

INVESTIGATION OF PLATES COVERED WITH ELASTOMERIC COATINGS SUBJECTED TO SHOCK WAVE LOADING

Anna Boczkowska*, Wiesław Barnat**, Tadeusz Niezgoda**

**Warsaw University of Technology
Faculty of Materials Science and Engineering
Wolaska 141, 02-507 Warsaw, Poland
tel. +4822 2347762, fax. +48 22 6281983
e-mail: abocz@meil.pw.edu.pl*

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

Abstract

The subject of investigation was numerical and experimental analysis of energy absorbing elastomeric layers in connection with experimental verification. The energy-absorbed layers were subjected to pressure impulse simulating a blast. The elaborated structures will be applied to solve problems connected with increasing the security of military vehicles and crucial oil and gas pipeline structures, particularly in dangerous locations, such as crossings over rivers etc. The constructions exposed to a violent crash or to the effect of a shock wave should have a structure enabling the absorption of a part of the crash-energy. Energy absorbing elements are most commonly made in a form of sandwich shells, the core of which is a system of suitable structural sections. Nevertheless, the application of elastomers may be of interest, because these materials possess the capabilities of absorbing the energy of a shock wave produced by a blast, and thus allow for a good protection. The analysis carried out will be useful for selection of kinds and parameters of energy-absorbing coatings, as well as for the future investigation aimed at determining the optimal parameters of energy-absorbing structures used in the armoured vehicles construction. In the paper, some aspects of an approach to the problems of energy absorption capabilities and crash energy dissipation were presented.

Key words: *protection against blast damage, elastomers, new technologies*

BADANIE PŁYT POKRYTYCH WARSTWĄ ELASTOMERU OBCIĄŻONYCH FALĄ UDERZENIOWĄ

Streszczenie

Przedmiotem badań była numeryczno-doświadczalna analiza energochłonnych elastomerowych warstw połączona z weryfikacją eksperymentalną. Warstwy energochłonne zostały obciążone impulsem ciśnienia symulującym wybuch. Opracowane struktury elastomerowe będą wykorzystywane do rozwiązywania problemów związanych ze zwiększenia bezpieczeństwa pojazdów wojskowych oraz newralgicznych konstrukcji rurociągów i gazociągów szczególnie w niebezpiecznych miejscach, takich jak przejścia nad rzekami itp. Konstrukcje, które mogą ulec szybkim zderzeniom lub narażone są na działanie fali uderzeniowej, powinny mieć strukturę umożliwiającą pochłanianą część energii udaru. Elementy energochłonne najczęściej są budowane w postaci powłok przekładkowych, których rdzeniem jest układ odpowiednich kształtowników. Niemniej jednak interesujące jest zastosowanie elastomerów. Tworzywa te mające zdolności do pochłaniania energii fali uderzeniowej pochodzącej od wybuchu pozwalają na dobrą ochronę. Dokonana analiza będzie przydatna przy doborze rodzajów i parametrów warstw energochłonnych, posłuży też do dalszych badań, których zadaniem będzie określenie optymalnych parametrów struktur energochłonnych wykorzystywanych w budowie pojazdów opancerzonych. W poniższym artykule przedstawiono wycinek podejścia do problemu energochłonności oraz rozpraszania energii udaru.

Słowa kluczowe: *ochrona przed skutkami wybuchów, elastomery nowe technologie*

1. Wstęp

Coraz śmielsze i okrutniejsze ataki terrorystyczne są powodem dążenia do zwiększenia odporności udarowej konstrukcji na działanie krótkotrwałych obciążeń pochodzących od wybuchów [1, 2]. Na działanie fali uderzeniowej są narażone załogi pojazdów bojowych oraz instalacje energetycznych linii przesyłowych, ropy i gazu.

W artykule opisano sposób zastosowania elastomerowych struktur energochłonnych, które staną się podstawą do dalszych badań. Przedstawiono także analizę numeryczną opracowywanej konstrukcji. Istotna jest weryfikacja eksperymentalna wykonanych obliczeń.

Dzięki przeprowadzonej analizie metodą elementów skończonych można było opracować wstępne modele obiektów doświadczalnych. Konstrukcje struktur zostały wykonane w formie elastomerowych warstw przyklejonych do blachy stalowej.

Warstwy energochłonne mają szerokie zastosowanie we współczesnej technice. Służą one przede wszystkim do rozproszenia energii powstałej w wyniku oddziaływania obcego ciała (udar) lub ciśnienia (np. spowodowanego wybuchem) na konstrukcję [3, 4, 5].

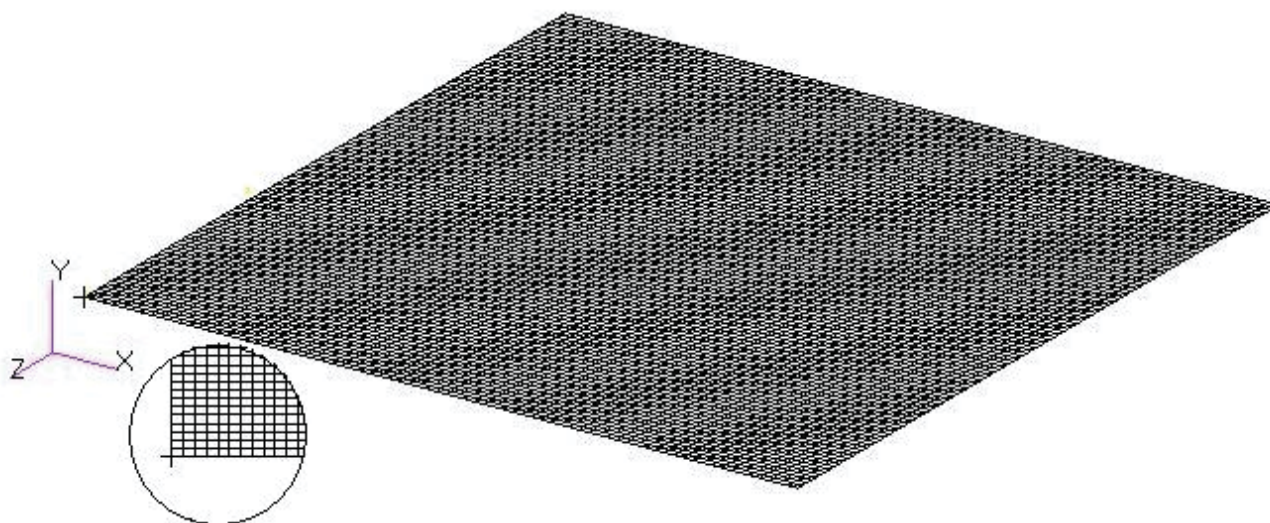
Dokonana analiza będzie przydatna przy doborze rodzajów i parametrów warstw energochłonnych, posłuży też do dalszych badań, których zadaniem będzie określenie optymalnych parametrów struktur energochłonnych wykorzystywanych w budowie pojazdów opancerzonych.

2. Opis badanych struktur energochłonnych

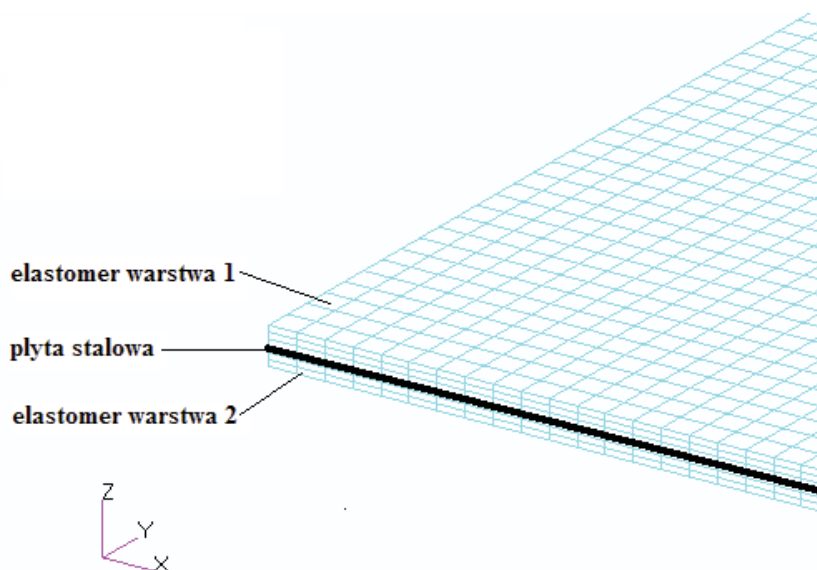
Analizie poddano cztery modele numeryczne. Przyjęto bazowy model obiektu chronionego w postaci kwadratowej płyty (blachy) o długości boku 0,5 m, w którym wyszczególniono naddatek na zamocowanie:

- Model 1 - stalowa płyta o grubości 1,5 mm obciążona impulsem ciśnienia;
- Model 2 - stalowa płyta z warstwą elastomeru obciążona impulsem ciśnienia po stronie stali;
- Model 3 - stalowa płyta z warstwą elastomeru obciążona impulsem ciśnienia po stronie elastomeru;
- Model 4 - stalowa płyta z dwiema warstwami elastomeru obciążona impulsem ciśnienia po stronie elastomeru;

Weryfikację eksperymentalną ww. modeli dokonano dla modelu 1 i 2.



Rys. 1. Ogólny widok siatki podziału na elementy skończone modelu numerycznego blachy stalowej
 Fig. 1. General view of the finite element mesh for the numerical model of the steel sheet



Rys. 2. Ogólny widok modelu 4 - blachy stalowej z dwiema warstwami elastomeru
 Fig. 2. General view of model 4 – steel sheet with two elastomeric layers

Płyty metalowe pokrywano elastomerem nitylomocznikowouretanowym (PNMU) o liniowej budowie. Makrocząsteczki takiego elastomeru zbudowane są z segmentów giętkich i sztywnych, złożonych z merów giętkich (G) i sztywnych (S). Mery giętkie otrzymano w wyniku addycji oligoadypinianu etylenu (OAE), o nazwie handlowej Alfaster T-620 z diizocyjanianem 4,4' difenylometanu (MDI). Mery sztywne powstały w wyniku reakcji grup aminowych $-NH_2$ dicyjandiamidu (DCDA) z grupami izocyjanianowymi ($-NCO$), zawartymi w MDI [6, 7]. Zastosowanie DCDA jako środka wydłużającego powoduje powstanie w każdym merze sztywnym silnie polarnych grup mocznikowych rozdzielonych tylko jednym atomem węgla i podstawnika w postaci silnie polarnej grupy imidonitrylowej. Te cechy budowy makrocząsteczek stosowanych elastomerów powodują, że są to polimery samogasnące, odznaczają się małą chłonnością wody i dużą odpornością hydrolityczną. Dzięki temu elementy wykonane z takich elastomerów mogą długotrwale pracować w środowisku wodnym o pH w granicach 3-11. Charakteryzują się również dużą odpornością na ścieranie, a zwłaszcza na hydrościeranie. Dotychczasowe przemysłowe zastosowania takich elastomerów dotyczą przede wszystkim szerokiego asortymentu części, zwłaszcza pracujących w warunkach przeróbki surowców mineralnych [8].

Zmieniając stosunek molowy substratów można zmieniać zawartość segmentów giętkich i sztywnych w makrocząsteczkach, a przez to wpływać na strukturę i właściwości PNMU. Na przykład twardość wg metody Shore'a [9] może zmieniać się od 65 do 95 °ShA, a odbojność wyznaczona metodą Schoba [10] od 50 do 35 %.

Do badań wybrano elastomer otrzymywany przy stosunku molowym substratów MDI/(OAE+DCDA) wynoszącym 1,5, co jest równoważne stosunkowi segmentów S/G 0,5 mol/mol. Taki elastomer charakteryzuje się gęstością na poziomie $1,23 \text{ kg/dm}^3$, współczynnikiem liniowej rozszerzalności termicznej $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, twardością 70°ShA, odbojnością 47% oraz zużyciem ściernym ok. 30 mm^3 (oznaczonym metodą Schoppera – Shlobacha [11]). Temperatura użytkowania PNMU o stosunku S/G równym 0,5 mol/mol nie przekracza 160°C .

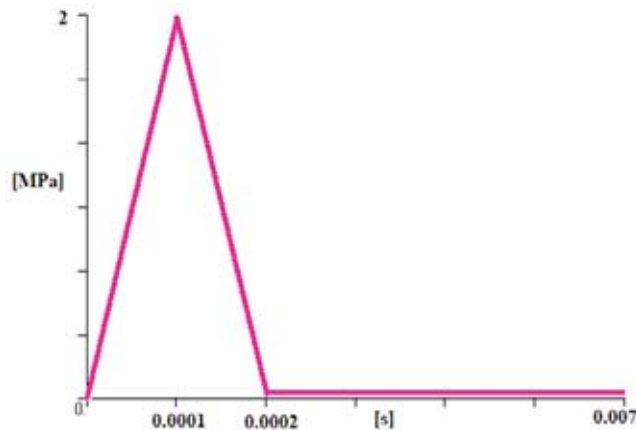
PNMU znajdują się w stanie wysokoelastycznym, co oznacza, że energia drgań cieplnych przewyższa barierę energetyczną obrotów wokół wiązań i na skutek tego nawet pod niewielkim obciążeniem przejawiają przede wszystkim znaczne odkształcenia elastyczne, łatwo i szybko odwracalne pod wpływem obciążenia. Odkształcenia sprężyste oraz plastyczne są niewielkie. Podczas odkształcania elastomeru objętość i energia wewnętrzna układu nie ulega zmianie, zaś jego entropia maleje.

3. Wyniki analizy numerycznej

Jak już wspomniano obiekty numeryczne były obciążone impulsem ciśnienia przedstawionym na rysunku 3. Charakter impulsu ciśnienia dobrano na podstawie badań literaturowych [2, 4, 12] i eksperymentu. Charakter przemieszczeń środkowego węzła przedstawiono na rysunku 4. Ze względu na usystematyzowanie opisu modeli do zobrazowania wyników wykorzystano przemieszczenia środkowego węzła na płycie (znajdującego się w płaszczyźnie symetrii).

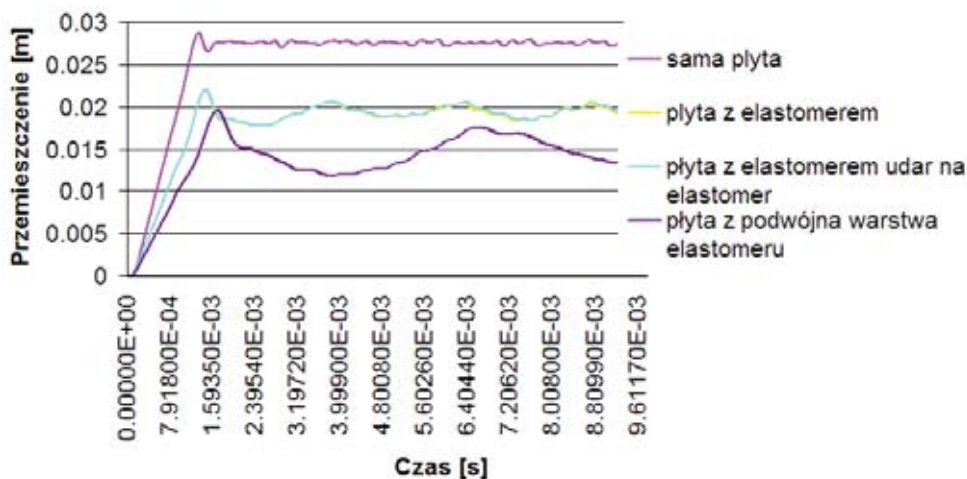
Blacha odkształca się w następujący sposób, iż uplastycznienie blachy rozpoczyna się wzdłuż utwierdzonych brzegów blachy (od środka brzegu w kierunku narożnika), następnie uplastycznia się cała blacha, w końcowej fazie rozciągania blachy największy wzrost odkształceń plastycznych występuje w środku blachy.

Na rysunku 5 przedstawiono zmianę przemieszczenia środka badanej blachy w funkcji czasu.



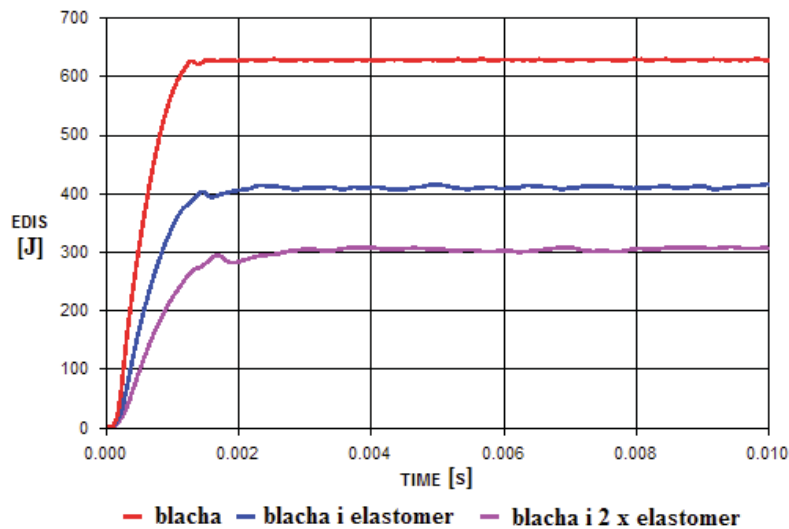
Rys. 3. Widok impulsu ciśnienia przyjętego jako obciążenie badanych modeli
Fig. 3. View of the pressure impulse assumed as the load for the tested models

Przedział początkowy około 0,15 ms odpowiada dojściu fali do obiektu i charakteryzuje się brakiem przemieszczeń. Czas trwania impulsu ciśnienia to kolejno 0,5 ms, natomiast czas narastania przemieszczenia jest znacznie dłuższy i wynosi około 2 ms. Następnie poziom przemieszczeń się stabilizuje, występują zanikające drgania wokół ustalonego poziomu 0.0273 m.



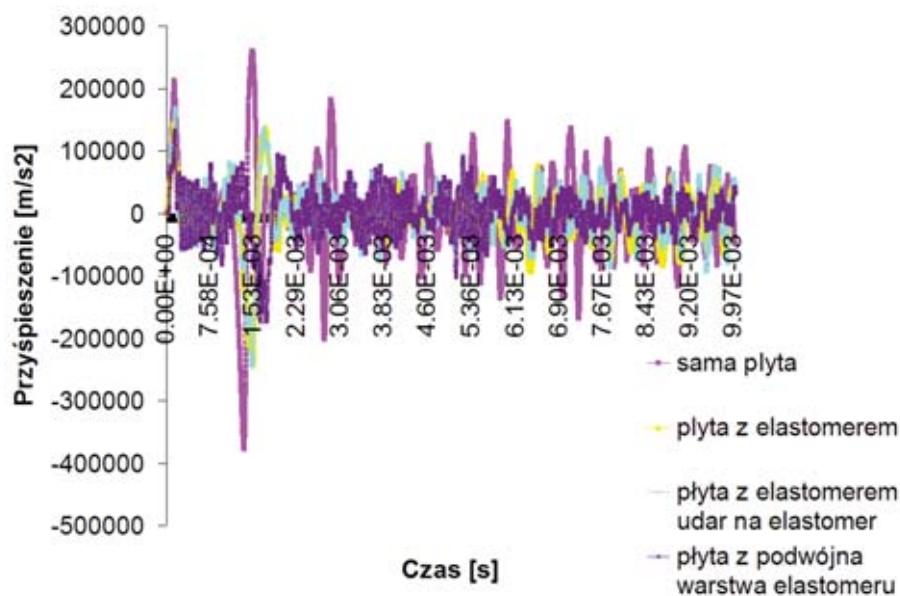
Rys. 4. Przemieszczenia środkowego węzła blachy w funkcji czasu
Fig. 4. Displacement of the central node vs. time

Maksymalna wartość energii odkształcenia dla całej płyty, przedstawiona na rysunku 5, dla modelu 1, wyniosła 630 J. Energia ta zwiększała się podobnie tak jak przemieszczenie w czasie od 0 do 0.001 s.



Rys. 5. Wzrost energii odkształcenia
Fig. 5. Increase of the deformation energy

Maksymalne przyspieszenie dla modelu 1 wyniosło $372\,000\text{ m/s}^2$ (rys. 6).



Rys. 6. Przyspieszenie węzła środkowego dla modeli 1-4
Fig. 6. Acceleration of the central node for models 1-4

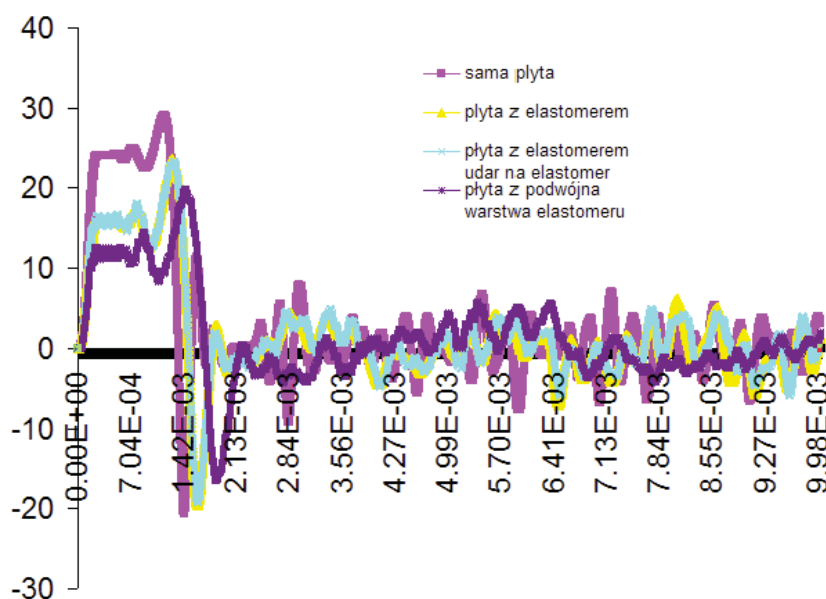
Zmianę prędkości węzła modelu 1 (którego maksymalna wartość wyniosła 28.97 m/s), odnotowano dla czasu 0.0017 s (rys. 7). W późniejszym czasie analizy nastąpiło wytłumienie prędkości.

Model 2 - blacha z warstwą elastomeru (obciążenie przyłożone po stronie blachy) odkształca się tak jak model 1.

Zmianę przemieszczenia środka modelu drugiego przedstawiono na rysunku 4.

Środek modelu drugiego przemieścił się maksymalnie o 0.0219 m . Następnie poziom przemieszczeń stabilizuje się, występują zanikające drgania wokół ustalonego poziomu 0.019 m .

Maksymalna wartość energii odkształcenia, jest przedstawiona na rysunku 5, dla modelu 2, wyniosła ona 410 J . Energia ta się zwiększała, tak jak w przypadku modelu pierwszego w czasie od 0 do 0.001 s .



Rys. 7. Wykres prędkości węzła środkowego modeli 1-4
 Fig. 7. Velocity plot of the central node for models 1-4

Maksymalne przyspieszenie dla modelu 2 wyniosło $242\ 000\ \text{m/s}^2$, (rys. 6). Maksymalna prędkość węzła dla modelu 2 była mniejsza niż dla modelu 1 i wyniosła $23.28\ \text{m/s}$ (dla czasu $0.0017\ \text{s}$), (rys 7). W późniejszym czasie analizy nastąpiło wytlumienie prędkości.

Model 3 - blacha z warstwą elastomeru (obciążenie przyłożone po stronie elastomeru) odkształca się tak, iż uplastycznienie blachy rozpoczyna się wzdłuż utwierdzonych brzegów blachy (od środka brzegu w kierunku narożnika), następnie uplastycznia się cała blacha, a w końcowej fazie rozciągania blachy największe nasilenie odkształceń plastycznych występuje w środku blachy.

Na rysunku 4 przedstawiono zmianę przemieszczenia środka modelu trzeciego z innymi modelami numerycznymi.

Środek modelu trzeciego przemieścił się maksymalnie o $0.0219\ \text{m}$. Następnie poziom przemieszczeń stabilizuje się, występują zanikające drgania wokół ustalonego poziomu $0.019\ \text{m}$.

Maksymalna wartość energii odkształcenia dla modelu 3, wyniosła $410\ \text{J}$ (rys. 5). Energia ta zwiększała się jak w przypadku modelu 1 w czasie od 0 do $0.001\ \text{s}$.

Maksymalne przyspieszenie dla modelu 3 wyniosło $242\ 000\ \text{m/s}^2$, na (rys. 6).

Maksymalna prędkość węzła dla modelu 3 była mniejsza niż dla modelu 1 i wyniosła $23.28\ \text{m/s}$, dla czasu $0.0017\ \text{s}$ (rys. 7). W późniejszym czasie analizy nastąpiło wytlumienie prędkości. Wyniki dla modelu 2 i 3 były zbliżone do siebie.

Model 4 - blacha z dwiema warstwami elastomeru (obciążenie przyłożone po stronie elastomeru) - odkształca się, tak jak poprzednie modele w następujący sposób: uplastycznienie blachy rozpoczyna się wzdłuż utwierdzonych brzegów blachy (od środka brzegu w kierunku narożnika), następnie uplastycznia się cała blacha, a w końcowej fazie rozciągania blachy największe nasilenie odkształceń plastycznych występuje w środku blachy.

Zmianę przemieszczenia środka modelu czwartego z innymi modelami numerycznymi przedstawiono na rys. 4.

Środek modelu czwartego przemieścił się maksymalnie o $0.0195\ \text{m}$. Następnie poziom przemieszczeń stabilizuje się, występują zanikające drgania wokół ustalonego poziomu $0.0150\ \text{m}$.

Maksymalna wartość energii odkształcenia dla modelu 4, wyniosła $300\ \text{J}$ (rys. 5). Energia ta zwiększała się tak jak w przypadku modelu pierwszego w czasie od 0 do $0.001\ \text{s}$.

Maksymalne przyspieszenie dla modelu 4 wyniosło $172\ 000\ \text{m/s}^2$, którego wykres przedstawiono na rys. 6.

Maksymalna prędkość węzła dla modelu 4 była najmniejsza w porównaniu z poprzednimi modelami i wyniosła 18.77 m/s odnotowano dla czasu 0.0017 s, (rys. 7). W późniejszym czasie analizy nastąpiło wytłumienie prędkości. Wyniki dla modelu 2 i 3 były zbliżone do siebie. Zestawienie uzyskanych wielkości metodą numeryczną przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Porównanie wyników uzyskanych dla analizowanych obiektów
 Tab. 1. Comparison of results for the analysed objects

Lp.	Model	przemieszczenie [m]		prędkości maks. [m/s]	Przyspieszenia [m/s ²]	Energia [J]
		maks.	trwałe			
1.	Model 1 sama płyta	0.0286	0.0273	28.97	372 000	630
2.	Model 2 płyta z elastomerem – uderzenie na stal	0.0219	0.019	23.28	242 000	410
3.	Model 3 płyta z elastomerem – uderzenie na elastomer	0.0219	0.019	23.28	242 000	410
4.	Model 4 płyta z dwiema warstwami elastomeru	0.0195	0.0150	18.77	172 000	300

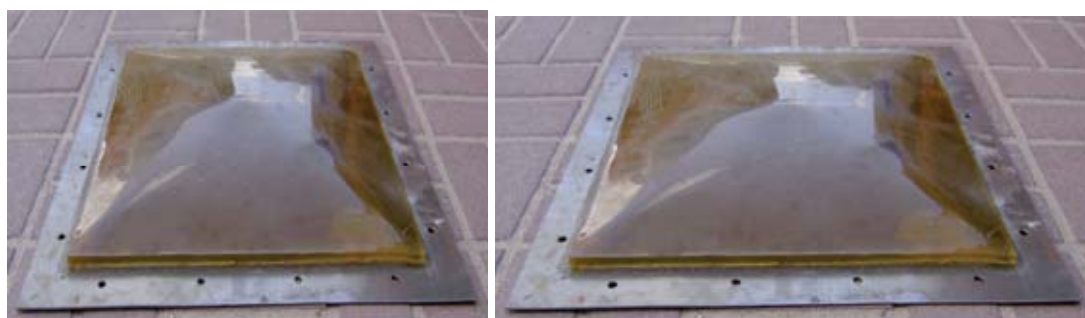
4 Wyniki badań eksperymentalnych

Ze względu na trudności w pomiarze podczas badań eksperymentalnych ograniczono się do zdjęcia profilu. Pomiar taki pozwala na wstępne określenie odkształcenia w sposób numeryczny. Na rysunku 8 przedstawiono zdjęcie odkształconej płyty. Maksymalne trwałe przemieszczenie węzła środkowego płyty stalowej wyniosło 28,26 mm.

Na rysunku 9 przedstawiono zdjęcie odkształconej płyty z dodatkową warstwą elastomeru.

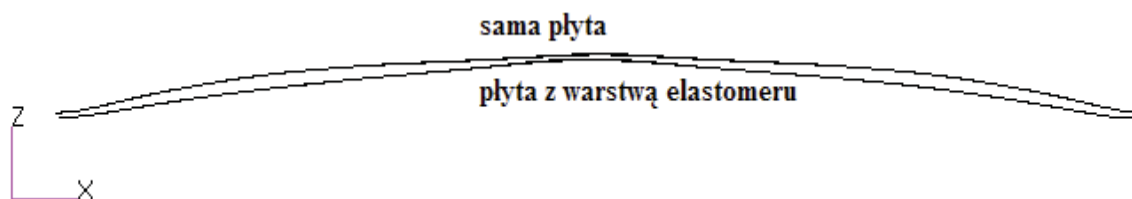


Rys. 8. Obiekt 1 blacha o grubości 1.5 mm, deformacja uzyskana z eksperymentu
 Fig. 8. Object 1 – sheet 1.5 mm thick, deformation obtained experimentally



Rys. 9. Obiekt 2 – blacha z warstwą elastomeru, deformacja uzyskana z eksperymentu
 Fig. 9. Object 2 – sheet with an elastomeric coating, deformation obtained experimentally

Maksymalne trwałe przemieszczenie węzła środkowego płyty stalowej wyniosło 23 mm. Na rysunku 10 przedstawiono porównanie profili (w zwiększonej skali) płyty stalowej i płyty z warstwą elastomeru.



Rys. 10. Porównanie profili (w zwiększonej skali) płyty stalowej i płyty z warstwą elastomeru
Fig. 10. Comparison of profiles (at increased scale) of the steel sheet and the sheet with an elastomeric coating

Tab. 2. Experimental results

	Rodzaj obiektu	Przemieszczenie trwałe [mm]	Oszacowana energia [J]	Przemieszczenie uzyskane numerycznie [mm]	Energia uzyskana numerycznie [J]
	Obiekt 1	28.26	732	27.3	630 13.9%
	Obiekt 2	23 (18.61%)	467	19	410

Metoda określenia energii odkształcenia polegała na zdjęciu chmury punktów z odkształconej płyty. Następnie chmurę tą przekształcono w powierzchnię nieodkształcalną opisaną materiałem RIGID [13]. Powierzchnia ta spełniała rolę stempla nie odkształconego. Model do badania energii odkształcenia przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Model służący do określenia energii odkształcenia
Fig. 11. Model for determining the energy of deformation

Stemplowi nadano małą prędkość. Przez odkształcenie blachy nieodkształcalnym stemplem nastąpiło wytworzenie energii odkształcenia blach. W ten sposób uzyskano wartość energii. Wartość energii odkształcenia dla obiektu 1 wyniosła 732 J a dla obiektu 2 wyniósł 467J.

5. Wnioski

Konstrukcje, które mogą ulec szybkim zderzeniom lub narażone są na działanie fali uderzeniowej, powinny mieć strukturę umożliwiającą pochłanianą część energii udaru. Elementy energochłonne najczęściej są budowane w postaci powłok przekładkowych, których rdzeniem jest układ odpowiednich kształtowników. Niemniej jednak interesujące jest zastosowanie elastomerów. Tworzywa te mające zdolności do pochłaniania energii fali uderzeniowej pochodzącej od wybuchu pozwalają na dość dobrą ochronę.

W tabeli 1 porównano wyniki dla czterech analizowanych struktur. Maksymalne przemieszczenia płyty chronionej uzyskano dla modelu 1. Najmniejsze przemieszczenie węzła środkowego odnotowano dla modelu 4 z dwiema warstwami elastomeru. Badania doświadczalne również potwierdziły, iż warstwy elastomerowe dobrze chronią obiekt przed skutkami działania

materiałów wybuchowych. Autorzy przedstawili fragment badań wykonywanych w Zakładzie Mechaniki Ogólnej WAT, przy współpracy mgr inż. Ryszarda Rekućkiego. W powyższym artykule przedstawiono wycinek podejścia do problemu energochłonności oraz rozpraszania energii udaru.

Literatura

- [1] Trzeciński, W., Trębiński, R., Cudziło, S., *Investigation of the Behaviour of Steel and Laminated Fabric Plates Under Blast Wave Load, Part I: Experimental Approach*, V International Armament Conference, Waplewo, 2005.
- [2] Krzewiński, R., Rekrucki, R., *Roboty budowlane przy użyciu materiałów wybuchowych*, Polcen, 2005.
- [3] Thornton, P. H., Jeryan, R. A., *Crash Energy Management in Composite Automotive Structures*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 7, No 2, pp. 167-180, 1988.
- [4] Babul, W., *Odkształcanie metali wybuchem*, WNT Warszawa 1980.
- [5] Włodarczyk, E., *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa, 1994.
- [6] Gruin, I., Ryszkowska, J., Boczkowska, A., Markiewicz, B., *Polimery*, 39, 226, 1994.
- [7] Gruin, I., Boczkowska, A., Ryszkowska, J., *Polimery*, 41, 350, 1996.
- [8] Lubas, W., Gruin, I., *Polimery*, 32, 484, 1987.
- [9] Norma PN-ISO 868.
- [10] Norma PN-71/C-04255.
- [11] Norma PN-75/C-04235.
- [12] Dobrociński, S., *Stabilność rozwiązań zagadnień odporności udarowej konstrukcji*, AMW Gdynia 2000.
- [13] *Dytran Theory Manual*, 2004; LS-DYNA theoretical manual, 1998.

