



Eksperymentalno-numeryczna analiza perforacji stali pancernej Armox 500T

ARKADIUSZ POPLAWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
00-908 Warszawa, arkadiusz.poplawski@wat.edu.pl

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalno-numerycznych perforacji stali pancernej Armox® 500T. Perforację płytek przeprowadzono przy użyciu działka pneumatycznego z wykorzystaniem trzech rodzajów penetratorów: ostrego, sferycznego oraz tępego. Użycie różnych geometrii penetratorów powoduje proces przebiccia i zniszczenia płytek w odmiennym stanie naprężenia i odkształcenia, co przekłada się na wystąpienie trzech podstawowych modów zniszczenia. Analizy numeryczne procesu perforacji prowadzono z wykorzystaniem kodu obliczeniowego Ls-Dyna posiadającego zaawansowany model konstytutywny materiału oraz zintegrowany model zniszczenia. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych poddano analizie i porównaniu. Analizowano kształt zniszczenia, stopień trwałego odkształcenia plastycznego oraz parametry stanu naprężenia i odkształcenia.

Słowa kluczowe: proces perforacji, metoda elementów skończonych, Armox® 500T, odkształcenia plastyczne, parametry stanu naprężenia

DOI: 10.5604/01.3001.0015.6957

1. Wprowadzenie

Zjawisko przebiccia/perforacji jest wyjątkowo złożonym procesem, któremu towarzyszą bardzo duże odkształcenia. Proces ten związany jest z oddziaływaniem obiektów o bardzo dużych energiach na bardzo małe powierzchnie. Dodatkowo obciążony materiał ulega deformacji w bardzo krótkim czasie i w efekcie generuje znaczne wartości szybkości odkształceń. W momencie zetknięcia się obydwu ciał zjawisku temu towarzyszy wzrost temperatury, która również wpływa na właściwości materiału. Możliwe jest, że dla niektórych materiałów w pobliżu miejsca uderzenia

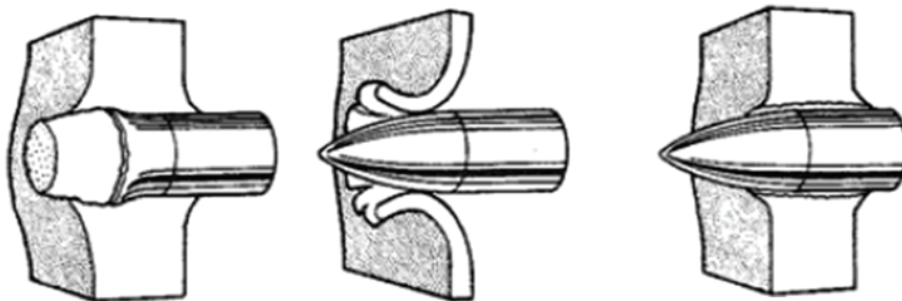
wystąpi temperatura zbliżona do temperatury topnienia. Proces przebicia może być zjawiskiem bardzo różnorodnym, szczególnie moment przechodzenia i wyjścia penetratora z materiału. Wpływ na różne postacie zniszczenia może mieć grubość penetrowanego materiału, materiał i geometria penetratora oraz jego prędkość [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Na rysunku poniżej przedstawiono trzy główne postacie zniszczenia występujące w materiałach ciągliwych. Zagadnienie dotyczące formowania korka (ang. *plugging*) występuje podczas uderzenia tępym lub półsferycznym penetratorem z prędkością zbliżoną do minimalnej, jaka wymagana jest do perforacji płyty o określonej grubości. W efekcie uderzenia powstaje tzw. korek o średnicy równej lub zbliżonej do średnicy penetratora (rys. 1a). Mechanizmem odpowiedzialnym za taki rodzaj zniszczenia jest przede wszystkim ścinanie. Dokładniej rzecz ujmując, w wyniku koncentracji naprężeń powstaje niestabilna uplastyczniona strefa ścinania, która dzieli materiał. Prawie cała praca deformacji plastycznych zostaje zmieniona w ciepło, jednak w wyniku dużych szybkości zaistniałych deformacji ciepło nie ma możliwości propagacji ze strefy uplastycznienia. W rezultacie temperatura w strefie plastycznej rośnie, wzmacniając proces plastycznego płynięcia oraz koncentrację lokalnych odkształceń plastycznych. Powstanie korka jest rezultatem intensywnej propagacji odkształceń plastycznych na przekroju materiału w wąskim pasmie maksymalnych naprężeń stycznych (adiabatyczne pasma ścinania).

a) PLUGGING

b) PETALING

c) DUCTILE HOLE GROWTH



Rys. 1. Rodzaje zniszczenia występujące w materiałach ciągliwych [6]

Kolejnym zagadnieniem jest rozrywanie materiału (ang. *petaling*), które występuje w wyniku działania promieniowych i obwodowych naprężeń rozciągających, zaś największa ich wartość pojawia się w pobliżu wierzchołka penetratora. Penetrator, najczęściej ostro zakończony, wypycha materiał aż do momentu osiągnięcia granicy wytrzymałości. Kiedy nastąpi jej przekroczenie, penetrator wnika w materiał, ciągle wyginając oraz rozrywając brzegi powstałej nieciągłości (rys. 1b).

Zagadnienie związane z rozpychaniem materiału (ang. *ductile hole growth*) dotyczy bardzo miękkich materiałów, gdzie występują bardzo duże odkształcenia plastyczne. Penetrator, zagłębiając się w materiale, prowadzi do powstania nieciągłości poprzez jego rozpychanie (rys. 1c).

W rzeczywistości wspomniane trzy mody zniszczenia praktycznie nigdy nie występują oddzielnie, pojawiają się natomiast ich kombinacje, z przewagą jednego z nich.

Wykorzystując zaawansowane metody numeryczne, możliwe jest określenie, jaki rodzaj zniszczenia wystąpi w materiale przy danych warunkach. Warunkiem poprawnego określenia przebiegu zniszczenia jest zastosowanie odpowiedniej metody numerycznej oraz wykorzystanie modelu materiałowego i zniszczenia, który będzie odzwierciedlał najistotniejsze zjawiska fizyczne występujące podczas tego skomplikowanego procesu.

W pracy przedstawione zostaną wyniki analiz numerycznych perforacji płytek wykonanych z materiału Armox® 500T. Uzyskane wyniki zostaną zweryfikowane w teście eksperymentalnym.

2. Opis i charakterystyka materiału Armox® 500T

Stal Armox® 500T to jedna z odmian stali pancernych produkowanych przez szwedzką firmę SSAB. Jest stalą martenzytyczną, zawdzięczającą swoje właściwości zaawansowanemu procesowi metalurgicznemu oraz końcowym procesom technologicznym, do których należą ulepszanie cieplne oraz walcowanie [7]. Do jej najważniejszych zalet można zaliczyć wysoką wytrzymałość (ok. 1750 MPa) oraz twardość (ok. 500 HB), przy możliwości względnie dobrej obrabialności materiału [8].

Pomimo intensywnego rozwoju nowoczesnych materiałów stal pancerna nadal jest szeroko stosowana w konstrukcjach wymagających podwyższonego poziomu ochrony balistycznej. Jest wykorzystywana zarówno w aplikacjach militarnych, jak i cywilnych. W grupie zastosowań militarnych jest używana przy budowie pojazdów bojowych (Leopard 2, KMV Puma), ratunkowych, taktycznych (Panhard PVP, Mowag Eagle) oraz pojazdów przeznaczonych głównie do rozminowywania terenu (Mrap Buffalo, Armtrack 400) [9].

W aplikacjach cywilnych jest wykorzystywana w konstrukcji samochodów do przewozu kosztowności oraz samochodów dyplomatycznych. Stosuje się ją również w budownictwie do wzmocnienia drzwi, okien, ścian oraz wszędzie tam, gdzie wymagana jest podwyższona ochrona balistyczna. Jako przykład budynku, w którym zastosowano różne gatunki płyty osłonowej Armox®, może służyć szwedzka ambasada w Waszyngtonie [7]. Tak szerokie zastosowanie stal Armox® zawdzięcza znakomitym właściwościom wytrzymałościowym oraz balistycznym.

Wszystkie badania eksperymentalne realizowane w prezentowanej pracy przeprowadzono na próbkach wykonanych z arkusza blachy o wymiarach $20 \times 500 \times 500$ mm. Skład chemiczny według certyfikatu jakości o nr 14207824 przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Skład chemiczny stali pancernej ArmoX® 500T

Producent	SSAB Oxelösund	Skład chemiczny [% wag]									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	B
Forma	Blacha 20 mm	0,27	0,27	0,85	0,008	0,001	0,5	0,92	0,353	0,056	0,002

W poniższych tabelach przedstawiono podstawowe właściwości mechaniczne i temperaturowe według danych od producenta.

TABELA 2

Właściwości stali ArmoX® 500T, cz. 1

Oznaczenie właściwości	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	HBW	KV (-40°C) [J]
Wartość	min. 1250	1450÷1750	min. 8	480÷540	min. 25
Norma	EN ISO 6892			EN ISO 6506-1	EN ISO 148

TABELA 3

Właściwości stali ArmoX® 500T, cz. 2

Oznaczenie właściwości	E [GPa]	cp [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	Tm [K]
Wartość	207	450	7850	1800

3. Uwarunkowanie modelowania numerycznego

W pracy analizy perforacji przeprowadzane są z użyciem metody elementów skończonych, z wykorzystaniem kodu obliczeniowego LS-Dyna. W metodzie tej ośrodek ciągły, opisywany w modelach analitycznych za pomocą równań różniczkowych cząstkowych, przybliżany jest układem dyskretnym, złożonym ze zbioru elementów o skończonej objętości i wyrażanym układem równań różniczkowych zwyczajnych [10, 11, 12, 13, 14, 15].

Analizy numeryczne przeprowadzono przy następującej konfiguracji programu obliczeniowego:

- algorytm z jawnym krokiem całkowania (typu *explicit*) do rozwiązania równań dynamicznych w zakresie nieliniowym,
- model konstytutywny stabelaryzowanego modelu Johnsona-Cooka (MAT224) łącznie z modelem zniszczenia do opisu materiału Armox® 500T,
- model typu rigid dla nieodkształcalnych elementów stosowanych w analizach perforacji do opisu penetratora oraz elementów mocujących,
- wykorzystanie elementów bryłowych i powłokowych,
- uwzględnienie kontaktu przy dużych odkształceniach i przemieszczeniach,
- zniszczenie materiału.

4. Model konstytutywny materiału

W pracy zastosowano dwa rodzaje modeli konstytutywnych materiałów. Do opisu materiału Armox® 500T wykorzystano stabelaryzowany model Johnsona-Cooka. W dalszej części pracy dotyczącej analiz numerycznych perforacji elementy geometryczne uproszczonego modelu stanowiska wraz z penetratorami opisano modelem bryły nieodkształcalnej.

Stabelaryzowany model Johnsona-Cooka [16] pozwala na opis zachowania materiału w zakresie sprężysto-plastycznym z uwzględnieniem jego lepkoplastycznego umocnienia oraz termicznego osłabienia (lub umocnienia). Granica plastyczności w tabelaryzowanym modelu konstytutywnym Johnsona-Cooka jest funkcją odkształcenia plastycznego, prędkości odkształceń oraz temperatury.

$$\sigma_y = k_1(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p) \frac{k_t(\varepsilon_p, T)}{k_t(\varepsilon_p, T_R)}, \quad (1)$$

gdzie: $k_1(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p)$ — rodzina krzywych określająca w warunkach izotermicznych dla każdej szybkości odkształceń naprężenia efektywne w funkcji efektywnych odkształceń plastycznych,

$k_t(\varepsilon_p, T)$ — tabela krzywych określająca dla każdej temperatury naprężenia efektywne w funkcji efektywnych odkształceń plastycznych,

T_R — temperatura pokojowa (odniesienia).

W modelu istnieje możliwość wykorzystania modelu zniszczenia opartego na kryterium odkształceniowym. Plastyczne odkształcenia niszczące są wypadkową kilku funkcji:

$$\varepsilon_{pf} = f\left(\frac{p}{\sigma_{vm}}, \frac{27J_3}{2\sigma_{vm}^3}\right) g(\dot{\varepsilon}_p) h(T) i(l_c), \quad (2)$$

gdzie: $f\left(\frac{p}{\sigma_{vm}}, \frac{27J_3}{2\sigma_{vm}^3}\right)$ – rodzina krzywych określająca dla każdej wartości para-

metru kąta Lodego plastyczne odkształcenia niszczące w funkcji trójosiowości,

$g(\dot{\varepsilon}_p)$ – funkcja skalująca plastyczne odkształcenia niszczące poprzez wpływ szybkości odkształceń,

$h(T)$ – funkcja skalująca plastyczne odkształcenia niszczące poprzez wpływ temperatury,

$i(l_c)$ – krzywa regularyzacji,

$\sigma^* = \frac{p}{\sigma_{vm}}$ – trójosiowość (ang. *triaxiality*),

$\mu = \frac{27J_3}{2\sigma_{vm}^3}$ – parametr Lodego (ang. Lode parameter),

p – ciśnienie,

$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}}$ – naprężenie efektywne,

$s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}$ – składowe dewiatora tensora naprężenia,

$\sigma_m = \sigma_{kk}/3$ – średnia wartość naprężeń głównych,

δ_{ij} – delta Kroneckera,

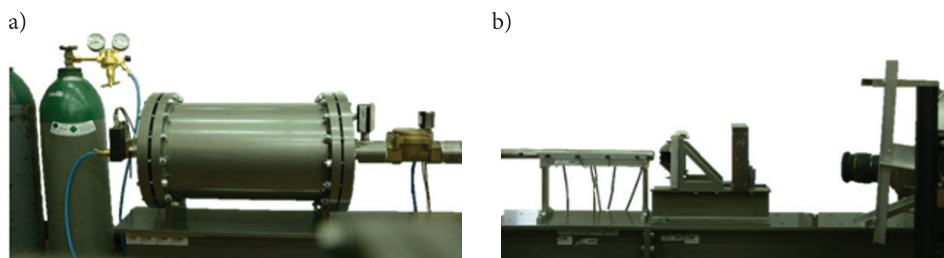
$J_3 = s_1 s_2 s_3 = (\sigma_1 + p)(\sigma_2 + p)(\sigma_3 + p)$ – trzeci niezmiennik dewiatora naprężenia.

Zniszczenie (usunięcie elementu z obliczeń) następuje, gdy parametr F osiągnie wartość równą jedności lub większą:

$$F = \int \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\varepsilon_{pf}} dt \geq 1. \quad (3)$$

5. Badania eksperymentalne perforacji w warunkach dynamicznych

Badania eksperymentalne przebijania cienkich płytek w warunkach dynamicznych przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na rysunku 4. Stanowisko badawcze jest rodzajem działa pneumatycznego. Wszystkie jego podzespoły główne zamontowane są na belce głównej. Do głównych podzespołów należy układ pneumatyczny, układ mocowania próbki, układ sterujący oraz układ rejestracyjno-pomiarowy. Układ pneumatyczny (rys. 2a) służy do napędzania elementów uderzających w badaną próbkę. Składa się z butli z gazem (argonem), zbiornika ciśnieniowego, lufy i dwóch zaworów elektromagnetycznych. Jeden z zaworów służy do napełniania zbiornika do określonego ciśnienia, drugi umożliwia oddanie strzału.



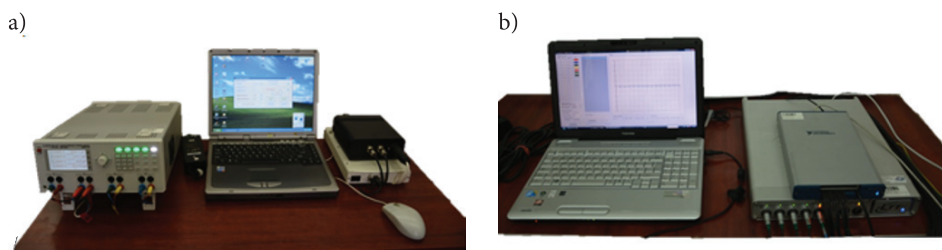
Rys. 2. Stanowisko badawcze do perforacji płytek w warunkach dynamicznych:
a) układ pneumatyczny, b) układ mocowania próbki z częścią pomiarową prędkości pocisków

Układ mocowania próbki (rys. 2b) składa się z podpór, do których przykręcona jest płyta z miejscem na próbkę. Próbkę natomiast mocuje się do płyty przy pomocy nakładki przykręcanej do płyty czterema śrubami. Elementy te przedstawione są dokładnie na rysunku 3.



Rys. 3. Sposób mocowania próbki w badaniach perforacji stali Armox® 500T w warunkach dynamicznych

Stanowisko jest sterowane automatycznie przy wykorzystaniu specjalistycznych kart elektronicznych oraz komputera z oprogramowaniem (rys. 4a). Oprogramowanie pozwala na: umieszczenie penetratora w położeniu startowym, uzyskanie wymaganej prędkości wylotowej pocisku poprzez ustawienie odpowiedniego ciśnienia oraz na oddanie strzału.



Rys. 4. Stanowisko badawcze do perforacji płytek w warunkach dynamicznych: a) układ sterowania, b) układ rejestracyjno-pomiarowy

Układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 4a, b pozwala na rejestrację prędkości wylotowej penetratora. Składa się z laserowych czujników prędkości podłączonych do wzmacniacza przebiegów szybkozmiennych LTT500. Wzmacniacz natomiast jest podłączony do rejestratora pomiarów szybkozmiennych firmy National Instruments. Karta pomiarowa jest podłączona do laptopa z zainstalowanym oprogramowaniem, umożliwiającym inicjację zapisu danych z częstotliwością 2 MHz (rys. 4b).

6. Założenia przyjęte w badaniach eksperymentalnych

W pracy rozważano jedynie uderzenie prostopadłe penetratorów w powierzchnię płytki. Płytką podparta była na całym obwodzie, w odległości 5 mm od krawędzi. W związku z tym odkształcenie próbki mogło mieć miejsce w kole o średnicy 20 mm. Strzały wykonywano z optymalnym dla stanowiska ciśnieniem w zbiorniku, wynoszącym 5 barów. Każdy z penetratorów, przy jednakowym ciśnieniu w zbiorniku, osiągał odmienne średnie prędkości wylotowe: pocisk tępy — 115 m/s, pocisk ostry — 135 m/s, pocisk sferyczny — 162 m/s.

7. Wykonanie próbek

Próbki wykonano z płyty o wymiarach $500 \times 500 \times 4,6$ mm. Korzystając z wyciarki wodnej, wycięto kółka o średnicy 30 mm. W drugim etapie próbki szlifowano na szlifierce do płaszczyzn, aby uzyskać grubość 1 mm. Operacja szlifowania próbek nadała im bardzo małą chropowatość powierzchni równą $Ra = 0,63 \mu\text{m}$.



Rys. 5. Zdjęcia wykonanych próbek

Grubość próbki była wymagana do uzyskania jej całkowitego przebiccia zarówno w badaniach statycznych, jak i dynamicznych. Ponadto przedstawiony eksperyment poddano w późniejszym etapie weryfikacji numerycznej, co wiąże się z dyskretyzacją modelu geometrycznego próbki. Większa grubość płytek wymagałaby większej liczby elementów, co przekładałoby się na znaczne pogorszenie efektywności obliczeniowej.

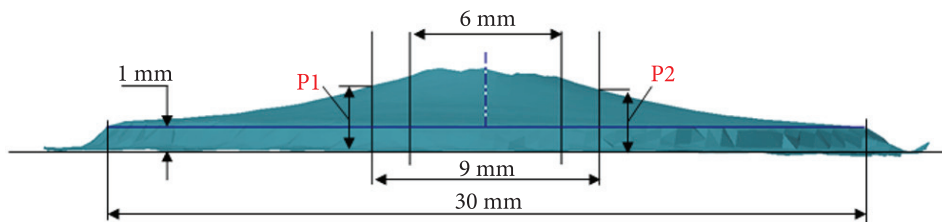
8. Metodyka pomiaru i analiza błędu

Po przeprowadzonym eksperymencie odkształcone płytki skanowano skanem 3D. Skany powierzchni próbek poddano obróbce i pomiarom geometrycznym ugięcia płytki w wyznaczonym miejscu. Przykładową próbkę oraz jej skan przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Próбка oraz jej skan po przeprowadzonych badaniach perforacji płytek

Metodę pomiaru trwałego odkształcenia plastycznego płytki przedstawiono schematycznie na rysunku 7. Pomiaru dokonywano na przekroju skanu w odległości 4,5 mm od środka powstałego otworu. Aby zminimalizować błąd pomiaru wynikający z niekoncentrycznego uderzenia pocisku w próbkę, jako ostateczny wynik przyjęto średnią arytmetyczną z dwóch pomiarów (P1 i P2).



Rys. 7. Metoda pomiaru trwałego odkształcenia próbki

Dla pięciu wykonanych prób przeprowadzono analizę błędów, wyznaczając dwustronny przedział ufności na podstawie rozkładu t-Studenta.

9. Opracowanie wyników badań eksperymentalnych

Poniżej przedstawiono zdjęcia oraz skany powierzchni przykładowych próbek po przeprowadzonych badaniach perforacji cienkich płytek trzema rodzajami penetratorów. Penetratory przemieszczały się z prędkościami średnimi 115 m/s, 162 m/s, 134 m/s, odpowiednio dla trzpienia walcowego, kulistego i ostrego.

W wyniku perforacji płytki penetratorem ostrym (rys. 8a) po stronie wyjściowej próbki powstał nieregularny wzór składający się z kilku ostrych fragmentów. Część z nich oderwana jest od całego elementu pod pewnym kątem. Ponadto występują również drobne elementy w kształcie litery „V”. W niektórych przypadkach dochodziło do całkowitego oderwania wspomnianych elementów. Rozerwane, sąsiadujące elementy mają krawędzie ukształtowane pod kątem zbliżonym do 45°, w wyniku dominującego działania naprężeń stycznych.

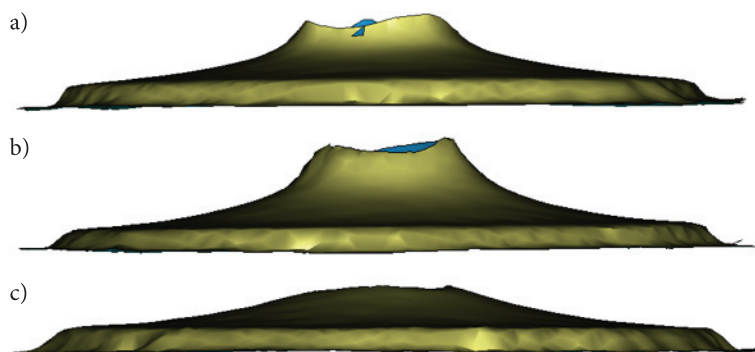
Penetracja penetratorem kulistym w pierwszym etapie spowodowała wypchnięcie korka (rys. 8b). W drugim etapie następowało rozpychanie materiału i pojawienie się pęknięć promieniowych. Liczba pęknięć była mniejsza w porównaniu do postaci zniszczenia uzyskanej przez penetrator ostry.

Zniszczenie materiału spowodowane przez penetrator walcowy charakteryzowało się utworzeniem korka oraz oderwaniem cienkiego pierścienia od brzegów otworu powstałego w próbce (rys. 8c).



Rys. 8. Przykładowe zdjęcia próbek po badaniach perforacji cienkich płytek w warunkach dynamicznych przez penetrator: a) ostry, b) kulisty, c) walcowy

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe skany przebitych próbek. Ze względu na ograniczenia skanera niemożliwe było odtworzenie charakteru zniszczenia w próbkach, jednak pomiar ugięcia płytek realizowany był w rejonie, który został odwzorowany bardzo dokładnie. Wartości ugięć są niewielkie, ich dokładny pomiar możliwy jest jedynie w specjalistycznym programie, jednak na rysunku poniżej zauważalna jest różnica pomiędzy ugięciem spowodowanym oddziaływaniem penetratora kulistego a dwoma pozostałymi przypadkami.



Rys. 9. Skany powierzchni próbek po przeprowadzonych badaniach perforacji cienkich płytek w warunkach dynamicznych przez penetrator: a) ostry, b) kulisty, c) walcowy

Szczegółowe zestawienie pomiarów stałego odkształcenia próbek przedstawiono w tabeli 4. Czerwone komórki w tabeli oznaczają dane odrzucone po przeprowadzonej analizie błędów. Rozrzut wyników jest duży, co może mieć związek z nie w pełni kontrolowanymi zjawiskami dynamicznymi oraz znacznym stopniem trudności występującym w badaniach dynamicznych.

Porównując ugięcie próbek, największą wartość uzyskano dla penetratora kulistego (2,91 mm), najmniejszą zaś dla penetratora ostrego (2,50 mm).

TABELA 4

Zestawienie pomiaru odkształcenia płytek w badaniach perforacji cienkich płytek w warunkach dynamicznych dla trzech rodzajów pocisków

TRZPIEŃ WALCOWY				TRZPIEŃ KULISTY			TRZPIEŃ OSTRY		
Lp.	P1	P2	(P1 + P2)/2	P1	P2	(P1 + P2)/2	P1	P2	(P1 + P2)/2
1	2,63	2,84	2,73	3,18	2,99	3,09	2,58	2,53	2,55
2	2,74	2,83	2,78	2,93	2,79	2,86	2,64	2,63	2,63
3	2,45	2,60	2,53	2,71	3,13	2,92	2,31	2,65	2,48
4	2,67	2,67	2,67	3,05	2,87	2,96	2,34	2,57	2,46
5	2,92	2,65	2,78	2,89	2,74	2,81	2,45	2,58	2,51
	\bar{P}	2,70		\bar{P}	2,93		\bar{P}	2,53	
	σ	0,11		σ	0,11		σ	0,07	
	X_1	2,59		X_1	2,82		X_1	2,45	
	X_2	2,81		X_2	3,04		X_2	2,60	
	\bar{P}_k	2,74		\bar{P}_k	2,91		\bar{P}_k	2,50	

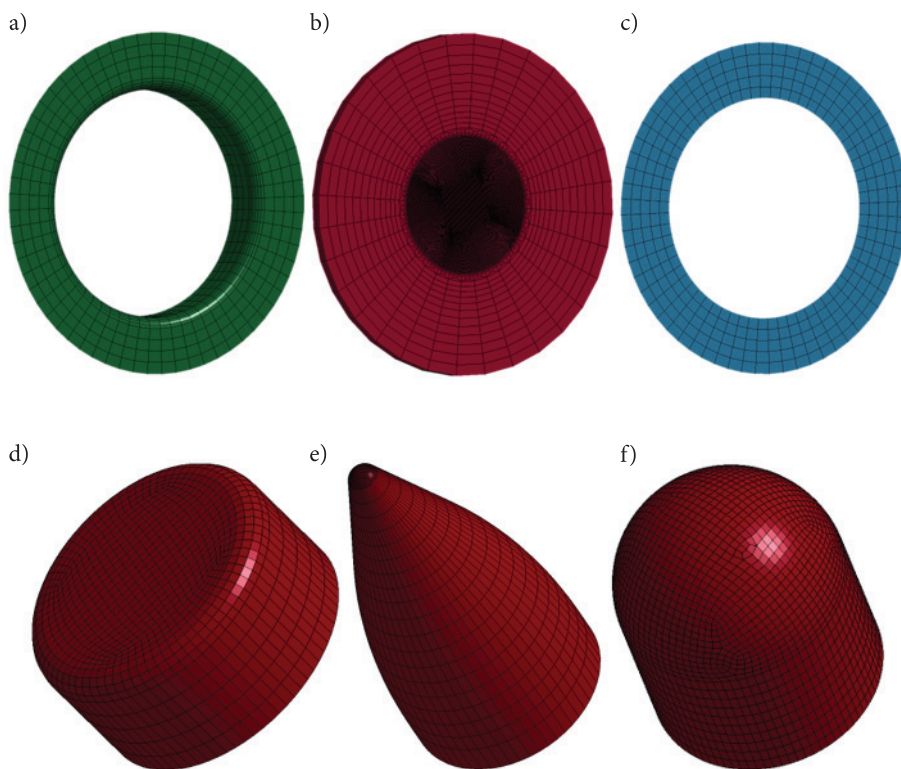
10. Analizy numeryczne perforacji płytek w warunkach dynamicznych

Założenia do modeli numerycznych wynikają z fizyki zjawisk towarzyszących procesowi perforacji (zniszczenia). Z uwagi na złożoność zjawiska zniszczenia wszystkie analizy numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem trójwymiarowych modeli, aby jak najwierniej odwzorować warunki realnego eksperymentu. W przypadku analiz dynamicznych uwzględniono wpływ szybkości odkształceń i temperatury na zachowanie się materiału podczas perforacji.

Zasadniczą rolę w procesach perforacji/przebijania pełni kontaktowe oddziaływanie ciał między sobą, zarówno penetratora z próbką, jak i próbki z elementami mocującymi. Właściwe zdefiniowanie kontaktu warunkuje poprawny opis wymiany pędu i energii między elementami układu fizycznego. W rozpatrywanym przypadku uwzględniono zjawisko tarcia dla pary trącej stal-stal. Przyjęto statyczny i dynamiczny współczynnik tarcia równy $\mu_s = 0,17$.

Dyskretyzacji poddano cztery elementy rozpatrywanego układu: wycinek płyty podpierającej próbkę, wycinek płyty dociskającej próbkę, penetrator oraz próbkę. Płyty mocujące opisano czterowęzłowymi elementami powłokowymi, natomiast próbkę i penetrator ośmiowęzłowymi elementami z jednym punktem całkowania. Elementy poddane dyskretyzacji przedstawiono na rysunku 10.

W przypadku próbki zagęszczono obszar o średnicy 12 mm w jej centralnej części, aby otrzymać dokładniejsze dane dotyczące mechanizmów zniszczenia w momencie uderzenia penetratora. Długość boku elementów w tym rejonie wynosi od 0,055 do 0,13 mm. Na grubości próbki otrzymano 18 elementów.



Rys. 10. Dyskretyzacja przestrzenna poszczególnych części stanowiska do badania perforacji płytek z materiału Armox® 500T: a) płyta podpierająca, b) próbka, c) płyta dociskająca, d) trzpień walcowy, e) trzpień ostry, f) trzpień kulisty

Warunki początkowe i brzegowe dotyczące podparcia tarczy i prędkości pocisków są niemal identyczne z warunkami panującymi w badaniach eksperymentalnych. Podparcie próbki zostało wykonane poprzez odebranie wszystkich stopni swobody węzłom płyty podpierającej oraz płyty dociskającej. Przemieszczenie pocisku w przypadku analiz dynamicznych zrealizowano poprzez zadanie prędkości początkowej (tj. tuż przed uderzeniem w próbkę), obliczonej jako średnia z zarejestrowanych prędkości podczas badań eksperymentalnych.

W przeprowadzonych analizach numerycznych analizowano postać zniszczenia, wartości odkształceń niszczących i parametrów stanu naprężenia oraz wielkość trwałego odkształcenia płytek.

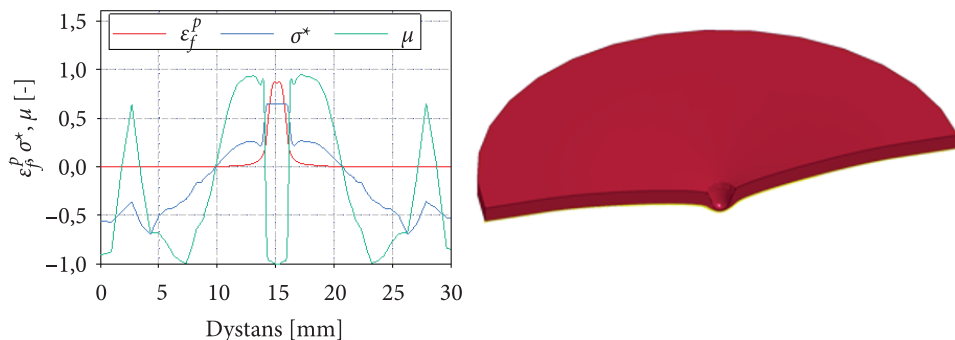
11. Opracowanie wyników analiz numerycznych

Jako pierwsze przedstawiono wyniki badań numerycznych dla penetratora ostrego. Jego oddziaływanie na próbkę spowodowało powstanie nieregularnego wzoru złożonego z kilku części. Rozerwanie elementów nastąpiło pod pewnym kątem do osi próbki. Zauważalna jest również duża nieregularność rozerwanych elementów (rys. 11).



Rys. 11. Postać zniszczenia próbki w procesie perforacji penetratorem ostrym w warunkach dynamicznych

Zniszczenie nastąpiło przy wartości odkształcenia efektywnego $\varepsilon^p = 0,87$ dla parametrów stanu naprężenia $\sigma^* = 0,65$ i $\mu = -1,0$ (rys. 12).



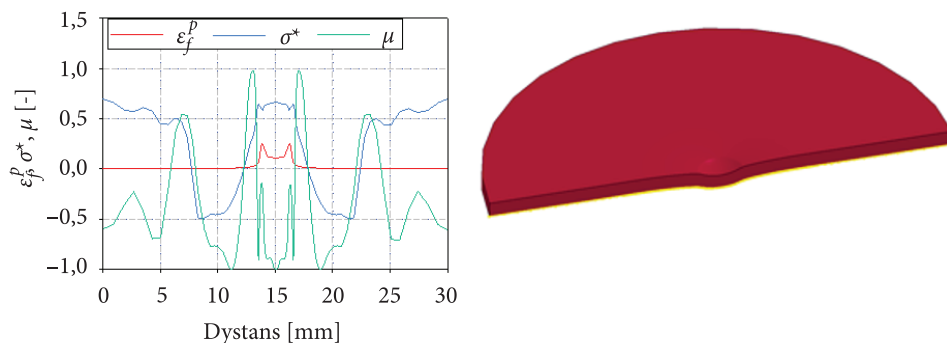
Rys. 12. Wykres efektywnych odkształceń plastycznych oraz parametrów stanu naprężenia dla analizy numerycznej z wykorzystaniem penetratora ostrego w warunkach dynamicznych

W przypadku penetratora kulistego doszło do utworzenia „koraka”. Posiada on charakterystyczny stożkowy kształt. Po jego oderwaniu powstały otwór podlegał ciągłym naporowi penetratora i w konsekwencji doszło do powstania promieniowych pęknięć na obwodzie otworu (rys. 13).



Rys. 13. Postać zniszczenia próbki w procesie perforacji penetratorem kulistym w warunkach dynamicznych

Pierwsze z elementów erodowały przy niskiej wartości odkształceń efektywnych $\varepsilon^p = 0,25$ dla parametrów stanu naprężenia $\sigma^* = 0,62$ i $\mu = -0,17$ (rys. 14). Stan taki świadczy o zniszczeniu w wyniku rozciągania, zbliżonego do dwuosiowego, w połączeniu ze ścinaniem.



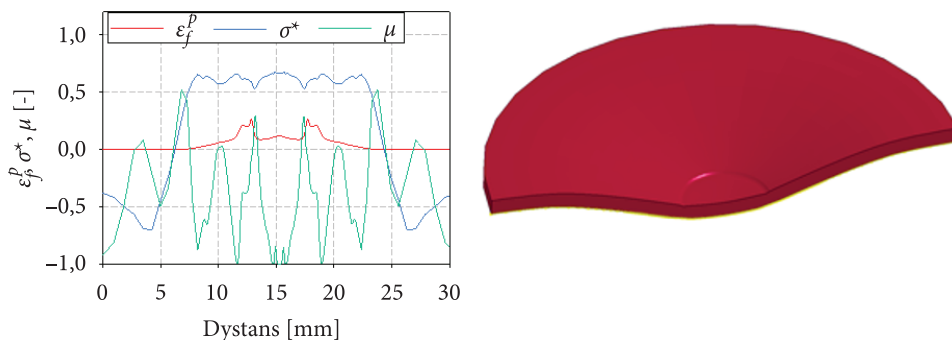
Rys. 14. Wykres efektywnych odkształceń plastycznych oraz parametrów stanu naprężenia dla analizy numerycznej z wykorzystaniem penetratora kulistego w warunkach dynamicznych

Przeprowadzenie perforacji z wykorzystaniem penetratora walcowego w warunkach dynamicznych spowodowało powstanie korka o regularnym kształcie. Podobnie jak w przypadku oddziaływania penetratora kulistego korki posiada ścięte krawędzie. Dodatkowo, na obwodzie otworu, powstał bardzo wąski pierścień wypchnięty przez krawędzie korka (rys. 15).



Rys. 15. Postać zniszczenia próbki w procesie perforacji penetratorem walcowym w warunkach dynamicznych

Perforacja badanej próbki z wykorzystaniem penetratora walcowego nastąpiła przy odkształceniu efektywnym $\varepsilon^p = 0,26$ i parametrach stanu naprężenia $\sigma^* = 0,62$ i $\mu = -0,05$ (rys. 16).



Rys. 16. Wykres efektywnych odkształceń plastycznych oraz parametrów stanu naprężenia dla analizy numerycznej z wykorzystaniem penetratora ostrego w warunkach dynamicznych

Dokonano pomiaru trwałego odkształcenia płytek, a wyniki przedstawiono w tabeli 5. Zbliżone wyniki ugięcia płytek osiągnięto w przypadku penetratora kulistego i walcowego. Najmniejsze ugięcie posiada próbka odkształcona przez oddziaływanie penetratora ostrego.

TABELA 5
Pomiar odkształcenia płytek uzyskany na podstawie analiz numerycznych w warunkach dynamicznych

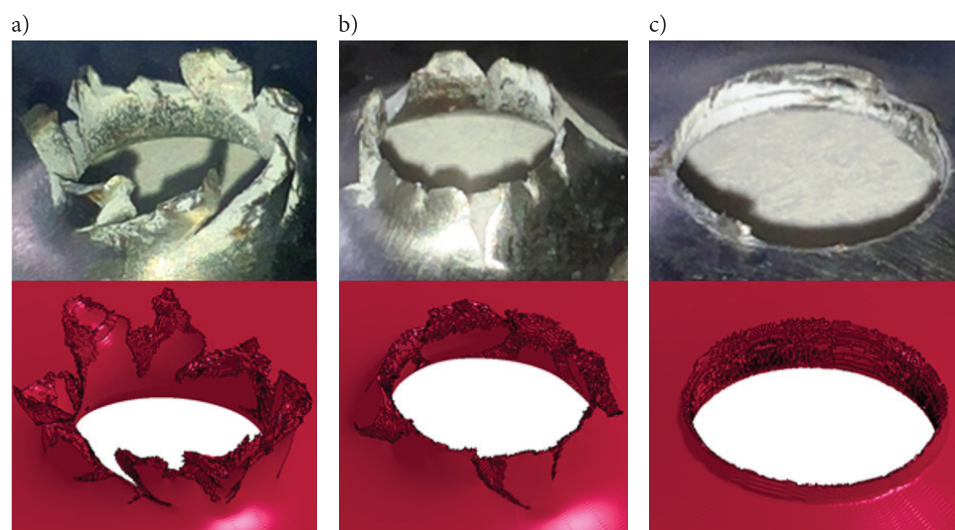
Rodzaj penetratora	Penetrator ostry	Penetrator kulisty	Penetrator walcowy
Wartość ugięcia [mm]	2,35	2,82	2,87

12. Porównanie badań eksperymentalnych i analiz numerycznych

Porównano odkształcenie trwale perforowanych płytek oraz postać uzyskanego zniszczenia. Największą różnicę w ugięciu próbek uzyskano dla penetratora ostrego, tj. 6%, najmniejszą zaś dla kulistego (3,2%). Największy błąd dla penetratora ostrego może wynikać z tego, że oddziałuje on najmniejszą powierzchnią na próbkę. Elementy w miejscu oddziaływania są poddane silnemu odkształceniu, co w rezultacie może mieć negatywny wpływ na odkształcenia całej próbki.

TABELA 6
Porównanie wyników badań ugięcia płytek dla warunków dynamicznych

Rodzaj penetratora	ostry	kulisty	walcowy
Dynamiczne badania eksperymentalne [mm]	2,5	2,91	2,74
Analizy numeryczne [mm]	2,35	2,82	2,87
Różnica wyników [%]	6,0	3,2	4,7



Rys. 17. Porównanie kształtu zniszczenia próbki w warunkach dynamicznych po perforacji penetratorem: a) ostrym, b) kulistym, c) walcowym

Odnosnie do skali zniszczenia można stwierdzić, że zniszczenie w warunkach dynamicznych okazuje się bardzo destruktywne. Powstałe wzory są nieregularne, o poszarpanych krawędziach. Ponadto w przypadku oddziaływania penetratora ostrego niektóre z oderwanych elementów układają się pod pewnym kątem.

Zastosowanie penetratora kulistego w warunkach dynamicznych spowodowało utworzenie „orka”. W badaniach dynamicznych powstał cienki pierścień dokoła otworu. Został on wypchnięty przez utworzony „korek”.

13. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiono eksperymentalno-numeryczną analizę rezultatów perforacji cienkich płytek wykonanych z materiału Armox® 500T w warunkach dynamicznych. W celu zweryfikowania, czy model jest wrażliwy na odmienne stany naprężenia, w analizach wykorzystano penetratory o trzech różnych geometriach. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych porównano z wynikami badań numerycznych pod względem stanu naprężenia, odkształcenia trwałego płytek oraz postaci zniszczenia próbek.

Na podstawie wyników badań można sformułować następujące wnioski końcowe:

- Proces perforacji jest zjawiskiem bardzo złożonym, zależy od wielu czynników i w zależności od stanu naprężenia i odkształcenia w perforowanym elemencie może charakteryzować się różnymi postaciami zniszczenia;
- Wyniki analiz numerycznych pokazują, że zniszczenie materiału Armox® 500T w aspekcie oceny jakościowej oraz ilościowej jest zgodne z wynikami badań eksperymentalnych, co umożliwia badanie zjawisk zachodzących podczas tego procesu;
- Analiza parametrów stanu naprężenia pokazuje, że zniszczenie materiału we wszystkich przypadkach nastąpiło głównie w wyniku kombinacji naprężenia rozciągającego i ścinającego;
- Pierwsza faza zniszczenia w przypadku penetratora ostrego nastąpiła przy stosunkowo wysokich odkształceniach plastycznych ($\varepsilon^p = 0,87$) w porównaniu do zniszczenia przez penetrator kulisty i walcowy (odpowiednio $\varepsilon^p = 0,25$ i $\varepsilon^p = 0,26$);
- Uzyskano bardzo dobrą zgodność geometryczną analizowanych typów zniszczenia przy niewielkich wartościach błędów pomiaru odkształcania trwałego płytek;
- Metoda elementów skończonych wraz z zastosowaniem zaawansowanego modelu konstytutywnego oraz modelu zniszczenia pozwala na właściwe modelowanie procesu perforacji.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.12.2021. Zatwierdzono do publikacji 3.01.2022.

Arkadiusz Popławski: <https://orcid.org/0000-0002-7494-8975>

LITERATURA

- [1] RUSINEK A., RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ J., ZAERA R., KLEPACZKO J., ARIAS A. I SAUVELET C., *Experimental and numerical study on the perforation process of mild steel sheets subjected to perpendicular impact by hemispherical projectiles*, International Journal of Impact Engineering, nr 36, 2009, 565-587.
- [2] RODRIGUEZ-MARTINEZ J., RUSINEK A., PESCI R., *Experimental survey on the behaviour of AISI 304 steel sheets subjected to perforation*, Thin-Walled Structures, nr 48, 2010, 966-978.
- [3] BORVIK T., HOPPERSTAD O., BERSTAD T. I LANGSETH M., *Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. Part II: numerical simulations*, International Journal of Impact Engineering, nr 27, 2002, 37-64.
- [4] DEY S., BØRVIK T., TENG X., WIERZBICKI T. I HOPPERSTAD O., *On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation*, International Journal of Solids and Structures, nr 44, 2007, 6701-6723.
- [5] DEY S., BØRVIK T., HOPPERSTAD O., LEINUM J. I LANGSETH M., *The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes*, International Journal of Impact Engineering, nr 30, 2004, 1005-1038.
- [6] ZUKAS J.A., *Impact Dynamics: Theory and Experiment*, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Maryland, 1980.
- [7] „SSAB,” 2015, [online]. Available: <http://www.ssab.com>, [dostęp: 5.10.2016].
- [8] NILSSON M., *Constitutive Model for Armox 500T and Armox 600T at Low and Medium Strain Rates*, Swedish Defence Research Agency, Stockholm 2003.
- [9] SEABRA P., *Tecnologia de Materiais*, 2010, [online]. Available: http://www.tecnologiademateriais.com.br/mt/2010/cobertura_paineis/blindagem/apresentacoes/ssab.pdf [dostęp: 10.10.2016].
- [10] ARGYRIS J., KELSEY S., *Energy theorems and structural analysis*, Butterworth, 1960, 347-356.
- [11] PRZEMIENIECKI J., *Theory of Matrix Structural Analysis*, New York, Dover Publ, 1985.
- [12] ZIENKIEWICZ O., *The finite element method*, 3rd ed, London, McGraw-Hill, 1977.
- [13] ZIENKIEWICZ O., TAYLOR R., *The finite element method*, 5th Edition, London, McGraw-Hill, 2000.

A. POPŁAWSKI

Experimental and numerical investigations of Armox® 500T armour steel perforation process

Abstract. This paper presents the results of experimental and numerical studies of the perforation of Armox 500T armoured steel. The plate perforation was performed with a pneumatic gun using three types of penetrators. Sharp, spherical, and blunt penetrators were used. The use of different geometries of penetrators causes the process of perforation and destruction of plates in a different state of stress and strain, which leads to the appearance of three basic modes of failure. Numerical analyses of the perforation process have been carried out using the Ls-Dyna computational code with an advanced constitutive model of the material and the integrated failure model. The obtained experimental and numerical results were analysed and compared. The failure shape, the level of plastic deformation and the parameters of stress and strain state were analysed.

Keywords: perforation process, Finite Element Method, Armox® 500T, plastic strain, stress state parameters

DOI: 10.5604/01.3001.0015.6957

