



**WYMIANA CIEPŁA W LUFIE ARMATY PRZECIWLOTNICZEJ
W CZASIE STRZELAŃ AMUNICJĄ ĆWICZEBNĄ ORAZ BOJOWĄ
– PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ**

***HEAT TRANSFER IN THE ANTI-AIRCRAFT GUN BARREL DURING
FIRE WITH TRAINING AND COMBAT AMMUNITION
– COMPARISON OF CALCULATION RESULTS***

Piotr KONIORCZYK, piotr.koniorczyk@wat.edu.pl, ORCID: 0000-0003-3538-6778,
Mateusz ZIELIŃSKI, mateusz.zielinski@wat.edu.pl, ORCID: 0000-0001-9078-4096
Zbigniew SURMA, zbigniew.surma@wat.edu.pl, ORCID: 0000-0001-7562-2953
Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46
Military University of Technology, 2 Gen. Sylwestra Kaliskiego St., 00 – 908 Warsaw 46

DOI 10.5604/01.3001.0053.9191

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych wymiany ciepła w ściance lufy wykonanej ze stali 30HN2MFA armaty przeciwlotniczej kalibru 35 mm podczas strzelań amunicją bojową oraz ćwiczebną. Obliczenia wykonano dla pojedynczego strzału oraz sekwencji siedmiu strzałów dla dwóch rodzajów amunicji 35x228 mm: z pociskiem podkalibrowym FAPDS-T oraz z pociskiem ćwiczebnym TP-T. Lufę o długości 3150 mm podzielono na 6 stref i w każdej z nich obliczono temperaturę w funkcji czasu wzdłuż grubości ścianki lufy podczas strzelań. Wyniki porównano dla obu rodzajów amunicji.

Słowa kluczowe: inżynieria mechaniczna, lufa działa przeciwlotniczego, wymiana ciepła, symulacje numeryczne, pole temperatury, pociski podkalibrowe, pociski ćwiczebne

1. Wstęp

Od 2012 roku Akademia Marynarki Wojennej we współpracy z Wojskową Akademią Techniczną, firmą PIT-RADWAR S.A. oraz ZM „Tarnów” S.A. buduje i rozwija Okrętowy

Abstract: The paper presents results of numerical simulations of heat transfer in the 35 mm anti-aircraft gun barrel wall made of 30HN2MFA steel during firing with combat and practice ammunition. Calculations were made for a single shot and a sequence of seven shots for two types of ammunition 35x228 mm: with FAPDS-T projectile and TP-T practice projectile. The 3150 mm long barrel was divided into 6 zones and in each zone the temperature versus time was calculated along the barrel thickness during firing. The results were compared for both types of ammunition.

Keywords: mechanical engineering, anti-aircraft cannon barrel, heat transfer, numerical simulation, temperature field, discarding sabot projectile, practice projectile

1. Introduction

Since 2012, the Polish Navy Academy in cooperation with the Military University of Technology and company PIT-RADWAR S.A. and Mechanical Plant ZM „Tarnow”

System Uzbrojenia OSU-35K, będący morskim autonomicznym systemem rozpoznawczo-ogniowym do zwalczania celów powietrznych, nawodnych i brzegowych. Obecnie system jest zainstalowany i testowany na niszczycielach min typu Kormoran II. System ma postać modułową, a jego głównym elementem jest armata kalibru 35 mm. Lata badań i testów OSU-35K zaowocowały sformułowaniem wielu problemów badawczych między innymi z zakresu balistyki wewnętrznej oraz wymiany ciepła (Dębski i in., 2016; Fikus, Dorochowicz i in., 2022; Fikus, Surma, Leciejewski, Trębiński, 2022; Fikus, Surma, Trębiński, 2019; Leciejewski i in., 2018; Zieliński, Koniorczyk, Surma, 2023; Zieliński, Koniorczyk, Surma, Preiskorn, Sienkiewicz, 2023; Zieliński, Koniorczyk, Surma, Zmywaczyk, Preiskorn, 2022). Jednym z takich zagadnień jest wpływ stosowanej amunicji na proces nagrzewania się ścianki lufy armaty podczas strzałów. Określenie ilości i sekwencji strzałów różnego rodzaju amunicją wymaga wykonania symulacji numerycznych wymiany ciepła w lufie.

Podczas eksploatacji armaty przeciwlotniczej 35 mm można stosować dwa typy amunicji. Pierwszy typ amunicji stanowią naboje 35x228 mm z pociskami podkalibrowymi stabilizowanymi obrotowo z rdzeniem fragmentującym ze smugaczem FAPDS-T (Frangible Armour Piercing Discarding Sabot with Tracer). Pociski tego typu przeznaczone są do niszczenia celów powietrznych, takich jak samoloty czy śmigłowce a także celów naziemnych, w tym wozów bojowych oraz pojazdów opancerzonych. Skuteczny zasięg pocisku FAPDS-T wynosi do 4 km. Drugi typ stosowanej amunicji to naboje 35x228 mm z pociskami ćwiczebnymi ze smugaczami TP-T (Target Practice with Tracer). Podstawowym celem tego typu amunicji jest nauka strzelania do celów powietrznych i naziemnych na odległość do 4 km. Amunicja typu TP-T charakteryzuje się tak dobranymi parametrami balistycznymi, aby

S.A. has been developing a Ship Weapon System OSU-35K designed as a navy autonomous identification-fire system for fighting aerial, sea and coastal objects. Now the system is installed and tested on mine destroyers of type Kormoran II. The system has a modular architecture with 35 mm gun as its main component. Years of investigations and tests on OSU-35K provided the formulation of many research problems including among others the questions of internal ballistics and heat transfer (Dębski and others, 2016; Fikus, Dorochowicz and others, 2022; Fikus, Surma, Leciejewski, Trębiński, 2022; Fikus, Surma, Trębiński, 2019; Leciejewski and others, 2018; Zieliński, Koniorczyk, Surma, 2023; Zieliński, Koniorczyk, Surma, Preiskorn, Sienkiewicz, 2023; Zieliński, Koniorczyk, Surma, Zmywaczyk, Preiskorn, 2022). One of them is influence of used ammunition on the process of heating the wall of gun barrel during the shooting. Determination of a number and sequence of shots with different types of ammunition requires a numerical simulation of heat transfer in the barrel to be made.

Two types of ammunition may be used for 35 mm antiaircraft gun. The first type includes cartridges 35x228 mm with sub-caliber projectiles stabilised by rotation and having a fragmentating core with tracer FAPDS-T (Frangible Armour Piercing Discarding Sabot with Tracer). Such projectiles are designed for fighting aerial targets such as planes or helicopters, and also ground targets like combat vehicles and armoured vehicles. The efficient range of FAPDS-T projectile is to 4 km. Cartridges 35x228 mm with practicing tracer projectiles TP-T (Target Practice with Tracer) create the second type of used ammunition. This type of ammunition is mainly aimed to practice the firing at the aerial and ground targets on the ranges to 4 km. Ammunition TP-T has suitably matched ballistic parameters

odwzorować użycie amunicji bojowej. Porównanie parametrów amunicji FAPDS-T i TP-T przedstawiono w tabeli 1 ("MESKO 35x228 with FAPDS-T projectile," 2023; "MESKO 35x228 with TP-T projectile," 2023).

simulating the use of live ammunition. Parameters of FAPDS-T and TP-T ammunition are compared in table 1 ("MESKO 35x228 with FAPDS-T projectile," 2023; "MESKO 35x228 with TP-T projectile," 2023).

Tabela 1. Porównanie parametrów amunicji stosowanej w armacie przeciwlotniczej kalibru 35 mm
Table 1. Comparison of parameters for ammunition used in 35 mm antiaircraft gun.

Typ pocisku <i>Type of projectile</i>	Masa pocisku [g] <i>Mass of projectile</i>	Masa ładunku prochowego [g] <i>Mass of propellant charge</i>	Masa naboju [g] <i>Mass of cartridge</i>	Średnia prędkość początkowa pocisku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] <i>Average muzzle velocity of projectile</i>
FAPDS-T	380	376	1460	1440±22
TP-T	550	345	1588	1180±15

Pomimo dobrania parametrów balistycznych amunicji TP-T tak, aby odwzorowywała w pełni realia strzelań amunicją bojową, parametry mające znaczenie dla wymiany ciepła w ścianie lufy armaty dla obu rodzajów amunicji są różne. Do tych parametrów należą: gęstość ρ , temperatura T_g oraz prędkość przepływu gazów prochowych w każdym z sześciu przekrojów lufy w_i . Dla obu rodzajów amunicji różne będą również współczynniki przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni lufy w funkcji czasu w każdej strefie.

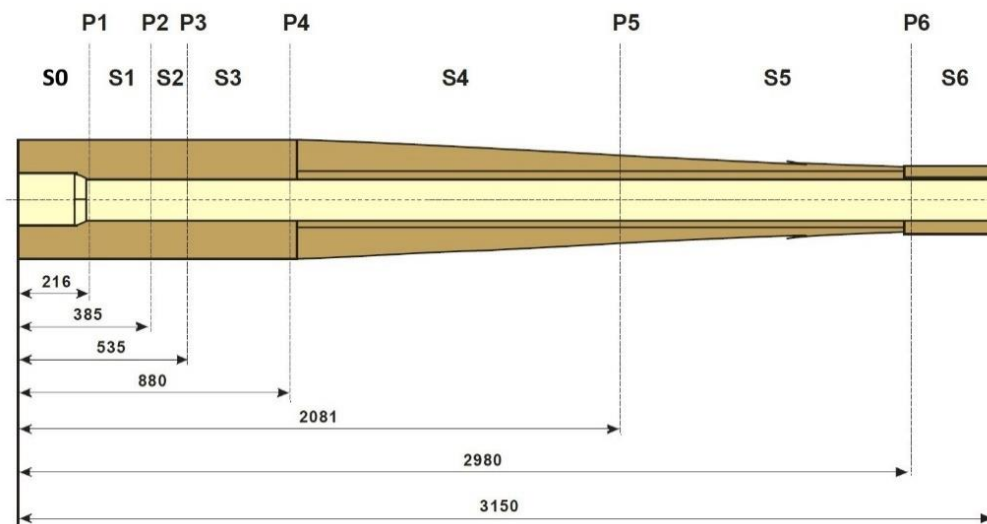
Symulacje wymiany ciepła w lufie armaty przeciwlotniczej kalibru 35 mm przeprowadzono poprzez rozwiązanie problemu początkowo – brzegowego dla pojedynczego strzału oraz serii 7 strzałów dla warunków brzegowych na wewnętrznej powierzchni lufy zależnych od rodzaju zastosowanej amunicji, tzn. FAPDS-T oraz TP-T. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES), zaimplementowanej w oprogramowaniu COMSOL Multiphysics w taki sam sposób, jak w publikacji (Zieliński i in., 2022; "COMSOL Documentation:," 2023). Do celów obliczeniowych, lufa armaty o długości 3150 mm została podzielona na 6 stref. Współczynnik przejmowania ciepła

Even if the ballistic parameters of TP-T ammunition are tailored to faithfully reflect the realities of firing with live ammunition the parameters important for heat transfer in the gun barrel wall are different for these types of ammunition. These parameters include: density ρ , temperature T_g , and flow velocity of propellant gases in each of barrel's six cross-sections w_i . The heat transfer coefficient on the inner surface of barrel as a function of time will be also different for two types of ammunition in each zone.

Simulations of heat transfer in 35 mm antiaircraft gun barrel was performed by solution of the initial-boundary value problem for a singular shot and a series of 7 shots and for boundary conditions on the inner surface of barrel depending on the type of used ammunition, i.e. FAPDS-T and TP-T. Calculations were performed using a Finite Element Method (FEM) implemented in computer code COMSOL Multiphysics in the same way as in publication (Zieliński and others, 2022; "COMSOL Documentation:," 2023). The barrel of the gun with the length of 3150 mm was divided on 6 zones for calculation reasons. The heat transfer coefficient $h_i(t)$ was calculated as a function of time in six selected cross-

$h_i(t)$ obliczono jako funkcję czasu w sześciu wybranych przekrojach od P1 do P6. Zgodnie z rys. 1. poszczególne przekroje odpowiadają następującym współrzędnym wzdłuż długości lufy: P1- $z = 216$ mm, P2- $z = 385$ mm, P3- $z = 535$ mm, P4- $z = 880$ mm, P5- $z = 2081$ mm, P6- $z = 2980$ mm. Określono także zmianę temperatury gazów prochowych w funkcji czasu $T_g(t)$. Wartości funkcji $h_i(t)$ w przekrojach od P1 do P6 obowiązują na całej długości stref od S1 do S6. Dla strefy S0, odpowiadającej komorze naboju armaty przyjęto na obecnym etapie badań taki sam warunek brzegowy, jak dla strefy S1 – rys. 1.

sections from P1 to P6. According to Fig. 1 the particular cross-sections correspond to following coordinates along the barrel length: P1- $z = 216$ mm, P2- $z = 385$ mm, P3- $z = 535$ mm, P4- $z = 880$ mm, P5- $z = 2081$ mm, P6- $z = 2980$ mm. The change of propellant gases temperature was also determined as a function of time $T_g(t)$. The values of function $h_i(t)$ in cross-sections from P1 to P6 are valid on the whole length of the zones from S1 to S6. For the zone S0 corresponding to the gun cartridge chamber it was accepted at the present stage of investigations that the boundary condition is the same as for the zone S1 – Fig. 1.



Rys. 1. Przyjęte do obliczeń strefy wymiany ciepła S1-S6 w lufie armaty 35 mm:

S1: $0 \div 385$ mm, $r_{out} = 55.0 \div 55.0$ mm; S2: $385 \div 535$ mm, $r_{out} = 55.0 \div 57.0$ mm; S3: $535 \div 880$ mm, $r_{out} = 57.0 \div 59.5$ mm; S4: $880 \div 2081$ mm, $r_{out} = 59.5 \div 44.07$ mm; S5: $2081 \div 2980$ mm, $r_{out} = 44.07 \div 31.0$ mm; S6: $2980 \div 3150$ mm, $r_{out} = 31.0$ mm (Zieliński i in., 2022)

Fig. 1. Heat transfer zones S1 to S6 of the 35 mm cannon barrel input to the calculations: S1: $0 \div 385$ mm, $r_{out} = 55.0 \div 55.0$ mm; S2: $385 \div 535$ mm, $r_{out} = 55.0 \div 57.0$ mm; S3: $535 \div 880$ mm, $r_{out} = 57.0 \div 59.5$ mm; S4: $880 \div 2081$ mm, $r_{out} = 59.5 \div 44.07$ mm; S5: $2081 \div 2980$ mm, $r_{out} = 44.07 \div 31.0$ mm; S6: $2980 \div 3150$ mm, $r_{out} = 31.0$ mm (Zieliński and others, 2022)

W przedstawionej pracy zaprezentowano wyniki symulacji numerycznych wymiany ciepła w lufie armaty przeciwlotniczej kalibru 35 mm dla dwóch różnych typów amunicji stosowanej podczas eksploatacji tej armaty.

The paper presents results of numerical simulations of heat transfer in the barrel of 35 mm anti-aircraft gun for two different types of ammunition fired with the gun.

2. Problem początkowo brzegowy wymiany ciepła w lufie armaty

Na potrzeby symulacji numerycznych nieustalonego przewodzenia ciepła w ścianie lufy rozpatrywanej armaty przyjęto temperaturę początkową $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Zarówno na wewnętrznej, jak i zewnętrznej powierzchni ścianki przyjęto warunek brzegowy III rodzaju (Zieliński i in., 2022). Na powierzchni zewnętrznej założono stałą wartość współczynnika przejmowania ciepła $h_{out} = 9,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$. Zgodnie z publikacją (Fikus, Surma i in., 2022) zmiana tego parametru w zakresie od $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ do $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ nie wpłynie na wyniki symulacji w stopniu większym niż 3%. Rozwiązano dwuwymiarowe, osiowosymetryczne równanie Fouriera w postaci (John Corner, 1950; Serebryakov, 1962; Wiśniewski, Wydawnictwo Naukowe PWN., 2017):

$$\rho_s(T)c_s(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(k_s(T)r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_s(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) \#(1)$$

dla / for

$$r_{in} < r < r_{out}, \quad 0 < z < l_m, \quad t > 0, \#(2)$$

gdzie: T jest temperaturą lufy, t stanowi czas, r jest odległością między osią lufy a rozpatrywanym węzłem. Dane materiałowe stali lufowej oznaczono jako: k_s – współczynnik przewodzenia ciepła stali, ρ_s – gęstość stali, c_s – ciepło właściwe stali.

Warunek początkowy przyjmuje postać:

$$T(0, r, z) = T_0 \#(3) \quad \text{dla / for}$$

$$r_{in} < r < r_{out}, \quad 0 < z < l_m, \quad t = 0. \#(4)$$

Wewnętrzny warunek brzegowy ma postać:

$$\dot{q}_i(t, r = r_{in}, z) = h_i(t) \cdot \left(T(t, r_{in}, z) - T_g(t, r_{in}, z)\right), \quad i = 1 \dots 6 \#(5)$$

a zewnątrz warunek brzegowy zapisano w postaci:

$$\dot{q} = h_{out} \cdot (T(t, r_{out}, z) - T_0) \#(6)$$

2. Initial Boundary Value Problem of Heat Transfer in the Gun Barrel

For the reasons of numerical simulations of transient heat transfer in the barrel wall of considered gun the initial temperature of $T_0 = 20^\circ\text{C}$ was taken. For both, inner and outer surfaces of the wall the boundary condition of the III type was taken (Zieliński and others, 2022). A constant value of the heat transfer coefficient was assumed for outer surface $h_{out} = 9,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$. According to publication (Fikus, Surma and others, 2022) any change of this parameter within $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ and $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ cannot affect the results of the simulation more than by 3%. A two-dimensional axial-symmetrical Fourier's equation was solved in the form (John Corner, 1950; Serebryakov, 1962; Wiśniewski, Wydawnictwo Naukowe PWN., 2017)

where: T is the barrel temperature, t is time, r is distance between barrel axis and a considered mesh. Material data of barrel steel are marked as: k_s – thermal conductivity of steel, ρ_s – density of steel, c_s – specific heat of steel.

The initial condition takes a form:

The inner boundary condition has a form:

and outer boundary condition was put down in a form:

gdzie: i odpowiada numerowi strefy, T_g jest temperaturą gazów prochowych wyznaczoną z rozwiązania problemu głównego balistyki wewnętrznej, $r_{in} = 17,5$ mm stanowi promień wewnętrzny lufy, a r_{out} jest promieniem zewnętrznym lufy zależnym od współrzędnej z – rys. 1. Wartość współczynnika przejmowania ciepła $h_i(t)$ określono z zależności (Zieliński i in., 2022):

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

która po przekształceniach przyjęła postać (Zieliński i in., 2022):

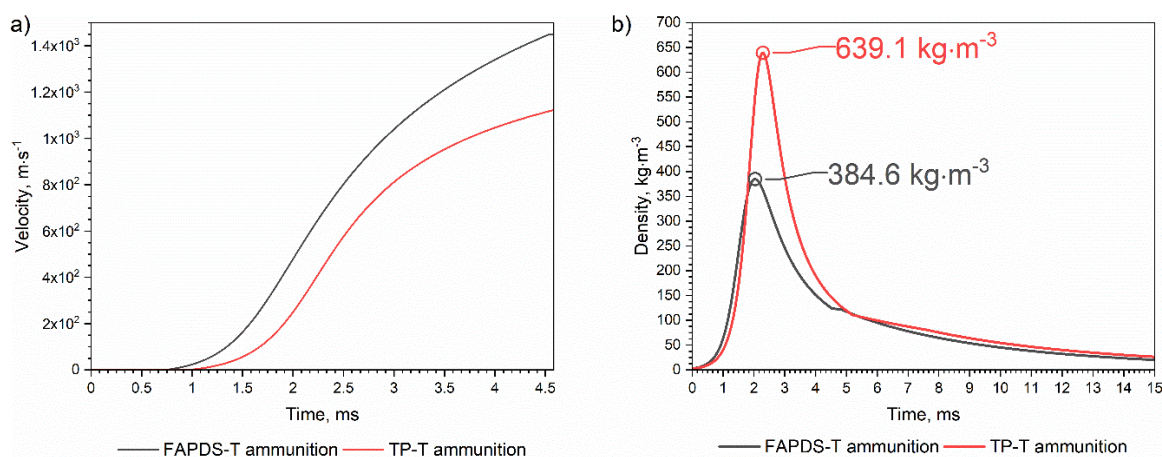
$$h_i = \frac{6,1}{D^{0,2}} (\rho w_i)^{0,8} \quad (8)$$

gdzie D jest średnicą wewnętrzną lufy, ρ gęstością gazów prochowych, w_i jest prędkością gazów prochowych w wybranym przekroju, proporcjonalną do prędkości pocisku v (Zieliński i in., 2022). Zmianę gęstości gazów prochowych oraz prędkości pocisku w lufie w funkcji czasu, które użyto do obliczeń współczynnika przejmowania ciepła $h_i(t)$ przedstawiono na rys. 2.

where: i is the number of zone, T_g is temperature of gases established with solution of the main problem of internal ballistics, $r_{in} = 17.5$ mm is the inner radius of barrel, and r_{out} is the outer radius of barrel depending on coordinate z – Fig.1. The value of heat transfer coefficient $h_i(t)$ was determined with relation (Zieliński and others, 2022):

which, after transformations, has a form (Zieliński and others, 2022):

where D is the inner diameter of barrel, ρ is density of powder gases, w_i is the velocity of powder gases for a specific cross-section, and it is proportional to projectile velocity v (Zieliński and others, 2022). Changes of density of powder gases and velocity of projectile in the barrel versus time which were used in calculations of heat interception coefficient $h_i(t)$ are presented in Fig. 2.



Rys. 2. Prędkość pocisku w lufie (a) oraz gęstości gazów prochowych (b) w funkcji czasu dla amunicji FAPDS-T oraz TP-T

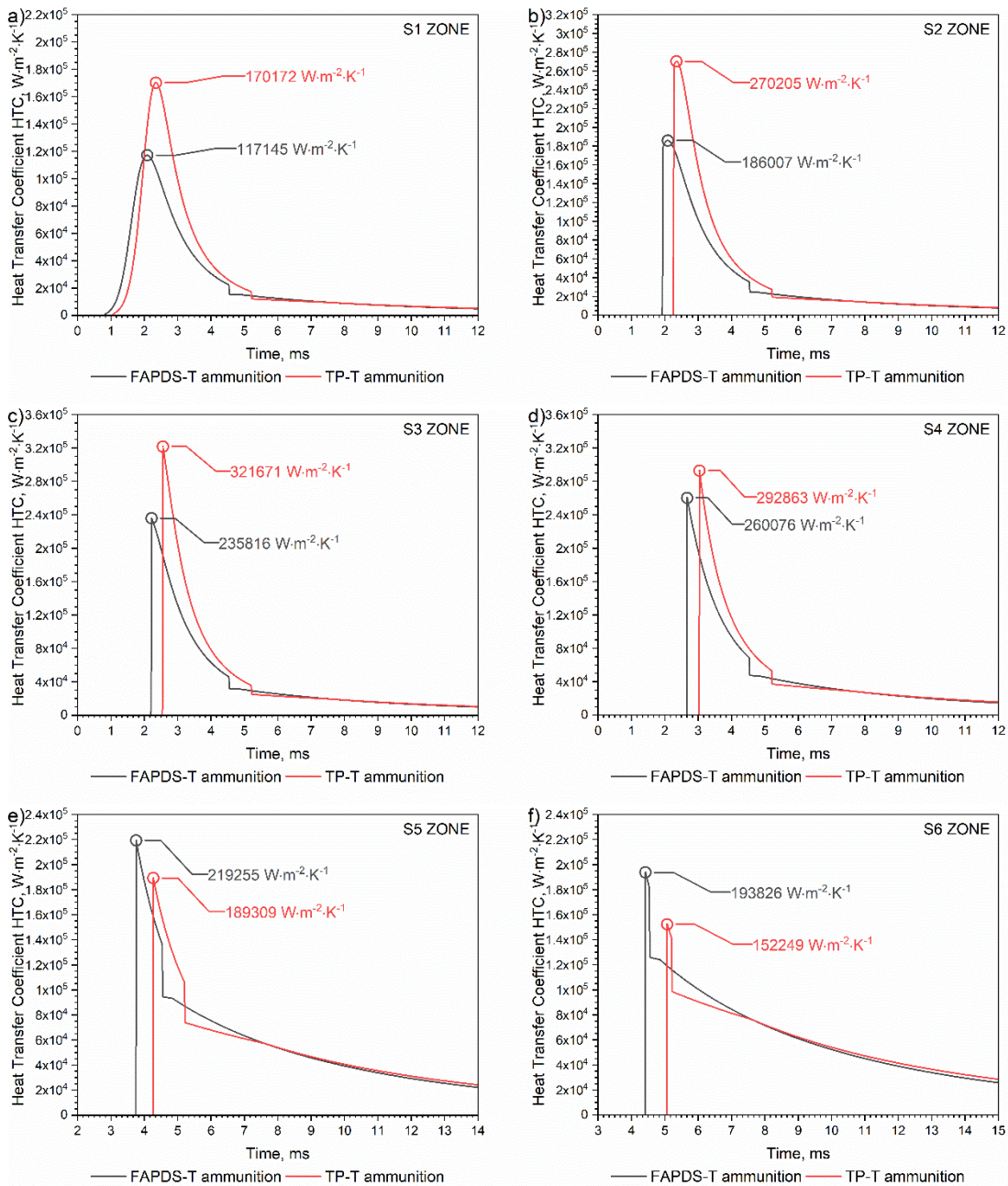
Fig. 2. Projectile velocity in the barrel (a) and propellant gases density (b) as a function of time for FAPDS-T and TP-T ammunition

3. Współczynnik przejmowania ciepła, temperatura gazów prochowych i parametry termofizyczne stali lufowej

Zgodnie z zależnością (8) wyznaczono współczynniki przejmowania ciepła w funkcji czasu na wewnętrznej powierzchni lufy w sześciu strefach lufy armaty kalibru 35 mm dla amunicji FAPDS-T oraz TP-T.

2. Heat Transfer Coefficient, Propellant Gases Temperature, and Barrel Steel Thermophysical Parameters

The heat transfer coefficient as a function of time were determined according to dependence (8) on the inner surface of barrel for six zones of 35 mm gun barrel and for ammunition FAPDS-T and TP-T.



Rys. 3. Współczynnik przejmowania ciepła w funkcji czasu w 6 przekrojach od P1 do P6 dla lufy armaty przeciwlotniczej kalibru 35 mm dla amunicji FAPDS-T oraz TP-T
Fig. 3. Heat transfer coefficient (HTC) as a function of time $h_i(t)$ in the 6 cross-sections P1 to P6 for the 35 mm anti-aircraft cannon barrel for FAPDS-T and TP-T ammunition

Porównanie współczynnika przejmowania ciepła w funkcji czasu dla obu typów amunicji w sześciu strefach lufy armaty przedstawiono na rys. 3.

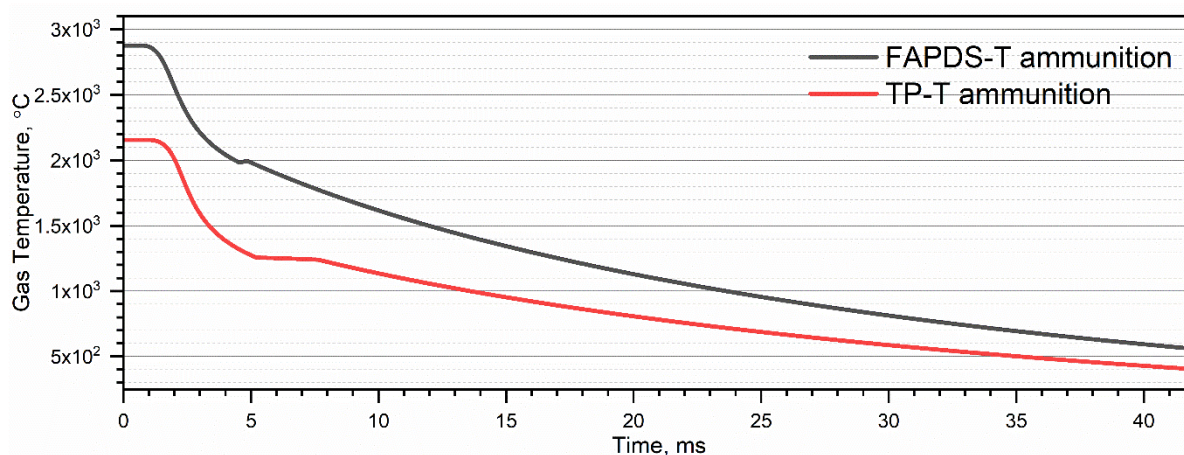
W przypadku obu rodzajów amunicji obserwujemy gwałtowne spadki współczynnika przejmowania ciepła w funkcji czasu $h_i(t)$ w każdym z sześciu przekrojów od P1 do P6: dla $t=4,54$ ms – w przypadku amunicji FAPDS-T, dla $t= 5,15$ ms - dla amunicji TP-T. Jest to moment, w którym pocisk opuszcza lufę. Niezależnie od rodzaju amunicji, współczynnik przejmowania ciepła osiąga najwyższą wartość w czwartej strefie.

W wyniku rozwiązania problemu głównego balistyki wewnętrznej uzyskano zmianę temperatury gazów prochowych w funkcji czasu $T_g(t)$ dla obu typów amunicji. Porównanie temperatury gazów prochowych w funkcji czasu dla amunicji FAPDS-T oraz TP-T przedstawiono na rys. 4. Słabo zmienny charakter przebiegu temperatury gazów prochowych w funkcji czasu dla amunicji TP-T w zakresie od około 5 ms do około 8 ms wynika z faktu, że dla tej amunicji pozostałości ładunku prochowego spalają się jeszcze po opuszczeniu lufy przez pocisk.

Fig. 3 compares heat transfer coefficient as a function of time for two types of ammunition in six zones of the gun barrel.

In the case of two types of ammunition there are sudden decreases of the heat transfer coefficient as a function of time $h_i(t)$ in each of six cross-sections from P1 to P6: at $t=4.54$ ms – for ammunition FAPDS-T, at $t= 5.15$ ms – for ammunition TP-T. It is a moment when projectile leaves the barrel. Independently on the type of ammunition the heat transfer coefficient has the highest value in the fourth zone.

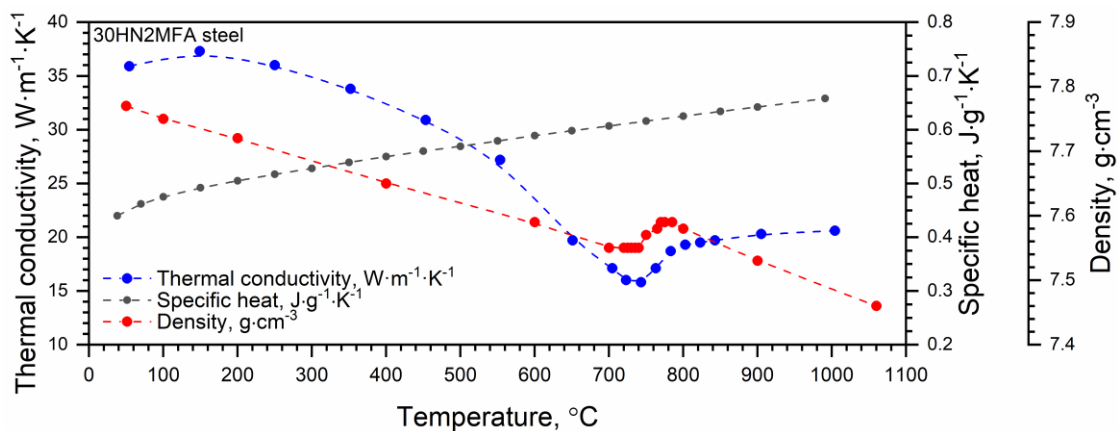
As a result of the solution of the main problem of internal ballistics the change of temperature was received for propellant gases as a function of time $T_g(t)$ for two types of ammunition. Fig. 4 compares the temperature of propellant gases versus the time for ammunition FAPDS-T and TP-T. Steady changes of propellant gases temperature in time for ammunition TP-T from ca. 5 ms to ca. 8 ms are caused by the fact that residuals of propellant charge are still burning after the projectile leaves the barrel.



Rys. 4. Temperatura gazów prochowych w funkcji czasu $T_g(t)$ dla lufy armaty przeciwlotniczej kalibru 35 mm dla amunicji FAPDS-T oraz TP-T (Zieliński i in., 2022)
Fig. 4. The propellant gas temperature as a function of time $T_g(t)$ for the 35 mm anti-aircraft cannon barrel for FAPDS-T and TP-T ammunition (Zieliński i in., 2022)

Współczynniki przejmowania ciepła na wewnętrznej oraz zewnętrznej powierzchni lufy w funkcji czasu w sześciu strefach oraz temperatura gazów prochowych w funkcji czasu posłużyły jako dane wejściowe do rozwiązania problemu początkowo-brzegowego wymiany ciepła w lufie armaty kalibru 35 mm. Innymi danymi wejściowymi koniecznymi do rozwiązania tego problemu są własności termofizyczne wybranej stali lufowej. Do obliczeń wybrano stal 30HN2MFA (Koniorczyk i in., 2020; Zieliński i in., 2022). Charakterystyki temperaturowe własności termofizycznych stali 30HN2MFA, tzn. współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe oraz gęstość w zakresie temperatury od pokojowej (RT – j. ang. *room temperature*) do około 1000 °C zobrazowano na rys. 5. W obliczeniach uwzględniono skurcz stali 30HN2MFA w temperaturze 749.7 °C – rys. 5 (Koniorczyk i in., 2020).

The heat transfer coefficient on the inner and outer surfaces of barrel as a function of time for six zones and the temperature of propellant gases in function of time were used as the input for solution of the initial-boundary value problem of heat transfer in 35 mm gun barrel. Thermophysical characteristics of selected barrel steel is another input needed for solution of this problem. Steel 30HN2MFA was chosen for calculations (Koniorczyk and others, 2020; Zieliński and others, 2022). Temperature characteristics of thermophysical properties of 30HN2MFA steel, i.e. thermal conductivity, specific heat, and density in the range of temperature from the room temperature (RT) to ca. 1000 °C are shown in Fig. 5. The calculations take into account the shrinkage of 30HN2MFA steel at temperature 749.7 °C – Fig. 5 (Koniorczyk and others, 2020).



Rys. 5. Własności termofizyczne (przewodność cieplna, ciepło właściwe oraz gęstość) w funkcji temperatury w zakresie od temperatury pokojowej RT do 1000 °C dla stali 30HN2MFA (Koniorczyk i in., 2020; Zieliński, Koniorczyk, 2023)

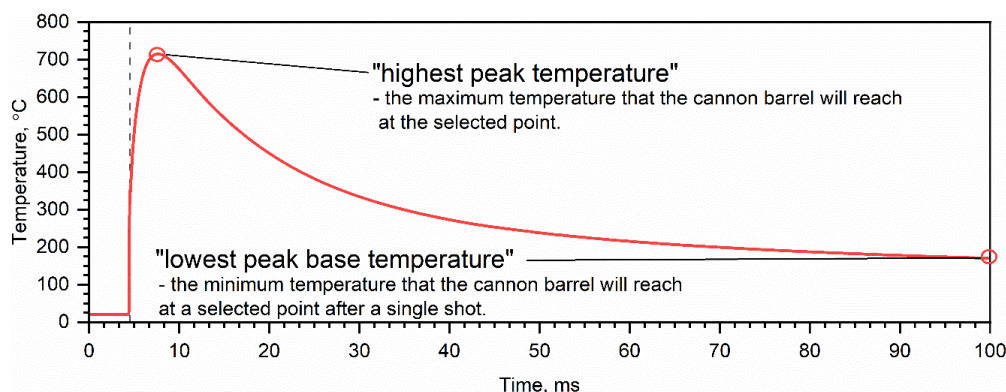
Fig. 5. Thermophysical properties (thermal conductivity, specific heat and density) as a function of temperature in the range from RT to 1000 °C for 30HN2MFA barrel steel (Koniorczyk and others, 2020; Zieliński, Koniorczyk, 2023)

4. Rozkład temperatury w lufie armaty po pierwszym strzale

Podczas pojedynczego strzału na wykresie temperatury w funkcji czasu na wewnętrznej powierzchni lufy można rozróżnić dwa charakterystyczne punkty – rys. 6.

4. Distribution of Temperature in Gun Barrel after the First Shot

Two specific points can be distinguished on the diagram of temperature as a function of time on the inner surface of barrel at a single shot – Fig. 6.



Rys. 6. Maksymalna i minimalna temperatura piku

Fig. 6. Maximum and minimum peak temperature

Pierwszy z nich odnosi się do maksymalnej wartości temperatury i nazywany jest maksymalną temperaturą piku. Drugi jest związany z temperaturą, jaką osiąga wewnętrzna powierzchnia lufy po 100 ms ($t=100$ ms – zakończenie pierwszego strzału, $t=200$ ms – zakończenie drugiego strzału, itd.) i jest nazywany minimalną temperaturą podstawy piku. Oba charakterystyczne punkty wyszczególniono na rys. 6.

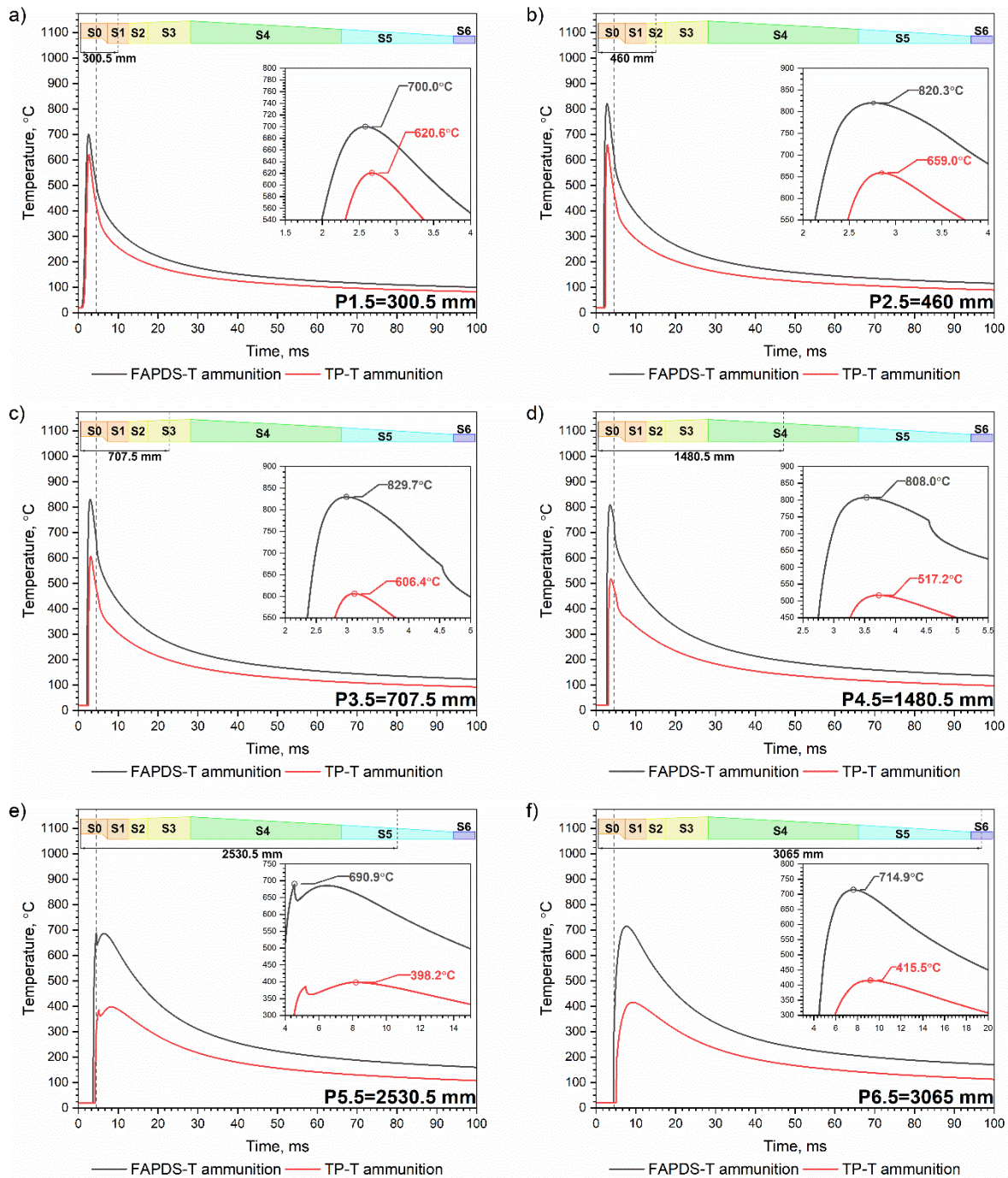
Porównanie rozkładów temperatury $T_i(t, r_{in}, z)$ na wewnętrznej powierzchni lufy dla pojedynczego strzału w sześciu strefach od S1 do S6 (współrzędna z w środku każdej strefy) dla amunicji typu FAPDS-T oraz TP-T przedstawiono na rys. 7 a)-d). Należy zaznaczyć, że dla każdej ze stref współczynnik przejmowania ciepła w funkcji czasu $h_i(t)$ jest inny – rys. 3. Przykładowo dla amunicji typu FAPDS-T przerywana linia na każdym z wykresów wyznacza czas opuszczenia lufy przez pocisk ($t=4,55$ ms) – rys. 6.

We wszystkich strefach, tzn. od S1 do S6 wewnętrzna powierzchnia lufy osiąga najwyższą temperaturę dla amunicji typu FAPDS-T – rys. 7. Największa różnica temperatury występuje w strefie S6 i wynosi 299,4 °C. W przypadku serii strzałów oznacza to możliwość oddania większej liczby strzałów dla amunicji ćwiczebnej, tzn. TP-T tak, by nie przekroczyć temperatury skurczu.

The first of them refers to the maximal value of temperature and is named as the highest peak temperature. The second is connected with temperature of barrel inner surface after 100 ms ($t=100$ ms – end of first shot, $t=200$ ms – end of second shot, etc.) and is named as the lowest peak base temperature. Both specific points are shown in Fig. 6.

Comparison of temperature distributions $T_i(t, r_{in}, z)$ on inner surface of the barrel for a single shot and in six zones from S1 to S6 (z coordinate in the centre of each zone) for ammunition types FAPDS-T and TP-T is presented in Fig. 7 a)-d). It has to be stressed that the heat transfer coefficient as a function of time $h_i(t)$ is different for each zone – Fig. 3. For instance, a dashed line in each diagram identifies the time of leaving the barrel by projectile ($t=4.55$ ms) – Fig. 6 of FAPDS-T type ammunition.

The inner surface of the barrel reaches the highest temperature in all zones, i.e. from S1 to S6, for ammunition FAPDS-T – Fig. 7. The highest difference of temperature occurs in zone S6 and is 299.4 °C. In the case of a series of shots it means that a greater number of shots can be fired for the practicing ammunition, i.e. TP-T, before the temperature of shrinkage is reached.



Rys. 7. Rozkład temperatury $T_i(t, r_{in}, z)$ na wewnętrznej powierzchni lufy w sześciu strefach od S1 do S6 dla pojedynczego strzału dla amunicji FAPDS-T oraz TP-T

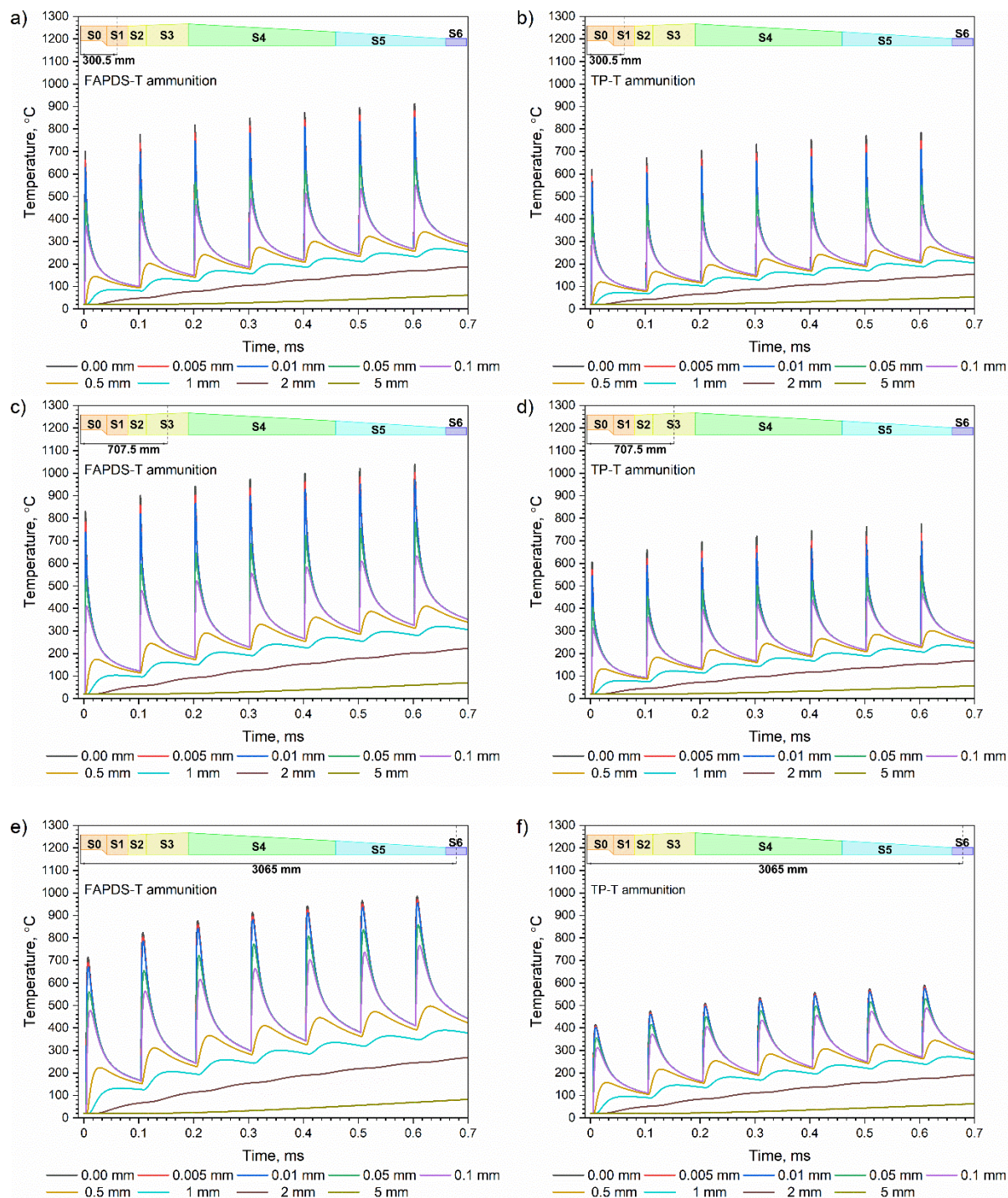
Fig. 7. Temperature distribution $T_i(t, r_{in}, z)$ of the barrel's inner surface at the 6 zones S1 to S6 for a single shot for FAPDS-T ammunition and TP-T ammunition

Należy podkreślić, że przedstawiony model wymiany ciepła pozwala obliczyć temperatury na wewnętrznej powierzchni lufy dla dowolnej sekwencji strzałów zaproponowanych przez producenta armaty.

It has to be underlined that presented model of heat transfer can be used to calculate the temperature on inner surface of barrel for any sequence of shots proposed by the manufacturer of the gun.

5. Rozkład temperatury w lufie armaty dla serii siedmiu strzałów

5. Gun Barrel Temperature Distribution for a Series of Seven Shots



Rys. 8. Rozkład temperatury $T_i(t, r_{in}, z)$ na wewnętrznej powierzchni lufy w trzech strefach S4, S5 i S6 dla serii siedmiu strzałów: lewa strona – amunicji FAPDS-T; prawa strona – amunicja TP-T
Fig. 8. Temperature distribution $T_i(t, r_{in}, z)$ of the barrel's inner surface at the 3 zones S4, S5 and S6 for the sequence of seven shots: left side – for FAPDS-T ammunition; right side – TP-T ammunition

Porównanie rozkładów temperatury $T_i(t, r_{in}, z)$ na wewnętrznej powierzchni lufy dla serii siedmiu strzałów w trzech strefach S4, S5 i S6 (współrzędna z w środku każdej strefy) dla amunicji typu FAPDS-T oraz TP-T przedstawiono na rys. 8.

Należy zauważyć, że temperatura podstawy piku jest w rzeczywistości temperaturą wewnętrznej powierzchni lufy do głębokości około 0.5 mm $T_i(t, r = r_{in} - 0.5 \text{ mm}, z)$ – rys. 8. Ze względu na sekwencję strzałów w rozpatrywanej armacie kalibru 35 mm najniższa temperatura piku jest odczytywana po każdym kolejnych 100 ms, np. dla $t = 100$ ms po pierwszym strzale, dla $t = 200$ ms po drugim strzale, itd. We wszystkich strefach, tzn. od S1 do S6 zarówno minimalna, jak i maksymalna temperatura pików jest dla amunicji ćwiczebnej TP-T zdecydowanie niższa w stosunku do tych samych temperatur uzyskiwanych dla amunicji bojowej typu FAPDS-T. Największa różnica rzędu 400 °C występuje w strefie S6 – rys. 8.

6. Obwiednie najniższych oraz najwyższych temperatur pików

Obwiednie najniższych oraz najwyższych temperatur pików po serii siedmiu strzałów dla amunicji typu FAPDS-T oraz TP-T przedstawiono na rys. 9.

Obwiednie najniższych temperatur pików, czyli temperatur podstawy pików zawierają informacje o zmianie temperatury wewnętrznej powierzchni lufy w funkcji ilości strzałów. Podobnie jak dla przypadku pojedynczego strzału, największa różnica temperatury wewnętrznej powierzchni lufy przy strzelaniu amunicją TP-T oraz FAPDS-T wynosi około 400 °C.

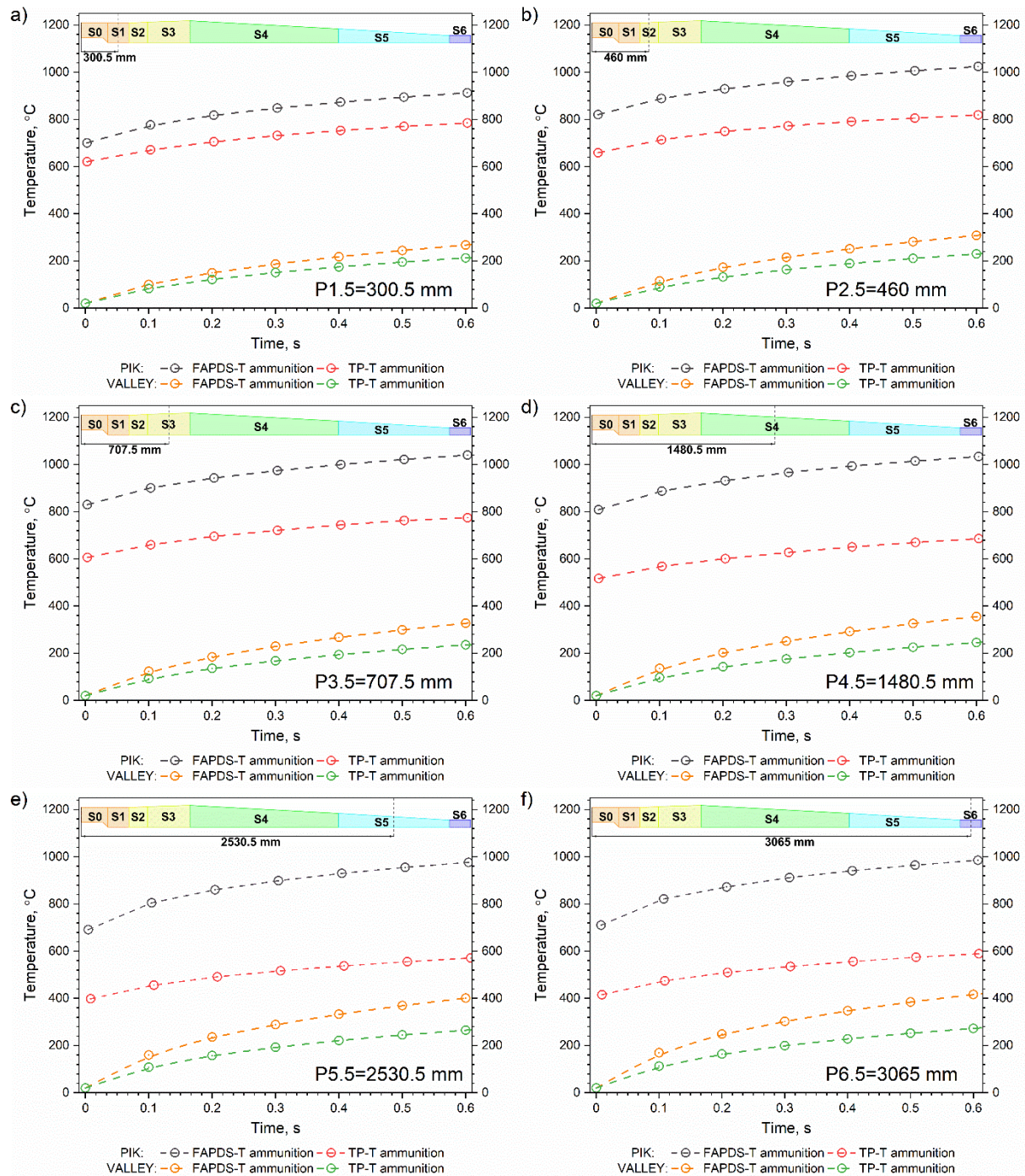
Comparison of temperature distributions $T_i(t, r_{in}, z)$ on the inner surface of barrel for the sequence of seven shots in three zones S4, S5 and S6 (z coordinate is in the centre of each zone) for FAPDS-T and TP-T ammunition types is shown in Fig. 8.

It has to be noted that the temperature of peak base is in reality a temperature of inner surface of barrel at the depth of ca. 0.5 mm $T_i(t, r = r_{in} - 0.5 \text{ mm}, z)$ – Fig. 8. Because of the sequence of shots in the considered 35 mm gun, the lowest temperature of peak is read-out after each successive 100 ms, e.g. at $t = 100$ ms after the first shot, at $t = 200$ ms after second shot, etc. In all zones, i.e. from S1 to S6, both the minimal and maximal temperature of peaks is decisively lower for practicing TP-T ammunition than for equivalent temperatures received for the live FAPDS-T ammunition. The greatest difference of ca. 400 °C takes place in zone S6 – Fig. 8.

6. Top and Bottom Envelopes of Peak Temperatures

Envelopes of the lowest and highest peak temperatures for the series of seven shots with ammunition FAPDS-T and TP-T are shown in Fig. 9.

The bottom temperature envelopes, i.e. temperatures of peak base, contain the information about the change of temperature on the inner barrel surface as a function of number of shots. Similarly as in the case of a single shot, the greatest difference of the barrel inner surface temperature between firing with TP-T and FAPDS-T ammunition is ca. 400 °C.



Rys. 9. Obwiednia najniższych i najwyższych temperatur na wewnętrznej powierzchni lufy dla sześciu stref od S1 do S6 dla sekwencji siedmiu strzałów dla amunicji FAPDS-T oraz TP-T

Fig. 9. Envelope of the lowest and the highest temperatures of the barrel's inner surface at the 6 zones S1 to S6 for the sequence of seven shots, for FAPDS-T ammunition and TP-T ammunition

7. Wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych wymiany ciepła w lufie armaty przeciwlotniczej kalibru 35 mm po jednym oraz po siedmiu strzałach dla

7. Conclusions

The paper presented results of numerical simulation of heat transfer in 35 mm anti-aircraft gun barrel after one and seven shots with two types of ammunition, i.e. FAPDS-

dwóch typów amunicji, tzn. FAPDS-T oraz TP-T. Rezultaty obliczeń można podsumować następująco:

1. Zmiana gęstości gazów prochowych w funkcji czasu dla obu typów amunicji ma podobny charakter, ale różni się wartością maksymalną osiąganą w 2÷3 ms. Gazy prochowe dla amunicji TP-T osiągają maksymalną gęstości 639,1 kg · m⁻³, podczas gdy dla amunicji FAPDS-T gęstość maksymalna wynosi 384,6 kg · m⁻³ – rys. 2 b).
2. Prędkość pocisku dla amunicji FAPDS-T ($v_0 = 1440 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) jest wyższa, niż dla amunicji TP-T ($v_0 = 1180 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) – rys 2 a). Należy zaznaczyć, że prędkość pocisku w lufie ma bezpośredni wpływ na wartość prędkości przepływu gazów prochowych w_i w poszczególnych przekrojach.
3. W strefach, tzn. S1÷S4 współczynnik przejmowania ciepła w funkcji czasu $h_i(t)$ dla amunicji FAPDS-T przyjmuje mniejsze wartości maksymalne w stosunku do tych samych wartości $h_i(t)$ dla amunicji TP-T – rys 3. Sytuacja ulega odwróceniu w strefach S5-S6, co ma związek z niższymi prędkościami przepływu gazów prochowych dla amunicji TP-T oraz zrównaniem się wartości gęstości gazów prochowych w funkcji czasu w przekrojach P5 i P6.
4. Amunicja typu FAPDS-T ma znacznie wyższą temperaturę gazów prochowych w stosunku do gazów prochowych pochodzących z amunicji TP-T – rys. 4.
5. Można przyjąć, że najniższa temperatura podstawy piku odpowiada temperaturze wewnętrznej powierzchni lufy do głębokości około 0.5 mm – rys. 7.
6. We wszystkich strefach „minimalna temperatura podstawy piku” jest wyższa dla amunicji FAPDS-T względem amunicji TP-T i wzrasta z każdym kolejnym strzałem. Największa wartość „minimalnej temperatury podstawy piku” występuje po

T and TP-T. The results of calculations can be summarised as follows:

1. Density of propellant gases changes as a function of time in a similar way for two types of ammunition, but there is a difference in maximal value reached after 2÷3 ms. Propellant gases for TP-T ammunition have maximal density 639.1 kg · m⁻³, whereas for FAPDS-T ammunition the maximal density is 384,6 kg · m⁻³ – Fig. 2 b).
2. The velocity of projectile for ammunition FAPDS-T ($v_0 = 1440 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) is higher than for ammunition TP-T ($v_0 = 1180 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) – Fig. 2 a). It has to be noted that the velocity of projectile in the barrel has a direct impact into the flowing velocity of propellant gases w_i in particular cross-sections.
3. In the zones S1÷S4 the heat transfer coefficient as a function of time $h_i(t)$ has lower maximal values for FAPDS-T ammunition than the same values of $h_i(t)$ for ammunition TP-T – Fig. 3. The situation is reversed in zones S5-S6, what is connected with the lower velocities of propellant gases flow for TP-T ammunition and equal values of propellant gases density in function of time in cross-sections P5 and P6.
4. Temperature of propellant gases is much higher for ammunition FAPDS-T than for TP-T – Fig. 4.
5. It can be taken that the lowest temperature of peak base corresponds to temperature of the inner barrel surface to the depth of ca. 0.5 mm – Fig. 7.
6. “The minimal temperature of peak base” is higher for FAPDS-T ammunition than for TP-T ammunition in all zones, and increases with each successive shot. The highest value of the “minimal temperature of peak base” is

siedmiu strzałach w strefie S6 i różnica dla obu naboju wynosi w tym przypadku około 145 °C.

after seven shots in zone S6, and in this case the difference for two cartridges is ca. 145 °C.

Literatura / Literature

- COMSOL Documentation:. (2023). Pobrane z: https://doc.comsol.com/6.0/docserver/#/com.comsol.help.heat/heat Ug_theory.07.75.html.
- Dębski, A., Koniorczyk, P., Leciejewski, Z., Preiskorn, M., Surma, Z., Zmywaczyk, J. (2016). Analysis of Heat Transfer in a 35 mm Barrel of an Anti-Aircraft Cannon. *Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering*, 7(3), 71–86. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0009.2983>.
- Fikus, B., Surma, Z., Leciejewski, Z., Trębiński, R. (2022). Influence of Relations Defining Propellant Gases—Barrel Heat Transfer on Critical Burst Length of 35 mm Anti-Aircraft Cannon. W: *Proceedings of the 32nd International Symposium on Ballistics*. DEStech Publications, Inc. DOI: <https://doi.org/10.12783/ballistics22/36087>.
- Fikus, B., Dorochowicz, A., Surma, Z., Kijewski, J., Leciejewski, Z., Michalski, J., Trębiński, R. (2022). Investigations of Middle-Caliber Anti-Aircraft Cannon Interior Ballistics including Heat Transfer Problem in Estimation of Critical Burst Length. *Processes*, 10(3), 607. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10030607>.
- Fikus, B., Surma, Z., Trebinski, R. (2019). Preliminary Application Correctness Assessment of Physical Burning Law in Interior Ballistics Phenomena Modeling in Small-Caliber Guns. W: *31st International Symposium on Ballistics*. Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc. DOI: <https://doi.org/10.12783/ballistics2019/33069>.
- John Corner. (1950). *Theory of the interior ballistics of guns*. New York: John Wiley & Sons.
- Koniorczyk, P., Zmywaczyk, J., Dębski, A., Zieliński, M., Preiskorn, M., Sienkiewicz, J. (2020). Investigation of Thermophysical Properties of Three Barrel Steels. *Metals*, 10(5), 573. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10050573>.
- Leciejewski, Z., Koniorczyk, P., Dębski, A., Preiskorn, M., Surma, Z., Zmywaczyk, J. (2018). Heat Transfer Calculations in Barrel Cover of 35 mm Naval Armament System Gun. *Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering*, 9(3), 53–70. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.2739>.
- MESKO 35x228 with FAPDS-T projectile. (2023). Pobrane z: <https://www.mesko.com.pl/en/product/35x228-with-fapds-t-projectile>.
- MESKO 35x228 with TP-T projectile. (2023). Pobrane z: <https://www.mesko.com.pl/en/product/35x228-with-tp-t-projectile>.
- Serebryakov, M. E. (1962). *Internal Ballistics of Gun Systems and Solid Rockets*. Moscow: Oborongiz.
- Wiśniewski, S., Wydawnictwo Naukowe PWN. (2017). *Wymiana ciepła* (wyd. 61). Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN. Pobrane z: <http://worldcatlibraries.org/wcpa/oclc/1005167174>.
- Zieliński, M., Koniorczyk, P. (2023). Thermophysical Properties of Selected Barrel Steels. *Problemy Techniki Uzbrojenia*, 164(2), 19–41. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.7229>.
- Zieliński, M., Koniorczyk, P., Surma, Z., Zmywaczyk, J., Preiskorn, M. (2022). Numerical Study of Heat Transfer in a Gun Barrel Made of Selected Steels. *Energies*, 15(5), 1868. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15051868>.
- Zieliński, M., Koniorczyk, P., Surma, Z., Preiskorn, M., Sienkiewicz, J. (2023). Selected Aspects of Heat Transfer Study in a Gun Barrel of an Anti-Aircraft Cannon. *Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering*, 14(2), 73–86. DOI:

<https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.6672>.

Zieliński, M., Koniorczyk, P., Surma, Z. (2023). Studies on Influence of Chromium Layer on Inner Surface of Steel Tube on Heat Transfer. *Applied Sciences*, 13(9), 5523. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13095523>.

