



**KONCEPCJA KINETYCZNEGO POCISKU FRAGMENTUJĄCEGO (PELE)
KALIBRU 120 MM DO CZOŁGU LEOPARD 2. CZĘŚĆ 2 - ANALIZA
NUMERYCZNA PROCESÓW PENETRACJI PRZEGRÓD BETONOWYCH
PRZEZ WARIANTY 120 MM KINETYCZNEGO POCISKU
FRAGMENTUJĄCEGO (PELE)**

***A CONCEPT OF 120 MM KINETIC ENERGY FRAGMENTATING
PROJECTILE FOR LEOPARD 2 TANK. PART 2 – NUMERICAL ANALYSIS
OF CONCRETE WALL PENETRATION BY VARIOUS 120 MM KINETIC
ENERGY FRAGMENTATING PROJECTILES (PELE)***

Kamil SADOCH, Mariusz MAGIER

Zakład Mechaniki i Techniki Uzbrojenia, Instytut Mechaniki i Poligrafii,
Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska,
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

*Department of Mechanics and Armament Technologies, Institute of Mechanics and Printings,
Faculty of Production Engineering, Warsaw University of Technology,
85 Narbutta St., 02-524 Warsaw, Poland*

Author's e-mail address: mariusz.magier@pw.edu.pl; ORCID: 0000-0002-4431-9537

DOI 10.5604/01.3001.0014.9016

Streszczenie: Badania zagadnienia wpływu własności wytrzymałościowych materiału rdzenia na zdolność fragmentacji korpusu kinetycznego pocisku odłamkowego dowiodły, że możliwe jest analizowanie tego zjawiska za pomocą programu Ansys 19.2 oraz modułu Explicit. Prędkości wystrzału pocisku elaborowanego aluminium wynosiły 935 m/s, 920 m/s, 874 m/s, 801 m/s, co odpowiada kolejno uderzeniu w przeszkodę z odległości 100 m, 200 m, 500 m oraz 1000 m. Pocisk z rdzeniem poliamidowym testowano, tylko dla prędkości uderzenia 935 m/s. Wykazano, że pocisk kalibru 120 mm, wykonany ze stali C45, elaborowany aluminium 1050 lub poliamidem PA12 przebija betonową ścianę o grubości 120 mm. Pocisk w trakcie penetracji tworzy stożek w przeszkodzie, a następnie fragmentuje.

Słowa kluczowe: pocisk kinetyczny, penetracja, symulacje numeryczne

Abstract: Investigations over dependence of strength properties of material used to the core of a kinetic energy fragmentating projectile on the efficiency of fragmentation of its shell have proved that this effect may be analysed by Ansys 19.2 code and Explicit module. Firing velocities of projectile filled with aluminium were 935 m/s, 920 m/s, 874 m/s, 801 m/s corresponding to hitting a barrier at respective distances 100 m, 200 m, 500 m and 1000 m. The projectile with the polyamide core was tested only for hitting velocity of 935 m/s. It was shown that 120 mm projectile made of C45 steel and filled with aluminium 1050 or polyamide PA12 penetrates a 120 mm thick concrete wall. The projectile creates a conical crater in the barrier at penetration and next starts to fragmentate.

Keywords: kinetic energy projectile, penetration, numerical simulations

1. Metodyka analiz numerycznych

Analizę numeryczną wykonano w programie Ansys v19,2 i module Explicit, który bazuje na solverze Autodyn. Jego zastosowanie pozwoliło na wykonanie wielu symulacji, których wybrane wyniki zaprezentowano w dalszej części pracy. Ponieważ pocisk i cel zostały zaprojektowane osiowo-symetrycznie postanowiono posłużyć się modelem dwuwymiarowym (2D), osiowo-symetrycznym. Taki zabieg znacznie uprościł i skrócił czas obliczeniowy.

W pierwszej kolejności skupiono się na optymalizacji siatki. Wielkości elementów siatki ustalono następująco:

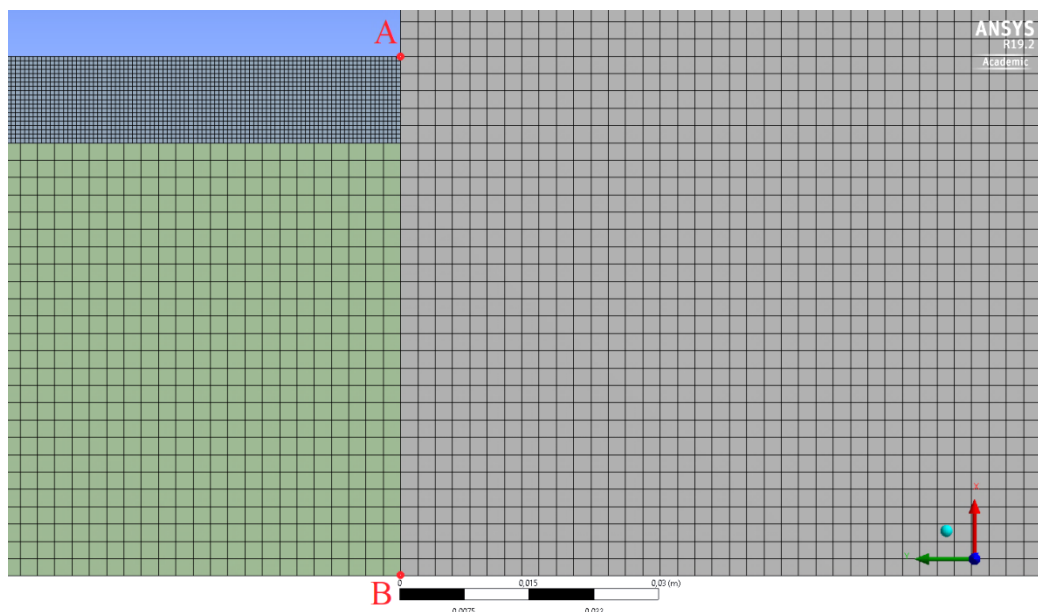
- - betonowa ściana 2 mm
- - rdzeń 2 mm
- - stalowa skorupa 0,5 mm

1. Introduction

Numerical analysis was made in Ansys v19.2 computer code and Explicit module based on Autodyn solver. Its application has facilitated the execution of many simulations and some results of them are presented in the paper. As a projectile and a target were designed in axial-symmetrical layout then a two dimensional (2D) model with axial symmetry was used. Such approach significantly simplified and reduced the time of calculations.

In the first step the optimisation of the mesh was made. Following sizes of elements were taken:

- - concrete wall 2.0 mm
- - core 2.0 mm
- - steel shell 0.5 mm.



Rys. 1. Siatka użyta do obliczeń numerycznych [opracowanie własne]

Fig. 1. The meshes used for numerical calculations [own development]

2. Modele obliczeniowe

W analizach zastosowano kilka różnych modeli materiałów zaimportowanym z biblioteki Ansys Explicit, jak również z literatury [1-6]. Początkowym założeniem było zastosowanie stali 40H w stanie utwardzonym na korpus

2. Calculating Models

Various material models taken from Ansys Explicit library and literature [1-6] were analysed. It was accepted initially to use a hardened 40H steel for the shell of projectile. But no verified values of Johnson – Cook model

pocisku. Nie znaleziono jednak zweryfikowanych wartości parametrów modelu Johnsona – Cooka do tego gatunku stali. Dlatego też zdecydowano się na zastosowanie na korpus pocisku stali C45 dla której w literaturze można znaleźć wartości parametrów modelu J-C [4].

2.1. Model obliczeniowy betonowej ściany [1]

Model betonu RHT opracowany przez Riedela, Hiermaiera i Thoma został pierwotnie zaimplementowany w kodzie ANSYS AUTODYN. Bazuje on na hydrostatycznym zachowaniu betonu. Wykorzystuje tzw równanie stanu $p-\alpha$ (EOS), które zostało wprowadzone przez Herrmanna. Porowatość jest określana za pomocą równania:

$$\alpha = \frac{v}{v_{solid}} = \frac{\rho_{solid}}{\rho} \quad (1)$$

Równanie stanu $P-\alpha$ jest funkcją wiążącą ciśnienie hydrostatyczne p , objętość właściwą v i energię wewnętrzną e .

$$p = f(v, e) \quad (2)$$

Jednym z podstawowych założeń $p-\alpha$ EOS jest to, że energie wewnętrzne materiału pierwotnego i materiału porowatego są identyczne. Zakłada się, że dany EOS w postaci równania:

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (3)$$

można zastosować do materiału porowatego zgodnie z równaniem:

$$p = f\left(\frac{v}{\alpha}, e\right) \quad (4)$$

$$p = \frac{1}{\alpha} f\left(\frac{v}{\alpha}, e\right) \quad (5)$$

Model RHT wykorzystuje wielomian dla materiału pierwotnego zgodnie z równaniem:

parameters were found to confirm application of Johnson – Cook model for this brand of steel. For this reason it was decided to take steel C45 for which the values of J-C model parameters may be found in literature [4].

2.1. Calculating Model of Concrete Wall [1]

Concrete model RHT developed by Riedel, Hiermaier and Thom was first implemented in code ANSYS AUTODYN. It is based on a hydrostatical behaviour of the concrete. It uses the equation of the state (EOS) $p-\alpha$ derived by Herrmann. The porosity is identified by the equation:

The equation of the state $p-\alpha$ is a function combining hydrostatic pressure p , specific volume v and internal energy e .

One of a basic assumptions of $p-\alpha$ EOS is that the internal energies of original and porous materials are identical. It is assumed that a given EOS in the form of equation:

may be used for the porous material according to the equation:

Model RHT employs a polynomial for the original material according to equation:

$$p = \begin{cases} A_1 \cdot \mu + A_2 \cdot \mu^2 + A_3 \cdot \mu^3 + (B_0 + B_1 \cdot \mu) \cdot \rho_0 \cdot e & \text{dla } \mu \geq 0 \\ T_1 \cdot \mu + T_2 \cdot \mu^2 + B_0 \cdot \rho_0 \cdot e & \text{dla } \mu < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Dane materiałowe przedstawiono w tabeli 1. | Material data is presented in table 1.

Tabela 1. Parametry obliczeniowe ściany betonowej [2]

Table 1. Calculating parameters of concrete wall [2]

Parametr /Parameter		Wartość / Value
Gęstość / Density		2520 [kg/m ³]
Ciepło właściwe / Specific heat		654 [J/(kg·K)]
Wytrzymałość betonu RHT /Concrete Strength	Wytrzymałość na ściskanie /Compressive Strength f_c	140 [MPa]
	Wytrzymałość na rozciąganie / Tensile Strength f_t/f_c	0,1
	Wytrzymałość na ścinanie / Shear Strength f_s/f_c	0,18
	Stała wytrzymałości powierzchni swobodnej / Intact Failure Surface Constant A	1,6
	EkspONENT wytrzymałości powierzchni swobodnej / Intact Failure Surface Exponent n	0,61
	Współczynnik pionowy rozciąganie/ściskanie / Tension/Compression Meridian Ratio / Q2.0	0,6805
	Przejście od łamliwości do gigliwości / Brittle to Ductile Transition BQ	0,0105
	Nachylenie krzywej wiązania / Hardening Slope	2
	Granica sprężystości / Elastic Strength/ f_t	0,7
	Granica sprężystości / Elastic Strength/ f_c	0,53
	Stała granica pęknięcia / Fracture Strength Constant B	1,6
	EkspONENT granicy pęknięcia / Fracture Strength Exponent m	0,61
	EkspONENT szybkości odkształcenia ściskającego / Compressive Strain Rate Exponent α	0,00909
	EkspONENT szybkości odkształcenia rozciągającego / Tensile Strain Rate Exponent δ	0,0125
	Maksymalny współczynnik granicy pęknięcia /Maximum Fracture Strength Ratio SFMAX	$1 \cdot 10^{20}$
	Stała awaryjności / Damage Constant D1	0,04
	Stała awaryjności / Damage Constant D2	1
	Minimalne odkształcenie do rozpadu / Minimum Strain to Failure	0,01
Szczątkowa pozostałości modułu sprężystości poprzecznej / Residual / Shear Modulus Fraction	0,13	
Moduł odkształcenia objętościowego / Bulk Modulus		35,27 [GPa]
Moduł sprężystości poprzecznej / Shear Modulus		22,06 [GPa]
P-alpha EOS	Gęstość materiału stałego / Solid Density	2750 [kg/m ³]
	Prędkość dźwięku w materiale porowatym / Porous Soundspeed	3242 [m/s]
	Wstępne ciśnienie zagęszczania / Initial Compaction Pressure P_e	93,3 [MPa]
	Ciśnienie zagęszczania zestalającego / Solid Compaction Pressure P_s	6000 [MPa]
	EkspONENT zagęszczania / Compaction Exponen n	3

2.2. Model obliczeniowy skorupy stalowej oraz rdzenia aluminiowego [3]

W modelu Johnsona-Cooka (JC) naprężenie zredukowane von Misesa jest obliczane jako funkcja odkształcenia, szybkości odkształcenia i temperatury w postaci:

$$\sigma_y = [A + B \cdot \varepsilon^n] \cdot [1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*] \cdot [1 - T^{*m}] \quad (7)$$

gdzie: ε jest równoważnym odkształceniem plastycznym, ε^* jest bezwymiarowym współczynnikiem odkształcenia plastycznego, T^* jest temperaturą homologiczną a stałe A, B, C, m i n są parametrami materiałowymi.

Model wytrzymałości J-C może zostać uzupełniony o model zniszczenia J-C uwzględniającym stan naprężeń, ciśnienia oraz wpływ szybkości odkształcenia i temperatury. Uszkodzenia materiału akumulowane są miejscowo za pomocą parametru zniszczenia i obliczane w następujący sposób:

$$D = \sum_{t=0} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_{JC}^f} \quad (8)$$

gdzie: $\Delta \varepsilon$ – przyrost odkształcenia, ε_{JC}^f – ekwiwalent błędu przyrostu.

Wartość ε_{JC}^f jest obliczana po każdym kroku czasowym za pomocą równania:

$$\varepsilon_{JC}^f = [D_1 + D_2 \cdot \exp D_3 \sigma^*] \cdot [1 + D_4 \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*] \cdot [1 + D_5 \cdot T^*]$$

gdzie: $\sigma^* = \frac{P}{\sigma}$, P – ciśnienie, σ – naprężenie Von Mises, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 – stałe materiałowe.

Dane materiałowe przedstawiono w tabelach 2 i 3.

2.2. Calculating Model of Steel Shell and Aluminium Core [3]

In Johnson-Cook (JC) model the reduced stress of von Mises is calculated as a function of the strain, the rate of strain and temperature having the form:

where: ε is the equivalent plastic strain, ε^* is the dimensionless coefficient of plastic strain, T^* is the homologous temperature, and the permanent values: A, B, C, m and n are the material parameters.

J-C Model of strength may be completed by J-C model of failures regarding the state of stresses, pressure, and influence of the strain rate and temperature. Destructions of the material are accumulated within an area by using the failure parameter and are calculated in the following way:

where: $\Delta \varepsilon$ – increment of the strain, ε_{JC}^f – equivalent of the increment error.

The value ε_{JC}^f is calculated after every time step from the formula

where: $\sigma^* = \frac{P}{\sigma}$, P – pressure, σ – stress of Von Mises, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 – material constants.

Material data is presented in tables 2 and 3.

Tabela 2. Parametry obliczeniowe skorupy pocisku [4]

Table 2. Calculating parameters of projectile shell [4]

Parametr / Parameter		Wartość / Value
Gęstość / Density		7833 [kg/m ³]
Elastyczność izotropowa <i>Isotropic Elasticity</i>	Moduł Young'a <i>Young's Modulus</i>	205 [GPa]
	Współczynnik Poisson'a <i>Poisson's Ratio</i>	0,29 (wynikowy)
	Moduł objętościowy <i>Bulk Modulus</i>	162,7 [GPa] (wynikowy)
	Moduł poprzeczny <i>Shear Modulus</i>	79457 [MPa]
Granica plastyczności na rozciąganie <i>Tensile Yield Strength</i>		310 [MPa]
Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie <i>Tensile Ultimate Strength</i>		565 [MPa]
Ciepło właściwe <i>Specific Heat</i>		477 [J/kg·K]
Wytrzymałość Johnson'a Cook'a <i>Johnson Cook Strength</i>	Naprężenie początku plastyczności / <i>Initial Yield Stress</i>	792 [MPa]
	Stała twardnienia <i>Hardening Constant</i>	510 [MPa]
	Eksponent twardnienia <i>Hardening Exponent</i>	0,26
	Stała szybkości odkształcenia <i>Strain Rate Constant</i>	0,014
	Eksponent mięknięcia termicznego <i>Thermal Softening Exponent</i>	1,03
	Temperatura topienia <i>Melting Temperature</i>	1519,9 [°C]
	Standardowa szybkość odkształcenia (/sek.) <i>Reference Strain Rate (/sec)</i>	1
Awaryjność Johnson'a Cook'a <i>Johnson Cook Failure</i>	Stała awaryjności D1 <i>Damage Constant D1</i>	0,025
	Stała awaryjności D2 <i>Damage Constant D2</i>	16,93
	Stała awaryjności D3 <i>Damage Constant D3</i>	-14,8
	Stała awaryjności D4 <i>Damage Constant D4</i>	0,0214
	Stała awaryjności D5 <i>Damage Constant D5</i>	0
	Temperatura topnienia <i>Melting Temperature</i>	1519,9 [°C]
	Standardowa szybkość odkształcenia / <i>Reference Strain Rate (/sec)</i>	1

Tabela 3. Parametry obliczeniowe aluminium rdzenia pocisku [5]
 Table 3. Calculating parameters of aluminium core of projectile [5]

Parametr / Parameter		Wartość / Value
Gęstość / Density		2710 [kg/m ³]
Elastyczność izotropowa Isotropic Elasticity	Moduł Young'a Young's Modulus	73150 [MPa]
	Współczynnik Poisson'a Poisson's Ratio	0,33
	Moduł objętościowy Bulk Modulus	71716 [MPa] (wynikowy)
	Moduł poprzeczny Shear Modulus	27500 [MPa] (wynikowy)
Granica plastyczności na rozciąganie Tensile Yield Strength		103 [MPa]
Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie Tensile Ultimate Strength		110 [MPa]
Ciepło właściwe / Specific Heat		900 [J/kg·K]
Wytrzymałość Johnson'a Cook'a Johnson Cook Strength	Naprężenie początku plas- tyczności / Initial Yield Stress	0,29 [MPa]
	Stała twardnienia Hardening Constant	195,19 [MPa]
	Eksponent twardnienia Hardening Exponent	0,47
	Stała szybkości odkształcenia Strain Rate Constant	0,35
	Eksponent mięknięcia termicznego Thermal Softening Exponent	-0,12
	Temperatura topienia Melting Temperature	650 [°C]
Standardowa szybkość odkształcenia Reference Strain Rate		1
Podstawowa awaryjność odkształceniowa Principal Strain Failure	Maksymalne odkształcenie podstawowe / Maximum Principal Strain	1,5
	Maksymalne odkształcenie poprzeczne / Maximum Shear Strain	1,5

2.3. Model obliczeniowy rdzenia poliami- dowego [6]

Poliamid PA12 użyty jako materiał rdzenia wykazuje właściwości lepkoplas-

2.3. Calculating Model for Polyamide Core [6]

Polyamide PA12 deployed as material of a core indicates the plastic-viscosity

tyczne. Model Johnsona-Cooka niestety nie sprawdza się w takich przypadkach. Wyniki symulacji numerycznej, w których wykorzystywano materiały zbliżone do poliamidu, jak np. polietylen, który występuje w bazie Ansys-Explicit, były mało wiarygodne. Dlatego też zdecydowano się na opis poliamidu z wykorzystaniem modeli Chaboche oraz Gurson – Tvergaard – Needleman.

Model Chaboche

Model Chaboche stosowany jest m.in. do analizy zachowania się żeliw i odlewów aluminium, składa się z czterech równań różniczkowych:

$$\dot{\varepsilon}^{tot} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{vp} \quad (9)$$

$$\dot{\sigma} = E(\dot{\varepsilon}^{el}) = E(\dot{\varepsilon}^{tot} - \dot{\varepsilon}^{vp}) \quad (10)$$

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \dot{\lambda} \cdot n = \dot{\lambda} \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} \right\} = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon^{vp} : \varepsilon^{vp}} \frac{3s - \sum_{i=0}^n \alpha_i}{2 \sigma_y} \quad (11)$$

$$\dot{\alpha}_i = \frac{2}{3} C_i \dot{\varepsilon}^{vp} - \gamma_i \alpha_i \dot{p} \quad (12)$$

gdzie: $\dot{\varepsilon}^{tot}$ – całkowita szybkość odkształcania, $\dot{\varepsilon}^{el}$ – szybkość odkształcania elastycznego, $\dot{\varepsilon}^{vp}$ – szybkość odkształcania lepko-plastycznego, λ – lepko-plastyczny mnożnik, n – kierunek, φ – funkcja przepływu, σ_y – granica plastyczności, s – naprężenie odchylające, α_i – naprężenia wsteczne, \dot{p} – skumulowane odkształcenie plastyczne, C , γ – parametry hartowania.

Model Chaboche zawiera trzy parametry, które są określane eksperymentalnie. Są to moduł Younga E i dwa parametry hartowania γ_i oraz C_i .

Dane materiałowe zastosowane podczas obliczeń zebrano w tabeli 4.

properties. Unfortunately the model of Johnson-Cook doesn't work in such cases. Results of numerical simulations for materials similar to polyamide, like polyethylene existing in the base of Ansys-Explicit, were unreliable. For that reason, the models of Chaboche, and Gurson – Tvergaard – Needleman were selected for a description of polyamide.

Model Chaboche

Chaboche model is used above all to analyse the behaviour of cast irons and aluminium casts and consists of four differential equations:

where: $\dot{\varepsilon}^{tot}$ – bulk strain rate, $\dot{\varepsilon}^{el}$ – plastic strain rate, $\dot{\varepsilon}^{vp}$ – plastic-viscosity strain rate, λ – plastic-viscosity multiplier, n – direction, φ – function of flowing, σ_y – plasticity limit, s – deflecting stress, α_i – backward stresses, \dot{p} – aggregated plastic strain, C , γ – parameters of hardening.

Chaboche model includes three parameters which are established in experiments. They are the Young modulus E and two parameters of hardening γ_i and C_i .

Material characteristics used at calculations are presented in table 4.

Tabela 4. Parametry obliczeniowe poliamidowego rdzenia pocisku [6]

Table 4. Calculating parameters of projectile polyamide core [6]

Parametr/ Parameter		Wartość/ Value
Gęstość / Density		915 [kg/m ³]
Sprężystość isotropowa/ Isotropic Elasticity	Moduł Young'a Young's Modulus	1450 [MPa]
	Współczynnik Poisson'a Poisson's Ratio	0,4
	Moduł odkształcenia objętościowego Bulk Modulus	2,4167 [GPa] (wynikowy/ resultant)
	Moduł odkształcenia poprzecznego Shear Modulus	517,86 [MPa] (wynikowy/ resultant)
Utwardzanie kinematyczne Caboche'a/ Chaboche Kinematic Hardening	Ilość modeli kinematycznych/ Numbers of Kinematic Models	1
	Naprężenie uplastyczniające/ Yield Stress	17,5 [MPa]
	Stała materiałowa C1 Material Constant C1	7920,5 [MPa]
	Stała materiałowa y1 Material Constant y1	387,81
Model Gurson'a (Funkcja plastyczności)/ Gurson Model (Yield Function)	Początkowa granica plastyczności/ Initial Yield Strength	17,5 [MPa]
	Porowatość początkowa/ Initial Porosity	0,047
	Pierwsza stała Tvergaard'a-Needleman'a First Tvergaard-Needleman Constant	1,2
	Druga stała Tvergaard'a-Needleman'a Second Tvergaard-Needleman Constant	1,1
	Trzecia stała Tvergaard'a-Needleman'a/ Third Tvergaard-Needleman Constant	1
Model Gurson'a Gurson Model	Ciepło właściwe Specific Heat	2300 [J/kg·K]
Awaryjność odkształcenia plastycznego Plastic Strain Failure	Maksymalne ekwiwalentne odkształcenie plastyczne EPS Maximum Equivalent Plastic Strain EPS	2

Model Gurson – Tvergaard – Needleman

Badania zaprezentowane w pracy [6] wykazały istnienie kulistych porów w objętości próbki poliamidowej. Wobec tego do opisu poliamidu przyjęto model Gursona, który został rozszerzony przez Tbergaarda i Needlemana w 1984 roku. Rozszerzony model uwzględnia wzrost, zarodkowanie¹ i koalescencję² poliamidu.

Naukowcy na podstawie badań doświadczalnych i analizy mikrostrukturalnej nie zdecydowali się na uwzględnienie zjawiska koalescencji. Zastosowany model opisują następujące równania:

$$\varphi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_y^2} + 2q_1 f \cosh\left(\frac{3q_2}{2} \frac{\sigma_{kk}}{\sigma_y}\right) - 1 - q_1^2 (f)^2 \quad (13)$$

$$\dot{f} = \dot{f}_{growth} + \dot{f}_{nucleation} \quad (14)$$

$$\dot{f}_{growth} = (1 - f) \dot{\varepsilon}^{pl} : I \quad (15)$$

$$\dot{f}_{nucleation} = \frac{f N \dot{\varepsilon}^{pl}}{S_N \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\varepsilon}^{pl} - \varepsilon_N}{S_N} \right)^2} \quad (16)$$

$$\dot{f}_0 = \dot{f}(t = 0) \quad (17)$$

gdzie: φ – funkcja przepływu; σ_{eq} – naprężenie zredukowane (von Mises); q_1, q_2 – parametry Tvergaard – Needleman; σ_{kk} – efektywne hydrostatyczne naprężenie; f – frakcja objętościowa; f_{growth} – frakcja wzrostu; $f_{nucleation}$ – frakcja nukleacji; $\bar{\varepsilon}^{pl}$ – efektywne plastyczne odkształcenie; $\dot{\varepsilon}^{pl}$ – szybkość efektywnego odkształcenia; ε_N – średnie odkształcenie; S_N – dewiacja; f_0 – porowatość początkowa.

Model of Gurson – Tvergaard – Needleman

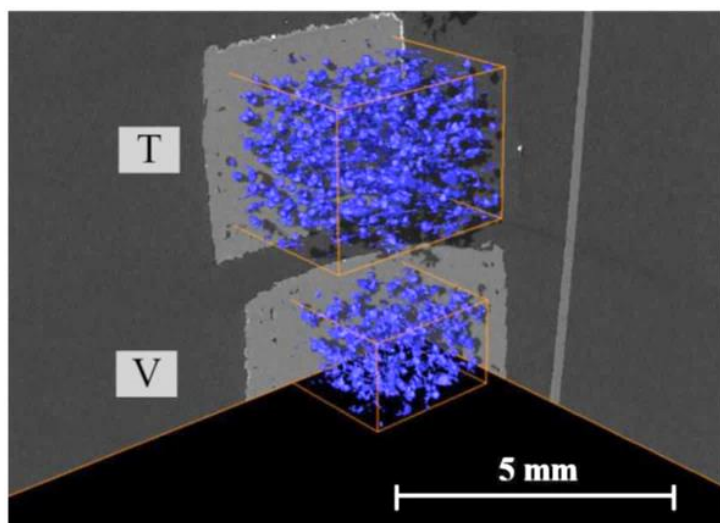
Experiments presented in publication [6] indicated a presence of spherical pores inside polyamide sample. Concerning that, a model, developed by Gurson and later extended by Tbergaard and Needleman in 1984, was accepted for a description of polyamide. The extended model considers the growth, nucleation¹ and coalescence² of polyamide.

Basing on experimental investigations and microstructural analyses the researchers decided not to consider the effect of coalescence. The applied model contained following expressions:

where: φ – function of the flow; σ_{eq} – reduced stress (von Mises); q_1, q_2 – parameters of Tvergaard – Needleman; σ_{kk} – effective hydrostatic pressure; f – volume fraction; f_{growth} – growing fraction; $f_{nucleation}$ – nucleation fraction; $\bar{\varepsilon}^{pl}$ – effective plastic strain; $\dot{\varepsilon}^{pl}$ – rate of the effective strain; ε_N – average strain; S_N – deviation; f_0 – original porosity.

¹ Zarodkowanie, nukleacja – fiz. Wstępny etap procesu tworzenia się nowej fazy. Źródło: PWN

² Koalescencja – zjawisko łączenia się małych kropelek cieczy w większe krople wskutek wzajemnych zderzeń. Źródło: PWN



Rys. 2. Tomografia komputerowe próbki poliamidowej. Niebieskie kulki to puste obszary [6]

Fig. 2. Computer tomography of a polyamide sample. Blue balls are the empty spaces [6]

3. Analiza fragmentacji pocisku elaborowanego aluminium

Na podstawie przebiegu symulacji komputerowej można oszacować wpływ zadanych parametrów na skuteczność fragmentacji pocisku. Symulacje komputerowe umożliwiają dokładniejszą niż w przypadku obliczeń analitycznych analizę zachowania się materiałów w warunkach dynamicznych. Zauważono np. że w przypadku ściany betonowej erozja następuje głównie w kierunku i zwrocie wektora prędkości początkowej pocisku. Zauważono również charakterystyczny dla betonu sposób fragmentacji.

Wadą stosowania modelu jest konieczność wprowadzenia algorytmów erozji, które mogą wpływać na poprawność uzyskiwanych wyników obliczeń. Na rysunku 4 kolorem czerwonym zaznaczono elementy siatki dla których przekroczono wartości graniczne naprężenia i które były usuwane z obliczeń. Przyjęto, że w miejscach występowania martwych komórek może występować fragmentacja.

Podczas obliczeń analizowano dwa główne zjawiska występujące po uderzeniu pocisku kinetycznego w przeszkodę: kąt stożka rozlotu fragmentów pocisku, oraz stopień fragmentacji skorupy.

3. Analysis of Fragmentation for a Projectile Filled with Aluminium

Basing on the computer simulation, an influence of the accepted parameters into the projectile fragmentation may be estimated. Computer simulations provide more accurate analysis of behaviour of materials at dynamic conditions than those provided by analytical calculations. It was noticed, for instance, that for a concrete wall the erosion translates mainly along the direction and sense of the projectile initial velocity vector. Moreover, a typical way of concrete fragmentation was noticed.

Necessity for introduction of algorithms of erosion is a disadvantage of the model as they may affect the correctness of received results of calculations. The meshes marked by red colour in Fig. 4 identify that limited values of the stress were trespassed for them and they were removed from calculations. It was accepted that the fragmentation may occur in the places of the death cells presence.

Two effects occurring at striking of a kinetic energy projectile into a barrier were analysed in this chapter: the scattering angle for fragments of the projectile, and the degree of the shell fragmentation.

3.1. Kąt stożka w pociskach elaborowanych aluminium

Ze względu na niejednorodny model fragmentacji przyjęto subiektywną metodę oceny kąta stożka. Rysowano dwie linie, z których jedna pokrywała się z osią pocisku, a druga była ręcznie dopasowywana do obszaru fragmentacji (rysunek 4). Wynik odczytywano z tabeli (rysunek 3). Odczytywany z niej (zaznaczono czerwonym kwadratem) kąt był połową kąta rozwarcia stożka, który został utworzony po fragmentacji.

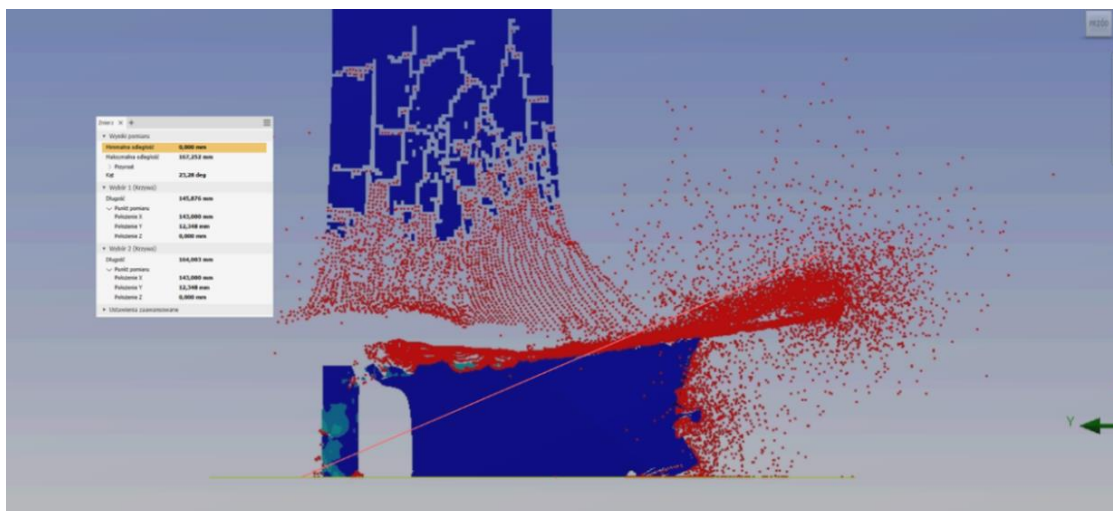
Zmierz	
▼ Wyniki pomiaru	
Minimalna odległość	0,000 mm
Maksymalna odległość	203,963 mm
Przyrost	
Kąt	26,54 deg
▼ Wybór 1 (Krzywa)	
Długość	153,163 mm
▼ Punkt pomiaru	
Położenie X	169,980 mm
Położenie Y	3,557 mm
Położenie Z	0,000 mm
▼ Wybór 2 (Krzywa)	
Długość	204,561 mm
▼ Punkt pomiaru	
Położenie X	169,980 mm
Położenie Y	3,557 mm
Położenie Z	0,000 mm
► Ustawienia zaawansowane	

3.1. Angle of the Cone for Projectiles Filled with Aluminium

A subjective method of the cone angle evaluation was taken due to the inhomogeneous model of fragmentation. Two lines were drawn, one along the projectile's axis and the second manually matched to the fragmentation zone (Fig. 4). The result was read out from a table (Fig. 3). The angle which was read out from the table (marked by red square) equals to the half of obtuse angle of a fragmentation cone.

Rys. 3. Okno wyników narzędzia pomiarowego: Zmierz Autodesk Inventor 2020

Fig. 3. Window of measurement tool results: execute the measurement, Autodesk Inventor 2020



Rys. 4. Pomiar kąta przy użyciu narzędzia w programie Autodesk Inventor 2020 [opracowanie własne]

Fig. 4. Identification of the angle by using tools in code of Autodesk Inventor 2020 [own development]

Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 5. Measurement results are presented in table 5.

Tabela 5. Kąt rozwarcia stożka dla pocisku elaborowanego aluminium o grubości skorupy 10 mm

Table 5. The cone obtuse angle for the projectile filled with aluminium and shell thickness 10 mm

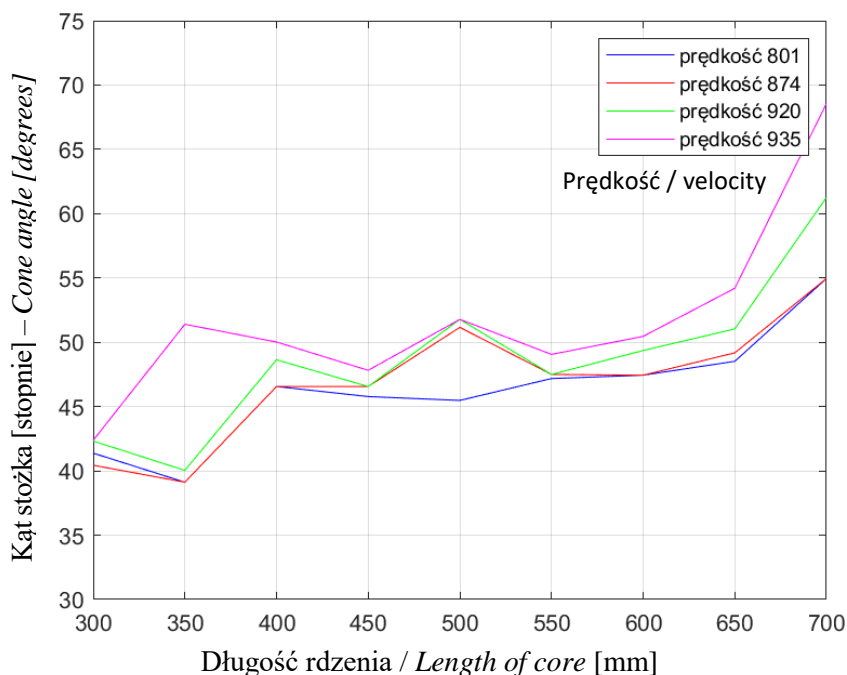
Długość rdzenia / Length of core [mm] – prędkość / Velocity [m/s]	Kąt rozwarcia stożka / Cone angle [°]
300 - 801	41,38
300 - 874	40,44
300 - 920	42,32
300 - 935	42,38
350 - 801	39,12
350 - 874	39,12
350 - 920	40,04
350 - 935	51,40
400 - 801	46,56
400 - 874	46,56
400 - 920	48,64
400 - 935	50,02
450 - 801	45,78
450 - 874	46,56
450 - 920	46,56
450 - 935	47,82
500 - 801	45,48
500 - 874	51,16
500 - 920	51,78
500 - 935	51,78
550 - 801	47,18
550 - 874	47,50
550 - 920	47,50
550 - 935	49,06
600 - 801	47,44
600 - 874	47,44
600 - 920	49,36
600 - 935	50,46
650 - 801	48,52
650 - 874	49,18
650 - 920	51,04
650 - 935	54,20
700 - 801	54,96
700 - 874	54,96
700 - 920	61,26
700 - 935	68,56

Wyniki symulacji numerycznej są rozbieżne z wynikami uzyskanymi z modelu teoretycznego [8], którego wyniki przedstawia rysunek 5. Model ten bazował na zasad-

Results of the numerical simulation differ from the results obtained from a theoretical model [8], the results of which are presented in Fig. 5. The model was based on a

niczym uproszczeniu. Mianowicie założono w nim, że pocisk będzie fragmentować tylko w trzeciej części długości. Symulacja w module Ansys Explicit wykazała, że procent fragmentacji skorupy jest ściśle uzależniony od długości jej fragmentacji.

significant simplification assuming that the projectile fragmentates only on a third part of its length. The simulation carried out in Ansys Explicit model has indicated that the percentage of shell fragmentation depends strictly on the length of its fragmentation.



Rys. 5. Kąt stożka w zależności od długości rdzenia, określony na podstawie symulacji numerycznej [opracowanie własne]

Fig. 5. Angle of the cone depending on the length of the core identified by the numerical simulation [own development]

Na podstawie rysunku 5, który jest interpretacją graficzną tabeli 1, widać że wyznaczony kąt rozwarcia stożka rozlotu fragmentów może być obarczony dość dużym błędem. Na podstawie wykresów można zauważyć tendencję zwiększania się kąta rozwarcia stożka wraz ze zwiększeniem długości rdzenia. Przypadek pocisku o długości 700 mm jest specyficzny. Nie doszło w nim do fragmentacji korpusu w tylnej jego części, dlatego cała energia została wykorzystana do fragmentacji obwiedni walca.

3.2. Fragmentacja korpusu elaborowanego aluminium

Aby oszacować jaka część skorupy pocisku uległa fragmentacji wyznaczono

It is visible, basing on Fig. 5 being a graphical representation of table 1, that identified angle of a cone for scattered fragments may be burdened by a relatively high error. Basing on the graphs a tendency may be noticed for increasing the scattering cone angle at increased length of the core. A projectile with the length of 700 mm is a specific case. The rear part of the shell has not fragmentated and then the whole energy was utilised for fragmentation of the cylinder circumference wall.

3.2. Fragmentation of the Shell Filled with Aluminium

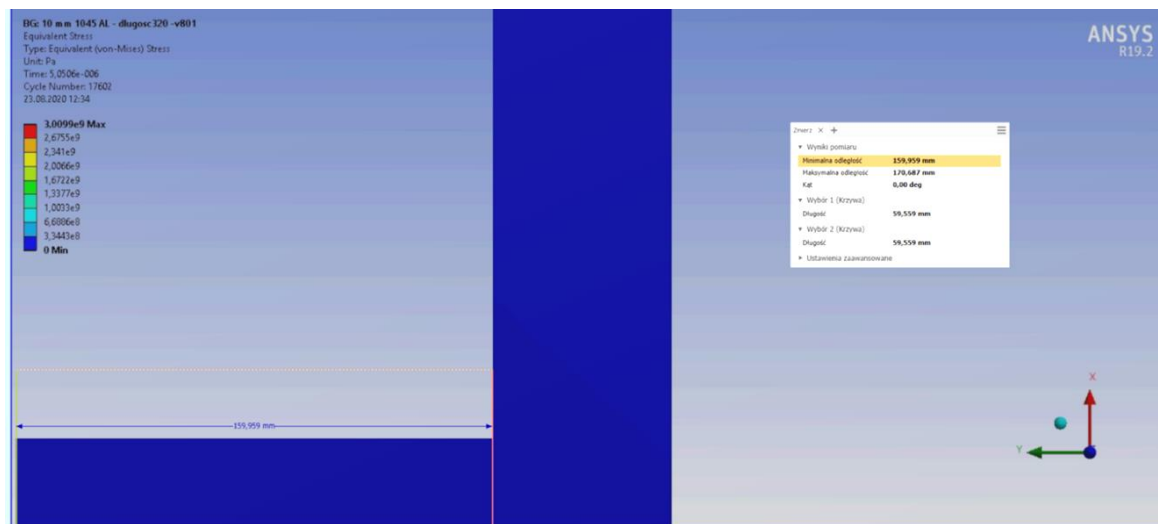
In order to estimate what part of the projectile shell was fragmented the length before

w programie Autodesk Inventor 2020 długość przed fragmentacją. Następnie zmierzono długość skorupy, która nie uległa fragmentacji. Symulację wykonano dla grubości ścianki korpusu 10 mm oraz długości rdzenia od 300 mm do 700 mm.

Używano do tego opcji wklejenia bitmapy, która była stop-klatką z filmu wygenerowanego przez program Ansys. Wymiary nie odpowiadają tym realnym, jednak nie ma to znaczenia w przypadku szacowania procentowo fragmentacji. Postanowiono, że w przypadku pomiarów długości wystarczy dokładność do części setnych. Mierzonym parametrem był ten z wiersza „minimalna odległość”.

the fragmentation was identified by Autodesk Inventor 2020 code. In the next step the length of the shell without fragmentation was measured. The simulation was performed at shell wall thickness of 10 mm and the length of core from 300 mm to 700 mm.

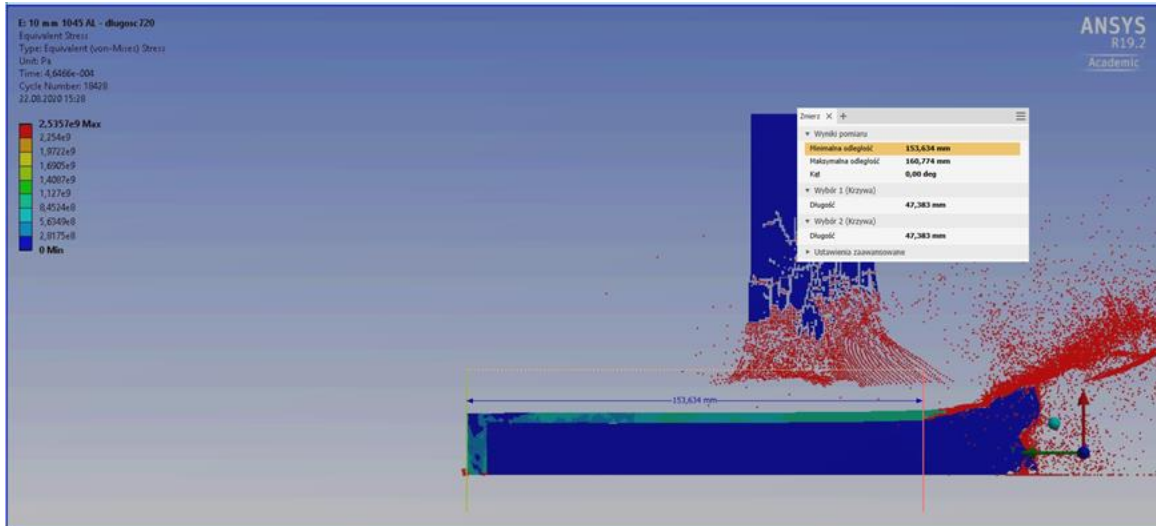
For this reason an option was used for sticking in a bitmap representing a snap-frame of a movie produced by Ansys code. The dimensions do not correspond to the real ones but it doesn't mean in the case of percentage estimation of the fragmentation. It was decided that measurement accuracy of hundredth parts of length was sufficient. The measured parameter was one from the line “minimal distance”.



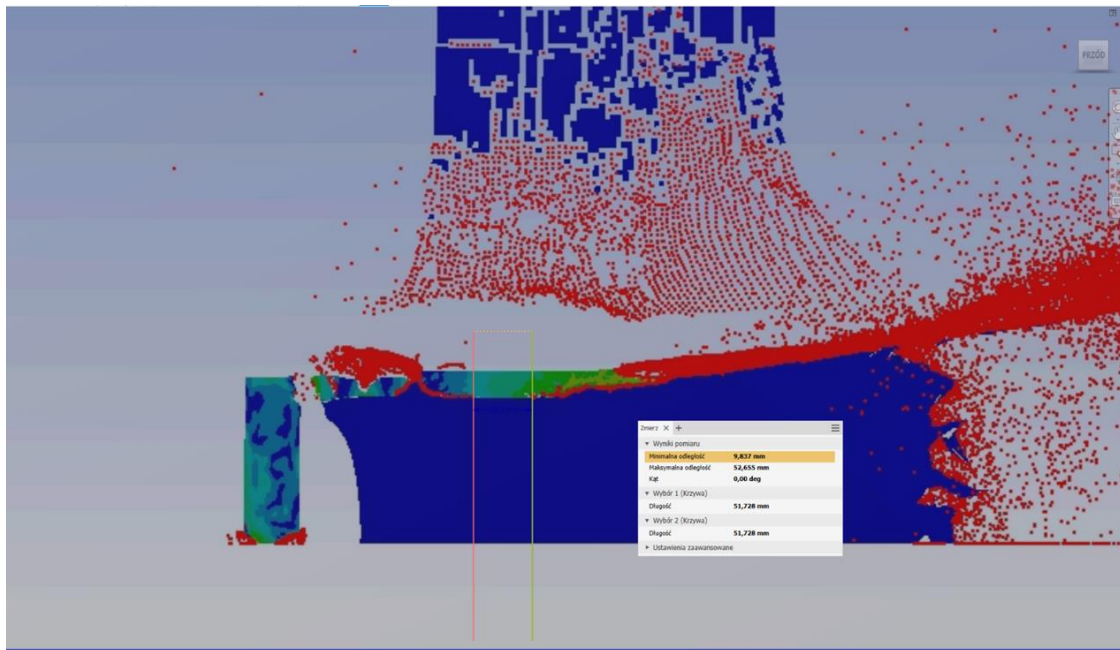
Rys. 6. Pomiar długości pocisku przed fragmentacją [opracowanie własne]
Fig. 6. Measurement of projectile's length before fragmentation [own development]

Przyjęto zasadę, że mierzono odcinek, w którym nie występowała erozja elementów świadcząca o przekroczeniu poziomu naprężeń dopuszczalnych.

An assumption was taken to measure a section without any erosion of elements indicating that the level of permissible stresses was crossed.



Rys. 7. Pomiar długości skorupy po fragmentacji [opracowanie własne]
Fig. 7. Measurement of projectile's length after fragmentation [own development]



Rys. 8. Pomiar długości skorupy po fragmentacji (zbliżenie)
Fig. 8. Measurement of the length for the shell (enlargement)

W przypadku stosunkowo krótkich pocisków występował efekt oddzielenia się dna i fragmentacji tylnej części pocisku. Mierzono wtedy jedynie odcinek środkowy.

Wyniki zaprezentowano w tabeli 6 i na rysunku 9.

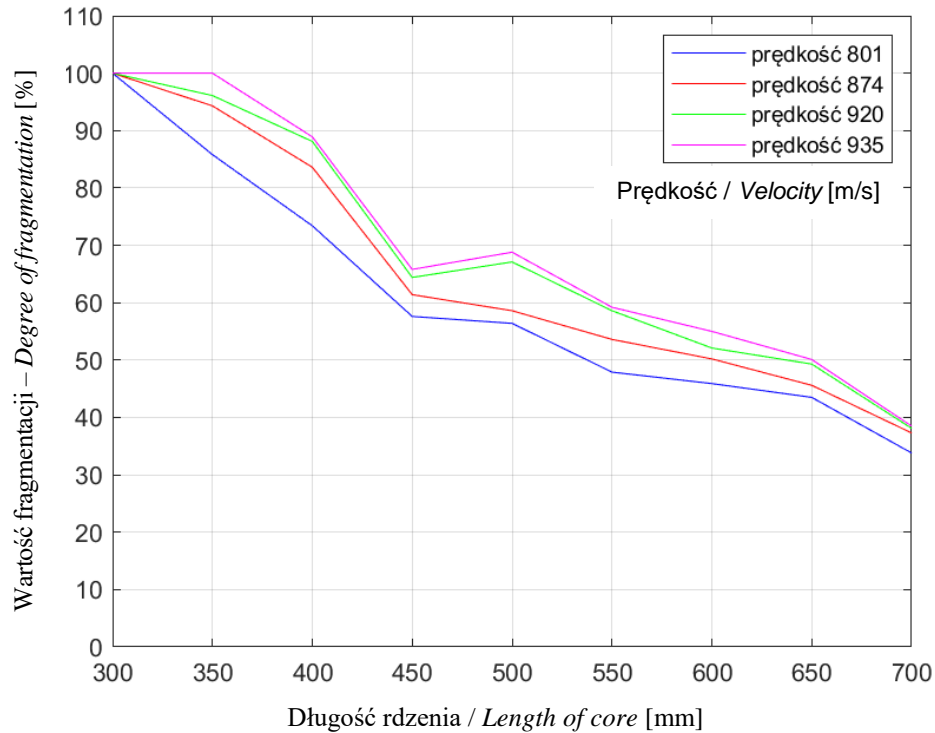
In the case of relatively short projectiles a separation of the base and fragmentation of projectile rear part was observed. Then, only a central section was measured.

Results are shown in table 6 and in Fig. 9.

Tabela 6. Fragmentacja skorupy wyznaczona na podstawie symulacji komputerowej

Table 6. Fragmentation of the shell established on the base of computer simulation

Długość pocisku/ Length of projectile [mm] – prędkość/ Velocity [m/s]	Fragmentacja obudowy/ Fragmentation of shell [%]
300 - 801	100
300 - 874	100
300 - 920	100
300 - 935	100
350 - 801	85,8
350 - 874	94,3
350 - 920	96,1
350 - 935	100
400 - 801	73,4
400 - 874	83,6
400 - 920	88,1
400 - 935	88,9
450 - 801	57,6
450 - 874	61,4
450 - 920	64,4
450 - 935	65,8
500 - 801	56,4
500 - 874	58,6
500 - 920	67,1
500 - 935	68,8
550 - 801	47,9
550 - 874	53,6
550 - 920	58,6
550 - 935	59,2
600 - 801	45,9
600 - 874	50,2
600 - 920	52,1
600 - 935	55,0
650 - 801	43,5
650 - 874	45,6
650 - 920	49,3
650 - 935	50,1
700 - 801	33,8
700 - 874	37,3
700 - 920	38,1
700 - 935	38,5



Rys. 9. Wielkość fragmentacji korpusu w stosunku do początkowej długości [opracowanie własne]

Fig. 9. Degree of shell fragmentation against the original length [own development]

Uzyskane wyniki symulacji jednoznacznie wskazują zależność wielkości fragmentacji od długości rdzenia. Z wyjątkiem przypadku długości rdzenia 450 mm, zależność przebiega niemalże liniowo. Ponadto z powyższego wynika, że im większa prędkość uderzenia, tym fragmentacja jest skuteczniejsza. Ciekawym przypadkiem jest rdzeń o długości 300 mm. Niezależnie od prędkości uderzenia fragmentował on całkowicie.

Następnie parametry z tabeli 6 wprowadzono do modelu obliczeniowego WITU [7], zastępując standardową wielkość fragmentacji. Wyniki te porównano z wynikami symulacji.

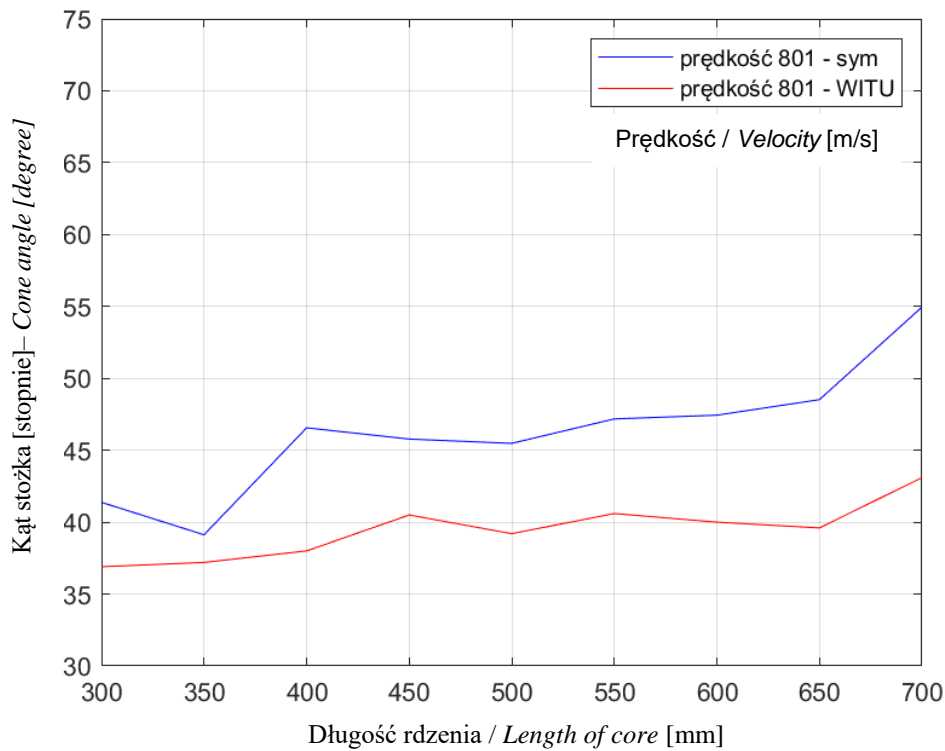
The received results of simulation indicate clearly on dependence between the scope of fragmentation and the length of the core. Excepting the instance of the core with 450 mm length the dependence has a linear character. Moreover, the above indicates that the effectiveness of the fragmentation is greater at higher impacting velocity. An interesting case represents a core of 300 mm length. It fragmented completely independently on the hitting velocity.

In the next step the parameters from table 6 were introduced into a calculating model of MIAT (Military Institute of Armament Technology) [7] to replace the standard value of fragmentation. Results were compared with the simulation.

Tabela 7. Kąt stożka utworzony na podstawie zmodyfikowanego (o wyniki fragmentacji) modelu obliczeniowego WITU [7]

Table 7. Conical angle created on the base of a modified (by the results of fragmentation) calculating model of MIAT (Military Institute of Armament Technology) [7]

Długość pocisku/ Length of projectile [mm] - prędkość/ Velocity [m/s]	Kąt rozwarcia stożka rozlotu fragmentów – symulacja/ Angle of spreading fragments - simulation [°]	Kąt rozwarcia stożka – model obliczeniowy WITU [7] / Angle of cone– MIAT's calculating model [°]
300 - 801	41,38	36,8
300 - 874	40,44	36,8
300 - 920	42,32	36,8
300 - 935	42,38	36,8
350 - 801	39,12	37,2
350 - 874	39,12	35,6
350 - 920	40,04	35,3
350 - 935	51,40	34,6
400 - 801	46,56	38
400 - 874	46,56	35,7
400 - 920	48,64	34,9
400 - 935	50,02	34,7
450 - 801	45,78	40,5
450 - 874	46,56	39,3
450 - 920	46,56	38,5
450 - 935	47,82	38,1
500 - 801	45,48	39,2
500 - 874	51,16	38,5
500 - 920	51,78	36,2
500 - 935	51,78	35,7
550 - 801	47,18	40,6
550 - 874	47,50	38,6
550 - 920	47,50	37
550 - 935	49,06	36,8
600 - 801	47,44	40
600 - 874	47,44	38,3
600 - 920	49,36	37,7
600 - 935	50,46	36,7
650 - 801	48,52	39,6
650 - 874	49,18	38,8
650 - 920	51,04	37,4
650 - 935	54,20	37,1
700 - 801	54,96	43,1
700 - 874	54,96	41,2
700 - 920	61,26	40,9
700 - 935	68,56	40,7



Rys. 10. Porównanie kąta stożka rozlotu fragmentów pomiędzy wynikami symulacji i modelem WITU [7] dla prędkości 801 m/s i grubości ścianki 10 mm pocisku elaborowanego aluminium [opracowanie własne]

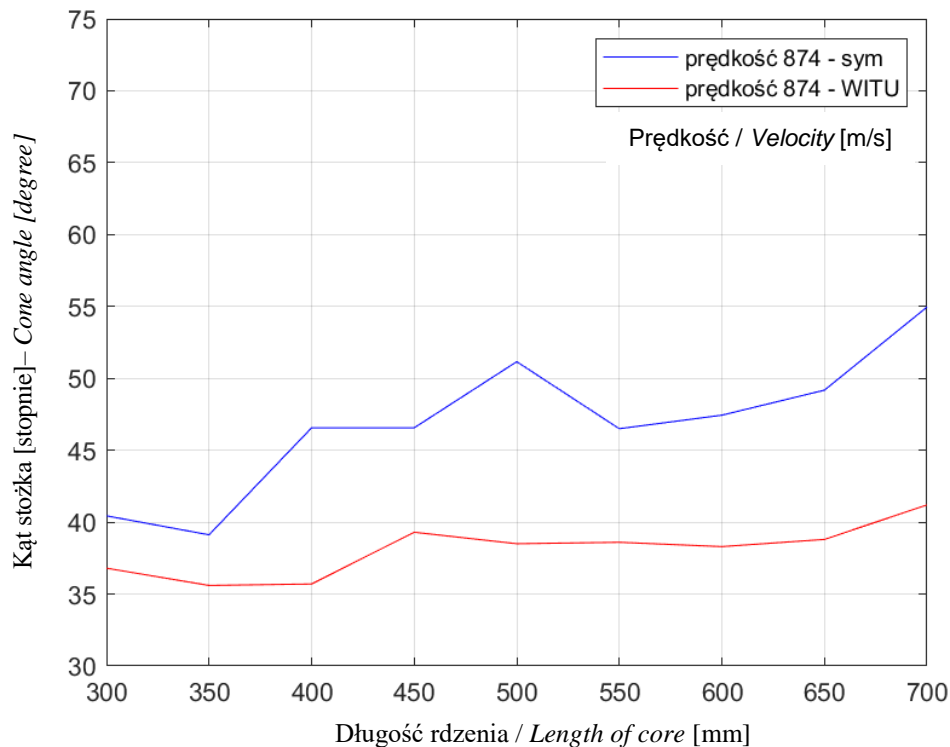
Fig. 10. Comparison of the cone angle of fragments scattering for results of simulation and the model of MIAT [7] at velocity 801 m/s and the wall thickness 10 mm for the projectile filled with aluminium [own development]

Na podstawie tabel 6 i 7 oraz rysunków 10-13 zauważono, że nie można przyjąć stosunku masy skorupy fragmentującej do całkowitej jako wartości stałej. W wynikach symulacji oraz modyfikowanym modelu matematycznym WITU [7] zauważono, że dla rdzenia aluminiowego, wraz ze wzrostem długości pocisku zwiększa się kąt rozwarcia stożka, który został utworzony z odłamków. Są znaczne rozbieżności, zwłaszcza w przypadku najdłuższego pocisku. Jednak tylko w przypadku najdłuższego pocisku nie doszło do fragmentacji skorupy na granicy denka i powierzchni bocznej (rys.7). Model WITU [7] nie uwzględnia tylnej fragmentacji pocisku (rys. 8). W przypadku długiego pocisku (rys.7) fala naprężeń została odbita od dna pocisku i przemieściła się w kierunku ścianek. Jeśli

Basing on tables 6 and 7 and figures 10-13 it was noticed that the relation between the mass of fragmenting shell and the overall mass cannot be taken as a constant. The results of simulation and the modified mathematical model of MIAT[7] show that for the aluminium core the value of the conical angle created from fragments increases with the length of the projectile. There are significant differences especially for the longest projectile. But it was only for the longest projectile where a fragmentation of a border between the base and the side wall was not observed (Fig.7). Model of MIAT [7] doesn't consider fragmentation of projectile's rear part (Fig. 8). In the case of the long projectile (Fig.7) the wave of stresses was reflected from the projectile base and travelled towards the walls. If the conical angle

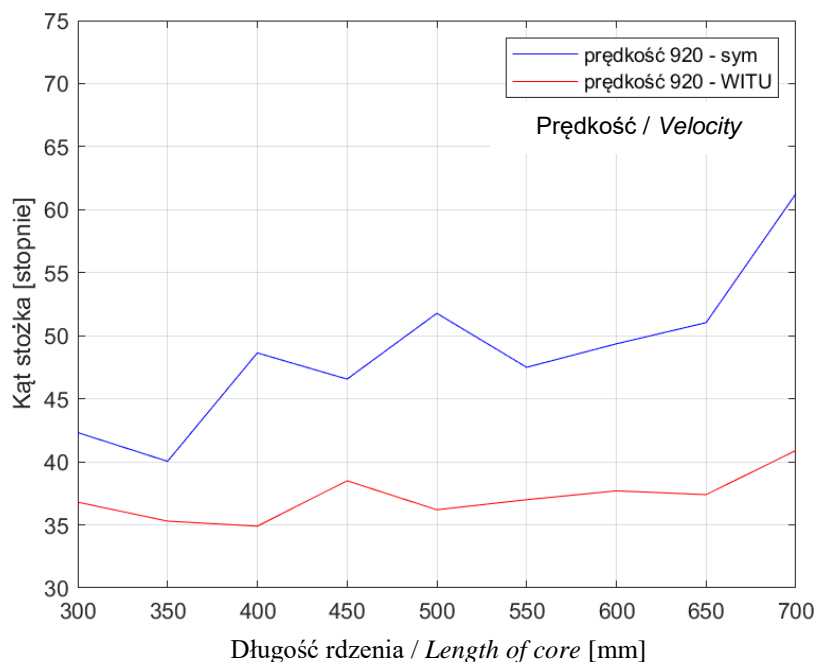
kąt rozwarcia stożka odłamków jest kluczowy, należy tak zaprojektować pocisk, aby tylna fragmentacja nie występowała. Dodatkowo należy sprawdzić, czy wykonanie rowków w korpusie spowoduje rozpadnięcie się skorupy w trakcie penetracji celu i wybicia większego otworu w przeszkodzie.

of spreading the fragments is of a key importance then the projectile has to be designed in a way preventing the rear fragmentation. Additionally, it has to be checked if making some notches in the shell may cause a shell disintegration during the penetration of a target and production of a greater hole in the barrier.



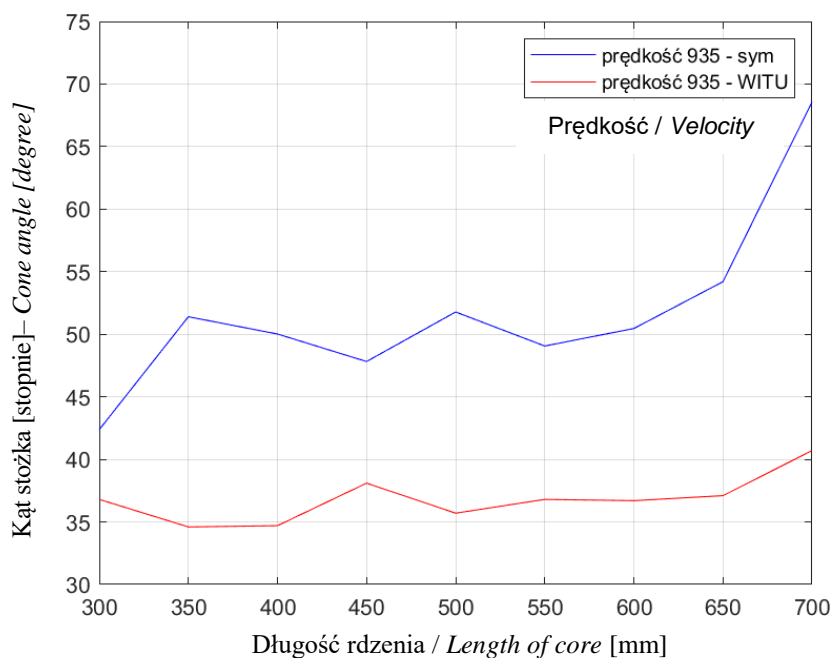
Rys. 11. Porównanie kąta stożka rozlotu fragmentów pomiędzy wynikami symulacji i modelem WITU [7] dla prędkości 874 m/s i grubości ścianki 10 mm pocisku elaborowanego aluminium [opracowanie własne]

Fig. 11. Comparison of the scattering angle of fragments for results of simulation and the model of MIAT [7] for velocity 874 m/s and wall thickness 10 mm and the projectile filled with aluminium [own development]



Rys. 12. Porównanie kąta stożka rozlotu fragmentów pomiędzy wynikami symulacji i modelem WITU [7] dla prędkości 920 m/s i grubości ścianki 10 mm pocisku elaborowanego aluminium [opracowanie własne]

Fig. 12. Comparison of the scattering angle of fragments for results of simulation and the model of MIAT [7] for velocity 920 m/s and wall thickness 10 mm and the projectile filled with aluminium [own development]



Rys. 13. Porównanie kąta stożka rozlotu fragmentów pomiędzy wynikami symulacji i modelem WITU [7] dla prędkości 935 m/s i grubości ścianki 10 mm pocisku elaborowanego aluminium [opracowanie własne]

Fig. 13. Comparison of the scattering angle of fragments for results of simulation and the model of MIAT [7] for velocity 935 m/s and wall thickness 10 mm and the projectile filled with aluminium [own development]

4. Analiza fragmentacji pocisku elaborowanego poliamidem

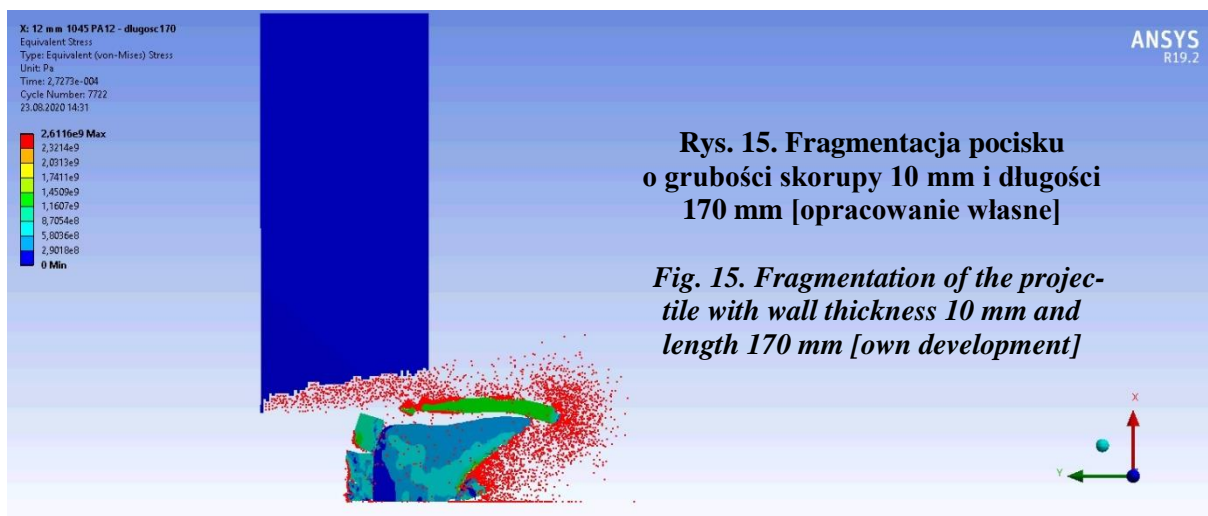
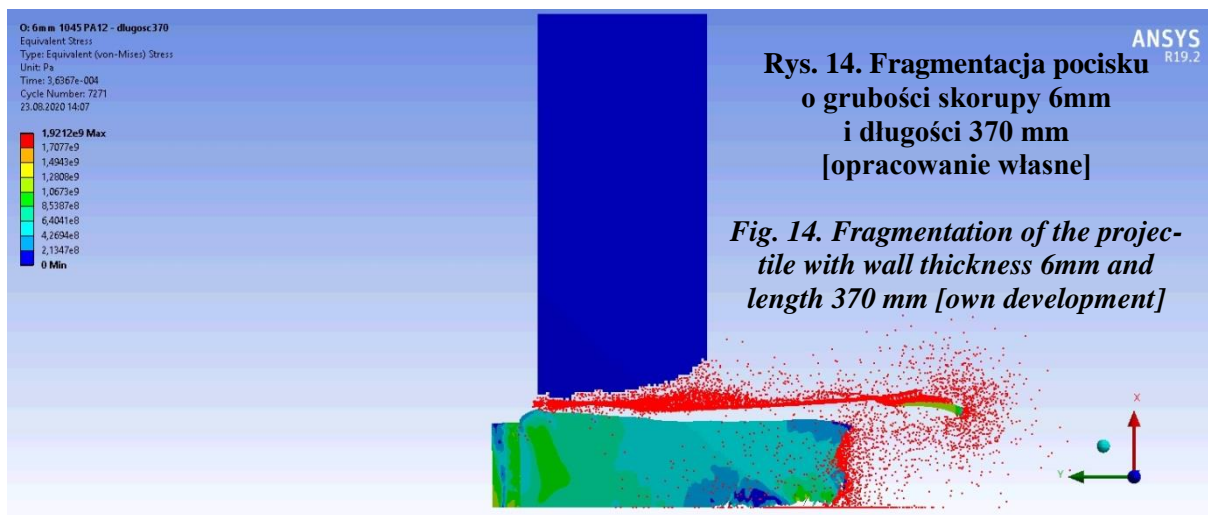
4.1. Kąt stożka w pociskach elaborowanych poliamidem

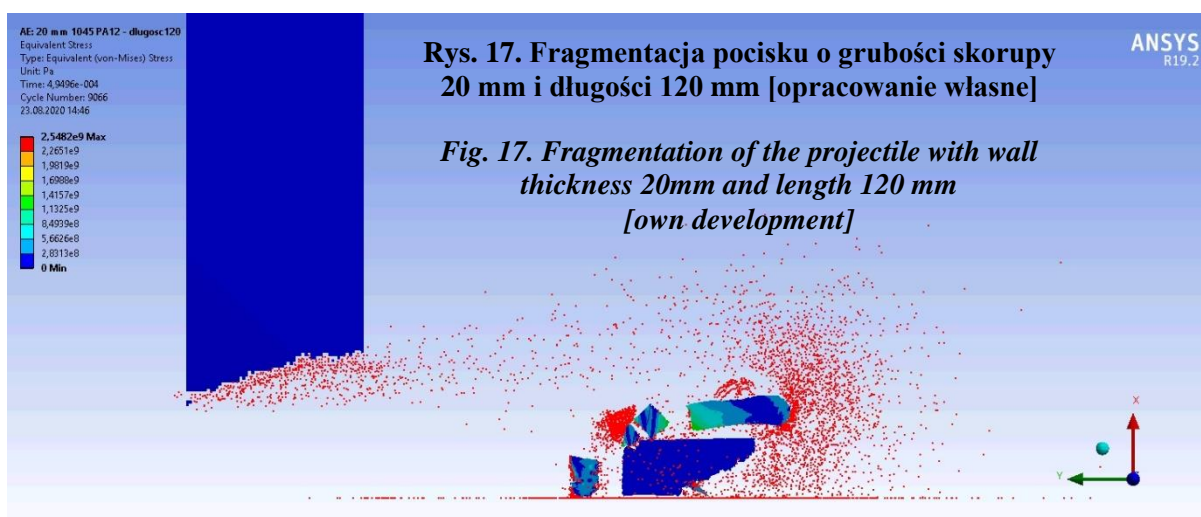
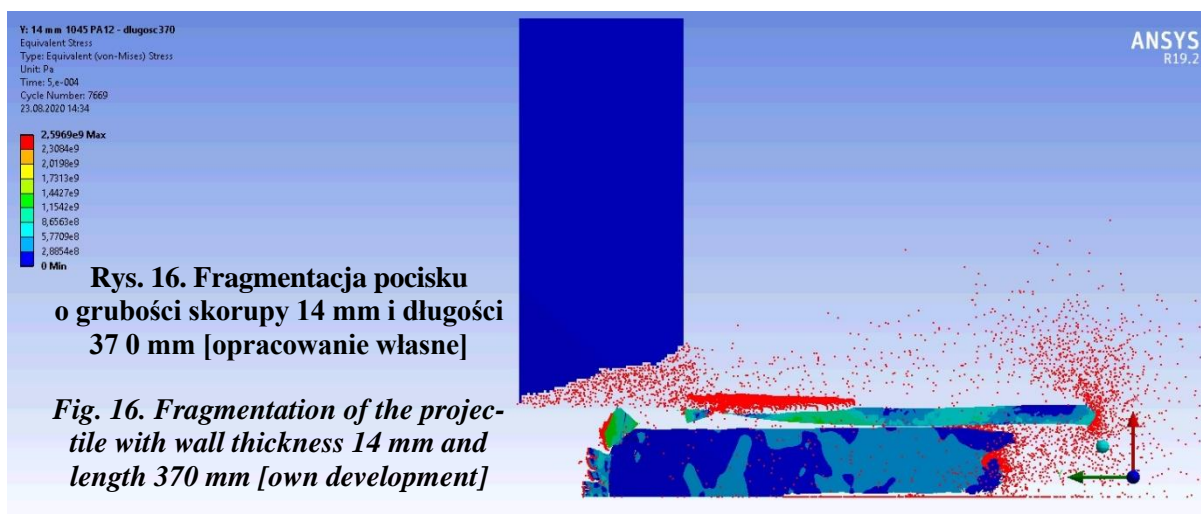
W wynikach symulacji dotyczących wersji pocisku elaborowanego poliamidem nie zaobserwowano tendencji do tworzenia się stożka fragmentów lub powstawał on w niewielkim zakresie. Poliamid wykazywał wysokie właściwości plastyczne przez co wpływał na fragmentację skorupy na całej długości, a w niektórych przypadkach nawet jej dna. Wszystkie symulacje pocisków elaborowanych poliamidem wykonano dla prędkości 935 m/s.

4. Analysis of Fragmentation for a Projectile Filled with Polyamide

4.1. Conical Angle in Projectiles Filled with Polyamide

A tendency for creation of a cone of scattered fragments was not observed in the results of simulation for an option of projectile filled with polyamide, or at least it was occurring at a minimal degree. The polyamide represented high plasticity what affected the fragmentation of the shell on the whole length and in some cases even its base. All simulations of projectiles filled with polyamide were made for velocity of 935 m/s.





Na rysunkach 14-17 ujawnia się silna tendencja do rozpadania się tylnej części pocisku. Poliamid ulega fali odkształceń w kierunku przeciwnym do wektora prędkości powodując silniejsze zniszczenia skorupy w porównaniu do skorup elaborowanych aluminium. Wyniki symulacji wskazują, że model poliamidu użyty w programie Ansys może wymagać dopracowania.

Nie zamieszczono w tym przypadku tabeli z procentowym wykazem fragmentacji skorupy, gdyż właściwie wszystkie pociski rozpadły się całkowicie nie tworząc stożka lub tworząc go w minimalnym stopniu.

In Figs. 14-17 a significant tendency of disintegration of the projectile rear part is visible. The polyamide yields to a straining wave in the opposite direction to the velocity vector what effects stronger destruction of the shell comparing to shells filled with aluminium. Results of simulations indicate that a polyamide model used in Ansys code might have required an improvement.

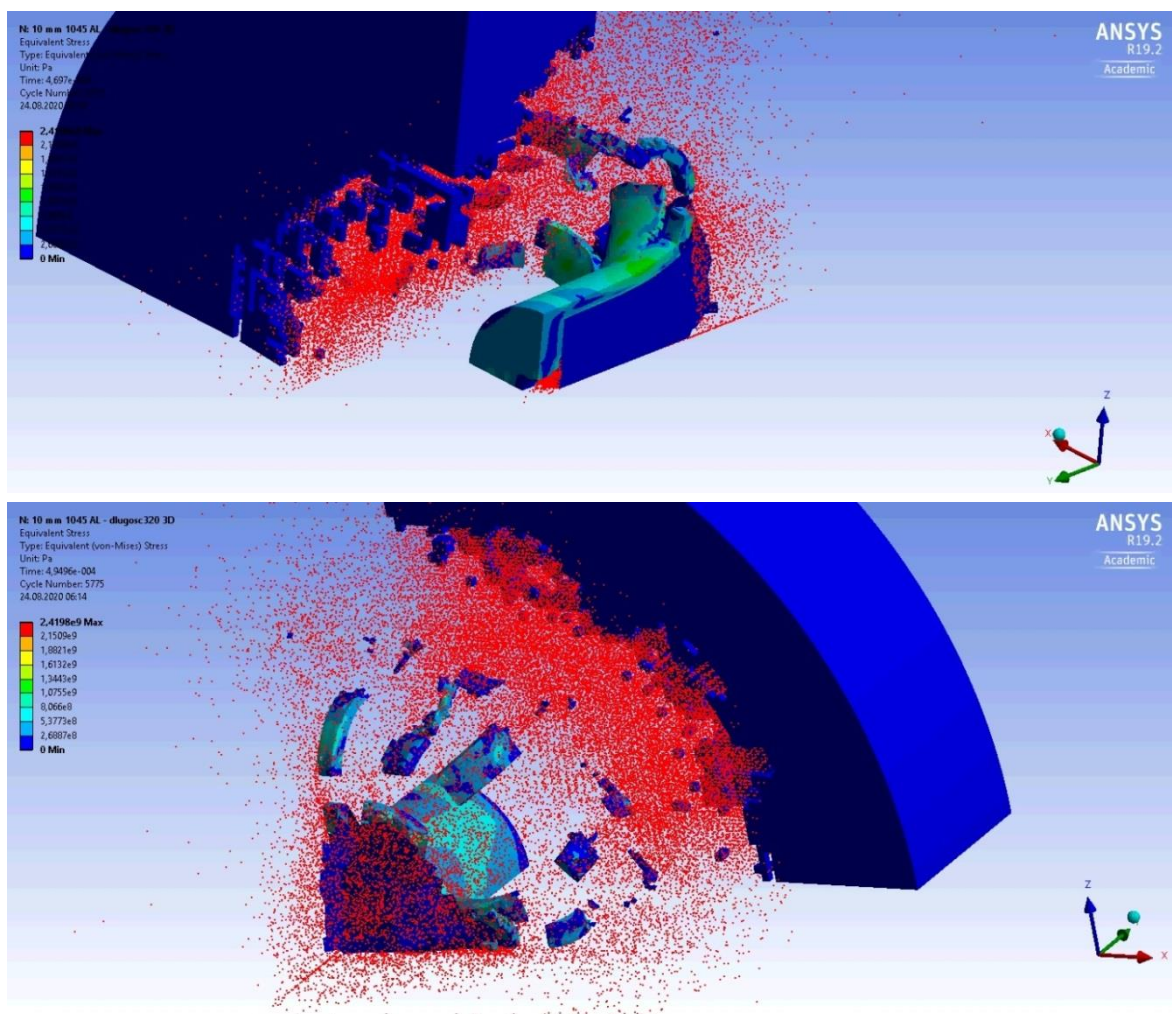
In this case a table indicating percentage of shell fragmentation was not included as actually all projectiles were completely disintegrated without creation of any cones, or with a minimal degree of creating it.

5. Przykładowa symulacja trójwymiarowa korpusu elaborowanego aluminium

Próbną symulację 3D wykonano dla jednego, wybranego wariantu. Niestety trudno jest bezpośrednio porównać model trójwymiarowy z analogicznym dwuwymiarowym. Przede wszystkim siatka modelu trójwymiarowego, oprócz tego, że nie składa się z idealnych sześciątów (dwuwymiarowa składa się z samych kwadratów) to są one znacznie większe.

5. Exemplary 3D Simulation of Shell Filled with Aluminium

A 3D simulation was tried for one of selected options. Unfortunately it is difficult to make a direct comparison between a 3D and equivalent 2D models. Most of all, the net of a 3D model doesn't include the ideal cubes (whereas 2D model includes only the squares), and the meshes are much greater at the end.



Rys. 18. Symulacja trójwymiarowa dla pocisku elaborowanego aluminium o długości 320 mm, grubości skorupy 10 mm oraz prędkości 935 m/s [opracowanie własne]

Fig. 18. Three-dimensional simulation for a projectile filled with aluminium and the length 320 mm, the shell thickness 10 mm and the velocity 935 m/s [own development]

W ramach weryfikacji modelu dwuwymiarowego wykonano analizę z uproszczoną

In order to verify the 2D model an analysis was made for a simplified net corre-

siatką w odniesieniu do dostępnej mocy obliczeniowej.

6. Wnioski

Badania zagadnienia wpływu własności wytrzymałościowych materiału rdzenia na zdolność fragmentacji korpusu kinetycznego pocisku odłamkowego dowiodły, że możliwe jest analizowanie tego zjawiska za pomocą programu Ansys 19.2 oraz modułu Explicit. Prędkości wystrzału pocisku elaborowanego aluminium wynosiły 935 m/s, 920 m/s, 874 m/s, 801 m/s, co odpowiada kolejno uderzeniu w przeszkodę z odległości 100 m, 200 m, 500 m oraz 1000 m. Pocisk z rdzeniem poliamidowym testowano, tylko dla prędkości uderzenia 935 m/s.

Wykazano, że pocisk kalibru 120 mm, wykonany z stali C45, elaborowany aluminium 1050 lub poliamidem PA12 przebija betonową ścianę o grubości 120 mm. Pocisk w trakcie penetracji tworzy stożek w przeszkodzie, a następnie fragmentuje. Na kąt stożka rozlotu fragmentów skorupy korzystnie może wpłynąć wzmocnienie dna pocisku. Podczas wnikania w przeszkodę, na rdzeń, ale również na skorupę działa siła powodująca falę podłużną.

W materiale o mniejszej gęstości i mniejszym module Younga, jakim jest PA12, „fala” odkształceń powodowała fragmentację części tylnej skorupy. Według zastosowanego modelu, wiązało się to z mniejszym kątem rozwarcia stożka rozlotu fragmentów, ale także lepszą fragmentacją i otworem o mniejszej średnicy wydrążonym w przeszkodzie. Być może występowanie tej fali korzystnie wpływa na niszczenie stosunkowo grubych, betonowych przeszkód. Aby to potwierdzić, konieczne są dalsze badania.

Pocisk elaborowany aluminium, niezależnie od prędkości wystrzelenia tworzył większy kąt rozwarcia stożka rozlotu fragmentów skorupy niż jego odpowiednik elaborowany poliamidem. Może to korzystnie

responding to accessible power of computations.

6. Conclusions

Investigations over the influence of material strength properties of the core on the shell fragmentation capacities of kinetic energy fragmenting projectiles have proved that the effect can be analysed by Ansys 19.2 code and Explicit module. Muzzle velocities of projectiles filled with aluminium were 935 m/s, 920 m/s, 874 m/s, 801 m/s, what corresponds consecutively to hitting into the barriers at distances 100 m, 200 m, 500 m and 1000 m. The projectile with the polyamide core was tested only at hitting velocity 935 m/s.

It was proved that 120 mm projectile made of C45 steel and filled with aluminium 1050 or polyamide PA12 penetrates the concrete wall of 120 mm thickness. The projectile first creates a cone in the barrier and next falls apart into fragments. The strengthening of projectile's base may be preferable for the conical angle of shell scattered fragments. Both the core and the shell are affected by the force producing a longitudinal wave at the penetration of a barrier.

The wave of strains effected the fragmentation of shell rear part in the material of lower density and lower Young modulus such as PA12. According to the applied model it was connected not only with a lower conical angle of scattered fragments but with a better fragmentation and a hole of lower diameter penetrated in the barrier, as well. It could be possible that the existence of this wave has a beneficial effect for destruction of relatively thick, concrete barriers. Further investigations are needed to confirm it.

The projectile filled with aluminium created a greater conical angle of scattered fragments than its counterpart filled with polyamide independently on the muzzle ve-

wpływać na niszczenie struktur po penetracji przeszkody.

Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono, że fragmentacja tylnej części skorupy negatywnie wpływa na kąt rozlotu odłamków. Dlatego zaproponowano, aby przeprowadzić badania, nie tylko, dla skorupy cylindrycznej, ale również dla innych kształtów, które pozwoliłyby wzmocnić skorupę pocisku, celem ustabilizowania procesu fragmentacji.

Ponadto stwierdzono, że na potrzeby obliczeń teoretycznych istotne jest uwzględnienie stopnia fragmentacji, wraz ze zmniejszaniem stopnia fragmentacji głowicy wzrastał kąt stożka rozlotu fragmentów. Mimo poprawek wprowadzonych do modelu obliczeniowego [7], błąd między obliczeniami teoretycznymi, a numerycznymi był znaczny i zwiększał się wraz ze zwiększeniem prędkości pocisku. Różnice jednak nie decydują o poprawności metod, a jedynie o konieczności przeprowadzenia testów laboratoryjnych.

Jak wyżej wykazano, aluminium i poliamid, jako materiały rdzenia, mogą być używane do różnych zastosowań 120 mm kinetycznego pocisku fragmentującego typu PELE.

locity. It may be preferred for destruction of objects after penetration of a barrier.

It was noticed on the basis of performed investigations that the fragmentation of the shell rear part has a negative impact into the scattering angle of fragments. For that reason it was suggested to carry out some investigations not only for the cylindrical shells but for other shapes as well to strengthen the shell of projectile and stabilise the process of fragmentation.

Moreover, it was stated that it is essential for theoretical calculations to take into account the degree of fragmentation as the lowering of the degree made the conical angle of scattered fragments increase. Despite the corrections introduced to the calculating model [7] the error between theoretical and numerical calculations was significant and increased with the velocity of projectile. But the differences don't decide about the correctness of the methods and only indicate a necessity to carrying out new laboratory tests.

As it was proved above, the aluminium and polyamide may be used as material of the core for various applications of 120 mm kinetic fragmentating projectile of PELE type.

Literatura / Literature

- [1] Heckötter C., Sievers J., *Comparison of the RHT Concrete Material Model in LS-DYNA and ANSYS AUTODYN.*, 11th European LS-DYNA Conference 2017, Salzburg, Austria.
- [2] Biblioteka materiałów Explicit zawarta w programie Ansys 19.2 na licencji badawczej.
- [3] Kupchella R., Stowe D., Xiao X., Algosio A. Cogar J., *Incorporation of Material Variability in the Johnson Cook Model.*, Procedia Engineering 2015, Tom 103, str. 318-325.
- [4] Murugesan M., Jung D. W., *Johnson Cook Material and Failure Model Parameters Estimation of AISI-1045 Medium Carbon Steel for Metal Forming Applications.*, Materials 2019, 12, 609; doi:10.3390/ma12040609.
- [5] Silva Morais J. M., *Mechanical Behavior of AA1050 at High Strain Rates.*, Tecnico Lisboa, 11.2014.
- [6] D. Schob, R. Roszak, I Sagradov, H. Sparr, M. Ziegenhorn, A. Kupsch, F. Leonard, B.R. Muller, G. Bruno., *Experimental determination and numerical simulation of material and damage behavior of 3D printed polyamide 12 under quasi-static loading.*, Arch. Mech. 71 (4-5), 507-526, 2019, DOI: 10.24423/aom.3162.

- [7] Pankowski Z., Szablowski K., *Projekt koncepcyjny pocisku uderzeniowego o działaniu odłamkowo-burzącym.*, (2007), Biuletyn PTU WITU nr 3, zeszyt 103, str. 67-74.
- [8] Magier M., Sadoch K., *Koncepcja kinetycznego pocisku fragmentującego (PELE) kalibru 120 mm do czołgu Leopard 2. Część 1. Obliczenia analityczne*, Problemy Techniki Uzbrojenia, zeszyt 155, 4/2020, str. 49-61.

