

DOŚWIADCZALNE BADANIE WPLYWU RODZAJU WYPEŁNIENIA PODSTAWOWYCH STRUKTUR KOMPOZYTOWYCH NA ENERGIĘ ZNISZCZENIA

Tadeusz NIEZGODA*, Stanisław OCHELSKI*, Wiesław BARNAT*

t.niezgoda@wme.wat.edu.pl, wbarnat@tlen.pl

*Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Streszczenie: Celem pracy jest ocena zastosowanego wypełnienia na zdolność pochłaniania energii przez kompozytowy element konstrukcji cienkościennej obciążonej dynamicznie. Elementy energochłonne wykonano w KMiS. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Intron. Badaniom poddano elementy energochłonne w postaci tulejek z dodatkowym wypełnieniem pianowym. Obciążenie realizowano poprzez osiowe wymuszenie kinematyczne.

1. WSTĘP

Panele energochłonne mają zastosowanie w konstrukcjach, których zadaniem jest ochrona ludzi lub ograniczenie zniszczenia całej konstrukcji w przypadku np. katastrofy śmigłowców, samochodów itp. W publikacjach niektórzy autorzy rozpatrują to zagadnienie w aspekcie lokalnej utraty stateczności i wynikającego stąd progresywnego zniszczenia (Timoszenko, 1972; Dacko i Barnat, 2004). Postępujące w miarę równomiernie zniszczenie sprawia, że praca zużyta na zniszczenie elementu energochłonnego powoduje znaczne ograniczenie skutków obciążenia udarowego konstrukcji np. uderzenia śmigłowca o ziemię. Innym zadaniem układu elementów energochłonnych może być rozpatrywanie ich np. jako układu rozpraszającego energię uderzenia pojazdu w barierkę ochronną lub energię wybuchu (Nagel i Thambiratnam, 2003; Zhong, 1993). Największa względna energie absorpcji (odniesiona do jednostki masy) posiadają kompozytowe elementy energochłonne (Barnat i Niezgoda, 2007).

Celem niniejszej pracy było porównanie wpływu zastosowanego elementu wypełnienia na energię pochłoniętą przez podstawowy element energochłonny. Kompozytowe elementy walcowe charakteryzują się większą siłą spęczenia inicjującą procesy zniszczenia niż elementy o innej geometrii (np. stożki) (Niezgoda i Barnat, 2005). Wyniki eksperymentalne posłużą do walidacji modeli numerycznych warstw ochronnych.

2. OPIS BADANYCH OBIEKTÓW

W pracy przedstawiono wybrane wyniki z badań doświadczalnych sześciu obiektów energochłonnych. Pierwszym obiektem, przedstawionym na rys 1 i 2, była tulejka wykonana z maty szklanej epoksyd o następujących wybranych własnościach: $E_{11}=1.85E+10$ Pa, $\nu_{1,2}=0.158$, $G_{1,2}=3.48E+09$ Pa. Tulejka charakteryzowała się średnicą wewnętrzną 40 mm i wysokością 50 mm i grubością ścianek 2 mm. Obiekt 1 – był modelem numerycznym

tulejki kompozytowej, przedstawionym na rys. 1, składał się z 30744 węzłów i 22680 elementów.

Model ten zweryfikowano eksperymentalnie przy pomocy tulejki przedstawionej na rys 2.

Prawo Hooke'a dla anizotropowego materiału wykorzystywanego do modelowania elementu energochłonnego ma następującą postać:

$$\sigma_i = C_{ij} * \varepsilon_j,$$

gdzie:

σ_i – składowe stanu naprężenia, C_{ij} – współczynniki materiałowe wprowadzone w ortogonalnym układzie współrzędnych, ε_j – składowe stanu odkształcenia.

Postać macierzy C_{ij} w ogólnym, trójwymiarowym zadaniu przyjmuje postać:

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} 1/E_a & -\nu_{ba}/E_b & -\nu_{ca}/E_c & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{ab}/E_a & 1/E_b & -\nu_{cb}/E_c & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{ac}/E_a & -\nu_{ba}/E_b & 1/E_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{ca} \end{pmatrix}$$

W związku z tym do opisu materiału ortotropowego niezbędna jest znajomość następujących stałych materiałowych: $E_a, E_b, E_c, \nu_{ab}, \nu_{ca}, \nu_{cb}, G_{ab}, G_{ca}, G_{cb}$ do odpowiedniego zdefiniowania ogólnych właściwości mechanicznych materiału zgodnie z właściwościami elementu niszczonego.

Obciążenie modelu numerycznego realizowano podobnie jak w przeprowadzonych eksperymentach poprzez wymuszenie kinematyczne. Analizowane modele były obciążone przez sztywną płytę, opisaną materiałem typu MATRIG.

W modelu materiałowym uwzględniono nieliniowości fizyczne (model materiału) i geometryczne (duże przemieszczenia i odkształcenia). Do analizy zastosowano modelowanie kontaktu typu powierzchniowego. Kontakt zdefiniowano pomiędzy płytą dolną elementami energochłonnymi, a płytą uderzającą.

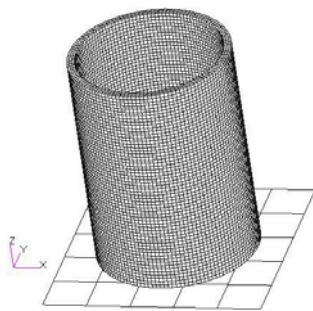
Drugi obiekt przedstawiony na rys. 3 – tulejka kompozytowa z wypełnieniem pianowym. Obiekt ten został zweryfikowany eksperymentalnie.

Trzecim obiektem były cztery tulejki cylindryczne bez inicjatorów (przyklejone do krążków kompozytowych żywicą E-53).

Czwartym obiektem były cztery tulejki cylindryczne przyklejone do płytek. Tulejki te posiadały inicjatory zniszczenia.

Piąty obiekt, przedstawiony na rys 7, różnił się od drugiego wypełnieniem pianką poliuretanową – budowlaną.

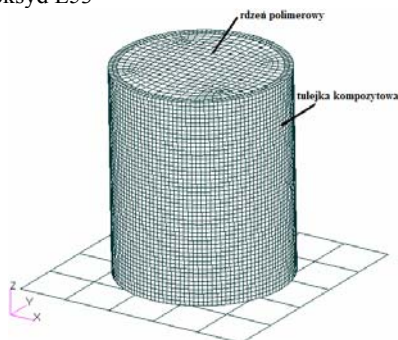
Szesty obiekt, przedstawiony na rys 5 i 6, różnił się od drugiego wypełnieniem pianką lotniczą – spienionym polichlorkiem winylu marki PCHW-1 o następujących własnościach materiałowych: $\rho = 115 \text{ kg/m}^3$, $E_r = 92.4 \text{ MPa}$, $E_c = 80.6 \text{ MPa}$, $R_m = 1.82 \text{ MPa}$, $R_c = 0.911 \text{ MPa}$, $\nu = 0.26$.



Rys. 1. Obiekt 1- model trójwymiarowy tulejki kompozytowej. Dla lepszego zobrazowania geometrii modelu pominięto górną płytę, za pomocą której realizowano wymuszenie kinematyczne.



Rys. 2. Obiekt 1 – tulejka kompozytowa wykonana z maty szklanej epoksyd E53



Rys. 3. Schemat modelu numerycznego tulejki z wypełniaczem polimerowym



Rys. 4. Obiekt 2 - panel energochłonny w postaci czterech tulejek kompozytowych



Rys. 5. Obiekt 3 - Panel energochłonny w postaci czterech tulejek kompozytowych z wypełnieniem pianowym



Rys. 6. Obiekt 4 - Panel energochłonny w postaci czterech tulejek kompozytowych z wypełnieniem pianowym



Rys. 7. Obiekt 5 i 6 - Schemat wypełnienia pianowego.

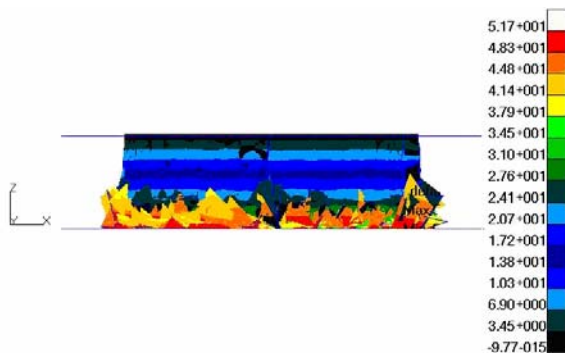
Obciążenie obiektów w eksperymencie realizowano kinematycznie z prędkością 0.01 m/s

3. WYNIKI DLA OBIEKTU 1 – TULEJKA KOMPOZYTOWA

Wyniki badań doświadczalnych dla obiektu 1 zostały wykorzystywane do walidacji modeli numerycznych.

Model numeryczny tulejki został obciążony płytą nieodkształcalną dla której nadano stałą prędkości 0.01 m/s. Obliczone wielkości przedstawiono w postaci planów warstwicznych. Deformację modelu numerycznego przedstawiono na rys. 8.

W wyniku analizy oszacowano względną energię absorpcji która wniósła 10.78 kJ/kg.



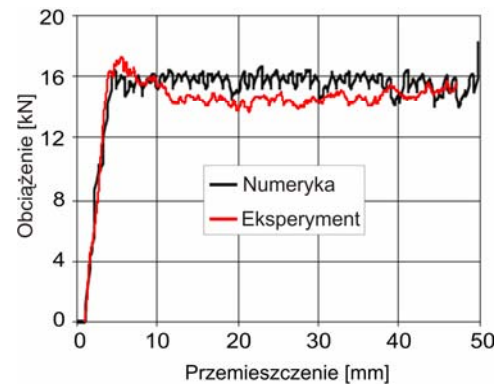
Rys. 8. Deformacja modelu numerycznego tulejki kompozytowej

Podobnie jak model numeryczny zachowywała się tulejka poddana badaniom eksperymentalnym. Sposób niszczenia kompozytowej tulejki przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Sposób niszczenia tulejki kompozytowej

Porównanie wyników siły niszczącej od przemieszczenia górnej płyty w strefie kontaktu pokazano oraz siły śpęczenia uzyskanej eksperymentalnie na rys.10. Skala pionowa opisuje wielkość reakcji pionowej (kN), a skala pozioma pokazuje przemieszczenie w mm. Analizując ten wykres można zauważyć bardzo dużą sztywność badanego obiektu w początkowym liniowo-sprężystym. Następnie niszczenie badanego obiektu odbywało się przy obciążeniu siłą śpęczenia rzędu 15 kN. Wartości sił śpęczenia są do siebie zbliżone. Świadczy to o poprawności wykonywania modelu i doboru parametrów modelu materiału.

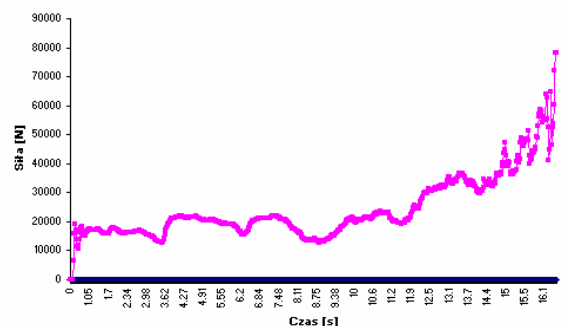


Rys. 10. Wykres przyrostu wartości reakcji pionowej uzyskanej numerycznie i eksperymentalnie

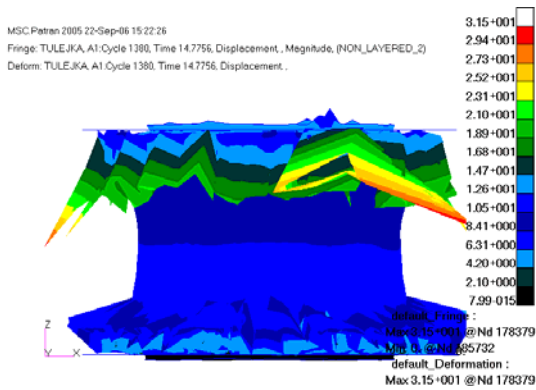
4. WYNIKI DLA OBIEKTU 2- TULEJKA KOMPOZYTOWA Z WYPEŁNIENIEM

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu numerycznego uzyskano wykres siły śpęczenia w zależności od przemieszczenia czasu (rys 11). Ze względu na zastosowanie wypełniacza siła śpęczenia zwiększała się. Zastosowanie wypełniacza spowodowało iż tulejka kompozytowa ulegała niszczeniu w sposób inny niż dla modelu samodzielnej tulejki. Wypełniacz uniemożliwia wwiniecie się tulejki do środka modelu. Wykres siły śpęczenia ma charakter liniowy. Na początku wykresu widać wyraźny skok wartości siły śpęczenia. Następnie jej wartość (dzięki zastosowaniu wypełniacza) się zwiększa. W początkowym procesie niszczenia warstwa tulejki kompozytowej ulega zniszczeniu przez lokalne wyoboczenie. Następnie tulejka zostaje zniszczona poprzez rozwarstwienie (tzw. pędzel). Sposób deformacji tulejki kompozytowej przedstawiono na rysunku 12.

Na podstawie obliczeń numerycznych stwierdzono, że średnia siła śpęczenia wynosi 30 kN. Po uwzględnieniu drogi, jaką pokonują sztywne płyty, oszacowano pracę sił śpęczenia na 1050 J. Po uwzględnieniu masy elementu badanego stwierdzono, że względna energia absorpcji dla tulejki kompozytowej z wypełniaczem wynosi 40,4 kJ/kg. Oznacza to, iż względna energia absorpcji dla tulejki kompozytowej z wypełniaczem jest prawie dwukrotnie większa niż dla tulejki stalowej.

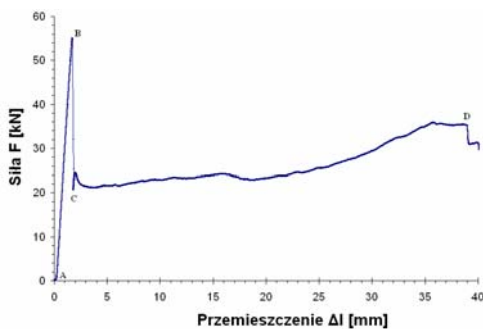


Rys. 11. Wykres siły śpęczenia tulejki kompozytowej z wypełnieniem pianowym uzyskany numerycznie



Rys. 12. Sposób deformacji numerycznego modelu tulejki kompozytowej z wypełnieniem pianowym

Podobnie jak modele numeryczne zachowywał się rzeczywisty obiekt. Wykres siły zniszczenia przedstawiono na rys 13. W pierwszym etapie AB nastąpiło zniszczenie początkowe warstw dla całej próbki. Następnie odnotowano katastroficzne niszczenie próbki BC charakteryzujące się niszczeniem gwałtownym poprzez pęknięcie próbki. Na odcinku CD siła śpęcznia wzrastała w sposób łagodny. Spadek siły śpęcznia w punkcie D został spowodowany zakończeniem eksperymentu.



Rys. 13. Wykres $F(\Delta l)$ z próby ściskania rurki z kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną, wypełnionej pianką bez inicjatora- próbka nr. 1

Charakterystyczny dla próbek kompozytowych sposób zniszczenia obiektu 2 przedstawiono na rys 14.



Rys. 14. Sposób deformacji tulejki kompozytowej z wypełnieniem pianowym

5. WYNIKI DLA OBIEKTU 3 – CZTERY TULEJKI

Uzyskane wyniki z badań eksperymentalnych dla obiektu trzeciego przedstawiono na rys 15.

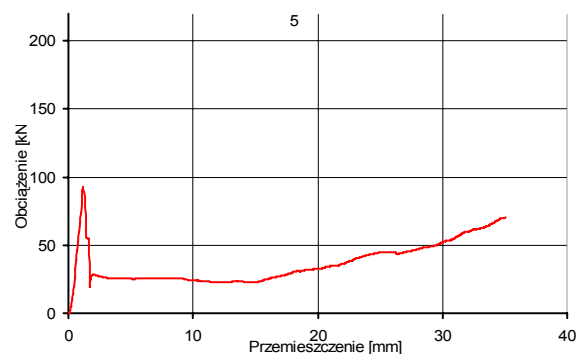
Przyklejenie elementów energochłonnych do płytke spowodowało zniszczenie elementów kompozytowych w pierwszym etapie eksperymentu w sposób katastroficzny poprzez kruche pęknięcie. Taki sposób niszczenia jest niepożądany dla konstrukcji energochłonnych. Następnie tulejki niszczyły się w sposób progresywny, głównie poprzez delaminację. Obiekt trzeci posiadał masę 298.9 g (przy masie rurek 74 g).

Charakter siły śpęcznia został przedstawiony na rys 16. Charakterystycznym dla wykresu jest występowanie pików siły spowodowane brakiem inicjatora i zapoczątkowaniem niszczenia konstrukcji w sposób katastroficzny. Wartość pików siły wyniosła 92.8 kN. Następnie wartość siły śpęcznia spadała do 28 kN. W wyniku mieszanego modelu niszczenia elementów energochłonnych (w miarę zapychania się tulejek) wartość siły śpęcznia wzrastała.



Rys. 15. Sposób niszczenia panelu energochłonnego w postaci czterech tulejek kompozytowych

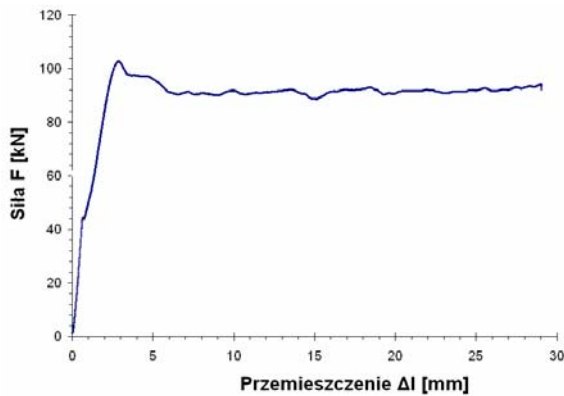
Średnia siła śpęczniana wyniosła 36,4 kN. Energia absorpcji wyniosła 1820 kJ a względna energia absorpcji wyniosła 24.6 kJ/kg. Zestawienie wyników eksperymentu pokazano w tabeli 1.



Rys. 16. Zależności $P-\Delta l$ dla pierwszego obiektu energochłonnego

6. WYNIKI DLA OBIEKTU 4 – CZTERY TULEJKI Z INICJATORAMI

W wyniku zastosowania inicjatorów nie odnotowano katastroficznego zniszczenia obiektów. Charakter przebiegu siły niszczącej pokazano na rys 17. Poziom siły niszczącej wynosi 90 kN. Względna energii absorpcji wynosi 150 kJ/kg.



Rys. 17. Wykres $F(\Delta l)$ z próby ściskania 4 rurek wykonanych z żywicy epoksydowej wzmocnionych matą szklaną, z inicjatorem, bez wypełnienia.

7. WYNIKI DLA OBIEKTU 5 – CZTERY TULEJKI Z PIANA BUDOWLANĄ

Uzyskane wyniki z badań eksperymentalnych przedstawiono na rys 18.

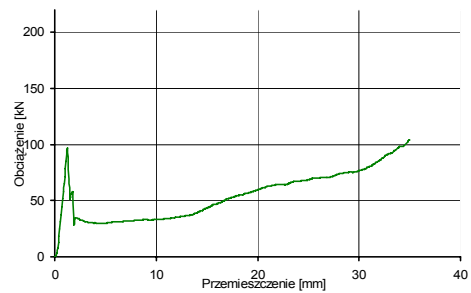


Rys. 18. Sposób niszczenia panelu energochłonnego w postaci czterech tulejek kompozytowych z wypełnieniem pianowym

Podobnie jak w przypadku obiektu drugiego przyklejenie elementów energochłonnych do płytek spowodowało katastroficzne (w pierwszym okresie) zniszczenie elementów kompozytowych. Obiekt piąty posiadał masę 410.8 g (przy masie rurek z wypełnieniem 185,1 g).

Charakter siły śpęczania został przedstawiony na rys 19. Charakterystycznym dla wykresu jest występowanie piku siły w początkowym okresie śpęczania, spowodowane brakiem inicjatora. Wartość piku siły wyniosła 97.2 kN. Następnie wartość siły śpęczania spadła do 31 kN. W wyniku mieszanego modelu niszczenia elementów energochłonnych oraz ograniczenia rozwarstwiania się elementów energochłonnych poprzez piankę budowlaną wartość siły śpęczania wzrastała.

Średnia siła śpęczana wyniosła 54.7 kN. Energia absorpcji wyniosła 2735 kJ a względna energia absorpcji wyniosła 14,8 kJ/kg. Zestawienie wyników eksperymentu pokazano w tabeli 1.



Rys. 19. Zależności P- Δl dla drugiego obiektu energochłonnego

8. WYNIKI DLA OBIEKTU 6 – CZTERY TULEJKI Z PIANA LOTNICZĄ

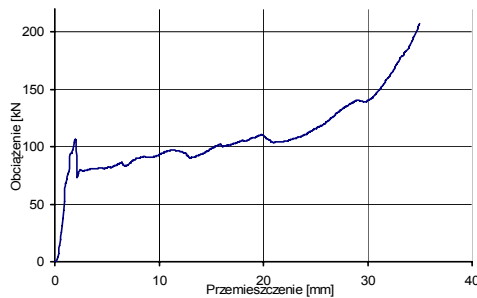
Uzyskane wyniki z badań eksperymentalnych przedstawiono na rys 20. Podobnie jak w przypadku obiektów poprzednich przyklejenie elementów energochłonnych do płytek spowodowało mieszane zniszczenie elementów kompozytowych. Duża gęstość piany lotniczej spowodowała ograniczenie swobodnej delaminacji kompozytowych elementów energochłonnych. Obiekt trzeci posiadał masę 428,8g (przy masie rurek z wypełnieniem 203,9 g).



Rys. 20. Sposób niszczenia panelu energochłonnego w postaci czterech tulejek kompozytowych z wypełnieniem pianowym w postaci pianki lotniczej

Charakter siły śpęczania został przedstawiony na rys 21. Charakterystycznym dla wykresu jest występowanie piku siły spowodowane brakiem inicjatora. Wartość piku siły wyniosła 105 kN. Następnie wartość siły śpęczania spadła nieznacznie do 81 kN. Tak duża wartość siły śpęczania (w porównaniu z obiektem 5 prawie dwukrotnie) jest spowodowana dość dużą gęstością pianki lotniczej. W wyniku mieszanego modelu niszczenia elementów energochłonnych oraz ograniczenia rozwarstwiania się elementów energochłonnych poprzez piankę lotniczą wartość siły śpęczania wzrastała.

Średnia siła śpęczana wyniosła 108.9 kN. Energia absorpcji wyniosła 5445 kJ a względna energia absorpcji wyniosła 26,7 kJ/kg. Zestawienie wyników eksperymentu pokazano w tabeli 1.



Rys. 21. Zależności P-Δ dla drugiego obiektu energochłonnego

9. ZAKOŃCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych czterech obiektów energochłonnych. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej typu Intron.

Kompozytowe elementy walcowe charakteryzują się większą względną energią absorpcji niż inne (Barnat i Niezgoda, 2007).

Ogólnie względna siła spękania i energia dla konstrukcji kompozytowych jest większa niż dla konstrukcji stalowych. Brak zastosowanego inicjatora powoduje katastroficzny model zniszczenia. Zjawisko to w aspekcie energochłonności jest niepożądane. Zastosowanie wypełniacza w postaci piany spowodowało zwiększenie względnej energii absorpcji.

Dużą zaletą paneli ochronnych jest ich mała masa. W przypadku rozpatrywania zastosowania elementów ochronnych dla przemysłu lotniczego ma to niemałe znaczenie. Przedstawione wyniki są wstępnymi próbami doboru wypełniacza elementy energochłonne. Przedstawione wyniki posłużą do walidacji modeli numerycznych

Na podstawie wstępnej oceny uzyskanych wyników stwierdzono, iż odpowiednie dobranie materiału wypełniacza pozwoli na uzyskanie większej energii, potrzebnej do zniszczenia badanej konstrukcji energochłonnej. Przyszłe zastosowanie analizy numerycznej usprawni proces optymalizacji parametrów wypełnienia.

Tab. 1. Zestawienie wyników eksperymentalnych

Lp	Struktura	Masa całej struktury [g]	Masa Rurek [g]	Masa wypełnienia [g]	Masa rurek +wypełnienia [g]
1	1 rurka		74		
2	1 rurka z wypełniaczem		74	27,75	
3	4 rurki	298,9	74	0	74
4	4 rurki z inicjatorami	298	74	0	74
5	4 rurki + pianka bud.	410,8	74	111,1	185,1
6	4 rurki + pianka lot.	428,8	74	129,9	203,9

Lp	Struktura	P_{sr} [kN]	Wysokość [mm]	EA [kJ]	WEA [kJ/kg]
1	1 rurka	16	50	797,9	10,78
2	1 rurka z wypełniaczem	30	50	1050	40,4
3	4 rurki	36,4	50	1820	24,6
4	4 rurki z inicjatorami	90	50	4500	150
5	4 rurki + pianka bud.	54,7	50	2735	14,8
6	4 rurki + pianka lot.	108,9	50	5445	26,7

LITERATURA

1. Timoszenko S. P. (1972), *Teoria stateczności sprężystej*. Arkady, Warszawa.
2. Dacko M. Barnat W. (2004), Stany Graniczne Cienkich Powłok Osiowo-Symetrycznych, *SYSTEM JOURNAL of Transdisciplinary Systems Science*, vol 9.
3. Nagel G., Thambiratnam D. (2003), Use of thin-walled frusta energy absorbers in protection of structures under impact loading. *Design and Analysis of Protective Structures against Impact/Impulsive/Shock Loads*, Queensland.
4. Zhong Z. H. (1993) *Finite element procedures for contact-impact problems*, Oxford University Press.
5. Barnat W., Niezgoda T. (2007), Badania energochłonności elementów podatnych w aspekcie zastosowanych materiałów *Journal of Kones Powertrain and Transport*, vol. 14, No 1.
6. Niezgoda T., Barnat W. (2005), Numeryczna Analiza Wpływu Kształtu Podstawowych Struktur Kompozytowych na Energię Zniszczenia, *III Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji Augustów, 1 – 4 czerwca 2005*.

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INFLUENCE OF KIND FULFILMENT BASIC COMPOSITE STRUCTURES ON ENERGY THE DESTRUCTION

Abstract: The opinion of applied fulfilment is on ability the aim of pracy the absorption through kompozytowy unit of thin-walled construction the energy weighted down dynamically. Energy-consuming units were executed in KMiIS. It investigations were conducted was on stamina machine engine Intron. The investigations were subjected in figure of muffs the energy-consuming units from additional foam fulfilment. Weight was realized by axial input function kinematic.