

NUMERICAL-EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FAILURE ENERGY OF COMPOSITE ENERGY ABSORBING PANELS

Tadeusz Niezgoda, Wiesław Barnat

Wojskowa Akademia Techniczna
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej
Gen. Sylwestra Kaliskiego2, 00-908 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 6839849 fax +48 22 6839355
e-mail: barnat@vp.pl

Abstract

The aim of the paper is an assessment of the influence of the applied fill on the energy absorbing capabilities of a composite element of a thin-walled structure under dynamic load. The experimental tests were carried out on the INSTRON universal testing machine. The analysis concerned energy absorbing elements in a shape of sleeves with additional foam fill. The numeric model charge was made like in previously carried out experiments, using cinematic input function. Analysed models were charged by a rigid plate, described by a material MATRIG type.

Foam filler use had for result the energy absorption improvement; this is important in the case of modernisation of existing structures using foam filler.

An important advantage of energy absorbing elements made of composite materials is their little mass. In the case of considering of protection elements for aviation industry, this factor is very important. The presented results are preliminary tests of energy absorbing filler choice and will be applied for numeric models validation.

The conclusion of preliminary estimation of obtained elements is that the appropriate choice of filler material will permit to obtain more important energy necessary for destruction of energy absorbing structure. The future application of numeric analyse will facilitate the process of filler parameters optimisation.

Keywords: transport, energy-absorbing elements, composites, numeric models, numerical analysis

NUMERYCZNO DOŚWIADCZALNE BADANIE ENERGII ZNISZCZENIA PODSTAWOWYCH STRUKTUR KOMPOZYTOWYCH

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

Zastosowanie wypełniacza w postaci piany spowodowało zwiększenie energii absorpcji – jest to dość istotne w przypadku modernizacji istniejących konstrukcji poprzez zastosowanie wypełnienia na pianowego.

Dużą zaletą elementów energochłonnych wykonanych z kompozytu jest ich mała masa. W przypadku rozpatrywania zastosowaniowa elementów ochronnych dla przemysłu lotniczego ma to niemałe znaczenie. Przedstawione wyniki są wstępnymi próbami doboru wypełniacza elementy energochłonnego i 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.

Słowa kluczowe: transport, elementy energochłonne, kompozyty, modele numeryczne, analiza numeryczna

1. Wstęp

Zagadnienie rozpraszania energii przez kompozytowe elementy absorbujące jest rozpatrywane w aspekcie lokalnej utraty stateczności lub progresywnego zniszczenia [1, 2]. Ze względu na uzyskanie jak największej ilości pochłoniętej energii pożądanym jest równomiernie zniszczenie konstrukcji ochronnej. W takim przypadku praca zużyta na zniszczenie elementu energochłonnego powoduje znaczne ograniczenie skutków obciążenia udarowego konstrukcji np. uderzenia platformy desantowej lub statku powietrznego o ziemię. Innym zadaniem struktur energochłonnych może być rozpatrywanie ich np., jako układu rozpraszającego energię uderzenia pojazdu w barierkę ochronną lub energię wybuchu [3]. Największą względną energię absorpcji (odniesioną do jednostki masy) posiadają kompozytowe elementy energochłonne [4].

Celem niniejszej pracy było oszacowanie wpływu zastosowanego wypełnienia na energię pochłoniętą przez podstawowy element energochłonny w postaci tulejki. Kompozytowe elementy walcowe charakteryzują się większą siłą spęczania inicjującą procesy zniszczenia niż elementy o innej geometrii (np. stożki) [5]. Uzyskane wyniki eksperymentalne posłużą do walidacji modeli numerycznych warstw ochronnych.

2. Opis badanych obiektów

W pracy przedstawiono wybrane wyniki z badań doświadczalnych czterech obiektów energochłonnych:

- Obiekt 1 - tulejka kompozytowa przebadana numerycznie i doświadczalnie, przedstawionym na rys. 1 i 3,
- Obiekt 2 - przedstawiony na rys 2 i 4 - tulejka kompozytowa z wypełnieniem pianowym,
- Obiekt 3 - przedstawiony na rys 5 - trzy tulejki cylindryczne z inicjatorami (przyklejone do podstawek kompozytowych żywicą E-53),
- Obiekt 4 - przedstawiony na rys 5, różnił się od trzeciego wypełnieniem pianką.

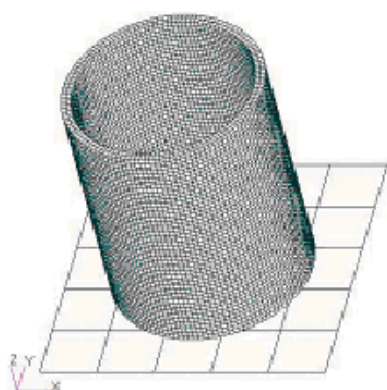
Tulejki kompozytowe zostały wykonane z maty szklanej epoksyd o następujących wybranych właściwościach: $E_{11}=1.85E+10$ Pa, $\nu_{12}=0.158$, $G_{12}=3.48E+09$ Pa. Tulejki charakteryzowała się średnicą wewnętrzną 40 mm i wysokością 50 mm i grubością ścianek 3 mm. Zastosowanym wypełnieniem była pianka lotnicza – spieniony polichlorkiem winylu PCHW-1 o następujących właściwościach materiałowych: $\rho = 115$ kg/m³, $E_r = 92.4$ MPa, $C_e = 80.6$ MPa, $R_M = 1.82$ MPa, $R_c=0.911$ MPa, $\nu = 0.26$.



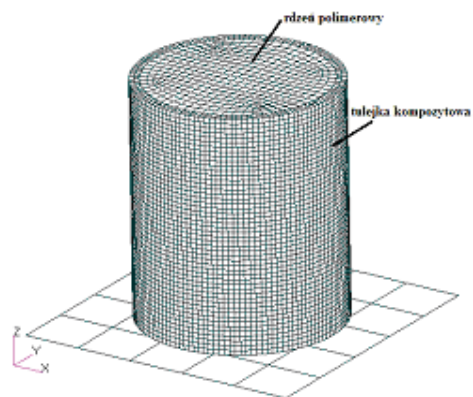
Rys. 1. Tulejka kompozytowa badana eksperymentalnie
Fig. 1. Composite sleeve investigated experimentally



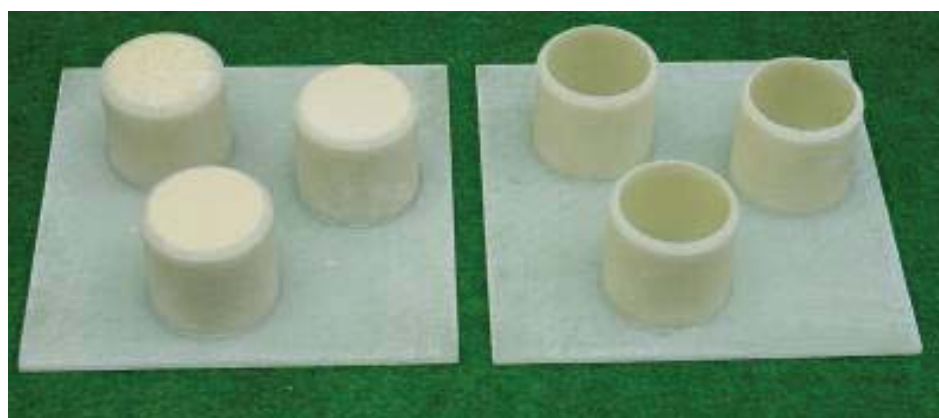
Rys. 2. Tulejka kompozytowa z wypełnieniem badana eksperymentalnie
Fig. 2. Composite sleeve with a polymer fill investigated experimentally



Rys. 3. Schemat modelu numerycznego tulejki
Fig. 3. Numerical model of the sleeve



Rys. 4. Schemat modelu numerycznego tulejki z wypełniaczem polimerowym
Fig. 4. Numerical model of the sleeve with a polymer fill



Rys. 5. Obiekt 3 i 4 - panele energochłonne w postaci trzech tulejek kompozytowych z wypełnieniem i bez wypełnienia pianowego

Fig. 5. Object 3 and 4 - energy absorbing panel in a shape of three composite sleeves and composite sleeve with a polymer fill

Prawo Hooke'a [6] 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:

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

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

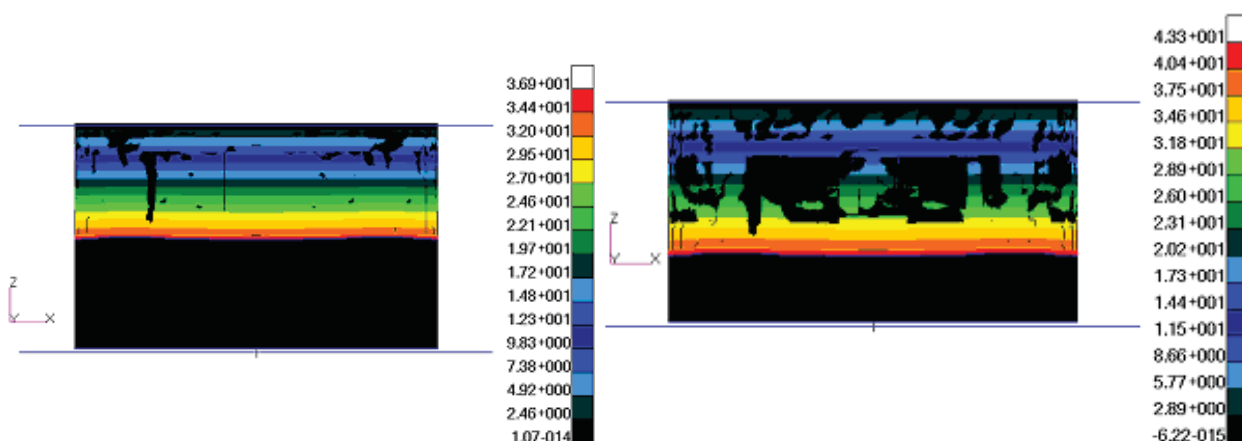
Obciążenie modelu numerycznego realizowano podobnie jak w przeprowadzonych eksperymentach poprzez wymuszenie kinematyczne. Analizowane modele były obciążone przez sztywną płytę, opisaną materiałem typu MATRIG.

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

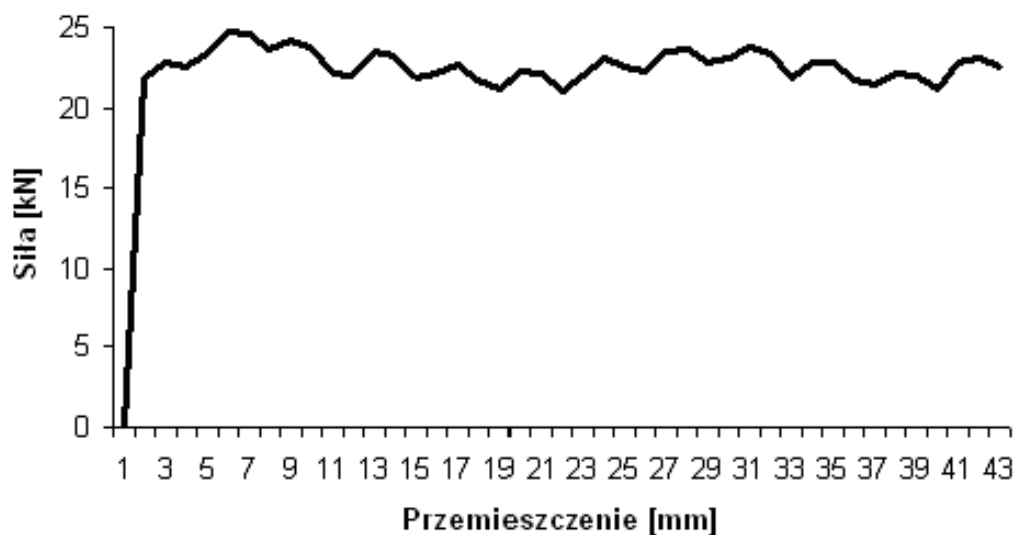
3. Wyniki badań dla tulejki kompozytowej

Model numeryczny tulejki został obciążony płytą nieodkształcalną, dla której nadano stałą prędkości 0.01 m/s. Obliczone wielkości przedstawiono w postaci planów warstwowych. Deformację modelu numerycznego przedstawiono na rys. 6.

W wyniku analizy oszacowano względną energię absorpcji, która wniosła 42 kJ/kg.



Rys. 6. Deformacja modelu numerycznego tulejki kompozytowej
Fig. 6. Deformation mode of the composite sleeve numerical model



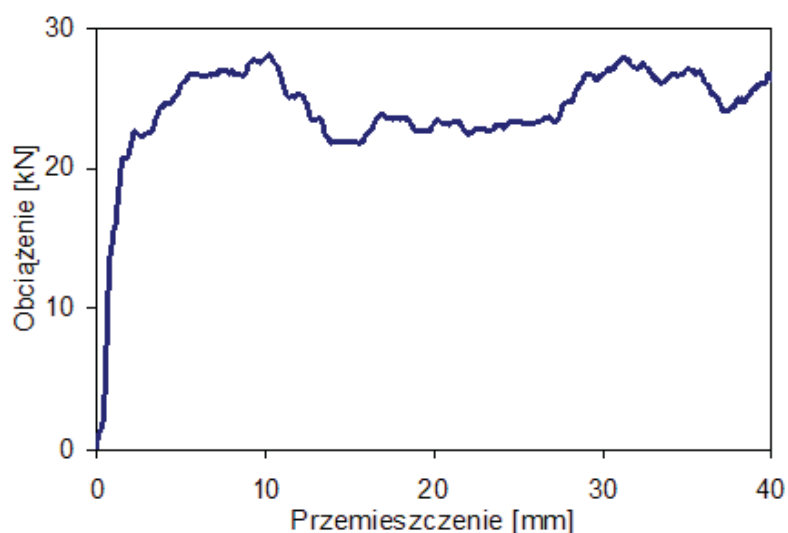
Rys. 7. Wykres przyrostu wartości reakcji pionowej uzyskanej numerycznie
Fig. 7. Numerically obtained compressive force diagram for the composite sleeve

Podobnie jak model numeryczny zachowywała się tulejka poddana badaniom eksperymentalnym. Sposób niszczenia kompozytowej tulejki przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 8. Sposób niszczenia tulejki kompozytowej
Fig. 8. Failure mode of the composite sleeve

Zmianę wartości siły niszczącej od przemieszczenia górnej płyty w strefie kontaktu pokazano na rys. 9. 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 śpężania rzędu 23 kN. Wykresy sił śpężania uzyskane numerycznie jak i doświadczalnie mają podobny charakter i świadczy to o poprawności wykonywania modelu i doboru parametrów modelu materiału.



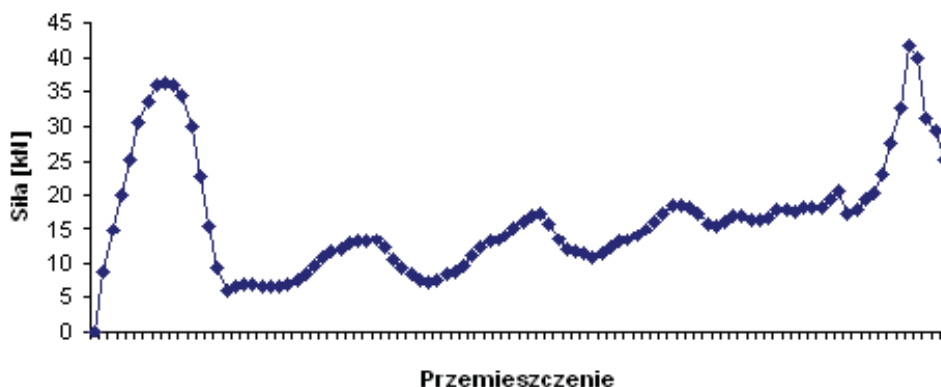
Rys. 9. Wykres przyrostu wartości reakcji pionowej uzyskanej eksperymentalnie
Fig. 9. Experimentally obtained compressive force diagram for the composite sleeve

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

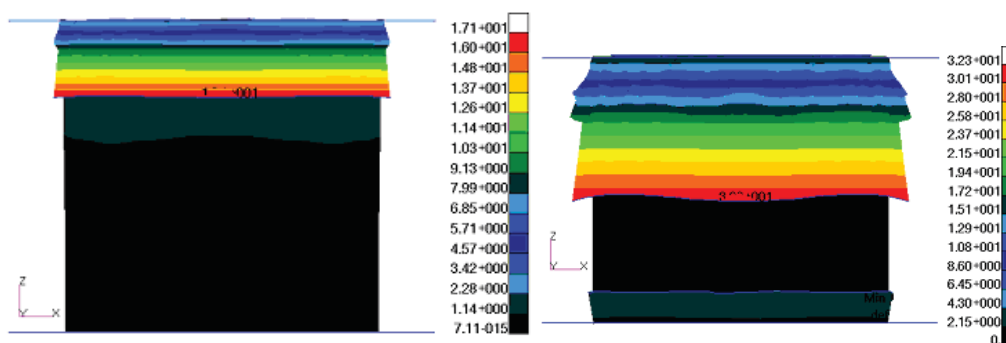
4. Wyniki badań dla tulejki kompozytowej z wypełnieniem

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu numerycznego uzyskano wykres siły śpężania w zależności od przemieszczenia czasu (rys 10). 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 śpężania ma złożony charakter. Na początku wykresu widać wyraźny skok wartości siły śpężania do ok. 37 kN. Następnie jej wartość (dzięki niszczeniu katastroficznemu tulejki) spada i osiąga wartość 7.5 kN. W następnym etapie obciążenia wartość siły śpężania wzrasta. Numeryczny model tulejki kompozytowej niszczy się w podobny sposób jak rzeczywisty obiekt. Sposób deformacji tulejki kompozytowej przedstawiono na rysunku 11.

Na podstawie obliczeń numerycznych stwierdzono, że średnia siła ściskania wynosi 20 kN. Po uwzględnieniu drogi, jaką pokonują sztywne płyty, oszacowano pracę sił ściskania na 800 J. Po uwzględnieniu masy elementu badanego stwierdzono, że względna energia absorpcji dla tulejki kompozytowej z wypełniaczem wynosi 24,4 kJ/kg.

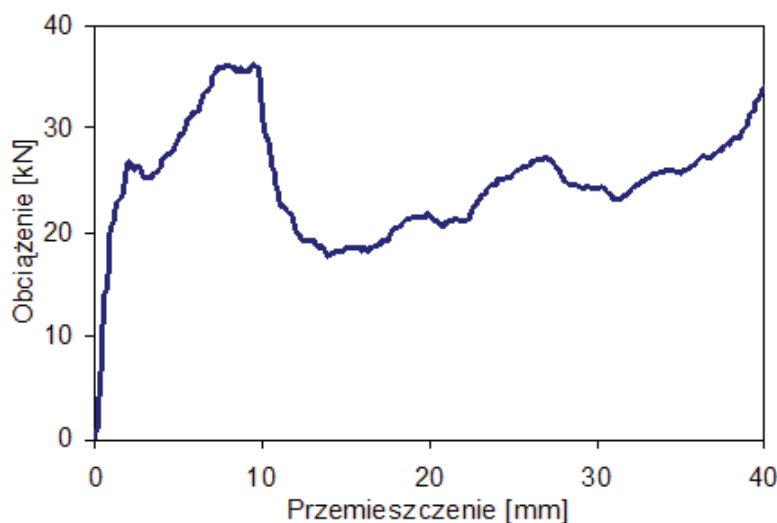


Rys. 10. Wykres siły ściskania tulejki kompozytowej z wypełnieniem pianowym uzyskany numerycznie
Fig. 10. Numerically obtained compressive force diagram for the composite sleeve with a polymer fill



Rys. 11. Sposób deformacji numerycznego modelu tulejki kompozytowej z wypełnieniem pianowym
Fig. 11. Deformation mode of the numerical model of the composite sleeve with a polymer fill

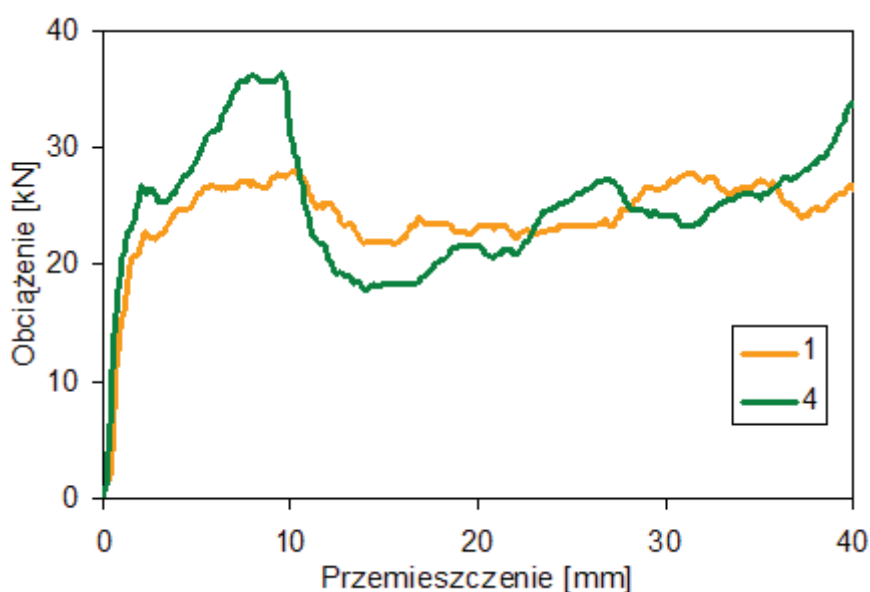
Podobnie jak modele numeryczne zachowywał się rzeczywisty obiekt. Wykres siły zniszczenia przedstawiono na rys 12. W pierwszym etapie nastąpiło zniszczenie początkowe warstw dla całej próbki. Następnie odnotowano katastroficzne niszczenie próbki charakteryzujące się niszczeniem gwałtownym poprzez pęknięcie próbki. Następnie siła ściskania wzrastała w sposób łagodny.



Rys. 12. Wykres $F-\Delta l$ z próby ściskania rurki z kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną, wypełnionej pianką
Fig. 12. $F-\Delta l$ plot obtained from the tension test of an epoxy composite tube reinforced with a glass mat and filled with a foam



Rys. 13. Sposób deformacji tulejki kompozytowej z wypełnieniem pianowym
 Fig. 13. Deformation mode of the numerical model of the composite sleeve with a polymer fill



Rys. 14. Porównanie wykresów przyrostu wartości reakcji pionowej uzyskanej eksperymentalnie
 1 – sama tulejka 2 – tulejka z wypełnieniem
 Fig. 14. Comparison of the vertical reaction increase obtained experimentally

Tab. 1. Zestawienie wyników eksperymentalnych uzyskanych dla tulejki z wypełnieniem i bez
 Tab. 1. Comparison of obtained results

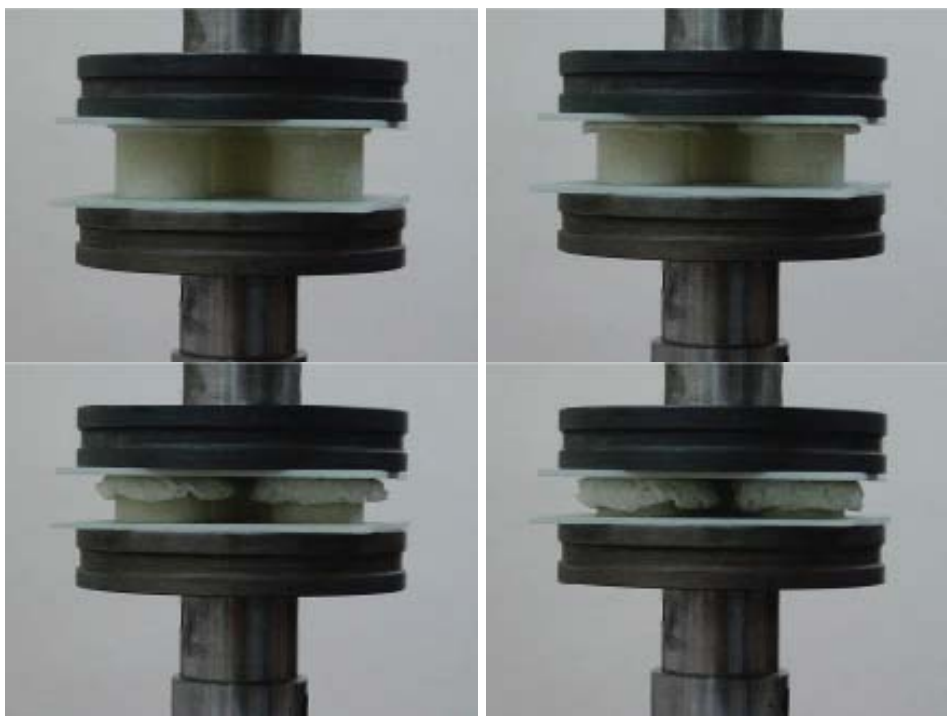
Rodzaj próbki	Grubość [mm]	D_{w2} [mm]	H [mm]	P_{max} [kN]	P_{sr} [kN]	$\frac{P_{sr}}{P_{max}}$	EA [J]	WEA [kJ/kg]	M [g]
Tulejka	3	39,3	50	28,1	23,1	0,822	1155	44,3	26,1
Tulejka z wypełnieniem	3	39,3	50	36,3	25	0,689	1250	37,7	33,2

Zastosowanie wypełniacza powoduje wzrost energii absorpcji. Tym niemniej źle dobrany rodzaj wypełniacza może spowodować pogorszenie własności energochłonnych elementu energochłonnego przez zmniejszenie względnej energii absorpcji. Zastosowanie wypełniacza ma również wady. W przypadku tulejki z wypełnieniem pianowym istnieje konieczność zwiększenia min grubości ścianki z 2 do 3 mm. Zbyt cienka ścianka nie wytrzyma naporu pianki i ulega katastroficznemu zniszczeniu (pękanie poprzeczne tulejki). Oznacza to, iż może dojść do tzw. zapętlenia doboru własności układu ochronnego, czyli zwiększając grubość ścianki możemy w szczególnych przypadkach spowodować uniemożliwienie zniszczenia elementu energochłonnego.

5. Wyniki dla obiektu 3 – trzy tulejki

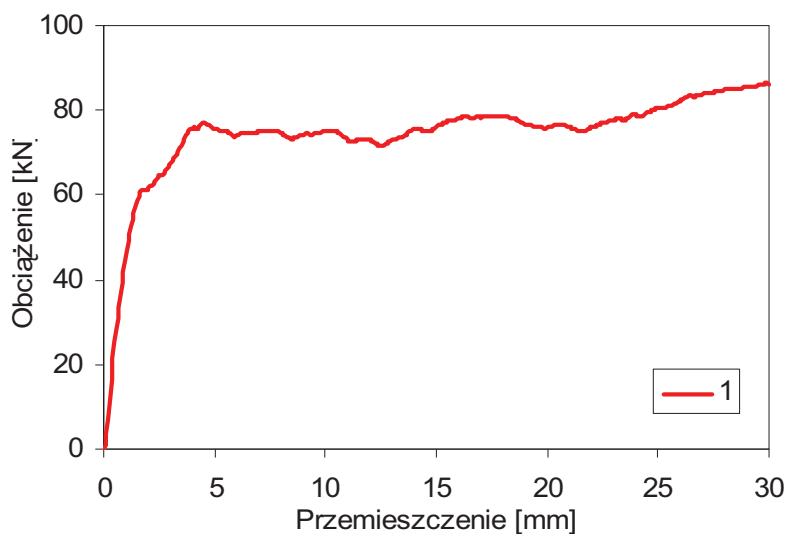
Uzyskane wyniki z badań eksperymentalnych dla obiektu trzeciego przedstawiono na rys 15. Przyklejenie elementów energochłonnych do płytki z jednej strony uniemożliwiło przesunięcie tulejek. Tulejki niszczyły się w sposób progresywny, głównie poprzez delaminację. Obiekt trzeci posiadał masę 66.1 g.

Charakter siły spęczania został przedstawiony na rys 16. Charakterystycznym dla wykresu jest łagodne narastanie siły spowodowane zastosowaniem inicjatorów (w postaci faz) rurek kompozytowych. Średnia wartość siły spęczania wyniosła 74,3 kN.



Rys. 15. Sposób niszczenia panelu energochłonnego w postaci trzech tulejek kompozytowych
Fig. 15. Failure mode of an energy absorbing panel in a shape of three composite sleeves

Średnia siła spęczana wyniosła 36,4 kN. Energia absorpcji wyniosła 2972 kJ a względna energia absorpcji wyniosła 45 kJ/kg. Zestawienie wyników eksperymentu pokazano w tabeli 2.



Rys. 16. Zależności P-Δ dla trzeciego obiektu energochłonnego
Fig. 16. P-Δ dependence for the energy absorbing object No. 3

Końcowy charakter zniszczenia przedstawiono na rys 17.



Rys. 17. Sposób niszczenia panelu energochłonnego w postaci trzech tulejek kompozytowych
 Fig. 17. Failure mode of an energy absorbing panel in a shape of three composite sleeves

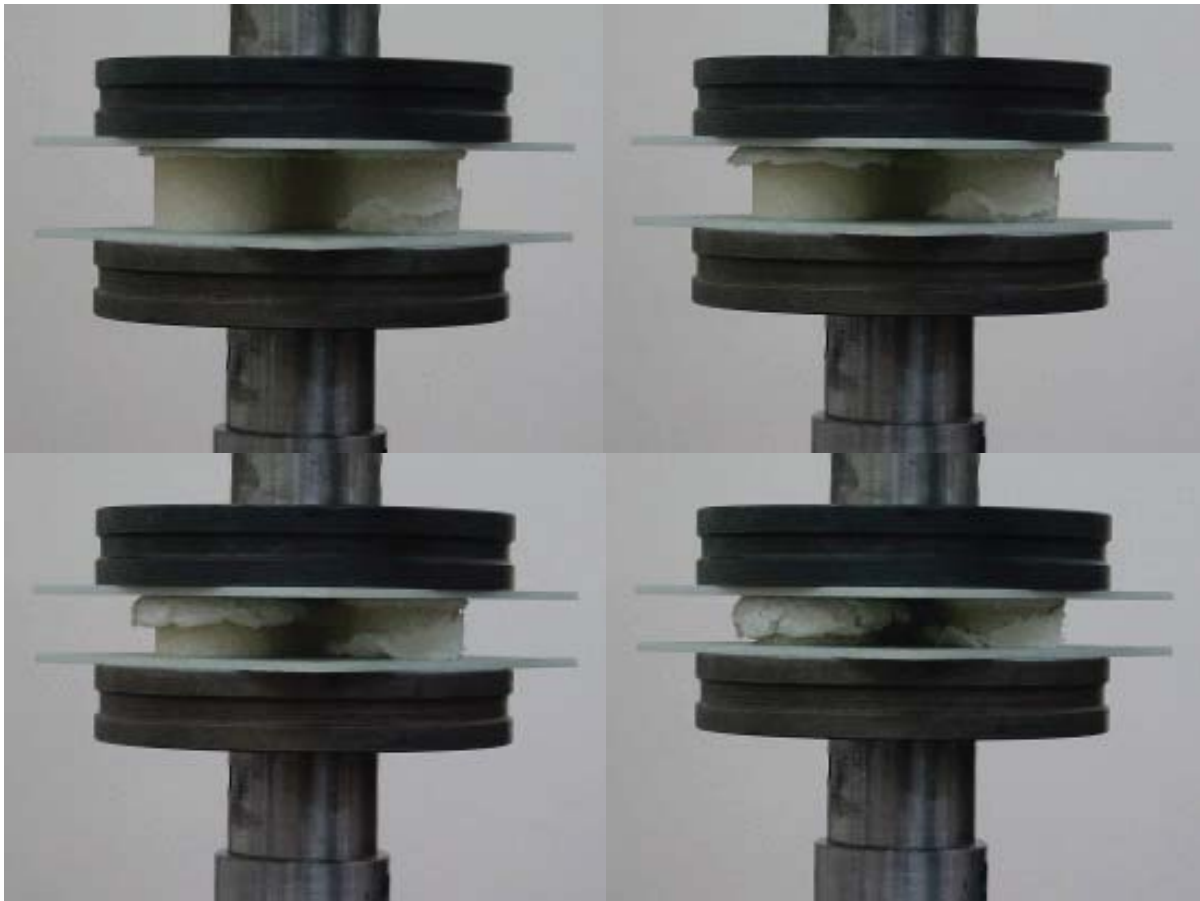
Tab. 2. Zestawienie wyników eksperymentalnych uzyskanych dla tulejki z wypełnieniem i bez
 Tab. 2. Comparison of obtained results

Struktura	Grubość crank [mm]	Dw2 [mm]	H [mm]	P _{max} [kN]	P _{śr} [kN]	P _{śr} /P max	EA [J]	WEA [kJ/kg]	m [g]
3 Tulejki	3	39,3	40	86,7	74,3	0,857	2972	45,0	66,1
3 Tulejki z wypełnieniem	3	39,3	40	105,7	90	0,851	3600	42,6	84,5

6. Wyniki dla obiektu 4 – trzy tulejki z wypełnieniem

Uzyskane wyniki z badań eksperymentalnych przedstawiono na rys 18. Zastosowanie elementów grubościennych (grubość ścianki 3 mm) umożliwiła zniszczenie progresywne elementów energochłonnych. W poprzednich pracach [7] zbyt cienka ścianka zastosowana do wykonania panelu energochłonnego powodowała katastroficzne niszczenie badanego obiektu. Duża gęstość piany lotniczej spowodowała ograniczenie swobodnej delaminacji kompozytowych elementów energochłonnych, co zaowocowało katastroficznym zniszczeniem tulejek. W celu przywrócenia poprzedniego progresywnego sposobu zniszczenia zastosowano rozwiązanie konstrukcyjne badanego obiektu poprzez zwiększenie grubości ścianek. Zwiększenie grubości ścianek dla zastosowanego materiału kompozytowego nie pozwala w pełni na uzyskanie progresywnego zniszczenia. Istnieje możliwość uzyskania katastroficznego zniszczenia tulejki kompozytowej z wypełnieniem pianowym (rys 18 – prawa tulejka). Obiekt czwarty posiadał masę 84,5g.

Charakter siły spęczania został przedstawiony na rys 19. Charakterystycznym dla wykresu jest występowanie załamania siły dla przemieszczenia 5 mm. Taki spadek siły jest spowodowany prawdopodobnie zniszczeniem katastroficznym jednej z rurek (rys 20). W wyniku mieszanego modelu niszczenia elementów energochłonnych oraz ograniczenia rozwarstwiania się elementów energochłonnych poprzez piankę lotniczą wartość siły spęczania wzrastała. Panel ochronny niszczył się z średnią siłą 70 kN. Maksymalna siłą jaka odnotowano dla obiektu 4 wynosi 105.7 kN.

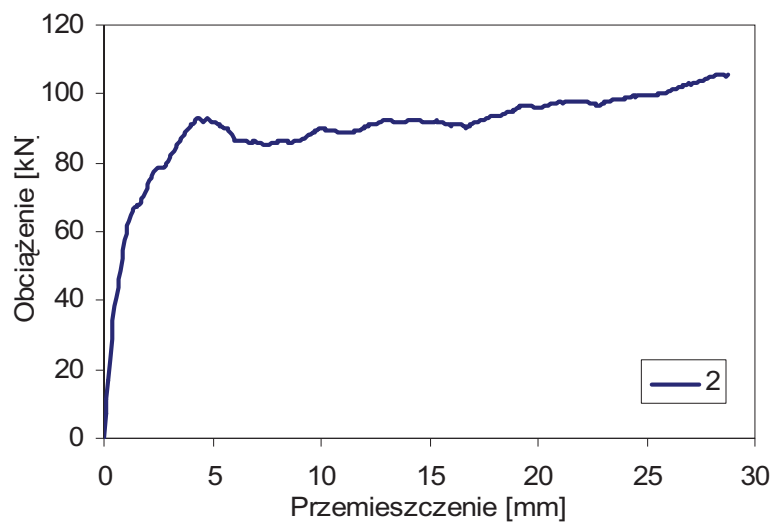


Rys. 18. Sposób niszczenia panelu energochłonnego w postaci trzech tulejek kompozytowych z wypełnieniem pianowym w postaci pianki lotniczej

Fig. 18. Failure mode of an energy absorbing panel in a shape of three composite sleeves filled with an aeronautic foam

W porównaniu z poprzednim obiektem wartość siły spęczenia była 1,13 razy większa.

Średnia siła spęczana wyniosła 90 kN. Energia absorpcji wyniosła 3600 kJ a względna energia absorpcji wyniosła 42,6 kJ/kg. Zestawienie wyników eksperymentu dla paneli pokazano w tabeli 2.



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

Fig. 19. P-Δ dependence for the energy absorbing object No. 2



Rys. 20. Sposób niszczenia panelu energochłonnego w postaci trzech tulejek kompozytowych z wypełnieniem pianowym

Fig. 20. Failure mode of an energy absorbing panel in a shape of three composite sleeves with foam fills

Zakończenie

W pracy przedstawiono wyniki badań numerycznych z weryfikacją eksperymentalną dwóch obiektów energochłonnych. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej typu Intron.

Zastosowanie wypełniacza w postaci piany spowodowało zwiększenie energii absorpcji – jest to dość istotne w przypadku modernizacji istniejących konstrukcji poprzez zastosowanie wypełnienia na pianowego.

Dużą zaletą elementów energochłonnych wykonanych z kompozytu 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 i 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.

Literatura

- [1] Niezgoda, T., Barnat, W., *Numeryczna Analiza Wpływu Kształtu Podstawowych Struktur Kompozytowych na Energię Zniszczenia*, III Symposium Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji Augustów, 1 – 4 czerwca 2005.
- [2] Nagel, G., Thambiratnam, D., *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, 2003.
- [3] Niezgoda, T., Barnat, W., *Analiza pasa bariery drogowej wzmocnionej elementami kompozytowymi w zastosowaniu do poprawy energochłonności elementów infrastruktury* Górnictwo Odkrywkowe 5-6/2006.
- [4] Barnat, W., Niezgoda, T., *Badania energochłonności elementów podatnych w aspekcie zastosowanych materiałów* Journal of Kones Powertrain and Transport vol 14 No 1/2007.
- [5] Niezgoda, T., Barnat, W., *Numeryczna Analiza Wpływu Kształtu Podstawowych Struktur Kompozytowych na Energię Zniszczenia*, III Symposium Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji Augustów, 1 – 4 czerwca 2005.

- [6] MSC Dytran, Example Problem Manual, Version 3.0 MSC 1996.
- [7] Niezgoda, T., Ochelski, S., Barnat, W., *Doświadczalne badanie wpływu rodzaju wypełnienia podstawowych struktur kompozytowych na energię zniszczenia*, Acta mechanica et automatica 1/2007.