

INVESTIGATION OF ENERGY-ABSORBING CAPABILITIES OF FLEXIBLE ELEMENTS IN THE ASPECT OF APPLIED MATERIALS

Wiesław Barnat, Tadeusz Niezgoda

Department of General Mechanics
Military University of Technology
Gen. S. Kaliskiego 2 Street, 00-908 Warsaw 49, Poland
tel.: +48 22 683 94 61
e-mail: barnat@vp.pl

Abstract

The paper deals with the problem of improvement of transport security through application of additional elements absorbing the crash energy. Experimental tests and numerical simulations of basic energy-absorbing elements in a shape of a sleeve made of steel, duralumin, bronze and glass-epoxy composite were presented. The results of the investigation will be used to develop a reliable numerical model of a panel of protective elements.

The numerical analysis was carried out by the Finite Element Method using the DYTRAN code. The calculations were verified experimentally on a universal testing machine INSTRON in the Department of General Mechanics of the Military University of Technology. On the basis of results of numerical and experimental investigations it was found that the composite sleeves have the specific absorbed energy twice higher than the steel ones. An interesting supplement of the energy dissipating system would be an additional element in the form of foams. It follows from the numerical calculation results that a higher specific absorbed energy was obtained for the composite energy absorbing element with a filler. The proposed method, based on numerical investigation, will allow for eliminating expensive and long-lasting testing of real objects. The obtained results will serve as guidelines to develop methods of testing for such structures and can be used in further research on increasing the security level in road transport.

Key words: transport security, energy-absorbing element, influence of material on energy-absorbing capabilities

BADANIA ENERGOCHŁONNOŚCI ELEMENTÓW PODATNYCH W ASPEKCIE ZASTOSOWANYCH MATERIAŁÓW

Streszczenie

W pracy rozważono problem związany z poprawą bezpieczeństwa transportu przez zastosowanie dodatkowych elementów absorbujących energię uderzenia. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych podstawowego elementu energochłonnego w postaci tulejki wykonanej ze stali, duraluminium, mosiądzu i kompozytu szklano epoksydowego. Wyniki tych badań posłużą do zbudowania wiarygodnego modelu numerycznego panelu elementów ochronnych. Analizę numeryczną wykonano metodą elementów skończonych w oprogramowaniu DYTRAN. Przeprowadzone obliczenia zostały zweryfikowane eksperymentalnie na maszynie wytrzymałościowej INSTRON w Zakładzie Mechaniki Ogólnej WAT. W wyniku badań numerycznych i eksperymentalnych stwierdzono, iż tulejki kompozytowe mają dwukrotnie większą względną energię absorpcji niż tulejki stalowe. Interesującym jest uzupełnienie układu rozpraszającego energię o dodatkowy element w postaci pian. W wyniku obliczeń numerycznych stwierdzono, iż względną maksymalną energię odkształcenia uzyskano dla kompozytowego elementu energochłonnego z wypełniaczem. Proponowana metoda oparta na badaniach numerycznych pozwoli na wyeliminowanie kosztownych i długotrwałych badań rzeczywistych obiektów. Otrzymane wyniki posłużą jako wytyczne do opracowania metodyki badania tego typu struktur i będą mogły być wykorzystywane w dalszych pracach badawczych w zakresie zwiększenia poziomu bezpieczeństwa w transporcie drogowym.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo transportu, elementy energochłonne, wpływ materiału na energochłonność

1. Wstęp

Coraz większe zagrożenia cywilizacyjne dla życia ludzkiego stanowi np. znaczne zwiększenie się prędkości pojazdów lub bobowe ataki terrorystyczne. Podstawowym zadaniem paneli ochronnych jest rozproszenie energii udaru pochodzącej od uderzenia lub eksplozji. Dążenie do uzyskania zmniejszenia kosztów przez zmianę ciężaru elementów energochłonnych czy też zwiększenie bezpieczeństwa odbywa się dzięki zastosowaniu elementów rozpraszających energię poprzez zniszczenie elementów struktury.

Dane literaturowe [1 - 4] dostarczają istotnych wskazówek dotyczących że modyfikacji istniejących rozwiązań konstrukcyjnych przez zastosowanie dodatkowych kompozytowych elementów absorbujących, co może znacznie polepszyć efektywność absorpcji energii kinetycznej takich struktur.

Najczęściej dąży się do zminimalizowania masy paneli energochłonnych. Mała masa pozwala na zaoszczędzenie m.in. paliwa, pozwala także na utrzymanie wymogu pływalności oraz daje możliwość transportu drogą lotniczą.

Dotychczasowe prace wskazują, iż największą względną energię absorpcji mają materiały, nazywane kompozytami włóknistymi, które w trakcie swojej około 60 - letniej historii, w ostatnich latach znacząco zwiększyły swój udział w wielu konstrukcjach np. samoloty, śmigłowce, jachty, okręty itp. [1]. Istotną zmianą, jaka nastąpiła w ciągu ostatnich kilkunastu lat, jest fakt coraz szerszego stosowania tego typu materiałów w elementach nośnych [2]. Jeszcze w latach 70 ubiegłego stulecia domeną kompozytów były obudowy, osłony, owiewki itp. Nieliczne wyjątki, takie jak łopaty wirników (struktura o bardzo prostym schemacie obciążenia) czy szybowce, tylko potwierdzały ogólną tendencję. Najważniejszą przyczyną tego stanu był brak technologii wytwarzania i tym samym brak powtarzalności cech wytrzymałościowych. Dopiero upowszechnienie się wstępnie przesyconych tkanin (tzw. prepregów) i automatyzacja procesów technologicznych sprawiły, że wyroby kompozytowe zaczęły charakteryzować się powtarzalnością swoich właściwości materiałowych. Kompozyty „awansowały” też w hierarchii materiałów konstrukcyjnych. Zaczęto je szerzej stosować do wytwarzania odpowiedzialnych, silnie obciążonych elementów konstrukcyjnych. Niejako automatycznie zwiększyło się też zapotrzebowanie na metody obliczeniowe dzięki którym można skutecznie przewidywać zachowanie się struktur kompozytowych w warunkach eksploatacyjnych. Wyniki uzyskiwane z wykorzystaniem podejścia, nazywanego klasyczną teorią kompozytów (sprowadzenie materiału kompozytowego do powłoki ortotropowej), przestały już wystarczać [3]. Świadczy o tym mnogość prac, w których w ciągu ostatnich 20 lat przedstawiono różne próby opracowania metod dokładniej opisujących i przewidujących zachowanie materiałów kompozytowych. Jednym z zagadnień stymulujących te poszukiwania jest modelowanie zachowania kompozytów poddanych obciążeniom udarowym, ze szczególnym naciskiem położonym na określenie własności energochłonnych tych materiałów [4].

2. Badania porównawcze podstawowego elementu energochłonnego - opis modeli numerycznych

W artykule porównano własności energochłonne 5 obiektów badań o zbliżonej geometrii, różniących się rodzajem materiału (gęstością):

- tulejki kompozytowej;
- tulejki stalowej;
- tulejki duraluminiowej PA 6;
- tulejki mosiądzu MO 58;
- tulejki kompozytowej z wypełniaczem piankowym.

Do badań wykorzystano tuleje o wymiarach przedstawionych w tabeli 1, pokazane na rysunkach 1 i 2. Analizę wykonano metodą elektów skończonych w oprogramowaniu DYTRAN. Dodatkowo dla rzeczywistych obiektów badań 1 i 2 dokonano analizy numerycznej. Obiekt 5 – analizowany numerycznie – modelem tulejki kompozytowej wypełnionej poliestrem o następujących własnościach materiałowych $E = 80 \text{ MPa}$, $G = 28,5 \text{ MPa}$, $\rho = 85 \text{ kg/m}^3$ [5]. Schemat modeli numerycznych przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Jak już wspomniano, przeprowadzone obliczenia zostały zweryfikowane eksperymentalnie na maszynie wytrzymałościowej INSTRON w Zakładzie Mechaniki Ogólnej WAT.

Tab. 1. Własności fizyczne badanych elementów
Tab. 1. Physical properties of investigated elements

| Lp. | Rodzaj materiału | Masa[g] | Wymiary[mm] | |
|-----|-------------------|---------|--|---------------|
| 1. | stal | 98,72 | wysokość średnica wewnętrzna grubość ścianki | 50 40 2 |
| 2. | kompozyt | 20,72 | | |
| 3. | duraluminium | 33,4 | | |
| 4. | mosiądz | 100,8 | | |
| 5. | kompozyt + pianka | 26 | | |



Rys. 1. Tulejka stalowa badana eksperymentalnie
Fig. 1. Steel sleeve investigated experimentally



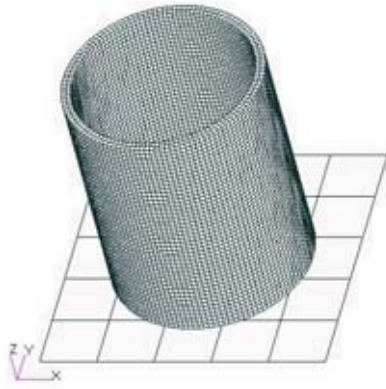
Rys. 2. Tulejka kompozytowa badana eksperymentalnie
Fig. 2. Composite sleeve investigated experimentally



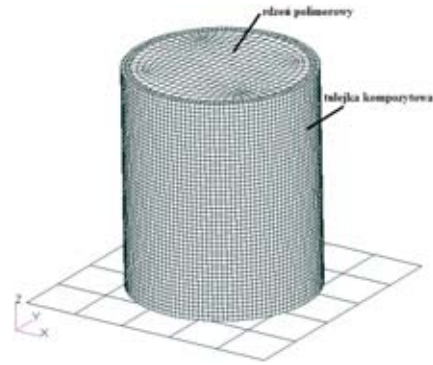
Rys. 3. Tulejka z mosiądzu badana eksperymentalnie
Fig. 3. Bronze sleeve investigated experimentally

Model numeryczny, przedstawiony na rysunku 4, składał się z 30 744 węzłów i 22 680 elementów typu SOLID. Model tulejki przedstawiony na rysunku 5 był podobny do modelu 3, uzupełnionego wypełniaczem w postaci pianki polimerowej. Rdzeń został zamodelowany 13 332 elementami typu SOLID i 14 790 węzłami. Kontakt pomiędzy wypełniaczem a tulejką został opisany kartą kontaktu master slave node.

Do opisu modeli numerycznych zastosowano dwa rodzaje materiałów. Płyty ściskające element walcowy zostały zamodelowane nieodkształcalnymi elementami CQUAD 4 nadając im własności materiału MATRIG [4]. MATRIG jest definiowany przez masę (gęstość) oraz grubość, która ma znaczenie przy odwzorowywaniu kontaktu. Moduł Younga i współczynnik Poissona nie są określane w przypadku nieodkształcalnego obiektu.



Rys. 4. Schemat modelu numerycznego tulejki
Fig. 4. Numerical model of the sleeve



Rys. 5. Schemat modelu numerycznego tulejki z wypełniaczem polimerowym
Fig. 5. Numerical model of the sleeve with a polymer filler

Obciążenie modeli realizowano kinematycznie. Analizowane fragmenty konstrukcji były obciążone przez dwie sztywne płyty. Płyta dolna była nieruchoma, a płyta górna poruszała się z prędkością 10 mm/min. Masa płyty górnej i dolnej wynosiła 1 kg. W modelu materiałowym uwzględniono nieliniowości fizyczne (model materiału) i geometryczne (duże przemieszczenia i odkształcenia).

Analizę numeryczną przeprowadzono specjalistycznym oprogramowaniem MSC Dytran, pozwalającym na symulacje procesów szybkościowych.

Elementy energochłonne, ze względu na lepsze własności opisu zjawiska zniszczenia kompozytu były zamodelowane elementami typu SOLID, dzięki czemu możliwe było pełne pokazanie sposobu zachowania się konstrukcji [6].

Elementy energochłonne miały następujące wybrane własności mechaniczne dla kompozytu mata szklana – epoksyd (uzyskane z eksperymentu): $E_{1,2}=6,8$ GPa, $\nu_{1,2}=0,27$, $G_{1,2}=3,8$ GPa. Dla stali przyjęto: $E_{1,2}=6,8$ GPa, $\nu_{1,2}=0,27$, $G_{1,2}=3,8$ GPa.

Prawo Hooke’a dla anizotropowego materiału ma następującą postać:

$$\sigma_i = C_{ij} * \varepsilon_j, \quad (1)$$

gdzie:

σ_i - składowe stanu naprężenia;

C_{ij} - współczynniki materiałowe wprowadzone w ortogonalnym układzie współrzędnych;

ε_j - składowe stanu odkształcenia.

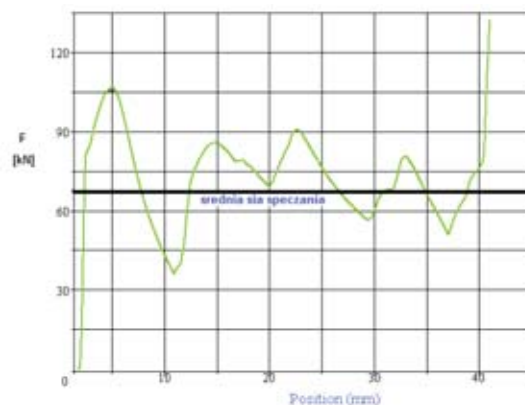
Postać macierzy C_{ij} w uogólnionym przypadku wygląda następująco:

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} 1/E_a & -\nu_{ba}/E_b & -\nu_{ca}/E_c & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{ab}/E_a & 1/E_b & -\nu_{cb}/E_c & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{ac}/E_a & -\nu_{ba}/E_b & 1/E_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{ca} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

W związku z tym do dokładnego opisu materiału ortotropowego niezbędna jest znajomość następujących stałych materiałowych: E_a , E_b , E_c , ν_{ab} , ν_{ca} , ν_{cb} , G_{ab} , G_{bc} , G_{ca} - do odpowiedniego zdefiniowania ogólnych właściwości mechanicznych materiału zgodnie z własnościami elementu niszczonego. Dla kompozytu który badano w omawianym przypadku do badań wstępnych przyjęto iż $E_1=E_2=E_{1,2}$.

3. Wyniki badań eksperymentalnych dla tulejki stalowej

Badania dla obiektu stalowego przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej z Zakładzie Mechaniki Ogólnej WAT. Szczęki maszyny poruszały się ze stałą prędkością 10 mm/min. W wyniku przeprowadzonego eksperymentu uzyskano wykres siły śpęczania w zależności od przemieszczenia szczęk maszyny wytrzymałościowej (rys. 6).



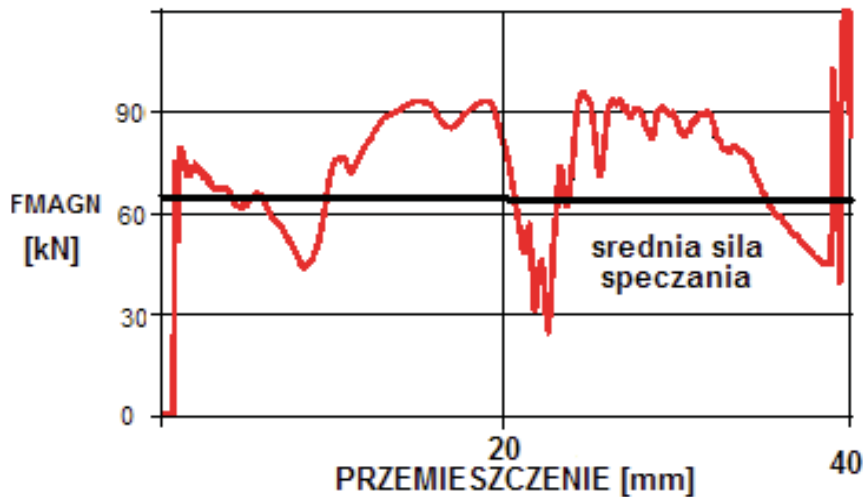
Rys. 6. Wykres siły śpęczania tulejki stalowej uzyskany eksperymentalnie
Fig. 6. Experimentally obtained compressive force diagram for the steel sleeve

Na podstawie otrzymanych wykresów można zaobserwować, że wykres ma charakter skokowy. Taki charakter przebiegu siły śpęczania jest spowodowany powstaniem dwóch fal na krawędzi bocznej tulejki. Sposób deformacji tulejki stalowej przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Proces i charakter deformacji tulejki stalowej
Fig. 7. Process and character of deformation of the steel sleeve

W wyniku eksperymentu stwierdzono, iż średnia siła śpęczania wynosi 70 kN. Po uwzględnieniu drogi, jaką pokonują szczęki maszyny wytrzymałościowej, oszacowano pracę sił śpęczania na drodze 35 mm, która wyniosła 2450 J. Po uwzględnieniu masy elementu badanego stwierdzono, że względna energia absorpcji (WEA) dla tulejki stalowej wynosi 24,82 kJ/kg. Powyższy przypadek przebadano w sposób numeryczny oprogramowaniem DYTRAN. Podobnie jak w eksperymencie element stalowy został numerycznie ściśnięty przez sztywne elementy płytowe. W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych uzyskano wykres siły śpęczania w zależności od czasu (rys. 8).



Rys. 8. Wykres siły spęczania tulejki stalowej uzyskany numerycznie
 Fig. 8. Numerically obtained compressive force diagram for the steel sleeve

Wykres numeryczny, tak samo jak eksperymentalny, ma charakter skokowy. Taki charakter przebiegu siły spęczania jest spowodowany powstaniem dwóch fal na krawędzi bocznej tulejki. Sposób deformacji tulejki stalowej przedstawiono na rysunku 9. Ponadto w końcowej fazie numerycznego ściskania tulejki nastąpiło „sprasowanie” tulejki dzięki zastosowaniu karty samo kontaktu.



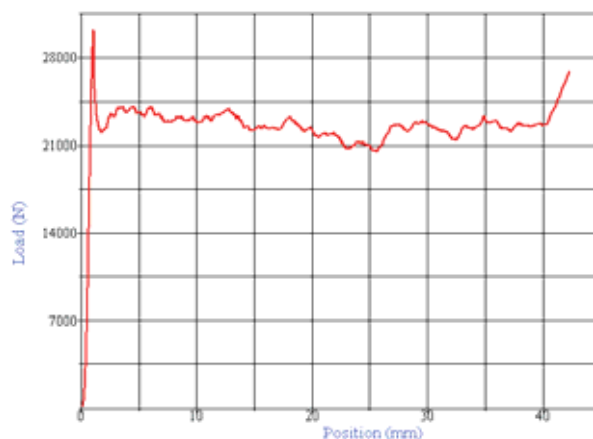
Rys. 9. Sposób deformacji numerycznego modelu tulejki stalowej
 Fig. 9. Deformation mode of the steel sleeve numerical model

Wyniki numeryczne są zgodne z wynikami uzyskanymi z eksperymentu. Uzyskana numerycznie względna energia absorpcji (WEA) wynosi około 26 kJ/kg. Taka zbieżność wyników świadczy o dobrym podejściu do modelowania procesu utraty energii poprzez elementy stalowe.

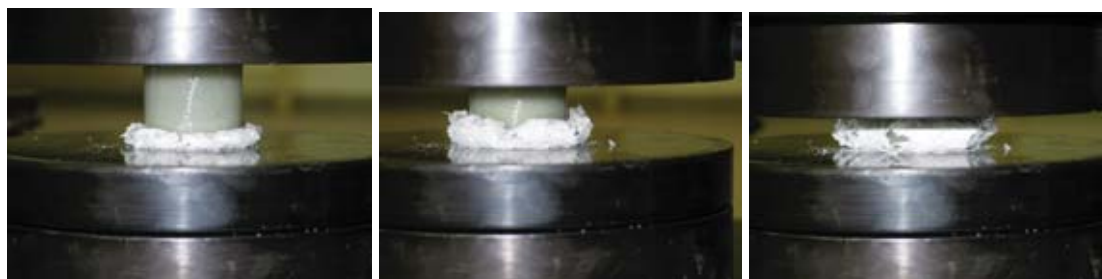
4. Wyniki dla tulejki kompozytowej

Podobnie jak dla obiektu stalowego badania dla kompozytu przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej w Zakładzie Mechaniki Ogólnej WAT. Szczęki maszyny poruszały się ze stałą prędkością 10 mm/min. W wyniku przeprowadzonego eksperymentu uzyskano wykres siły spęczania w zależności od przemieszczenia szczęk maszyny wytrzymałościowej (rys. 10).

Wykres ma charakter linowy. Na początku wykresu widać wyraźny skok wartości siły spęczania spowodowany brakiem inicjatora (fazy na krawędzi tulejki). Następnie wykres ma charakter stały w wyniku progresywnego sposobu niszczenia elementu kompozytowego. Taki charakter przebiegu siły spęczania jest spowodowany powstaniem rozwarstwienia tulejki (tzw. pędzla). Sposób deformacji tulejki kompozytowej przedstawiono na rysunku 11.

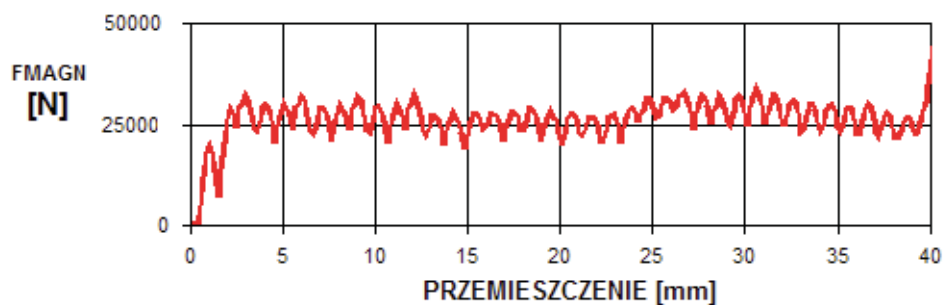


Rys. 10. Wykres siły spęczania tulejki stalowej uzyskany eksperymentalnie
 Fig. 10. Experimentally obtained compressive force diagram for the steel sleeve



Rys. 11. Sposób niszczenia tulejki kompozytowej
 Fig. 11. Failure mode of the composite sleeve

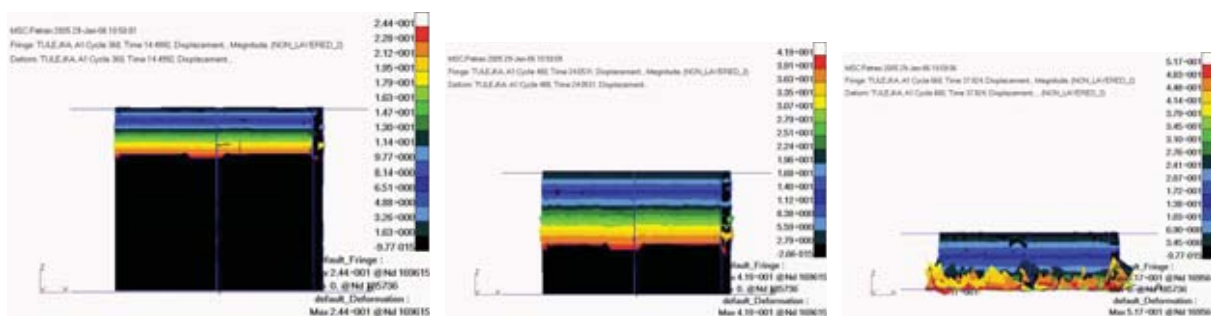
W wyniku eksperymentu stwierdzono, iż średnia siła spęczania wynosi 23 000 N. Po uwzględnieniu drogi, jaką pokonują szczęki maszyny wytrzymałościowej, oszacowano pracę sił spęczania na 805 J. Po uwzględnieniu masy elementu badanego stwierdzono, że względna energia absorpcji dla tulejki kompozytowej na drodze 35 mm wynosi 38,85 kJ/kg. Oznacza to, iż względna energii absorpcji dla tulejki kompozytowej jest prawie dwukrotnie większa niż tulejki stalowej. Powyższy przypadek podobnie jak dla tulejki stalowej, przebadano w sposób numeryczny oprogramowaniem DYTRAN. Tak samo jak w eksperymencie element kompozytowy został numerycznie ściśnięty poprzez sztywne elementy płytowe. W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych uzyskano wykres siły spęczania w zależności od czasu (rys. 12).



Rys. 12. Wykres siły spęczania tulejki kompozytowej uzyskany numerycznie
 Fig. 12. Numerically obtained compressive force diagram for the composite sleeve

Wykres numeryczny, tak jak wykres eksperymentalny, ma charakter stały. Niemniej jednak numeryczny model tulejki kompozytowej ulega deformacji, podobnej do deformacji stwierdzonej

w wypadku eksperymentu. Sposób deformacji tulejki kompozytowej przedstawiono na rysunku 13.



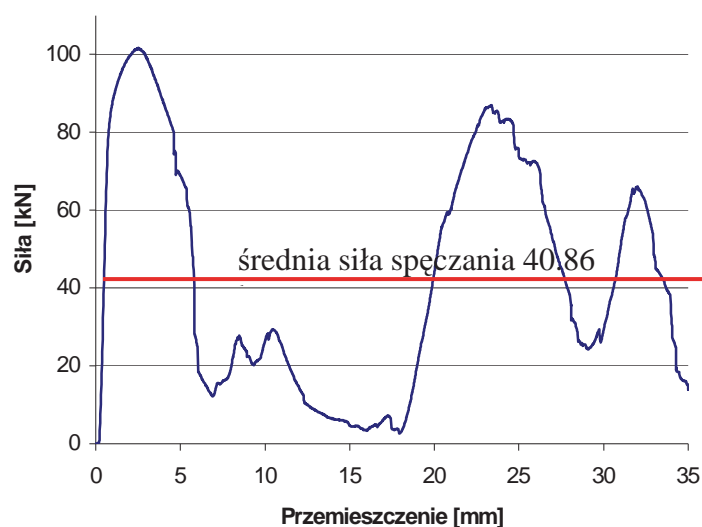
Rys. 13. Sposób deformacji numerycznego modelu tulejki kompozytowej
Fig. 13. Deformation mode of the composite sleeve numerical model

Wyniki numeryczne są zgodne z wynikami z eksperymentu. Uzyskana numerycznie względna energia absorpcji wynosi około 40 kJ/kg. Taka zbieżność wyników świadczy o dobrym podejściu do modelowania procesu utraty energii poprzez elementy kompozytowe.

5. Wyniki badań eksperymentalnych dla tulejki z duraluminium

Badania dla obiektu duraluminiowego przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej w Zakładzie Mechaniki Ogólnej WAT. Szczęki maszyny podobnie jak w poprzednich przypadkach poruszały się ze stałą prędkością 10 mm/min. W wyniku przeprowadzonego eksperymentu uzyskano wykres siły śpęczania w zależności od przemieszczenia szczęk maszyny wytrzymałościowej (rys. 14).

Na podstawie otrzymanych wykresów można zaobserwować, że wykres ma charakter skokowy. Taki charakter przebiegu siły śpęczania jest spowodowany kruchością materiału tulejki. Sposób deformacji tulejki duraluminiowej przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 14. Wykres siły śpęczania tulejki duraluminiowej uzyskany eksperymentalnie
Fig. 14. Experimentally obtained compressive force diagram for the duralumin sleeve



Rys. 15. Sposób deformacji tulejki duraluminiowej
Fig. 15. Deformation mode of the duralumin sleeve

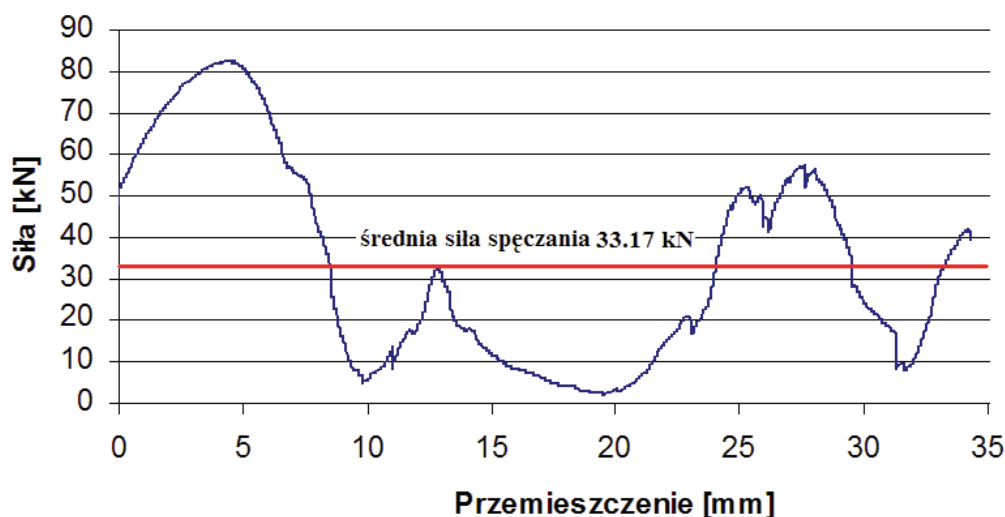
W wyniku eksperymentu stwierdzono, że średnia siła spęczania wynosi 40,86 kN. Po uwzględnieniu drogi, jaką pokonują szczęki maszyny wytrzymałościowej, oszacowano pracę sił spęczania na 1487 J. Po uwzględnieniu masy elementu badanego stwierdzono, iż względna energia absorpcji (WEA) dla tulejki duralowej wynosi 40,82 kJ/kg.

Wyniki numeryczne są zgodne z wynikami z eksperymentu. Uzyskana numerycznie względna energia absorpcji (WEA) wynosi około 29 kJ/kg.

Prace badawcze dla duraluminium zostały zaniechane z powodu zbyt dużej „niestabilności” sposobu niszczenia oraz dość dużych kosztów materiałowych.

6. Wyniki badań eksperymentalnych dla tulejki z mosiądzu

Badania dla obiektu wykonanego z mosiądzu przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej w Zakładzie Mechaniki Ogólnej WAT. Szczęki maszyny podobnie jak w poprzednich przypadkach poruszały się ze stałą prędkością 10 mm/min. W wyniku przeprowadzonego eksperymentu uzyskano wykres siły spęczania w zależności od przemieszczenia szczęk maszyny wytrzymałościowej (rys 16).



Rys. 16. Wykres siły spęczania tulejki wykonanej z mosiądzu uzyskany eksperymentalnie
Fig. 16. Experimentally obtained compressive force diagram for the brass sleeve

Na podstawie otrzymanych wykresów można zaobserwować, że wykres podobnie jak w przypadku obiektu wykonanego z duraluminium, ma charakter skokowy. Taki charakter przebiegu siły spęczania jest spowodowany kruchością materiału tulejki. Sposób deformacji tulejki mosiężnej przedstawiono na rysunku 17.



Rys. 17. Sposób deformacji tulejki wykonanej z mosiądzu

Fig. 17. Deformation mode of the brass sleeve

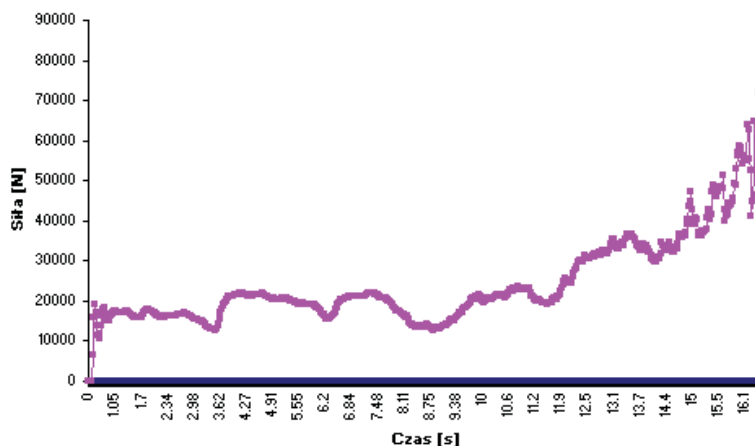
W wyniku eksperymentu stwierdzono, że średnia siła śpęczania wynosi 33,17 kN. Po uwzględnieniu drogi, jaką pokonują szczęki maszyny wytrzymałościowej, oszacowano pracę sił śpęczania na 1160 J. Po uwzględnieniu masy elementu badanego stwierdzono, iż względna energia absorpcji (WEA) dla tulejki mosiężnej wynosi 11,52 kJ/kg.

Podobnie jak w przypadku tulejki z duraluminium duża „niestabilność” procesu niszczenia oraz dość duże koszty tulejek spowodowała zarzucenie prac badawczych nad mosiądzem.

6. Wyniki dla tulejki kompozytowej z rdzeniem

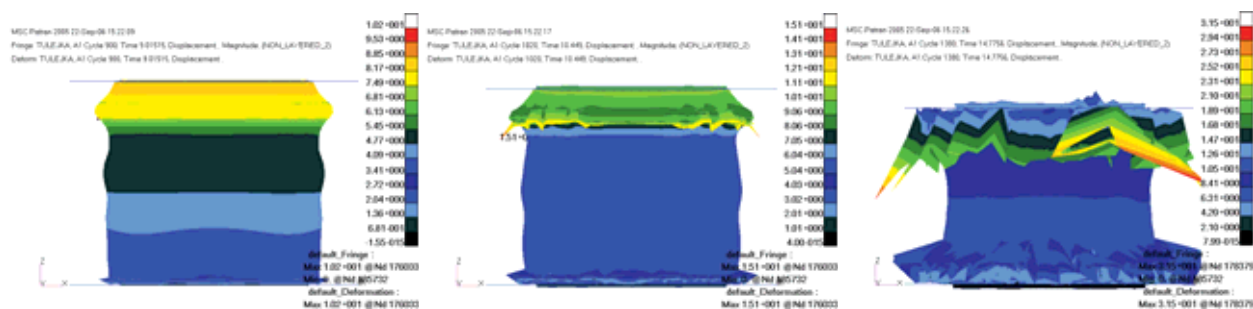
W wyniku przeprowadzonego eksperymentu numerycznego uzyskano wykres siły śpęczania w zależności od przemieszczenia czasu (rys 18). Ze względu na zastosowanie wypełniacza siła śpęczania zwiększała się. Zastosowanie wypełniacza spowodowało iż tulejka kompozytowa ulegała niszczeniu w sposób inny niż dla modelu samodzielnej tulejki. Wypełniacz uniemożliwia zwinięcie się tulejki do środka modelu. Wykres siły śpęczania ma charakter linowy. Na początku wykresu widać wyraźny skok wartości siły śpęczania. Następnie wartość siły (dzięki zastosowaniu wypełniacza) się zwiększa. W początkowym procesie niszczenia warstwa tulejki kompozytowej ulega zniszczeniu przez lokalne wyboczenie. Następnie tulejka zostaje zniszczona poprzez rozwarstwienie (tzw. pędzel). Sposób deformacji tulejki kompozytowej przedstawiono na rysunku 19.

Na podstawie obliczeń numerycznych stwierdzono, że średnia siła śpęczania wynosi 30 kN. Po uwzględnieniu drogi, jaką pokonują sztywne płyty, oszacowano pracę sił śpęczania 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. Niezbędne jest jednak przeprowadzenie weryfikacji eksperymentalnej badanego modelu numerycznego.



Rys. 18. Wykres siły śpęczania tulejki kompozytowej z wypełnieniem pianowym uzyskany numerycznie

Fig. 18. Numerically obtained compressive force diagram for the composite sleeve with a polymer filler



Rys. 19. Sposób deformacji numerycznego modelu tulejki kompozytowej z wypełnieniem pianowym
 Fig. 19. Deformation mode of the numerical model of the composite sleeve with a polymer filler

7. Wnioski do badań porównawczych

Interesujące jest porównanie względnej energii absorpcji dla tulejek o tych samych własnościach geometrycznych (metalowej i kompozytowej). Porównanie otrzymanych wyników przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Zestawienie otrzymanych wyników
 Tab. 2. Comparison of obtained results

| Lp. | rodzaj materiału | kompozyt | stal | Duraluminium PA6 | Mosiądz MO 58 | Kompozyt wypełniony pianką |
|-----|--|----------|-------|------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | masa [g] | 20.72 | 98.72 | 33.4 | 100.8 | 26 |
| 2 | średnia siła spęczania [kN] | 23 | 70 | 40.86 | 33.17 | 30 |
| 3 | praca siły spęczania na drodze 35 mm [J] | 805 | 2450 | 1430.1 | 1160.95 | 1050 |
| 4 | względna energia absorpcji [kJ/kg] | 38.85 | 24.82 | 42.82 | 11.52 | 40.4 |

W wyniku badań numerycznych i eksperymentalnych stwierdzono, iż tulejki kompozytowe mają dwukrotnie większą względną energię absorpcji niż tulejki stalowe. Interesującym jest uzupełnienie układu rozpraszającego energię o dodatkowy element w postaci pian.

W wyniku obliczeń numerycznych stwierdzono, iż względną maksymalną energię odkształcenia uzyskano dla kompozytowego elementu energochłonnego z wypełniaczem 40 kJ/kg. Oznacza to, że zastosowanie takich tulejek do warstw ochronnych jest celowe.

Dalsze symulacje numeryczne procesu zderzenia, dla różnych konfiguracji i przy różnych prędkościach uderzenia, pozwolą na szczegółowe poznanie charakteru rozproszenia energii uderu poprzez elementy energochłonne. Niemniej jednak pożądane jest przeprowadzenie serii eksperymentów porównawczych i weryfikujących badania numeryczne. Proponowana metoda oparta na badaniach numerycznych pozwoli na wyeliminowanie kosztownych i długotrwałych badań rzeczywistych obiektów. Otrzymane wyniki posłużą jako wytyczne do opracowania metodyki badania tego typu struktur i będą mogły być wykorzystywane w dalszych pracach badawczych w zakresie zwiększenia poziomu bezpieczeństwa w transporcie drogowym.

Kolejnym etapem badań było rozważanie modyfikacji istniejącej konstrukcji w celu zwiększenia jej właściwości energochłonnych, przez zastosowanie elementów o zmienionych profilach oraz nowych struktur zdolnych pochłonąć większą ilość energii i dodatkowo wzmocnionych pianami metalicznymi.

Literatura

- [1] Ochelski, S., *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, WNT, Warszawa 2004.
- [2] Urbański, J., *Tworzywa sztuczne*, MON 1962.
- [3] Muc, A., *Mechanika kompozytów włóknistych*, Księgarnia Akademicka Kraków 2003.
- [4] MSC Dytran, *Example Problem Manual*, Version 3.0 MSC 1996.
- [5] Żmihorski, E. *Konstrukcje przekładkowe*, MON 1964.
- [6] Niezgoda, T., Barnat, W., *Numeryczna analiza wpływu kształtu podstawowych struktur kompozytowych na energię zniszczenia*, III Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Augustów, 2005.