo że energia impulsu obciążenia dostarczana do powłoki jest mniejsza (nieco krótszy czas trwania impulsu), lokalne maksima na wykresie naprężeń zredukowanych osiągają wartość graniczną (wartości odpowiadają granicy plastyczności) w czasie trwania impulsu, powodując uplastycznienie powłoki. W tym przypadku wpływ imperfekcji wstępnych nie odgrywa większego znaczenia, gdyż uplastycznienie osiągnięte jest w jednakowej chwili (około 0,03 ms). Impuls ciśnienia o amplitudzie 10 MPa powoduje zniszczenie powłoki w fazie uplastyczniania — zdolność do przenoszenia obciążenia zmniejszyła się, na co wskazują przebiegi reakcji podłoża (rys. 18).



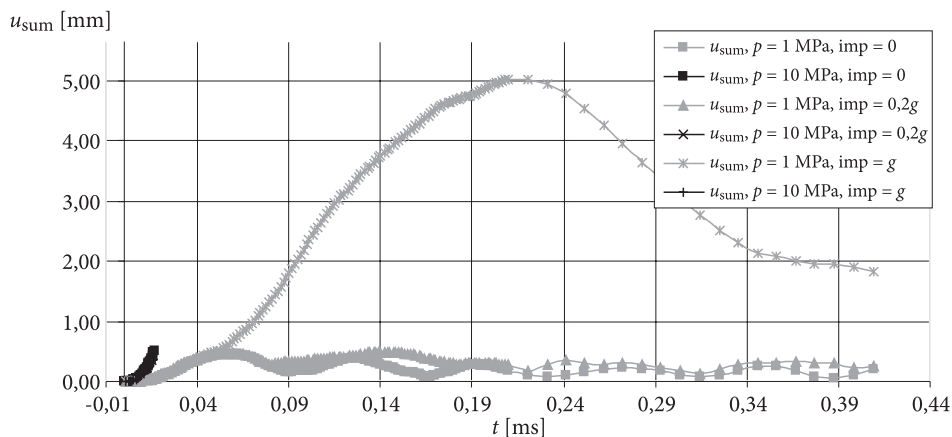
Rys. 18. Przebiegi czasowe reakcji podłoża



Rys. 19. Przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń zredukowanych



Rys. 20. Przebiegi czasowe energii odkształceń



Rys. 21. Przebiegi czasowe największych wypadkowych przemieszczeń

4. Wnioski końcowe

Analizując częstotliwości, postacie drgań własnych, wykresy, odpowiedzi powłoki oraz strefy uplastycznienia, można stwierdzić, że:

- zwiększenie promienia dolnej podstawy spowodowało obniżenie częstotliwości drgań własnych, zwiększenie amplitudy reakcji podłoża oraz zmniejszenie sztywności powłok,
- dla powłok izotropowych wykonanych z materiału kompozytowego obserwuje się zmianę postaci drgań własnych, towarzyszącą zmianie promienia podstawy dolnej,

- zjawisko rezonansu, rozumiane jako dynamiczne wyboczenie, na ogół powoduje wzmocnienie amplitud przemieszczeń, naprężeń i energii odkształceń,
- we wszystkich powłokach, niezależnie od rodzaju materiału, amplituda impulsu ciśnienia $p = 10$ MPa powoduje ich zniszczenie przez pojawienie się przegubów plastycznych przy podstawie — na wykresach energii odkształceń obserwuje się raptowny jej wzrost,
- zmiana promienia podstawy nie wpływa na proces zniszczenia powłoki (granica plastyczności jest osiągnięta w jednakowej chwili) dla amplitudy impulsu ciśnienia $p = 10$ MPa,
- zwiększenie promienia podstawy powoduje zwiększenie wartości najwcześniej pojawiającego się maksimum na przebiegu naprężeń zredukowanych,
- wzrost amplitudy imperfekcji kształtu powoduje wzrost naprężeń zredukowanych, przemieszczeń i energii — proces zniszczenia może być inicjowany przy niższych amplitudach impulsu ciśnienia niż w przypadku braku imperfekcji kształtu,
- rozważane wartości imperfekcji kształtu nie wpływają na przebiegi reakcji podłoża,
- w przypadku materiału typu kompozyt wzrost naprężeń jest na tyle duży dla powłoki o promieniu $R = 28$ mm, że niezależnie od wartości amplitudy impulsu ciśnienia, zostaje osiągnięta granica plastyczności, co świadczy o większej podatności powłoki na zniszczenie.

Na podstawie wniosków można stwierdzić, że powłoki stożkowe spełniają swoją rolę jako absorbery energii. Istnieje możliwość sterowania procesem pochłaniania energii przez zmianę wymiarów geometrycznych i/lub amplitudy wstępnych imperfekcji kształtu. Proces zniszczenia w początkowej fazie powstaje w pobliżu miejsca podparcia. Parametry, jak naprężenie zredukowane czy reakcja podłoża, mogą być przydatne w jakościowej ocenie zachowania się powłoki zarówno w analizie numerycznej jak również w eksperymentalnej. Wyboczenie dynamiczne, które powstaje w efekcie pojawienia się wstępnych imperfekcji kształtu, sprzyja zwiększeniu wartości amplitud przemieszczeń w trakcie trwania impulsu, a co za tym idzie naprężeń, więc jest zjawiskiem niekorzystnym w aspekcie obniżenia odporności konstrukcji na impulsowe obciążenie. Natomiast w przypadku rozważanych absorberów stożkowych pozwala w sposób kontrolowany wpływać na ich własności dyssypacyjne.

LITERATURA

- [1] W. ABRAMOWICZ, *Thin-walled structures as impact energy absorbers*, Thin-walled Struct., Elsevier, 41, 2-3, Febr. 2003, 91-109.
- [2] J. BŁACHUT, G. D. GALLETLY, *Buckling strength of imperfect hemispheres*, Journal of Thin-Walled Structures, 23, 1995, 1-20.
- [3] K. DAE KWAN, H. JAE-HUANG, *Establishment of gun blast wave model and structural analysis for blast load*, Journal of Aircraft, 43, 4, 2006, 1159-1168.
- [4] B. S. GOLZAN, H. SHOWKATI, *Buckling of thin-walled conical shells under uniform external pressure*, Thin-Walled Structures, 46, 2008, 516-529.
- [5] K. KOWAL-MICHALSKA (et. al.), *Stateczność dynamiczna kompozytowych konstrukcji płytowych*, WNT, Warszawa, 2007.
- [6] M. KRÓLAK, *Stateczność ortotropowej powłoki stożkowej ściskanej osiowo — w ujęciu nieliniowym*, Archiwum Budowy Maszyn, 3, Łódź, 1969.
- [7] G. LE BLANC, M. ADOUM, V. LAPOUJADE, *External blast load on structures — empirical approach*, 5th European LS-DYNA Conference, Ulm, Germany, 2006.
- [8] G. J. SMITSES, *Dynamic stability of suddenly loaded structures*, Springer Verlag, New York, 1990.
- [9] A. S. VOLMIR, *Ustojczivost Deformirujemych Sistem*, Moskwa, 1967.
- [10] User's Guide ANSYS 11sp1, Ansys, Inc., Houston, USA.

J. JANKOWSKI, T. KUBIAK

Dynamic response of thin-walled conical shells subjected to pressure pulse loading

Abstract. The paper deals with dynamic buckling phenomenon in aspect of response of open conical shells, subjected to pulse loading with pressure normal to the surface. Isotropic material of shells was assumed (steel or composite) with a bilinear characteristic. In this paper, influence of initial shape imperfection (corresponding to the least frequency of free vibration) on the mechanism of shell failure was investigated. Research was carried out with finite elements method using ANSYS 11.0 tool. Moreover, conical shells were analyzed as absorbers, in aspect of the change of pulse loading energy into energy of plastic deformations.

To solve this problem, finite shell element (SHELL43 – 4 nodes with 6 degrees of freedom) was used. Investigated shells were simply supported at the lower edge. Moreover, initial shape imperfections were applied for amplitudes: 0, 0.2 g and g (where g – thickness of shell). Pulse loading function was assumed as triangular with amplitude of 1 MPa or 10 MPa. Calculations were divided into two parts. First, free vibration modes and frequencies were obtained. Next, the results were performed, applying appropriate modes, for the highest values of a total energy [J], total displacement [mm], reaction of the ground [N] and equivalent Huber stress [MPa], taking into account two different values of greater radius R .

Concluding, analyzed conical shells have ability to dissipate loading energy. This process can be predicted and controlled by changing geometric parameters or/and level of initial shape imperfections. Mechanism of initial failure appears near spans.

Keywords: dynamic buckling, conical shells, finite elements method, dynamic response, energy absorbers, impact

