



Analiza numeryczna procesu perforacji wybranych struktur cienkościennych

ARKADIUSZ POPŁAWSKI, WERONIKA PISKORZ

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

Streszczenie. Praca dotyczy wielowariantowych analiz numerycznych trzech cienkościennych struktur przestrzennych o topologiach: plastra miodu, prostokątnej i auksetycznej. Analizy właściwe poprzedzono doбором materiału, z którego potencjalnie struktury mogłyby zostać wytworzone. Optymalny materiał wybrano spośród trzech materiałów metalicznych, dla których dostępny był zaawansowany model konstytutywny materiału oraz model zniszczenia. Wykorzystanie właściwego modelu pozwoliło na uwzględnienie wielu zjawisk podczas bardzo złożonego procesu perforacji, co przekłada się na jakość i trafność uzyskanych rezultatów badań numerycznych. Zasadnicze analizy numeryczne prowadzone po etapie doboru materiału skupiały się na analizie wytrzymałości struktur w procesie ich perforacji obiektami w postaci kulki o średnicy 10 mm. Trzy obiekty uderzające w struktury rozmieszczono w taki sposób, aby uwzględnić wpływ miejsca uderzenia na proces perforacji. Na podstawie pomiaru głębokości perforacji kulek oraz analizy obszaru oddziaływania na strukturę wytypowano najbardziej wytrzymałą topologię. W kolejnym etapie przeprowadzono dodatkowe analizy numeryczne, które pozwoliły na określenie efektywności struktury oraz oszacowanie jej granicy balistycznej.

Słowa kluczowe: proces perforacji, struktura plastra miodu, struktura prostokątna, struktura auksetyczna, metoda elementów skończonych, granica balistyczna

DOI: 10.5604.01.3001.0015.6958

1. Wprowadzenie

Struktury cienkościenne są jednymi z najpowszechniej występujących elementów zarówno w przyrodzie, jak i w wielu gałęziach przemysłu, m.in. w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, elektromaszynowym, okrętowym czy spożywczym. Struktury te można zdefiniować w prosty sposób: jako elementy, w których jeden

z wymiarów jest znacznie mniejszy niż pozostałe. Do najważniejszych charakteryzujących je właściwości możemy zaliczyć: bardzo korzystny stosunek wytrzymałości do masy, wysoką sztywność oraz bardzo dobre właściwości energochłonne [1]. Właściwości użytkowe struktur cienkościennych zależą w przeważającej części od ich konstrukcji, kształtu, materiału oraz technologii, w jakiej zostały wytworzone. Ciągły rozwój technologii wytwarzania oraz nowoczesne narzędzia inżynierskie pozwalają uzyskać struktury o bardzo skomplikowanych kształtach i unikatowych właściwościach, spełniające niekiedy bardzo wysublimowane wymagania.

Podjęto próbę przeanalizowania wybranych struktur cienkościennych w procesie ich perforacji. Zjawisko przebicia/perforacji jest procesem bardzo złożonym. Rezultat perforacji, tj. sposób zniszczenia struktury, zależy głównie od właściwości materiału, z jakiego wykonana jest perforowana struktura, prędkości uderzenia, wymiarów i kształtu penetratora oraz wymiarów względnych obu ciał. Procesowi temu towarzyszą duże odkształcenia materiału oraz znaczne przyrosty temperatury w samym obszarze styku dwóch ciał [2, 3].

Uwzględniając fizykę i przebieg procesu perforacji, do analizy rozpatrywanego zagadnienia wykorzystano metodę elementów skończonych. Opiera się ona na otrzymywaniu przybliżonych rozwiązań równań różniczkowych cząstkowych, stanowiących model matematyczny stanu fizycznego badanego ciała lub procesu, jakiemu ciało to jest poddane. Ideą metody elementów skończonych jest podział ciągłego modelu geometrycznego na skończoną liczbę podobszarów — elementów skończonych łączących się ze sobą w węzłach, powstaje tym samym dyskretny model geometryczny. Umożliwia to analizę nawet bardzo skomplikowanych struktur przestrzennych [4, 5, 6, 7]. W analizach numerycznych wykorzystano jeden z najbardziej zaawansowanych modeli numerycznych dostępnych w bibliotece materiałów oprogramowania Ls-Dyna. Model ten opisuje zachowanie materiału w zakresie sprężysto-plastycznym przy umocnieniu lepkoplastycznym i osłabieniu termicznym [11]. Zaimplementowany model zniszczenia uwzględnia: prędkość odkształcenia, wpływ temperatury oraz stan naprężenia i odkształcenia.

Analizy numeryczne prowadzono dwuetapowo. Pierwszy etap umożliwił wytypowanie odpowiedniego materiału, z którego potencjalnie mogłyby zostać wykonane struktury. Etap analiz właściwych poddaje ocenie jakościowej i ilościowej trzy topologie struktur cienkościennych pod względem ich podatności na proces perforacji.

2. Etap doboru materiału struktur

Pierwszy etap analiz numerycznych dotyczy wytypowania właściwego materiału, z jakiego analizowane struktury mogłyby zostać wykonane. Rozpatrywano materiały, z których potencjalnie struktury mogą zostać wytworzone oraz dostępne

są ich modele konstytutywne, a także modele zniszczenia. Pod uwagę wzięto stal Armox® 500T, stop tytanu Ti6Al4V oraz stop aluminium 2024. Podstawowe właściwości mechaniczne rozpatrywanych materiałów opisano w tabeli 1.

TABELA 1
Właściwości mechaniczne stali Armox® 500T, tytanu Ti6Al4V oraz aluminium 2024

Materiał	E [GPa]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	Twardość	A5 [%]
Armox® 500T [3,10]	207	1450-1750	min 1250	480-540 HBW	8
tytan Ti 6Al 4V [9]	114	900	830	33 HRC	8-10
aluminium 2024 [8]	73	360-435	250-290	104-123 HB	12-14

Proces wytypowania właściwego materiału polega na przeprowadzeniu analiz numerycznych procesu perforacji płytek wykonanych ze wszystkich trzech metali. Porównano zachowanie materiałów podczas perforacji oraz prędkość perforującej kulki w zależności od czasu, aby wybrać materiał najbardziej wytrzymały, najmniej podatny na proces perforacji.

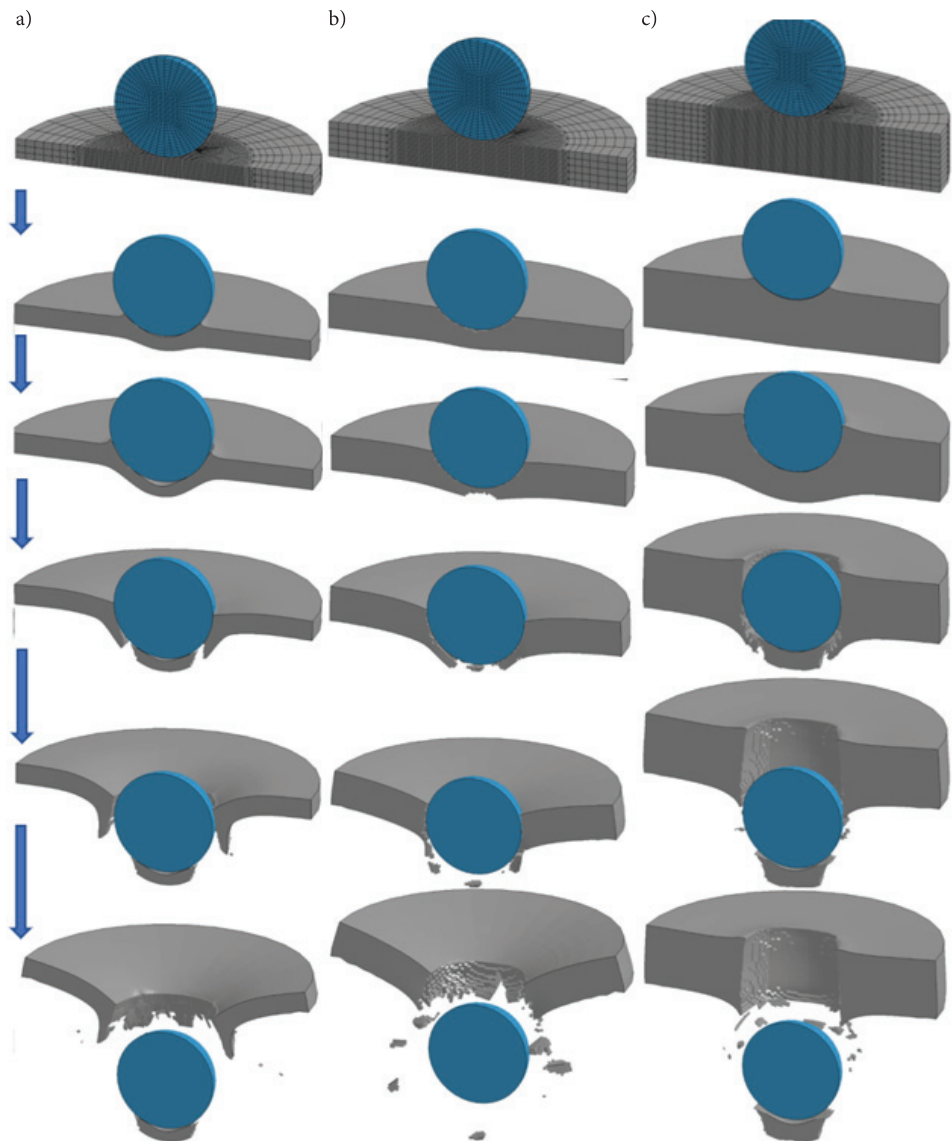
Dla wszystkich trzech płytek perforująca kulka miała tę samą średnicę oraz masę. Wszystkie płytki miały kształt walca o tej samej średnicy, przy czym grubość każdej płytki była dostosowana w taki sposób, aby wszystkie miały jednakową masę. Wymiary i masa płytek oraz kulki dla modelu numerycznego zostały umieszczone w tabeli 2.

TABELA 2
Wartości parametrów modeli numerycznych

Parametr modelu numerycznego	Wartość
Średnica kulki	10 mm
Masa kulki	4 g
Grubość płytki z materiału Armox® 500T	1,989 mm
Grubość płytki z materiału Tytan Ti 6Al 4V	3,521 mm
Grubość płytki z materiału Aluminium 2024	6,000 mm
Średnica płytki	30 mm
Masa płytki	10,9 g

Analizy numeryczne procesu perforacji wykonano w programie LS-Dyna z wykorzystaniem modelu materiałowego MAT_224. Siatka elementów skończonych została wykonana z elementów bryłowych, gdzie w strefie kontaktu zagęszczono elementy do wielkości 0,22 mm, aby lepiej odwzorować proces przebicia płytki przez kulkę.

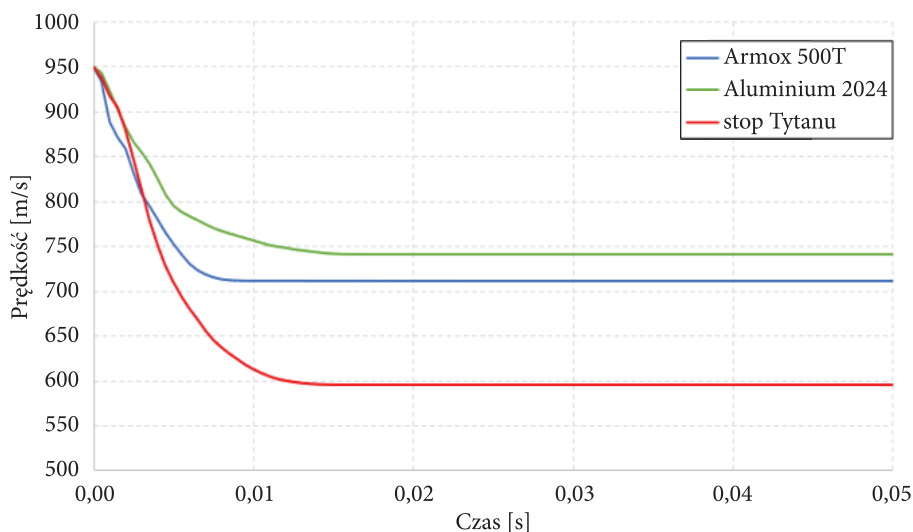
Model został utwierdzony poprzez odebranie wszystkich stopni swobody w podstawie na obwodzie płytki, które znajdowały się poza strefą kontaktu. Dla wszystkich analiz numerycznych prędkość początkowa kulki była taka sama i wynosiła 950 m/s.



Rys. 1. Przebieg procesu perforacji płytek wykonanych z materiału: a) Armox® 500T, b) stopu tytanu Ti6Al4V, c) stopu aluminium 2024

Na rysunku 1 przedstawiono rezultaty analiz numerycznych pokazujące przebieg procesu perforacji dla każdego z materiałów w sześciu chwilach czasowych. We wszystkich analizowanych przypadkach nastąpiło całkowite przebicie płytki. Dla materiału Armox® 500T oraz stopu aluminium w ostatnim etapie perforacji utworzył się korek, co świadczy o dominującym naprężeniu stycznym towarzyszącym procesowi niszczenia w strefie kontaktu obydwu ciał. Dla stopu tytanu doszło do rozerwania materiału i silnej defragmentacji jego cząstek.

Wykres na rysunku 2 prezentuje, jak zmieniła się prędkość początkowa kulki w czasie dla każdego wariantu materiałowego. Największą redukcją prędkości, a co za tym idzie największą odpornością na perforację wykazał się stop tytanu. W określonych warunkach początkowo brzegowych płytka wykonana ze stopu tytanu Ti 6Al 4V znacznie obniżyła prędkość kulki. W czasie 0,01 s spadek prędkości wyniósł prawie 350 m/s, natomiast dla pozostałych materiałów było to ok. 225 m/s.

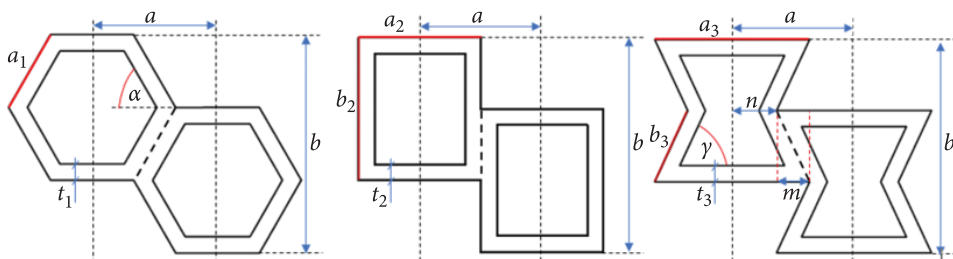


Rys. 2. Przebieg prędkości kulki perforującej płytki z różnych materiałów

3. Etap analiz właściwych

Analizy właściwe dotyczą obliczeń numerycznych procesu perforacji struktur cienkościennych o trzech wybranych topologiach. Opracowanie geometrii trzech struktur poprzedzone było ustaleniem wymiarów pojedynczej komórki danej struktury. Musiały one zostać dobrane tak, aby pola powierzchni jednej komórki dla wszystkich trzech wybranych struktur były takie same lub różniły się w bardzo małym

stopniu, dzięki czemu końcowe modele trójwymiarowe powinny charakteryzować się taką samą masą i zbliżoną porowatością. Rysunek 3 pokazuje przekroje komórek podstawowych wraz z zaznaczonymi na nich wymiarami, które wykorzystano do wyznaczenia wzorów pozwalających obliczyć pola powierzchni dla każdej z komórek.



Rys. 3. Przekroje komórek, od lewej: komórka plastra miodu, komórka prostokątna, komórka struktury auksetycznej

Poniżej przedstawiono wzory na pola powierzchni komórek, gdzie:

S_1, S_2, S_3 — pola powierzchni dla komórek plastra miodu, prostokątnej, auksetycznej;

$t_{1,2,3}$ — połowa grubości ścianki komórki podstawowej;

b — odległość pomiędzy komórkami;

α — kąt dla komórki plastra miodu;

γ — kąt dla komórki struktury auksetycznej.

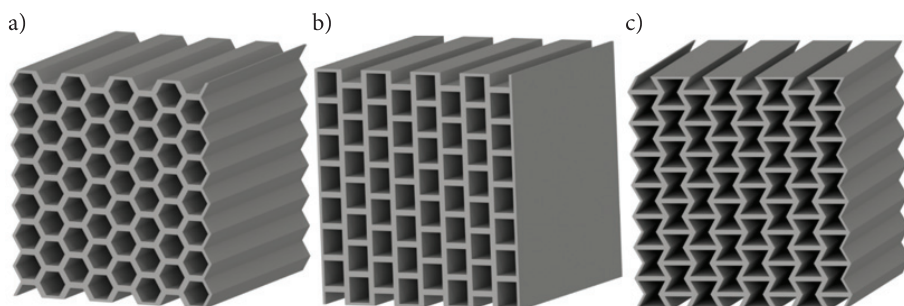
$$S_1 = \frac{2 \cdot t_1 (2 \cdot b \cdot \operatorname{tg} \alpha - 3 \sqrt{3} \cdot t_1)}{\sqrt{3} \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{2 \cdot t_2 (2 \sqrt{3} \cdot b + 3 \cdot b - 6 \sqrt{3} \cdot t_2)}{3 \sqrt{3}}, \quad (2)$$

$$S_3 = \frac{t_3^2 (-12 \cdot \operatorname{tg} \gamma + 12 \cdot \sin \gamma) + t_3 (b \cdot 2 \sqrt{3} \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \sin \gamma + 2 \cdot b \cdot \sin \gamma + 4 \cdot b \cdot \operatorname{tg} \gamma)}{3 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \sin \gamma} \quad (3)$$

W trakcie obliczeń przyjęto: $b = 20$ mm, $\alpha = 120^\circ$, $\gamma = 60^\circ$ oraz $t_3 = 1$ mm. Poszukiwane były wielkości t_1 i t_2 . Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano pakiet matematyczny Matlab.

Uwzględniając obliczone wymiary komórek, wygenerowano modele przestrzenne struktur o trzech zróżnicowanych topologiach, które w kolejnym kroku poddano dyskretyzacji. Modele trójwymiarowe, utworzone w programie Autodesk Inventor, przedstawiono na rysunku 4.



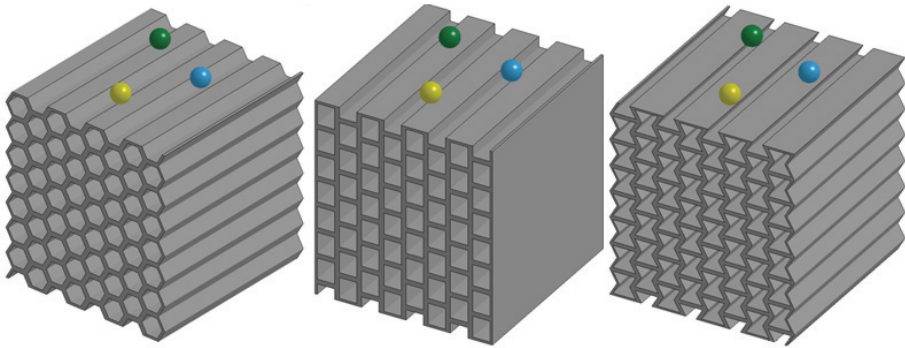
Rys. 4. Modele trójwymiarowe o topologii: a) plastra miodu, b) prostokątnej, c) auksetycznej

Analizy numeryczne procesu perforacji struktur cienkościennych mają na celu wyznaczenie optymalnej topologii, w najmniejszym stopniu podatnej na zniszczenie, cechującej się najwyższą wytrzymałością. Porównaniu poddane zostaną głębokości perforacji każdej ze struktur w miejscach uderzenia trzech kul. Dla lepszego zobrazowania wyników przedstawiono również rozkłady efektywnych odkształceń plastycznych w miejscach perforacji.

Dla wszystkich struktur warunki początkowo-brzegowe były takie same. Podparcie struktur zostało wykonane przez odebranie wszystkich stopni swobody dla wszystkich węzłów znajdujących się w podstawie struktur.

Przemieszczenie kul zrealizowano poprzez nadanie im jednakowej prędkości początkowej. Prędkość początkowa została dobrana tak, aby optymalnie zobrazować proces perforacji struktur.

Istotnym aspektem uwzględnionym w analizowanych przypadkach jest również początkowe położenie kulek. Rysunek poniżej (rys. 5) przedstawia położenie kulek we wszystkich modelach przed uderzeniem. Kulki zielone są umiejscowione bezpośrednio nad komórką, kulki żółte nad ścianą komórkową, natomiast kulki niebieskie znajdują się pomiędzy ścianą komórkową a komórką. Zastosowane umiejscowienie kulek pozwala uwzględnić wpływ miejsca uderzenia kulki na przebieg procesu perforacji, a przez to ocenić globalną wytrzymałość struktur w trzech analizowanych przypadkach.



Rys. 5. Położenie kulek przed uderzeniem, od lewej: struktura plastra miodu, struktura prostokątna, struktura auksetyczna

Praca ma charakter jedynie analityczno-numeryczny, w związku z tym, aby dokonać walidacji modeli, przeprowadzono weryfikację bilansu energetycznego dla wszystkich trzech przypadków. Dla każdej chwili czasowej powinna być spełniona zasada zachowania energii [3]:

$$E_k + E_i + E_s + E_{rw} + E_d + E_h = E_k^0 + E_i^0 + W_{ext}, \quad (4)$$

gdzie: E_k — energia kinetyczna,
 E_k^0 — energia kinetyczna początkowa,
 E_i — energia wewnętrzna,
 E_i^0 — energia wewnętrzna początkowa,
 E_s — praca sił tarcia,
 E_{rw} — energia nieodkształcalnej ścianki,
 E_d — energia rozproszona na skutek tłumienia,
 E_h — praca sił zapobiegających efektowi *hourglass*,
 W_{ext} — praca sił zewnętrznych.

W programie LS-Dyna równanie energetyczne może zostać zweryfikowane poprzez sprawdzenie współczynnika „*eratio*” wyrażonego wzorem [3]:

$$eratio = \frac{E_{total}}{E_{total}^0 + W_{ext}}, \quad (5)$$

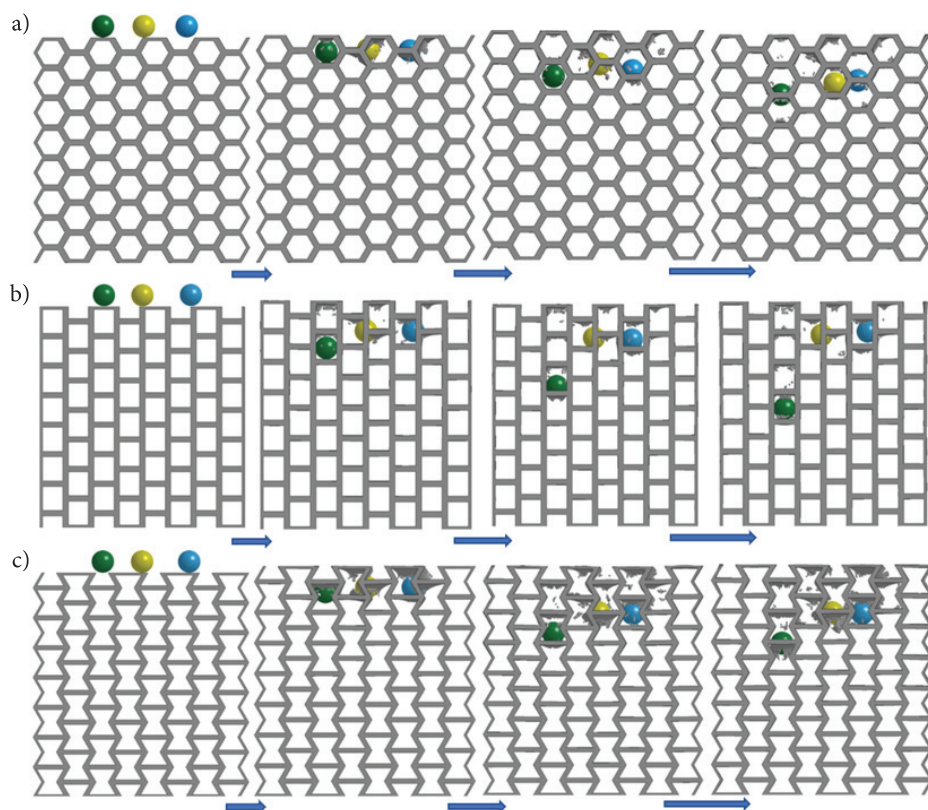
gdzie: E_{total} — energia całkowita,
 E_{total}^0 — energia całkowita początkowa,
 W_{ext} — praca sił zewnętrznych.

Zasada zachowania energii jest spełniona dla współczynnika *eratio* bliskiego jedności w każdej chwili czasowej. Energia *hourglass* powinna być jak najmniejsza. Za wartości poprawne uważa się te oscylujące w granicach 10% energii całkowitej.

Dla wszystkich przeprowadzonych analiz bilans energetyczny został zweryfikowany i jest poprawny. W związku z tym, że kulki przemieszczają się z bardzo dużą prędkością i po zderzeniu ze strukturami nagle ją tracą, największe zmiany energii dotyczą energii kinetycznej. Jest ona zamieniana na procesy związane z degradacją struktur, m.in. silnym odkształceniem plastycznym oraz erozją elementów.

Przechodząc do zasadniczej oceny rezultatów przeprowadzonych obliczeń numerycznych dla trzech topologii, przedstawiono wyniki w postaci ilustracji postępu procesu perforacji oraz wykresy przemieszczenia kulek w funkcji czasu.

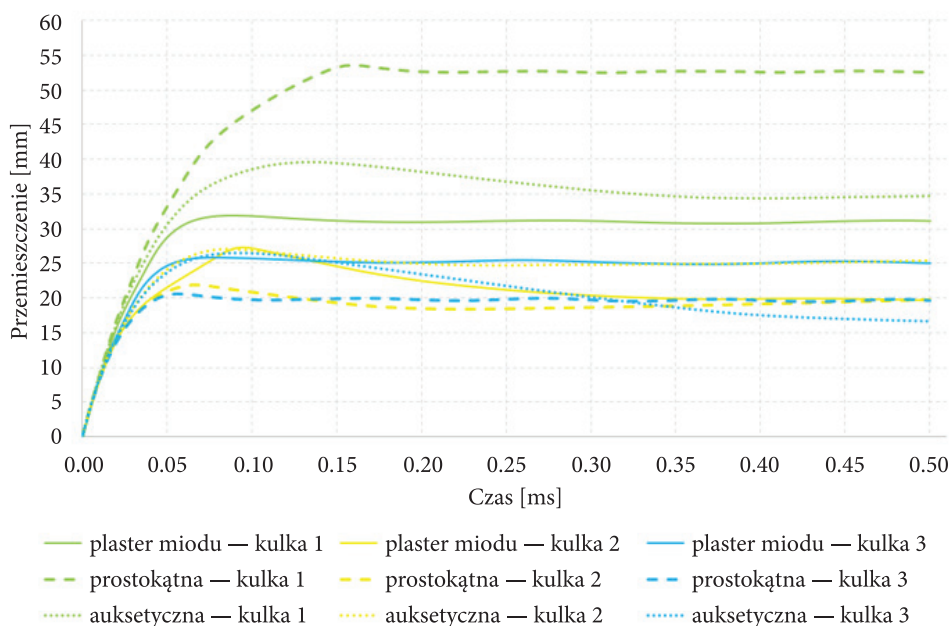
W procesie perforacji struktury plastra miodu (rys. 6a) wszystkie trzy kulki zatrzymały się na podobnej głębokości. Najmniej uszkodzeń wyrządziła kulka niebieska, która była umieszczona między ścianą komórkową a komórką. Największe uszkodzenia wystąpiły przy uderzeniu kulki zielonej, całkowicie przebiła ona dwie komórki struktury i uszkodziła kolejną w kolumnie, przebijając jej górną ściankę.



Rys. 6. Proces perforacji struktury: a) plastra miodu, b) prostokątnej, c) auksetycznej

W trakcie perforacji struktury prostokątnej (rys. 6b) kulki żółta i niebieska zatrzymały się na tej samej głębokości. Podobnie jak w strukturze plastra miodu kulka zielona wyrządziła największe zniszczenia podczas uderzenia. W tym przypadku były one jednak dużo większe w porównaniu do pozostałych kulek.

W procesie perforacji struktury auksetycznej (rys. 6c) kulki zachowały się podobnie jak w przypadku perforacji struktury plastra miodu. Kulka zielona, uderzająca prostopadłe do ścian struktury, dokonała największych zniszczeń. Można jednak zauważyć, że zniszczenia spowodowane przez kulki obejmują większą przestrzeń w obrębie struktury.



Rys. 7. Zestawienie wykresów przemieszczeń kulek w funkcji czasu dla analizowanych rodzajów struktur

Wykresy przedstawione na rysunku 7 pokazują przemieszczenie kulek w czasie dla każdej ze struktur. Największe przemieszczenie ze wszystkich wystąpiło dla kulki pierwszej (zielonej) w strukturze prostokątnej, najmniejsze dla kulki trzeciej (niebieskiej) w tej samej strukturze. W strukturze auksetycznej kulka pierwsza i trzecia po osiągnięciu maksymalnej głębokości przemieściły się następnie przeciwnie do pierwotnego kierunku ruchu w zakresie od 5 do 10 mm. Zachowanie takie spowodowane jest właściwościami sprężysto-plastycznymi materiału. To samo wydarzyło się przy kulce drugiej (żółtej) w strukturze plastra miodu. Największa różnica w przemieszczeniu kulek w tej samej strukturze występuje w strukturze prostokątnej.

Różnica ta wynosi ponad 30 mm. Najmniejsza różnica pojawia się w strukturze plastra miodu i wynosi ok. 5 mm. W tabeli 3 dodatkowo przedstawiono wartości maksymalne przemieszczenia każdej z kulek dla wszystkich struktur.

TABELA 3

Zestawienie wartości przemieszczenia kulek dla każdej ze struktur

Struktura	Przemieszczenie kulki pierwszej — zielonej [mm]	Przemieszczenie kulki drugiej — żółtej [mm]	Przemieszczenie kulki trzeciej — niebieskiej [mm]
Plastra miodu	32	27	25,8
Prostokątna	53,5	22	21
Auksetyczna	39,5	27	26,4

Analizie poddano również odkształcenia efektywne pokazujące, w jakim stopniu pracuje cała struktura (rys. 8). Można zauważyć, że w strukturze auksetycznej występują o wiele bardziej rozległe odkształcenia plastyczne w porównaniu do pozostałych dwóch struktur.

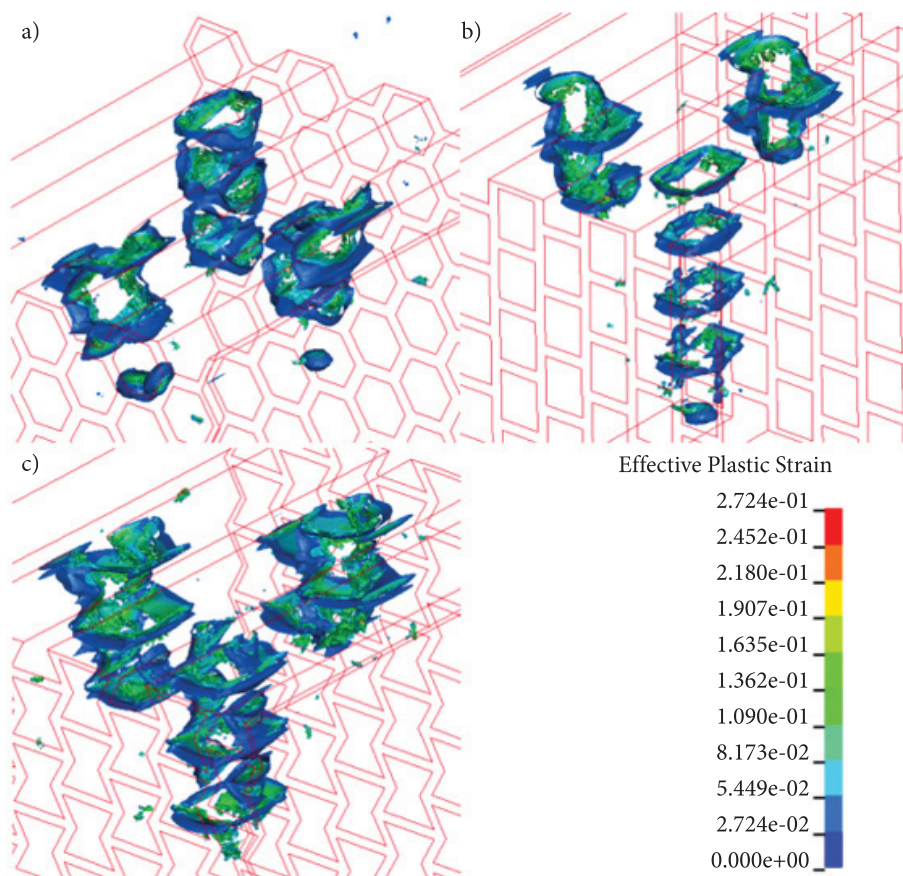
Uwzględniając wartości przemieszczeń kulek oraz obszar oddziaływania na strukturę, topologią, która jest stosunkowo najmniej podatna na perforację, jest struktura plastra miodu. Struktura prostokątna mimo wystąpienia najmniejszych przemieszczeń dwóch kulek posiada również wynik najmniej korzystny, gdzie jedna z kulek osiągnęła największą wartość przemieszczenia spośród wszystkich analizowanych topologii. W strukturze auksetycznej występowały większe przemieszczenia oraz większy obszar oddziaływania penetratorów w porównaniu do struktury plastra miodu.

W celu zbadania pełnej efektywności struktury plastra miodu przeprowadzono kolejne analizy numeryczne, zwiększając prędkość kulek aż do momentu całkowitego przebiccia struktury przez co najmniej jedną z nich. Za pełne przebiccie uznaje się przejście kulki przynajmniej połową jej średnicy przez ostatnią ściankę struktury.

TABELA 4

Wartości przemieszczenia kulek dla każdej z prędkości

Prędkość początkowa [m/s]	Przemieszczenie kulki pierwszej [mm]	Przemieszczenie kulki drugiej [mm]	Przemieszczenie kulki trzeciej [mm]
1500	57,5	44	47
2000	83,5	85	73
2200	94	99	77,5
2300	95	102	81
2400	98	przebiccie (500 m/s)	88



Rys. 8. Odształcenia efektywne: a) struktury plastra miodu, b) struktury prostokątnej, c) struktury auksetycznej

Zestawienie wyników z wariantowych analiz numerycznych badania efektywności struktury plastra miodu przedstawiono w tabeli 4. Sukcesywnie zwiększanie prędkości początkowej kulek pozwoliło na wyznaczenie teoretycznej prędkości początkowej, przy której dochodzi do pełnej perforacji analizowanej struktury w jednym z trzech opcjonalnych miejsc uderzenia. Przy prędkości początkowej 2300 m/s kulki zatrzymują się w dolnej części struktury, jedna z nich narusza ostatnią ściankę, jednak nie przebija jej w pełni. Analiza przy prędkości początkowej kulek 2400 m/s ujawnia pełne przebicie kulki będącej w położeniu początkowym nad ścianą komórkową. Kulka żółta przebija w pełni strukturę z prędkością resztkową wynoszącą ok. 500 m/s. Stąd można przyjąć, że granica balistyczna dla analizowanej

struktury wynosi w przybliżeniu 2350 m/s. Granica ta wyznaczona jest w przybliżeniu, gdyż jej dokładne określenie wymagałoby dodatkowych analiz numerycznych w przedziale prędkości początkowej od 2300 do 2400 m/s.

4. Podsumowanie i wnioski

W pracy przeprowadzono dwuetapowe analizy wariantowe struktur cienkościennych o trzech topologiach. W pierwszym etapie analiz badano trzy rodzaje materiałów metalicznych pod względem ich wytrzymałości w procesie perforacji. Etap drugi analiz numerycznych opierał się na analizach perforacji wybranych struktur przez objekty w postaci kulki. Kulki rozmieszczono tak, aby uwzględnić losowe miejsca uderzenia obiektu.

- Spośród trzech analizowanych materiałów wytypowano stop tytanu jako materiał optymalny pod względem masy i wytrzymałości do dalszych analiz perforacji.
- Przestrzenna struktura plastra miodu została uznana za najbardziej wytrzymałą strukturę w procesie perforacji ze względu na najbardziej korzystny układ zniszczeń dla trzech kulek przy prędkości 950 m/s.
- Struktura plastra miodu wytrzymuje perforację przez kulki, których maksymalna prędkość początkowa wynosi ok. 2200 m/s, a masa ok. 4 g.
- Struktura plastra miodu wytrzymuje uderzenie kulkami z prędkością 2300 m/s (niepełna perforacja), natomiast jej całkowite przebicie przez jedną z kulek następuje przy prędkości początkowej obiektu równej 2400 m/s.
- Granica balistyczna dla struktury plastra miodu, oszacowana na podstawie przeprowadzonych analiz, wynosi ok. 2350 m/s.
- Analizowana struktura plastra miodu posiada bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe w warunkach obciążenia małogabarytowymi elementami poruszającymi się z bardzo dużymi prędkościami, przy czym na podstawie analizy literaturowej przypuszcza się, że ma równocześnie wysoką efektywność w aspekcie energochłonności, co zwiększa jej atrakcyjność w stosunku do tradycyjnych rozwiązań konstrukcyjnych.

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] BISCHOFF M., BLETZINGER K., WALL W.A., RAMM E., *Models and Finite Elements for Thin-Walled Structures, Part 2. Solids and Structures*, [in:] *Encyclopedia of Computational Mechanics*, John Wiley & Sons, USA 2004, <https://doi.org/10.1002/0470091355.ecm026> [dostęp 6.10.2018].
- [2] LIABLE C.R., *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.
- [3] POPŁAWSKI A., *Eksperymentalno-numeryczne wyznaczanie odkształceń niszczących stali Armox 500T w złożonych stanach naprężenia*, (praca doktorska), Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2016.
- [4] BANAŚ K., *Metoda elementów skończonych – wprowadzenie do MES*, 2012, http://www.metal.agh.edu.pl/~banas/wprowadzenie_do_MES.pdf [dostęp: 2.04.2019].
- [5] BUDZYŃSKI A., *Krótki wstęp do zastosowania Metody Elementów Skończonych (MES) do numerycznych obliczeń inżynierskich*, GM View, 5/2006, Wrocław 2006.
- [6] PAMIN J., *MES w zagadnieniach nieliniowych*, https://www.l5.pk.edu.pl/~jpamin/dyd/MK/nie-lin_MK1.pdf [dostęp: 2.04.2019].
- [7] ROKACH I., *Nieliniowe zagadnienia w SWS*, http://www.tu.kielce.pl/~rokach/instr/mes2_wyklad_6.pdf [dostęp: 2.04.2019].
- [8] KŁYSZ S., *Charakterystyki wybranych materiałów – materiały lotnicze*, [w:] *Podstawy wytrzymałości materiałów*, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 2015.
- [9] KRASICKA-CYDZIK E., MSTOWSKI J., CIUPIK F.L., *Materiały implantowe: stal a stopy tytanu*, <http://lfc.com.pl/wp-content/uploads/2016/08/materiały-implantowe.pdf> [dostęp: 5.05.2019].
- [10] SSAB, Armox® 500T, <https://www.ssab.pl/produkty/marki/armox/armox-500t> [dostęp: 5.05.2019].
- [11] Livermore Software Technology Corporation. *Ls-Dyna keyword user's manual*, Livermore, California: LSTC, 2014.

A. POPŁAWSKI, W. PISKORZ

Perforation analysis of selected thin-walled structures

Abstract. The paper concerns multivariate numerical analyses of three thin-walled three-dimensional structures of honeycomb, rec-tangular and auxetic topologies. The analyses were preceded by the selection of the material from which the structures could potential-ly be made. The most optimal material was selected from three metallic materials for which an advanced constitutive material model and a failure model were available. The use of an appropriate model has allowed a number of phenomena to be taken into account during the very complex perforation process, which translates into the quality and accuracy of the numerical results obtained. The main numerical analyses, carried out after the material selection stage, were focused on the analysis of the strength of the structures in the process of their perforation with objects in the form of a ball with a diameter of 10 mm. The three objects hitting the structures were arranged in such a way as to take into account the influence of the impact location on the perforation process. Based on the measurement of the perforation depth of the balls and the analysis of the area of impact on the structure, the most strength topology was selected. In the next step, additional numerical analyses were carried out to determine the effectiveness of the structure and to estimate its ballistic limit.

Keywords: perforation process, honeycomb structure, rectangular structure, auxetic structure, Finite Element Method, ballistic limit

DOI: 10.5604.01.3001.0015.6958