

Dr inż. Robert PANOWICZ, email: rpanowicz@wat.edu.pl

Mgr inż. Damian KOŁODZIEJCZYK, email: dkolodziejczyk@wat.edu.pl

Mgr inż. Kamil SYBILSKI, email: ksybilski@wat.edu.pl

Dr hab. inż. Wiesław BARNAT, email: wbarnat@wat.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Tadeusz NIEZGODA, email: tniezgoda@wat.edu.pl

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna

WSTĘPNA ANALIZA ODDZIAŁYWANIA CZĄSTEK KULISTYCH Z GŁOWICĄ TYPU PG-7G

Streszczenie: W artykule przedstawiono wstępną weryfikację oddziaływania elementu małego gabarytowego w postaci kulki łożyskowej o średnicy 5,55 mm z przeszkodą w postaci tarczy metalowej o grubości 2,5 mm. W procesie obliczeniowym rozważano jedynie część układu - płytę o wymiarach na tyle dużych, że na brzegach rozpatrywanego układu nie dochodzi do zmian wielkości fizycznych spowodowanych uderzeniem. Trójwymiarowy model numeryczny wykonano w systemie HyperMesh [1], a do analiz zjawisk szybkozmiennych użyto nieliniową metodę elementów skończonych zawartą w programie Ls-Dyna [2].

PRELIMINARY ANALYSIS OF INTERACTION OF SPHERICAL PARTICLES WITH PG-7G TYPE HEAD

Abstract: The paper presents an preliminary verification of reaction between a small-dimension element in the form of a bearing ball with diameter of 5,55 mm with plate in the form of a metal disc (thickness of the plate was 2,5 mm). During the numerical calculation was analyzed only a part of the system – the plate which dimensions were so big, that on its corners wasn't any changes during impact and the bearing ball. A three-dimensional numerical model was carried out using HyperMesh [1], and to analyze fast-changing phenomena of nonlinear finite element contained in Ls-Dyna [2].

1. WPROWADZENIE

Zderzenia małych cząstek stałych z przeszkodą jest przyczyną występowania szerokiego spektrum zjawisk zależnego od prędkości i kąta uderzenia, wielkości oraz kształtu cząstek, a także rodzaju materiału cząstki i tarczy. Zakres tych zjawisk obejmuje: erozję powierzchni podłoża i cząstki, ścieranie oddziaływujących ze sobą materiałów, platerowanie powierzchni tarczy materiałem pocisku powodujących zmianę masy uderzającego elementu. Efekty te mogą być traktowane jako niepożądane lub korzystne w zależności od rodzaju procesu i oczekiwanego efektu.

Granat typu PG-7G jest jednym z typów pocisku wykorzystywanym w wyrzutniach granatów RPG-7. Granat ten, był podstawowym środkiem przeciwpancernym drużyny piechoty zmotoryzowanej. Prostota obsługi, niski koszt i efektywność sprawiły, że wyrzutnia ta stała się najpopularniejszą bronią w swojej klasie. Obecnie używa go około czterdziestu krajów i jest produkowany w różnych wariantach w dziewięciu krajach.

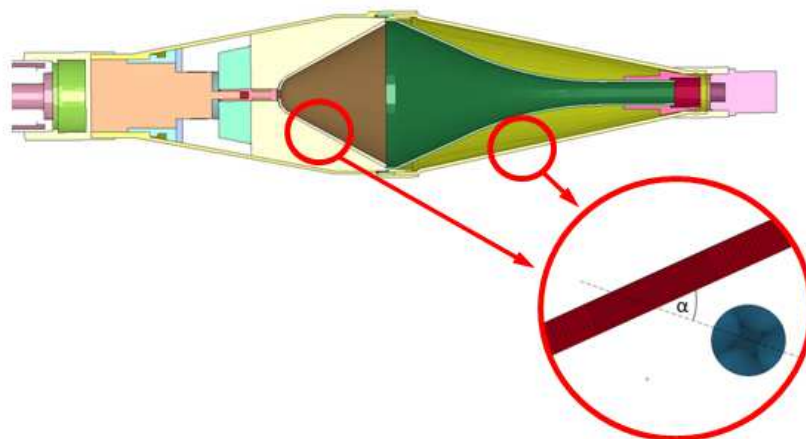
W pracy tej zostały przedstawione wyniki badań numerycznych oraz eksperymentalnych. Miały one na celu uzyskania informacji na temat wpływu prędkości i kąta uderzenia na przebieg procesu zderzenia (obszar zniszczeń i deformacji, zmiana energii kulki).

Dostępne obecnie oprogramowanie, a szczególnie komercyjne kody obliczeniowe są na tyle rozbudowane, że dają możliwość bardzo dokładnej analizy zjawisk zachodzących z dużymi szybkościami odkształceń, w których mamy do czynienia z szybkim przebiegiem procesu deformacji materiałów i powstających przy tym pęknięć. Niemalą rolę w tego typu zjawiskach odgrywają także efekty cieplne powodujące zmniejszenie granicy plastyczności substancji przy jednoczesnym zwiększeniu jej ciągliwości. Rozważane w niniejszej pracy zagadnienie charakteryzuje się właśnie takimi cechami. Jednym z przykładowych programów pozwalających analizować przedstawione zjawisko jest program LS-Dyna, który służy m.in. do analiz zjawisk szybkozmiennych metodą elementów skończonych. Program ten wykorzystuje algorytm jawnej metody całkowania do numerycznego rozwiązania równań ruchu. Ma ona szerokie zastosowanie w analizach problemów wysokonieliniowych i szybkozmiennych.

2. OBLICZENIA NUMERYCZNE

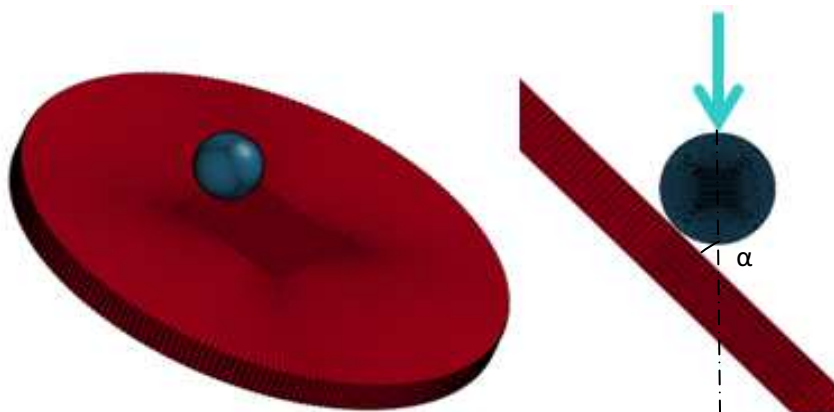
Do odwzorowania procesu oddziaływania kulki i płyty wykorzystano metodę elementów skończonych (MES), która należy do jednej z najefektywniejszych i najbardziej popularnych metod analiz numerycznych konstrukcji. Jest to metoda symulacyjna, której istota polega na zastąpieniu układu ciągłego, jakim jest rzeczywista konstrukcja, układem dyskretnym. Dokładność odzwierciedlenia geometrii rzeczywistego obiektu oraz wierne opisanie zachowania się materiałów pozwala w tej metodzie na zminimalizowanie błędów uzyskanych wyników.

Ze względu na charakter badanego zjawiska obliczenia wykonano za pomocą nieliniowego modułu dynamicznego. Model numeryczny płyty i kulki wykonano z 8-węzłowych elementów bryłowych z 1 punktem całkowania. Rozpatrywana płyta składała się z 264000 elementów, natomiast kulka łożyskowa z 123032.



Rys.1. W analizach korzystano z uproszczonego układu: wycinka płyty oraz kulki uderzającej pod kątem $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

Umiejscowienie analizowanego obszaru pocisku pozwala na uproszczenie modelu numerycznego i zastąpienie skomplikowanej geometrii głowicy PG-7G przedstawionej na rysunku 1 układem pokazanym na rysunku 2.



Rys. 1. Model numeryczny płyty oraz pocisku w postaci kulki łożyskowej uderzającej pod kątem $\alpha=30^\circ$, $45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

W trakcie analiz rozpatrywano uderzenie kulki w różnego rodzaju, powszechnie wykorzystywane metale: stal, miedź oraz stop aluminium, które są wykorzystywane do budowy rzeczywistego pocisku PG-7G. Ich własności materiałowe opisano modelem materiałowym Johnson'a-Cook'a [2]. Model ten jest powszechnie stosowany w symulacjach numerycznych zjawisk dynamicznych, w tym zderzeń, w przypadkach gdzie mamy do czynienia z odkształceniowym umocnieniem materiału, osłabieniem materiału na skutek wzrostu temperatury oraz dużymi i bardzo dużymi prędkościami odkształceń. Model ten został opracowany na drodze badań eksperymentalnych przez Johnsona i Cooka w 1983 roku [3]. Ma on postać przedstawioną wzorem:

$$\sigma_Y = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m})$$

gdzie: σ_Y jest naprężeniem efektywnym, ε efektywnym odkształceniem plastycznym, $\dot{\varepsilon}^*$ znormalizowaną szybkością efektywnego odkształcenia plastycznego, A, B, C, n i m to stałe materiałowe wyznaczone na drodze badań eksperymentalnych. Temperaturę unormowaną T^* określa zależność:

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$$

gdzie: T_{room} temperatura w której przeprowadzano eksperyment, T_{melt} temperatura topnienia.

Modelowanie procesu oddziaływania elementu małogabarytowego z tarczą wiąże się z przyjęciem modelu zniszczeń zarówno kulki jak i tarczy. Powszechnie wykorzystywane w metodzie elementów skończonych naprężeniowe lub odkształceniowe modele zniszczeń nie opisują wystarczająco dokładnie szybkozmiennego i wysoce nieliniowego procesu destrukcji materiału spowodowanego uderzeniem kulki w tarczę. W analizie tego typu zagadnień wykorzystuje się bardziej złożone modele powstawania i rozwoju pęknięć oraz zniszczeń biorące pod uwagę od większą liczbę czynników. Do modeli tych możemy zaliczyć modele: Johnsona-Cooka [2], Cockcrofta i Lathama [3], Johnsona - Holmquista [2]. W niniejszej pracy wykorzystano model Johnsona-Cooka opisujący proces niszczenia materiału:

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^p}{\varepsilon_f}$$

gdzie ε_f jest odkształceniem niszczącym przy odpowiednim wzroście:

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^*]$$

gdzie: $\sigma^* = \frac{\text{ciśnienie}}{\bar{\sigma}}$, $\Delta \bar{\varepsilon}^p$ jest przyrostem efektywnego odkształcenia plastycznego podczas przebicia, σ^* jest naprężeniem znormalizowanym w odniesieniu do naprężenia efektywnego, D_1 , D_2 , D_3 , D_4 i D_5 są stałymi materiałowymi. Przyjmuje się, że całkowite zniszczenie materiału następuje, gdy parametr $D \geq 1$.

Wykorzystane w analizach numerycznych dane opisujące zachowanie się odkształcanego i niszczonego materiału zawarto w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów modelu Johnson'a-Cook'a [2]

Miedz								
Gęstość, ρ [kg/m ³]	Współczynnik Poissona, ν	Moduł Younga, E [MPa]	Stałe empiryczne					
			A [MPa]	B [MPa]	n	C	m	
8940	0,335	126	90	292	0,31	0,0025	1,09	
Stałe do modelu zniszczenia								
D_1	D_2	D_3		D_4		D_5		
0,54	4,89	3,03		0,014		1,12		
Aluminium								
Gęstość, ρ [kg/m ³]	Współczynnik Poissona, ν	Moduł Younga, E [MPa]	Stałe empiryczne					
			A [MPa]	B [MPa]	n	C	m	
2770	0,3	48	337	343	0,41	0,01	0	
Stałe do modelu zniszczenia								
D_1	D_2	D_3		D_4		D_5		
0	0	0		0		0		

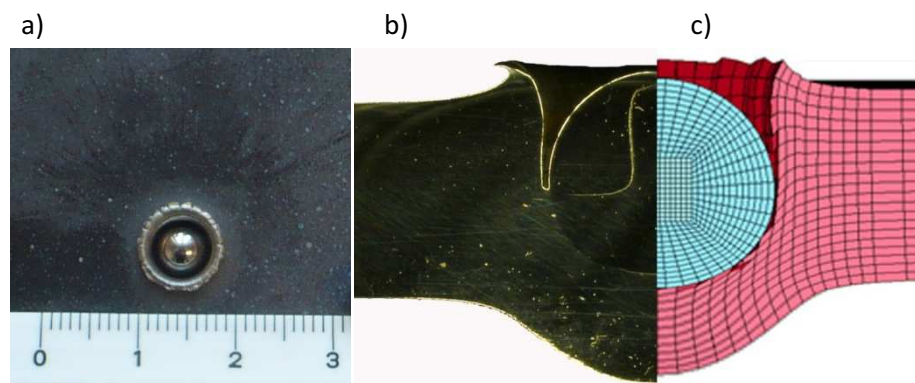
3. WALIDACJA MODELU

Porównanie zachowania wykorzystanego do obliczeń modelu z wynikami badań eksperymentalnych zostało przedstawione szczegółowo w pracy [4]. W badaniach tych rozpatrywano analogiczny układ kulka - płyta. Przy czym zarejestrowana na bramkach optoelektronicznych prędkość zderzenia wynosiła 838 m/s, a płyta miała grubość 5 mm i była wykonana ze stalowej blachy.

Przeprowadzona wówczas walidacja dała dobrą zbieżność wyników analiz numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych. Wybrane wyniki walidacji przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników z walidacji modelu [4]

	Grubość płyty [mm]	Ugięcie płyty [mm]
Eksperyment	2,5	2,2
MES	2,0	2,0



Rys.3. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i analiz numerycznych przeprowadzonych w celu walidacji modelu numerycznego [4]; a) widok próbki z góry, b) przekrój przez próbkę, c) wynik analizy numerycznej

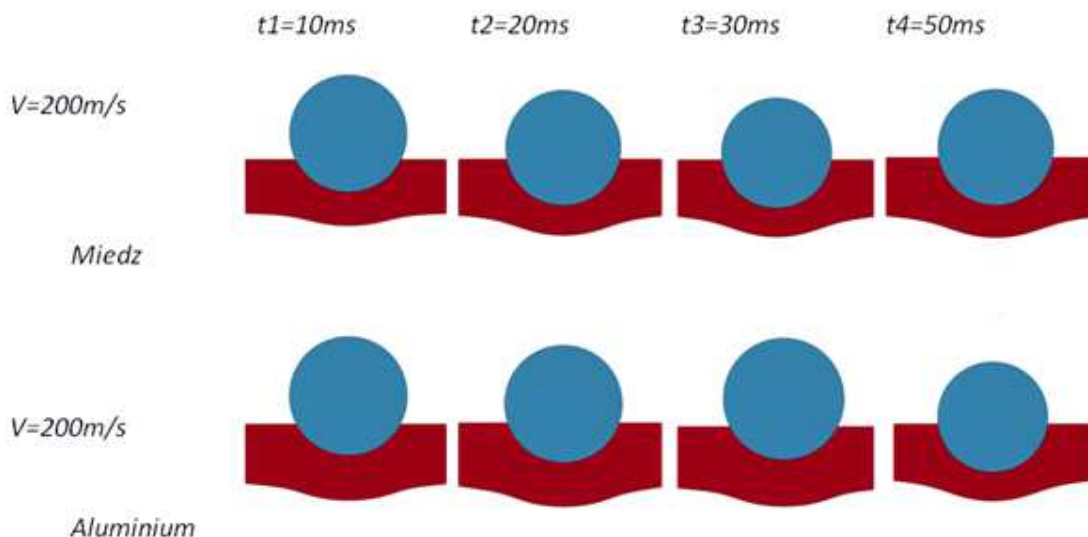
4. ANALIZA MES

W trakcie badań przeprowadzono szereg analiz uderzenia kulki w płytę różniących się prędkością początkową kulki oraz kąta padania kulki. Celem analiz było określenie granicznych prędkości oraz kątów padania kulki, dla których nie następuje przebicie materiału płyty a także ocena wpływu tych parametrów na proces deformacji rozpatrywanego układu.

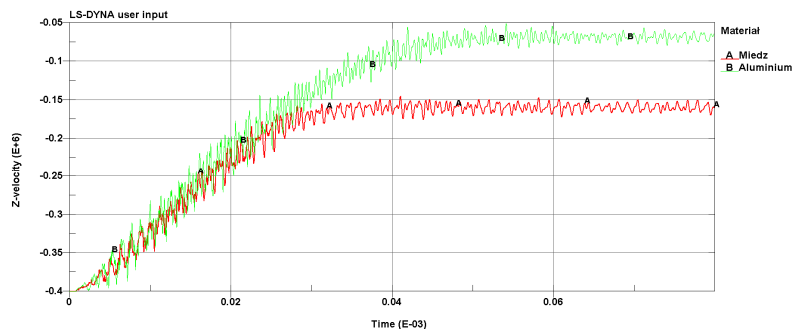
5.1. Wyniki analizy przy prostopadłego uderzenia kulki w tarczę z prędkością początkową kulki równą 200 m/s

Przebieg procesu oddziaływania kulki z miedzianą oraz aluminiową płytą został przedstawiony na rysunku 4 dla wybranych kroków czasowych. Odpowiada temu zmiana prędkości kulki w funkcji czasu przedstawiona na rysunku 5. W procesie przebijania możemy wyróżnić trzy obszary ze względu na zmianę prędkości kulki. Pierwszy, początkowy charakteryzuje się prawie liniowym spadkiem prędkości. W obszarze tym mniejszą rolę odgrywają własności wytrzymałościowe materiału, z którego wykonano płytę. Następnie krzywa ulega stopniowemu zakrzywieniu, zmiany prędkości w tym obszarze zależą głównie od własności wytrzymałościowych materiału płyty. W końcowej fazie obiekt przechodzi przez płytę, odbija się od niej lub w niej grzęźnie, dlatego praktycznie nie występują w nim zmiany prędkości.

W tabeli 3 zostały zamieszczone kompletne wyniki dla początkowej prędkości uderzenia kulki wynoszącej 200 m/s w tarczę.



Rys.4. Wyniki analizy numerycznej zderzenia kulki łożyskowej z metalową płytą w wybranych krokach czasowych dla prędkości kulki równej 200m/s



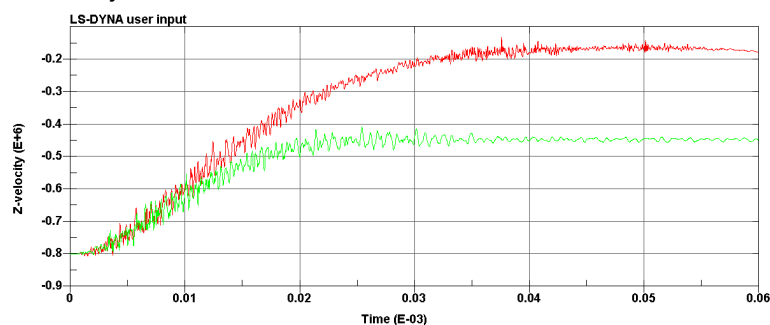
Rys.5. Prędkość punktu środkowego kulki przy kącie uderzenia 90° i prędkości 200m/s

Tabela 3. Zestawienie wyników dla analizy z prędkością początkową kulki 200m/s

		30°	45°	60°	90°
Przebite	Aluminium	Brak	Brak	Brak	Brak
	Miedź	Brak	Brak	Brak	Brak

5.2. Wyniki analizy przy uderzeniu kulki w tarczę pod kątem 30° dla prędkości wyjściowej kulki 800m/s

Również dla prędkości wyjściowej kulki 800m/s przeprowadzono szereg analiz pod różnymi kątami uderzenia. Wykres prędkości kulki przedstawia rysunek 6, zestawienie końcowe wyników zawarte jest w tabeli 4.



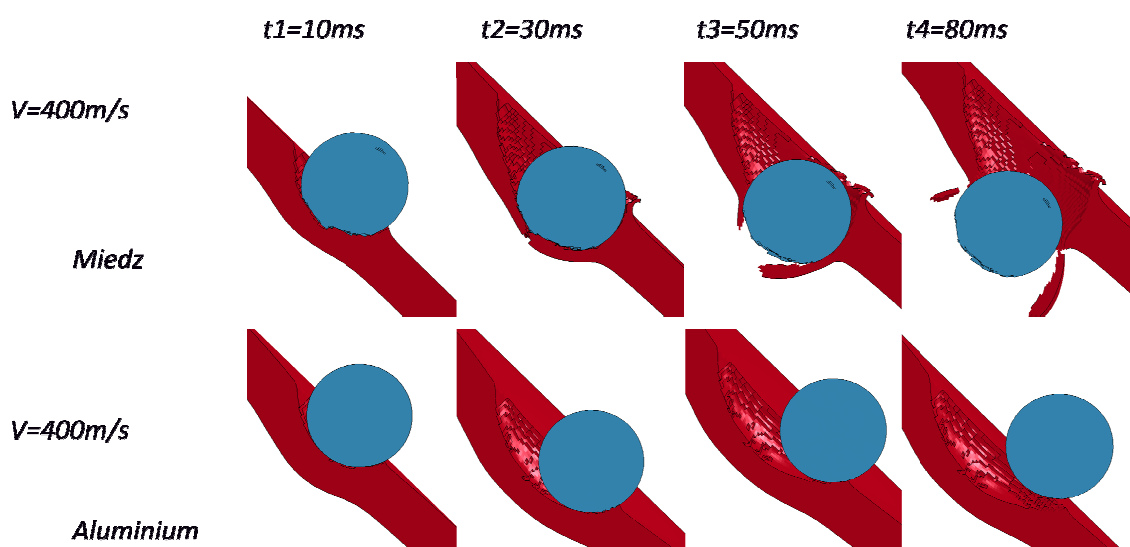
Rys.6. Prędkość punktu środkowego kulki przy kącie uderzenia 30° i prędkości 800m/s

Tabela 4. Zestawienie wyników dla analizy z prędkością początkową kulki 800m/s

		30°	45°	60°	90°
Przebicie	Aluminium	Tak	Tak	Tak	Tak
	Miedź	Tak	Tak	Tak	Tak

5.3. Wyniki analizy przy prostopadłym uderzeniu kulki w tarczę pod kątem 45° dla prędkości wyjściowej kulki 400m/s

Podobne zestawienie zostało przeprowadzone dla prędkości uderzenia 400m/s. Poniżej przedstawiono wariant przy uderzeniu pod kątem 45°. Dla prędkości tej istnieje graniczna wartość kąta uderzenia, przy której nie następuje pełne przebicie materiału płyty, wartość ta zależy również od materiału płyty (tab.5). Udało się ustalić, że dla miedzi wartość graniczna kąta zawiera się w przedziale 30°-45°, dla aluminium jest to natomiast wartość z przedziału 45°-60°.



Rys.7. Wyniki analizy numerycznej zderzenia w wybranych krokach czasowych dla prędkości 400m/s

Tabela 5. Zestawienie wyników dla analizy z prędkością początkową kulki 400m/s

		30°	45°	60°	90°
Przebicie	Aluminium	Brak	Brak	Tak	Tak
	Miedź	Brak	Tak	Tak	Tak

6. WNIOSKI

Wstępne analizy pozwoliły określić graniczne wartości prędkości oraz kąta zderzenia niezbędne do przebicia rozpatrywanego obiektu. Rozpatrzono wiele wariantów zderzenia – dla różnych prędkości oraz kątów uderzenia. Przeprowadzone badania pozwoliły na dokładniejszą analizę zjawisk zachodzących podczas procesu przebicia. Analizując wyniki należy podkreślić, że wyższe prędkości zderzenia powodują erozję zwłaszcza gdy cząstki uderzają w powierzchnię przeszkody pod kątem innym niż prostopadle, co zgadza się z wynikami badań stopnia odkształcenia plastycznego i naprężenia powierzchniowe badanego numerycznie w kontekście strzału ze śrutu [6] przez M. Kobayashi, T. Matsui oraz Y. Murakami. Obecnie analizy są na etapie badania układów zespołów płyt.

Literatura

1. www.altair.com: *HyperWorks Tutorials*
2. J.O. Hallquist: *LS-Dyna manual* March 2006
3. M. G. Cockroft, D. J. Latham, Ductility and the workability of metals, *Journal of the Institute of Metals*, 96, 1968
4. R. Panowicz, D. Kołodziejczyk, K. Sybilski, W. Barnat, T. Niezgoda: Walidacja modelu dynamicznego oddziaływania elementu małogabarytowego z przeszkodą, *Mechanik* nr. 7 rok 2011
5. Johnson G. R., Lindholm U. S.: *Strain-rate effects in metals at large shear strains. Material behavior under high stress and ultrahigh loading rates: Proc. 29th Sagamore Army Mater. Res. Conf. Lake Placid 1982, New York 1983*
6. M. Kobayashi, T. Matsui, Y. Murakami, Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening, *Int. J. Fatigue* 20 (5) (1998) 351–357.