



BADANIE MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA METODY BALISTYCZNEJ DO SAMOWZMOCNIENIA LUF KALIBRU 35 MM

INVESTIGATIONS ON BALLISTIC METHOD APPLICATION FOR SELF-STRENGTHENING 35 MM GUN BARRELS

Tomasz SATŁAWSKI, Wojciech FURMANEK

Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna
Faculty of Mechatronics and Aviation at the Military University of Technology

DOI 10.5604/01.3001.0010.5151

Streszczenie: W pracy przeanalizowano koncepcję zwiększenia trwałości lufy kalibru 35 mm poprzez zastosowanie operacji technologicznej zwanej samowzmocnieniem. Rozpatrzono przypadek samowzmocnienia lufy za pomocą metody balistycznej, polegającej na przeprowadzeniu technologicznych strzałów amunicją specjalną o wzmocnionym ładunku miotającym. W wyniku wykonanych prac analityczno-numerycznych stwierdzono, że efekt samowzmocnienia ogranicza się jedynie do komory nabożowej i ma charakter bardzo lokalny, tj. odkształcenie plastyczne materiału lufy obejmuje nie więcej niż 30% grubości ścianki lufy. Otrzymane wyniki świadczą, że samowzmocnienie metodą balistyczną jest mało efektywne, a w przypadku stosowania na lufę zamienników materiałowych o wyższych właściwościach wytrzymałościowych może nie przynieść praktycznie żadnej korzyści.

Słowa kluczowe: samowzmacnianie, autofreтаж, metoda balistyczna samowzmacniania

1. Wstęp

Stosując klasyczne podejście do projektowania lufy napotykamy na poważne ograniczenie. Nierównomierny rozkład naprężeń w rurze grubościennej determinuje fakt, że przy stosunku $r_z/r_w = 2$ (r_w - promień wewnętrzny, r_z - promień zewnętrzny), który jest powszechny w lufach działowych, nie możemy osiągnąć większej niż $0,5 R_{pl}$ (R_{pl} - granica plastyczności) dopuszczalnej wartości ciśnienia wewnętrznego. Dalsze zwiększanie średnicy zewnętrznej

Abstract: The paper includes an analysis of a concept for increasing the service life of 35 mm gun barrels by technological process of self-strengthening. A process of barrel self-strengthening that uses a ballistic method based on technological firings with special ammunition of increased propelling charge is considered. In effect of analytical - numerical studies it was stated that a self-strengthening effect is strictly limited to the cartridge chamber and has a local character i.e. the plastic deformation of barrel's material includes not more than 30% of barrel wall thickness. The received results indicate that efficiency of self-strengthening provided by the ballistic method is low and in cases of deploying materials in barrels with high strength characteristics it could not bring any benefits at all.

Keywords: self-strengthening, auto-fretage, ballistic method of self-strengthening (self-hooping)

1. Introduction

Serious limits can be encountered at classical approach to designing a gun barrel. Irregular distribution of stresses inside of a thick-wall cylinder makes that at the ratio $r_z/r_w = 2$ (r_w - internal radius, r_z - external radius) which is commonly used in gun barrels it is not possible to get a greater value of internal pressure than value accepted for $0.5 R_{pl}$ (R_{pl} - plasticity limit). Further increase of external diameter is not translated into a di-

nie powoduje proporcjonalnego przyrostu wytrzymałości, a maksymalna wartość ciśnienia wewnętrznego, jakim możemy obciążyć daną konstrukcję, wynosi $0,75 R_{pl}$ przy $r_z/r_w = \infty$. Konstruktorzy uzbrojenia od zawsze starali się rozwiązać ten problem. Początkowo dobrym rozwiązaniem wydawało się stosowanie luf wzmocnionych. Jednak rozwiązanie to było kosztowne i zwiększało znacząco masę działa. Dobrą alternatywą okazała się technika samowzmocnienia, która polega na wywołaniu naprężeń wstępnych, działających przeciwnie do zadanego obciążenia. Jednym z pierwszych sposobów uzyskania takiego efektu było samowzmocnienie metodą balistyczną. Polega ona na wykonaniu strzelań z poddawanej obróbce lufy specjalnym rodzajem amunicji. Naboje wykorzystywane w tym celu cechują się generowaniem ciśnienia znacznie przekraczającego wartości osiągnięte przez amunicję standardową. Niewątpliwą zaletą takiego rozwiązania jest brak konieczności budowania dodatkowego oprzyrządowania technologicznego oraz przyspieszenie procesu produkcji. Odstrzał z wykorzystaniem takiej amunicji spełnia dodatkowo rolę testu poprawności wykonania wyrobu.

W artykule przedstawiono wady i zalety wykorzystania balistycznej metody samowzmacniania oraz efekty jej zastosowania do produkcji luf 35 mm armat KDA. Analizę przeprowadzono w trzech etapach. Pierwszy etap to obliczenia balistyki wewnętrznej dla naboju bojowego oraz wzmocnionego, które pozwolą na wyznaczenie maksymalnego ciśnienia działającego w danym odcinku lufy.

W kolejnym etapie wyznaczono stan naprężeń w lufie – wykorzystano do tego celu metody analityczne oraz oprogramowanie CAE (Ansys). Kolejne rozdziały stanowią wnioski z tych obliczeń.

2. Obliczanie maksymalnego ciśnienia wewnętrznego w funkcji odległości od wlotu lufy

Do wyznaczenia ciśnienia maksymalnego dla amunicji bojowej wymagane są przebiegi ciśnienia w funkcji drogi pocisku. Z powodu braku przebiegów ciśnienia wyznaczonego metodą eksperymentalną wykresy otrzymano drogą inżynierii odwrotnej, wykorzystując

rect increase of strength and the maximal value of internal pressure that may be applied for a structure is $0.75 R_{pl}$ at $r_z/r_w = \infty$. Designers of weapons have ever tried to find out a solution of this question. At the beginning the application of strengthened barrels seemed to be a good solution. But this solution was costly and it increased the weight of gun largely. A technique of self-strengthening (self-hooping) based on producing initial stresses acting against the applied loads has proved a good option. A ballistic self-hooping method was one of the first used to get such effect. It is based on using a being processed barrel for firings with special type of ammunition. Cartridges used for that generate the pressures which are significantly greater than for the standard ammunition. The acceleration of manufacturing process and elimination of additional technological fittings are certainly the benefits of this solution. Moreover the firing with such ammunition is a kind of workmanship correctness test for the article

Advantages and disadvantages of ballistic self-strengthening method and results of its application for manufacture of 35 mm barrels for KDA guns are presented in the paper. The analysis is divided on three stages. The first stage includes the calculations of internal ballistics for the regular service and boosted rounds which can be used to establish the maximal value of pressure acting in particular parts of the barrel.

The state of stresses in the barrel is presented in the next stage by using analytical and computer code CAE (Ansys) methods. The next parts deal with conclusions drawn from these calculations.

2. Calculating Maximal Internal Pressure Versus the Distance from Barrel Inlet

In order to find out the maximal pressure for service ammunition the change of the pressure along the projectile displacement is needed. As experimental values of pressure changes were not accessible then the charts were received by a reverse engi-

m.in. dane zawarte w katalogu producenta. Rozwiązanie problemu głównego balistyki wewnętrznej przeprowadzono z wykorzystaniem programu komputerowego „Balistyka wewnętrzna broni lufowej”, rozwiązującego przedstawiony układ równań (1-5) z wykorzystaniem iteracyjnej metody numerycznej Rungego-Kutty 4-go rzędu. Przedstawiony model zakłada wiele uproszczeń. Do najważniejszych z nich należą założenia, że proch jest jednorodny pod względem fizycznym i chemicznym, a strefa reakcji rozkładu (front płomienia) przemieszcza się warstwami równoległymi w głąb fazy stałej ze stałą, zależną od ciśnienia prędkością, opisaną zależnością (5). Podstawowe charakterystyki układu miotającego 35 mm armaty KDA przedstawiono w tabeli 1, natomiast właściwości prochu przyjętego do modelowania ujęto w tabeli 2.

neering method that uses above all the data included in the manufacturer's catalogue. A solution of the main issue of internal ballistics was found by using computer code „Internal Ballistics for Barrel Weapons” that solves the presented system of equations (1-5) by using Runge-Kutty iterating numerical method of the 4-th order. The presented modelling assumes some simplifications. The most essential of them is that the powder is physically and chemically homogeneous and decomposition reaction zone (burning front) moves in parallel layers into a solid phase with a permanent velocity depending on pressure and is described by formula (5). Basic characteristics of propelling system for 35 mm KDA gun are shown in table 1 and for the powder taken to modelling in table 2.

$$\left\{ \begin{array}{l} p = p_z + \frac{f\omega\psi - \theta\varphi\frac{mv^2}{2}}{w_0 - \frac{\omega}{\rho}(1-\psi) - \alpha\omega\psi + sl} \quad (1) \\ \frac{d\psi}{dt} = \frac{S_1}{A_1} \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{\kappa_1} \psi \cdot u(p)} \quad (2) \\ \frac{dv}{dt} = \frac{ps}{\varphi m} \quad (3) \\ \frac{dl}{dt} = v \quad (4) \\ u(p) = Ap^n \quad (5) \end{array} \right.$$

v – prędkość pocisku;
 p – średnie ciśnienie balistyczne w przestrzeni zapociskowej;
 p_z – ciśnienie zapłonu;
 θ – współczynnik prac drugorzędnych;
 ψ – względna część spalonego ładunku;
 l – droga pocisku;
 $u(p)$ – szybkość palenia się prochu

v – velocity of projectile;
 p – average ballistic pressure in space behind the projectile;
 p_z – pressure of ignition;
 θ – coefficient of secondary works;
 ψ – relative part of burnt charge;
 l – displacement of the projectile;
 $u(p)$ – powder burning rate

Tabela 1. Podstawowe dane układu miotającego 35 mm armaty KDA

Table 1. Basic data of 35 mm KDA gun propelling system

Masa pocisku / Projectile mass	m [kg]	0,55
Pole przekroju poprzecznego lufy / Barrel cross-section value	s [m ²]	0,001
Objętość komory naboju lufy / Capacity of barrel cartridge chamber	w_0 [dm ³]	0,38
Całkowita droga pocisku w przewodzie lufy / Total displacement of projectile in barrel	L_0 [m]	2,99

Następnie na podstawie otrzymanych danych, wzorów (6) i (7) zawartych w [1] oraz

The graph showing the pressure of powder gases inside the barrel for 35x228

procedury obliczeniowej zawartej w [2] przedstawiono przebieg ciśnienia gazów prochowych w lufie dla 35x228 mm naboju bojowego. Poprawność wzorów (6) i (7) potwierdzają badania przedstawione w publikacji [3], przeprowadzone w oparciu o wyniki z 5 czujników ciśnienia umieszczonych w lufie 30 mm armaty przeciwlotniczej PLDvK M53.

mm service cartridge are prepared on the basis of received data, formulae (6) and (7) included in [1] and calculating procedure included in [2]. Correctness of relations (6) and (7) is confirmed by investigations presented in [3] performed on the basis of 5 pressure sensors fixed in the barrel of 30 mm antiaircraft gun PLDvK M53.

$$p_p = \frac{p}{\left(1 + \frac{\omega}{3m}\right)} \quad (6)$$

$$p_d = \frac{1 + \frac{\omega}{2m} \cdot p}{\left(1 + \frac{\omega}{3m}\right)} \quad (7)$$

Tabela 2. Charakterystyki prochu przyjętego do modelowania

Table 2. Characteristics of powder selected for modelling

Masa prochu/ <i>Mass of powder</i>	ω [kg]	0,345
Siła prochu/ <i>Force of powder</i>	f [MJ/kg]	0,98
Kowolumen gazów prochowych / <i>Co-volume of powder gases</i>	α [dm ³ /kg]	1,49
Współczynnik prawa szybkości spalania / <i>Coefficient of burning rate law</i>	A [m/(s·Pa)]	$6,3 \cdot 10^{-9}$
Gęstość prochu / <i>Powder density</i>	δ [kg/m ³]	1600
Początkowe pole powierzchni ziarna prochowego / <i>Initial value of surface for a powder grain</i>	S_1 [mm ²]	104
Początkowa objętość ziarna prochowego / <i>Initial capacity of a powder grain</i>	Λ_1 [mm ³]	55,6
Liczba kanalików n / <i>Number of holes</i>	[szt.] [<i>Items</i>]	7
Współczynniki kształtu ziaren prochowych / <i>Shape coefficient of powder grains</i>	χ	0,74
	λ	0,023
	μ	- 0,58

Opracowując wykres założono, że maksymalne ciśnienie gazów prochowych oddziałujących na ścianki lufy w części pomiędzy płaskiem wlotowym lufy, a miejscem występowania najwyższego ciśnienia, zmienia się liniowo, od wartości ciśnienia działającego na dno komory naboju do wartości ciśnienia oddziałującego na dno pocisku. W pozostałej części lufy maksymalne ciśnienie jest równe ciśnieniu działającemu na dno pocisku.

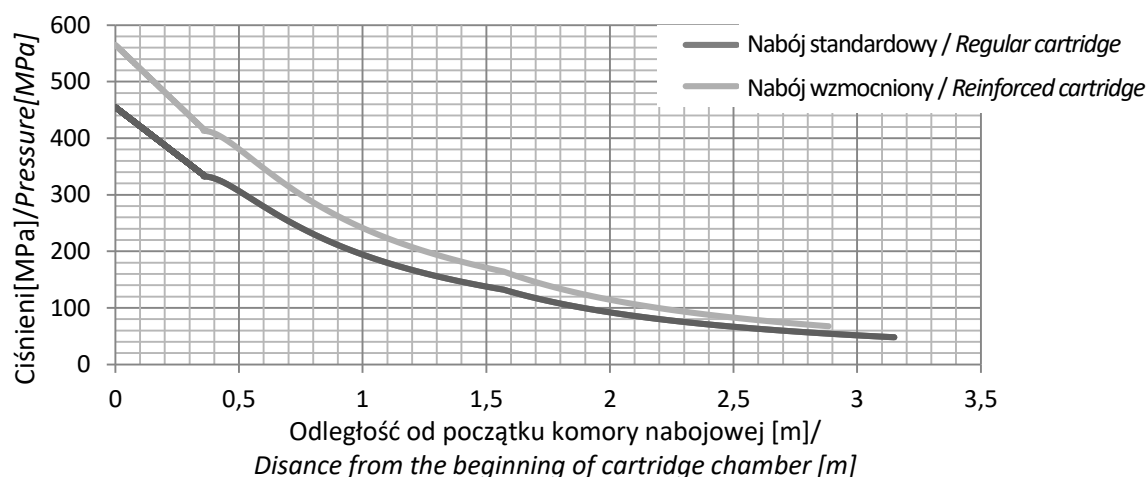
Analogicznie jak dla amunicji bojowej, również dla naboju wzmocnionego wyznaczono krzywą maksymalnego ciśnienia gazów prochowych działającego na ścianki lufy. Przy czym w tym przypadku wartość ciśnienia maksymalnego wynosiła 520 MPa – odpowiada ono wartości podawanej przez dokumentację technologiczną 35 mm armaty KDA. Otrzymane krzywe ciśnień przedstawiono na rysunku 1. Dane wejściowe do programu rozwiązującego

The chart was prepared under the assumption that the maximal pressure of powder gases acting on the barrel walls within the section between the barrel inlet plane and the place of the highest pressure is subjected to linear changes from the value of pressure acting on the base of cartridge chamber to the value of pressure acting on the projectile base. In the remaining part of the barrel the pressure equals to that acting on the projectile base.

The curve of maximal pressure of powder gases acting on the barrel walls was prepared for the boosted round in the same way as for the service ammunition. But in this case the value of maximal pressure was equal to 520 MPa – it corresponds to the value included in technical specification of 35 mm KDA gun. The received curves are shown in figure 1. Input data for

problem główny balistyki wewnętrznej nie różni się od podanych wcześniej dla naboju bojowego, z wyjątkiem zastosowania zwiększonej masy pocisku (600 g) oraz ładunku miotającego (350 g).

the computer code used for solving the main question of internal ballistics are the same as for the live cartridge apart the increased mass of projectile (600 g) and propelling charge (350 g).



Rys. 1. Krzywe maksymalnego ciśnienia działającego na ścianki lufy
Fig. 1. Curves of maximal pressure acting on the barrel walls

W oparciu o uzyskane wyniki wybrano przekroje, dla których przeprowadzono analizę naprężeń w ściance lufy (rys. 2). Wykonane obliczenia umożliwiły również wyznaczenie ciśnienia działającego w danym przekroju. Przekrój pierwszy (H-H) wybrano ze względu na występowanie największych naprężeń natomiast przekrój drugi (I-I) to miejsce, w którym znajduje się dno pocisku w momencie oddziaływania największego ciśnienia. Trzeci przekrój pokazany został jedynie w celach poglądowych. Na podstawie wzoru (8) obliczono teoretyczny promień odkształcenia w funkcji odległości od płasku wlotowego lufy, wyniki zaznaczono na rys. 2 kolorem czerwonym.

3. Wyznaczenie rozkładu naprężeń w lufie poddanej samowzmocnieniu z użyciem naboju o podwyższonym ciśnieniu

W związku z dużą zmiennością obciążeń w poszczególnych przekrojach lufy oraz dynamiką zjawiska strzału z armaty przeciwlotniczej, wyznaczenie stanu naprężeń jest zadaniem skomplikowanym. W pracy uproszczono obliczenia poprzez przeanalizowanie problemu jedynie w wybranych

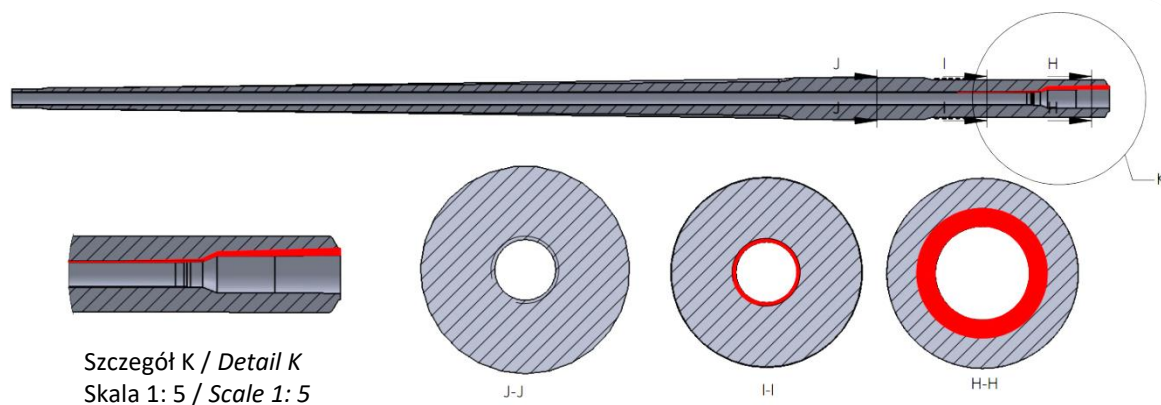
Basing on received results the cross-sections were selected for preparing an analysis of stresses within the barrel's wall (Fig. 2). Performed calculations gave also a possibility for establishing the pressure acting in a specific cross-section. The first cross-section (H-H) was selected for the existence of the highest stresses and the second cross-section (I-I) is the place of projectile base location when the greatest pressure occurs. Third cross-section is shown only for presentation reasons. Basing on formula (8) a theoretical radius of the strain was calculated as a function of distance from the barrel inlet plane and the results are marked in red colour in Fig. 2.

3. Identification of Field of Stresses in a Barrel Subjected to Self-hooping by Overpressure Cartridge

Identification of the state of stresses is a complex assignment as there are large changes of loads in particular cross-sections of the barrel during the dynamics of firing with the anti-aircraft gun. In the paper the calculations were simplified by considering the problem only in selected cross-sections

przekrojach, w których założono istnienie płaskiego stanu naprężenia. Założono, że lufa obciążona jest jedynie ciśnieniem wewnętrznym. Pominięto wpływ zastosowania łuski oraz sił osiowych występujący podczas strzału.

and it was assumed that the field of stresses has a plane character there. It was assumed that the barrel is loaded exclusively by the internal pressure. Any impact of the cartridge case used and axial forces at firing was omitted.



Rys. 2. Przekrój lufy 35 mm armaty KDA z zaznaczeniem analizowanych przekrojów oraz obszaru odkształconego plastycznie przez amunicję do samowzmacniania
Fig. 2. Cross-section of the barrel for 35 mm KDA gun with markings of analysed cross-sections and a plastically strained area caused by self-strengthening ammunition

Obliczenia analityczne stanu naprężeń oparto o zależności przedstawione w publikacjach [4] i [5]. Wyprowadzając wzory tam zawarte zastosowano model zakładający, że materiał lufy jest izotropowy oraz sprężysto-idealnie plastyczny [6]. Próbę obliczenia stanu naprężeń z uwzględnieniem nieliniowości materiału podano m.in. w opracowaniu [7]. Jednak publikacja ta również zakłada uproszczenia np. liniowe umacnianie materiału.

W związku z niedoskonałością analitycznych metod wyznaczania stanu naprężeń w ścianie lufy wzmocnionej, zastosowano również metodę elementów skończonych za pośrednictwem programu ANSYS 17.2. Nowoczesne oprogramowanie CAE umożliwia zastosowanie modelu materiałowego, uwzględniającego nieliniowości w krzywej rozciągania oraz efekt Bauschingera, który może mieć istotny wpływ na proces samowzmacniania. Możliwe jest również rozpatrzenie wpływu dynamiki zjawiska strzału. W przeprowadzonych obliczeniach numerycznych założono występowanie płaskiego stanu naprężenia oraz pominięto wpływ łuski oraz sił osiowych.

Pierwszy analizowany przekrój (H-H) znajduje się w odległości 10 cm od początku

Analytical calculations for the state of stresses were based on relations presented in publications [4] and [5]. These formulae were prepared by deployment of a model assuming that material of the barrel is isotropic with elastic-ideal plasticity [6]. An attempt to calculate a state of stresses for non-linear material is included above all in [7]. But that publication also assumes some simplifications e.g. the linear strengthening of the material.

Because of some imperfections connected with analytical methods used for establishment of the state of stresses in the wall of strengthened barrel the method of finite elements was also used through ANSYS 17.2 computer code. Modern package of CAE software can deal with material models considering the nonlinearities in tension curves and the Bauschinger's effect which may also affect the self-hooping process significantly. It is also possible to regard the dynamics of firing phenomenon. Numerical calculations assume that the field of stresses exists in a plane and the influence of cartridge case and axial forces is not considered.

The first analysed cross-section (H-H) is

lufy, gdzie ścianki łuski są na tyle cienkie, aby można było pominąć ich wpływ na nośność. Ciśnienie w tym przekroju dla naboju bojowego wynosi maksymalnie ok. 450 MPa. Z wykorzystaniem wzoru [8] obliczono promień odkształcenia powstałego na skutek działania ciśnienia wytwarzanego przez amunicję bojową 35x228 mm TP-T. Następnie na podstawie zależności (8-12) wyznaczono rozkład naprężeń w przekroju lufy podczas działania tego ciśnienia.

placed 10 cm from the beginning of barrel where the walls of the case are sufficiently thin to omit their influence. In this cross-section the pressure for service cartridge is maximum ca. 450 MPa. The radius of strain caused by action of pressure created by service ammunition 35x228 mm TP-T was calculated from formula [8]. Then the field of stresses within the barrel cross-section was determined for this pressure by using relations (8-12).

$$p = \frac{R_{pl}}{\sqrt{3}} \cdot \left[2 \ln \left(\frac{r_a}{r_w} \right) + \frac{r_a^2 - r_z^2}{2r_z^2} \right] \quad (8)$$

$$\delta_y(r) = -p_b + \frac{2R_{pl}}{\sqrt{3}} \left[1 + \ln \left(\frac{r}{r_w} \right) \right] \quad (9)$$

$$\delta_r(r) = -p_b + \frac{2R_{pl}}{\sqrt{3}} \left[\ln \left(\frac{r}{r_w} \right) \right] \quad (10)$$

Dla $r \in (r_w, r_a)$

$$\delta_y(r) = \frac{R_{pl}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{r_a^2}{r_z^2} \left[1 + \frac{r_z^2}{r^2} \right] \quad (11)$$

$$\delta_r(r) = \frac{R_{pl}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{r_a^2}{r_z^2} \left[1 - \frac{r_z^2}{r^2} \right] \quad (12)$$

Dla $r \in (r_a, r_z)$

gdzie:

$\delta_r(r)$ – naprężenia promieniowe
 w funkcji promienia

$\delta_y(r)$ – naprężenia obwodowe
 w funkcji promienia

R_{pl} – granica plastyczności

r_a – promień odkształcenia plastycznego

r_z – promień zewnętrzny

where:

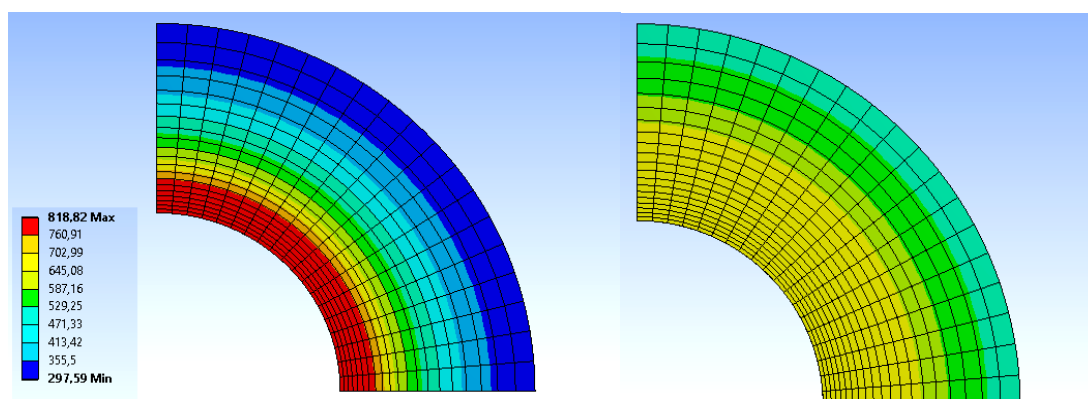
$\delta_r(r)$ – radial stresses in function of
 radius

$\delta_y(r)$ – perimeter stresses
 in function of radius

R_{pl} – plasticity limit

r_a – radius of plastic strain

r_z – external radius



Rys. 3. Porównanie rozkładu naprężeń zredukowanych podczas strzelania amunicją bojową z lufy przepiężonej (prawa strona) oraz lufy niewzmocnionej (lewa strona)

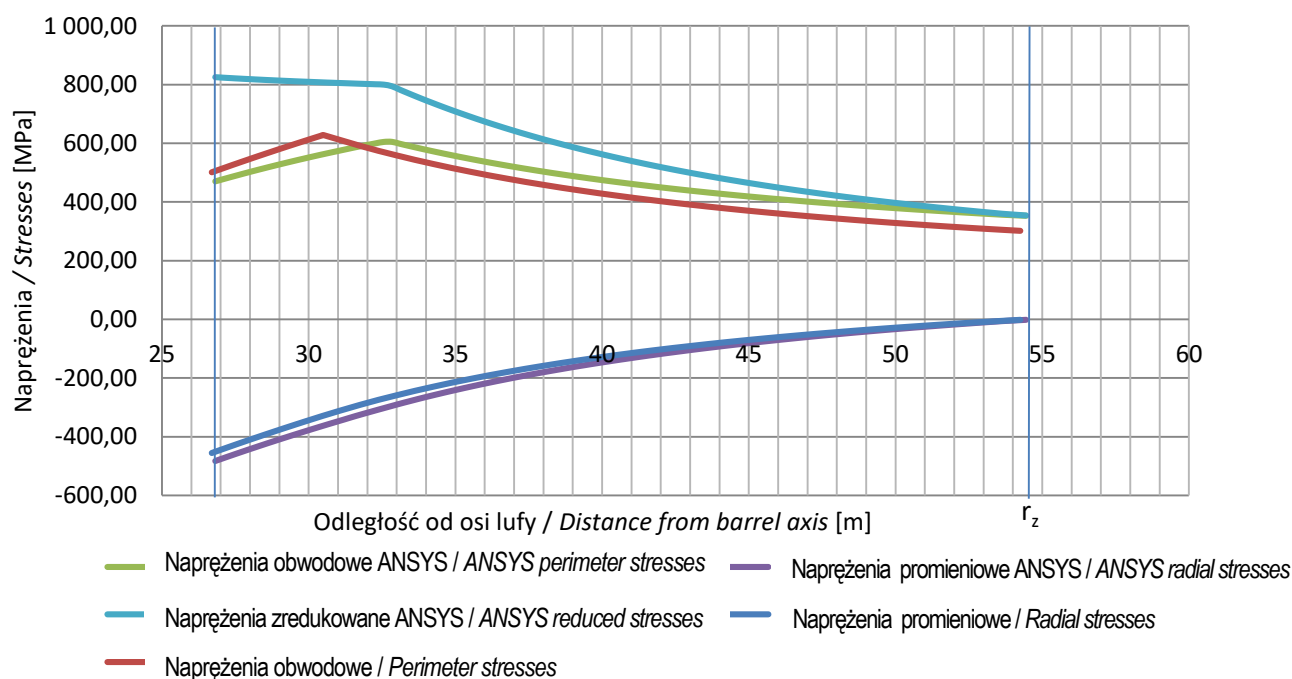
Fig. 3. Comparison of fields of reduced stresses at firing with service ammunition for overstressed barrel (on the right side) and non-reinforced barrel (on the left)

Lufa 35 mm armaty przeciwlotniczej KDA wykonana jest ze stali 32CrMoV1210. Wymagania zawarte w dokumentacji technologicznej podają minimalną wartość granicy plastyczności wynoszącą 735 MPa. Dalsze obliczenia przeprowadzono jednak opierając się o krzywą rozciągania stali, którą uzyskano dzięki uprzejmości HSW.S.A., gdzie granica plastyczności wynosi 829 MPa.

Analizę powtórzono z wykorzystaniem programu ANSYS 17.2. W programie odwzorowano krzywą rozciągania stali 32CrMoV1210 oraz geometrię rozpatrywanego przekroju. W celu zwiększenia dokładności obliczeń analizę przeprowadzono jedynie dla wycinka lufy przy zastosowaniu podpór typu „frictionless support” oraz obciążeniu ciśnieniem wewnętrznego wycinka ścianki. Poprawność takiego rozwiązania sprawdzono poprzez przeprowadzenie uproszczonej symulacji dla pełnego cylindra. Zestawienie wyników uzyskanych na podstawie wzorów oraz programu ANSYS przedstawiono na rysunku 4.

The barrel of 35 mm antiaircraft KDA gun is made from 32CrMoV1210 steel. Technical specifications give 735 MPa as the minimal value of plasticity limit. But further calculations were performed on the basis of a steel tension curve that was received by the courtesy of HSW.S.A. (Stalowa Wola Steel Works) where the limit of plasticity is 829 MPa.

The analysis was repeated by using computer code ANSYS 17.2. The tension curve for the steel 32CrMoV1210 and the geometry of considered cross-section were reproduced in the code. In order to increase the accuracy of calculations the analysis was carried out only for a fragment of the barrel by deployment of „frictionless support” and by applying the pressure load against the internal fragment of the wall. Correctness of such solution has been checked by a simplified simulation for a complete cylinder. Comparison of results received on the base of formulae and ANSYS computer code is shown in figure 4.



Rys. 4. Naprężenia w przekroju H-H przed samowzmoocnieniem, występujące podczas strzelania amunicją standardową 35x228 TP-T

Fig. 4. Stresses in cross-section H-H occurring at firing with regular ammunition 35x228 TP-T before self-strengthening

Kolejnym krokiem obliczeń było wyznaczenie naprężeń szczałtkowych, pozostających w lufie po usunięciu ciśnienia przepiężającej-

In the next step the residual stresses left in the barrel after the ending of overstraining pressure surge were calculated. The calcula-

go. Obliczenia oparto o wzory (13-16).

tions were based on expressions (13-16).

$$\delta_y(r) = \frac{2R_{pl}}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{r_a^2 + r_z^2}{r_z^2} + \ln\left(\frac{r}{r_a}\right) - \left[\frac{r_w^2}{r_z^2 - r_w^2} \right] \left[\frac{r_z^2 + r_a^2}{2r_z^2} + \ln\left(\frac{r_a}{r_w}\right) \right] \left(1 + \frac{r_z^2}{r^2} \right) \right\} \quad (13)$$

$$\delta_r(r) = \frac{2R_{pl}}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{r_a^2 + r_z^2}{r_z^2} + \ln\left(\frac{r}{r_a}\right) - \left[\frac{r_w^2}{r_z^2 - r_w^2} \right] \left[\frac{r_z^2 + r_a^2}{2r_z^2} + \ln\left(\frac{r_a}{r_w}\right) \right] \left(1 - \frac{r_z^2}{r^2} \right) \right\} \quad (14)$$

Dla / For $r \in (r_a, r_z)$

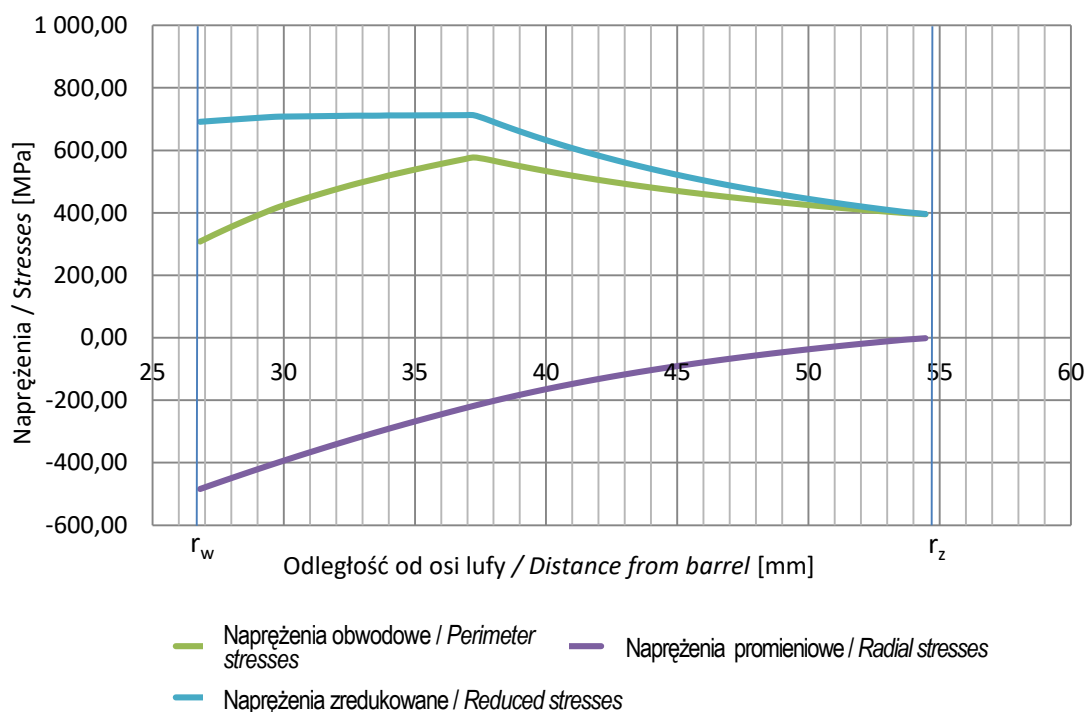
$$\delta_y(r) = \frac{2R_{pl}}{\sqrt{3}} \left\{ \left[1 + \frac{r_z^2}{r^2} \right] \left[\frac{r_a^2}{2r_z^2} + \frac{r_w^2}{r_z^2 - r_w^2} \left(\frac{r_a^2 - r_z^2}{2r_z^2} - \ln\left(\frac{r_a}{r_w}\right) \right) \right] \right\} \quad (15)$$

$$\delta_r(r) = \frac{2R_{pl}}{\sqrt{3}} \left\{ \left[1 - \frac{r_z^2}{r^2} \right] \left[\frac{r_a^2}{2r_z^2} + \frac{r_w^2}{r_z^2 - r_w^2} \left(\frac{r_a^2 - r_z^2}{2r_z^2} - \ln\left(\frac{r_a}{r_w}\right) \right) \right] \right\} \quad (16)$$

Dla / For $r \in (r_w, r_a)$

Końcowym etapem analizy było wyznaczenie naprężeń powstających w rozpatrywanym przekroju na skutek ponownego strzału amunicją bojową. Obliczenia wykonano za pomocą programu ANSYS, a wyniki przedstawiono na rysunku 5. Obniżenie naprężeń maksymalnych na wskutek samowzmocnienia zobrazowano na rysunku 3.

Identification of stresses generated in a considered cross-section by firing a new shot with service ammunition was a final stage of analysis. Calculations were performed by using ANSYS computer code and results are shown in figure 5. Reduction of maximal stresses caused by the self-strengthening is shown in figure 3.



Rys. 5. Naprężenia w przekroju H-H po samowzmocnieniu, występujące podczas strzału z wykorzystaniem amunicji bojowej 35x228 TP-T

Fig. 5. Stresses in cross-section H-H occurring during the shot with service ammunition 35x228 TP-T after the self-strengthening

Przedstawione wyniki obliczeń uzyskane za pomocą metody elementów skończonych (MES) zbliżone są do modelu obliczeniowego przedstawionego w [8], który został potwierdzony wynikami z eksperymentów przeprowadzonych na przewodach luf wykonanych ze stali A723 o granicy plastyczności 1022 MPa oraz poddanych samowzmocnieniu metodą hydrostatyczną. Analizując przedstawione dane można zauważyć obniżenie naprężeń maksymalnych. Jednak uzyskany tam promień odkształcenia nie jest optymalny. W literaturze często podawaną wartością promienia odkształcenia plastycznego jest wartość pomiędzy $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ grubości ścianki lufy. W pracy [9] zawarto wzór (17) pozwalający w prosty sposób oszacować optymalny promień odkształcenia plastycznego. Wzór ten został wyrowadzony przy założeniu, że maksymalne naprężenia podczas oddziaływania ciśnienia roboczego powinny znajdować się na granicy sprężysto-plastycznej w ściance. Obliczony w ten sposób promień odkształcenia dla przekroju H-H wynosi 43 mm. W celu wywołania żądanego odkształcenia należy poddać ściankę lufy działaniu ciśnienia 635 MPa. Wykonano również analogiczne obliczenia przy założeniu użycia materiału o najniższej dopuszczalnej granicy plastyczności, tj. 735 MPa. W wyniku tych obliczeń stwierdzono, że promień uplastycznienia materiału podczas działania ciśnienia generowanego przez amunicję do samowzmocnienia wynosi 43 mm, co stanowi wartość jedynie 3 mm niższą od wyliczonej wartości optymalnej. Wartość odkształceń obliczonych w tym przypadku pokrywa się z maksymalną wartością odkształceń zakładanych przez dokumentację technologiczną.

gdzie:

r_{opt} - promień optymalny,
 p - ciśnienie robocze

Obliczono również naprężenia dla przekroju I-I, jednak ze względu na fakt wystąpienia bardzo niewielkich odkształceń plastycznych (0,5 mm) nie przedstawiono wyników tych obliczeń w pracy.

Presented results of finite elements method (FEM) calculations fall close with the calculating model presented in [8] which was confirmed by the results of experiments carried out on barrels made from A723 steel having the plasticity limit of 1022 MPa and subjected to self-strengthening by a hydrostatic method. The analysis of presented data shows that the maximal stresses are reduced. But the radius of the straining is not optimal in that case. Typical value of plastic strain radius given in literature is a value between $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ of barrel wall thickness. In publication [9] is presented expression (17) for a simple estimation for the radius of plastic strain. The expression was deducted at the assumption that the maximal stresses during the action of working pressure have to be in the elastic-plastic border inside the wall. The radius of the straining calculated in this way for H-H cross-section is 43 mm. In order to enforce demanded straining the wall of the barrel has to be subjected to pressure of 635 MPa. Similar calculations were performed at the assumption that the material possessing the lowest acceptable limit of plasticity, i.e. 735 MPa, is used. In effect of these calculations it was stated that the radius of material plasticisation caused by the pressure generated by the self-strengthening ammunition is 43 mm what is only by 3 mm lower value than the calculated optimal one. The value of deformations calculated in this case is identical to maximal value of strains included in technological specifications.

$$r_{opt} = r_w e^{\sqrt{3} \frac{p}{2R_{pl}}} \quad (17)$$

where:

r_{opt} – optimal radius,
 p – working pressure

The stresses were also calculated for cross-section I-I but as very small plastic strains have happened (0.5 mm) the results are not included in the paper.

4. Wnioski

4.1. Wnioski z analizy stanu naprężeń

Sposób zamocowania lufy w dziale, współpraca łuski z komorą naboju oraz dynamika zjawiska to czynniki, które nie są uwzględnione na tym etapie obliczeń, jednak mogą znacząco ograniczyć efekt samowzmocnienia. Jedynym elementem działającym korzystnie w tym przypadku jest temperatura. W przypadku, w którym stosowana amunicja nie wywoła wymaganego odkształcenia pozytywny skutek może przynieść ponowienie procesu, lub wcześniejsze „rozgrzanie” działa np. z wykorzystaniem amunicji standardowej.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń, można stwierdzić, że za pomocą naboju do samowzmocnienia możliwe jest osiągnięcie zadowalających wyników wzmocnienia jedynie w obszarze komory naboju. Związane jest to z charakterem przebiegu krzywej ciśnienia oraz zdecydowanie mniejszą grubością ścianki komory naboju w porównaniu z resztą lufy. Przy zastosowaniu samowzmocnienia w armacie przeciwlotniczej taki obszar odkształceń plastycznych jest akceptowalny. Wynika to z faktu, że armata przeciwlotnicza, oprócz dużej wytrzymałości, powinna również mieć odpowiednią bezwładność termiczną, umożliwiającą strzelanie długimi seriami z dużą szybkostrzelnością. Stosując lufę tego kalibru w bojowym wozie piechoty dobrym rozwiązaniem wydaje się połączenie metody balistycznej z metodą mechaniczną. Umożliwiłoby to wykonanie samowzmocnienia na całej długości lufy, a co za tym idzie zmniejszenie masy działa. Byłoby to rozwinięciem patentu [10], dotyczącego połączenia metody hydraulicznej z mechaniczną. Jednak ograniczenia wynikające z dokładności wykonania zarówno przewodu lufy jak i wolframowego trzpienia mogą uniemożliwić wykorzystanie metody mechanicznej w armatach średniego kalibru i mniejszych.

Warto zauważyć, że uzyskany podczas obliczeń promień odkształcenia nie jest optymalny nawet przy założeniu uproszczonego modelu obliczeniowego oraz minimalnej granicy plastyczności akceptowalnej przez wymagania techniczne. Aby zoptymalizować

4. Conclusions

4.1. Conclusions on Stress Field Analysis

Such factors as the way of barrel fixing in the gun, mutual actions between the cartridge case and the cartridge chamber, and the dynamics of the phenomenon may significantly reduce the effect of self-strengthening but they were not considered on this stage of calculations. Temperature is the only one beneficial factor in this case. In cases when the used ammunition fails to produce the required strains a positive result may be achieved through a repeated action or preheating of the gun by using regular ammunition.

On the strength of performed calculations it may be stated that the self-strengthening cartridge may be used successfully only within the area of the cartridge chamber. It is connected with the character of changes for the pressure curve and with a significantly thinner wall of the cartridge chamber than the rest of the barrel. Such area of elastic strains is acceptable at application of the self-strengthening for the antiaircraft gun. It results from the fact that the antiaircraft gun has to possess both the high strength and thermal inertia providing the firing in long series with the high rate of fire. For the deployment of this calibre barrel in an infantry combat vehicle a combination of ballistic and mechanical methods seems to be a good solution. It would provide the self-strengthening along the whole length of the barrel and reduction of gun weight in result. It would be a development of patent [10] concerning the combination of hydraulic and mechanical methods. But the limitations caused by the accuracy of manufacturing both the bore of the barrel and the tungsten mandrel may prevent the use of the mechanical method in guns of medium calibre and smaller.

It is worth to notice that the radius of the strain received in calculations is not optimal even if the simplified model of calculations and minimal limit of plasticity acceptable by technical specifications are used. The barrels made from steel

proces produkcji luf wykonanych ze stali 32CrMoV1210, należałoby poddać je działaniu ciśnienia o wartości przekraczającej 635 MPa. Zbudowanie takiej amunicji jest możliwe, przy zastosowaniu prochu o innych, niż przyjęte do modelowania, charakterystykach geometrycznych. Jednak wraz ze wzrostem gęstości ładowania oraz energetyczności prochu wzrasta też różnica pomiędzy ciśnieniem oddziaływującym na dno pocisku, a ciśnieniem oddziaływującym na dno komory naboju. Wpływa to niekorzystnie na proces samowzmacniania. Przyspieszone jest również zużycie luf balistycznych, wykorzystywanych do produkcji amunicji oraz występuje podwyższone ryzyko wystąpienia wypadku. Wykonane obliczenia wykazują, jak ważne są właściwości materiału stosowanego do produkcji lufy. Kluczową rolę odgrywa tu granica plastyczności użytej stali, a wzrost tej własności powoduje zmniejszenie użyteczności metody balistycznej.

Uwzględniając fakt wykorzystywania przez HSW S.A. metody hydraulicznej do wzmacniania 155 mm luf armatohaubic samobieżnych KRAB, stosownym wydaje się zaadaptowanie tej techniki do luf mniejszego kalibru. Jednak adaptacja powinna być poprzedzona szeregiem badań zmęczeniowych. Związane jest to ze skomplikowanym procesem zużycia lufy armatniej, obejmującym nie tylko zużycie zmęczeniowe, ale i erozyjne. Zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej lufy nie musi oznaczać wydłużenia jej przydatności do użycia. Warto zwrócić uwagę na fakt zmniejszonego zużycia erozyjnego lufy przepiężonej, co jest spowodowane mniejszymi odkształceniami na powierzchni wewnętrznej występującymi podczas strzału. Do zastosowania metody hydraulicznej, użycie amunicji do samowzmacniania również byłoby wskazane. Korzystnie wpłynęłoby to na rozkład naprężeń oraz byłoby doskonałym testem jakości wykonania lufy.

4.2. Wnioski dotyczące konstrukcji naboju do samowzmacniania

Konstruując amunicję do samowzmacniania szczególną uwagę należy zwrócić na występujące różnice ciśnienia pomiędzy dnem

32CrMoV1210 would have been subjected to pressures above 635 MPa in order to optimise the process of manufacture. Development of such ammunition is possible if a powder with geometrical characteristics different than accepted for modelling is deployed. But with increasing the density of loading for the powder and its energetic performance there is also an increase of difference between the pressure acting to the base of projectile and the base of the cartridge chamber. It affects negatively the process of self-strengthening. Moreover the wearing of ballistic barrels used for production of ammunition and the risk of an incident are also increased. Performed calculations show the importance of characteristics for material used in barrel production. The key role is played by the limit of plasticity of the used steel and the increase of this value diminishes the usefulness of the ballistic method.

Considering the fact that the HSW S.A. uses a hydraulic method for strengthening the barrels of 155 mm self-propelled howitzers KRAB it seems reasonable to adapt this technique for lower calibre barrels. But such adaptation has to be preceded by a series of fatigue tests. It is connected with a sophisticated process of wearing for the gun barrels consisting not only of the fatigue but also the erosion wear. Any increase of barrel fatigue resistance not necessarily means an increased length of its service usefulness. It is worth to note that the overstressed barrel is less susceptible to the erosive wear what is caused by lower strains occurring on the internal surface at firing. The use of ammunition for self-strengthening would be also recommended when the hydraulic method was deployed. It could affect positively the field of stresses and create a perfect test of barrel workmanship quality.

4.2. Conclusions Concerning the Design of Self-strengthening Cartridges

In designs of self-strengthening ammunition special attention has to be paid on pressure differences between the base

komory naboju a dnem pocisku. Aby wzmocnienie komory naboju było bardziej równomierne na całej jej długości, konieczne jest zwiększenie masy pocisku. Dzięki większej bezwładności pocisku zmniejszy to różnicę ciśnień w obszarze pomiędzy tylnym płaskiem lufy, a punktem maksymalnego ciśnienia. Zastosowanie cięższego pocisku może umożliwić również użycie standardowego prochu wykorzystywanego w amunicji 35x228 mm TP-T. Przeprowadzone obliczenia wskazują również, że dla materiału stosowanego do produkcji 35 mm luf w HSW S.A. lepsze efekty można uzyskać przy zastosowaniu amunicji generującej ciśnienie maksymalne większe niż 520 MPa. Jednym ze sposobów osiągnięcia podwyższonych ciśnień w tego rodzaju amunicji może być zastosowanie ładunku miotającego, składającego się z mieszanki prochów stosowanych w amunicji 35x228 mm TP-T oraz FAPDS-T. Jednak wprowadzenie takiej amunicji musiałoby być poprzedzone szeregiem testów w zakresie odkształceń powstałych w komorze naboju oraz badaniami defektoskopowymi, które ukazywałyby wystąpienie ewentualnych pęknięć.

Na podstawie przedstawionych powyżej danych można łatwo zauważyć, jak ważny jest wpływ własności materiałowych stali na efektywność procesu samowzmacniania. Aby maksymalnie zwiększyć wytrzymałość zmęczeniową lufy, amunicja powinna być dopasowana do charakterystyk materiału lufy aktualnie używanego w produkcji. Dobieranie ciśnienia przepiężania do właściwości stali powinno być poprzedzone zbudowaniem modelu obliczeniowego, pozwalającego uwzględnić wpływ dynamiki strzału na odkształcenia występujące w lufie.

W amunicji tego typu ważna jest wysoka powtarzalność ciśnienia generowanego podczas strzału. Publikacje [11] i [12] ukazują jak ważny wpływ na te parametry ma rodzaj zastosowanego zapłonika. Pożądane jest użycie zapłoników inicjujących ładunek miotający w środkowej części komory łuski. Uzyskany w taki sposób zapłon przyczyni się do zmniejszenia wspomnianej różnicy ciśnień oraz poprawi powtarzalność przebiegu ciśnień balistycznych. Nie bez znaczenia pozostaje cena jednostkowa amunicji. Nabój powinien zawierać

of the cartridge chamber and the base of the projectile. In order to get more uniform strengthening of the cartridge chamber along its length an increase of projectile's mass is needed. For a greater inertia of the projectile the difference of pressures in the space between the barrel rear plane and the point of maximal pressure is diminished. The regular powder of ammunition 35x228 mm TP-T may be also used when a heavier projectile is deployed. Performed calculations indicate that better results may be received when the ammunition generating greater pressures than 520 MPa is used for the material of 35 mm barrels manufactured in HSW S.A. Deployment of a propelling charge containing the mixture of powders used in 35x228 mm TP-T and FAPDS-T ammunition may be a solution for reaching increased pressures in such ammunition. Anyway the application of such ammunition has to be preceded by a series of tests for the strains occurring in the cartridge chamber and defectoscopic tests to find out possible cracks.

On the grounds of information presented above it can be noticed that the material properties of steel have significant impact on the effectiveness of self-strengthening process. In order to increase the barrel fatigue strength the ammunition has to be fitted to the characteristics of barrel material currently used in the production. Matching the value of overpressure to the properties of the steel has to be preceded by preparation of a calculating model for considering the impact of the dynamics of firing into the deformations generated in the barrel.

High repeatability of pressure generated at firing is of a great importance for this type of ammunition. Publications [11] and [12] show how the type of an igniter affects these parameters. It is recommended to use the igniters which initiate the propelling charge in the central part of cartridge case chamber. Such way of ignition may reduce the said difference of pressures and improve the repeatability of changes for ballistic pressures. The cost of ammunition is also important. The car-

rać jak największą liczbę elementów z amunicji produkowanej seryjnie. Konieczność budowy specjalnych narzędzi lub zastosowanie skomplikowanych procesów technologicznych w połączeniu z jednostkową produkcją mogłoby istotnie zwiększyć cenę naboju do poziomu, w którym jego zastosowanie byłoby nieopłacalne. Amunicja ta powinna też charakteryzować się łatwą rozróżnialnością od wzorów amunicji bojowej, w celu zminimalizowania możliwości użycia jej w niewłaściwy sposób.

tridge has to contain a possibly great number of components taken from ammunition in serial production. A need for preparing special tools or deployment of sophisticated technological processes in connection with a low number of manufactured items would increase the cost of the cartridge to a significant level where its application could be unprofitable. Such ammunition has to be also easily distinguished from the types of service ammunition to avoid its wrong use.

Literatura / Literature

- [1] S. Torecki, *Balistyka wewnętrzna*, Warszawa 1980,
- [2] E. Wassermann, *Zasady projektowania broni artyleryjskiej*, Warszawa 1968,
- [3] L. Jedlicka, S. Beer, *Pressure Distribution in the Space Behind a Projectile, Advances in Military Technology 1/2017, University of Defence, Brno, Czech Republic*,
- [4] E.K. Łarman, *Projektowanie sprzętu artyleryjskiego, Część I*, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1955
- [5] P. Lazzarin, P. Livieri, *Different Solutions for Stress and Strain Fields in Autofrettaged Thick-walled Cylinders*, International Journal of Pressure Vessels and Piping 71, str. 231-238, 1997,
- [6] R. Hill, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford University Press Inc., New York, 1950,
- [7] R. Wiśniewski, A.J. Rostocki, K. Rajski, W. Bock, *Wysokie ciśnienia, wytwarzanie, pomiary, zastosowania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980,
- [8] J.H. Underwood, *Kendall Analysis of Cannon Pressure Vessels*, Technical Report ARWSB-TR-12006, April, 2012,
- [9] Amran Ayob, M. Kabashi Elbasheer, *Optimum Autofrettage Pressure in Thick Cylinders*, Journal Mechanical, December 2007, No. 24, str. 1-14,
- [10] A.R. Parker, *Patent nr. US 7,818,986 B1*, 2010,
- [11] A.W. Horst P.J. Conroy, *Flame-Spreading Processes in a Small-Caliber Gun*, Army Research Laboratory, 2007,
- [12] Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground, *Pressure-Flame Spread Correlations in the Simulator Ignition Studies of 105-mm Tank Charges*, 1988.

Projekt nr O ROB 0046 03 001 dofinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków na naukę w latach 2012-2015

Project O ROB 0046 03 001 co-financed by the National Centre for Research and Development from the science funds within 2012-2015

