



**OPTYMALIZACJA UŻYCIA ZASOBU PRACY LUF ARMAT
PRZECIWLOTNICZYCH KALIBRU 35 MM W ASPEKCIE
EFEKTYWNOŚCI NIEZAWODNOŚCIOWEJ I EKONOMICZNEJ**
**OPTIMIZATION OF THE USAGE OF 35 MM ANTI-AIRCRAFT GUN
BARRELS IN TERMS OF RELIABILITY AND ECONOMIC EFFICIENCY**

Wojciech FURMANEK, *wojciech.furmanek@wat.edu.pl*, ORCID: 0000-0003-3492-639X
Grzegorz LEŚNIK, *grzegorz.lesnik@wat.edu.pl*, ORCID: 0000-0003-1229-335X
Ryszard WOŹNIAK, *ryszard.wozniak@wat.edu.pl*, ORCID: 0000-0002-5555-3126
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 10.5604/01.3001.0054.1484

Streszczenie: W artykule sformułowano podstawy naukowe optymalizacji użycia zasobu pracy luf armat przeciwlotniczych kalibru 35 mm, umożliwiające zwiększanie ich trwałości o 25÷100% przy jednoczesnej poprawie wskaźników efektywności operacyjnej. Opracowanie nowego podejścia w ocenie trwałości i skuteczności tych luf wynika z aktualnych rozwiązań i możliwości systemów nawigacyjno-celowniczych, pocisków nowej generacji (amunicji programowalnej z podpociskami), zastosowania pomiaru prędkości wylotowej w czasie rzeczywistym (przy zachowaniu lub nawet wzroście dotychczasowej prędkości wylotowej i szybkostrzelności), zwiększających prawdopodobieństwo trafiania celów pływających, nadbrzeżnych i latających (zwłaszcza BSP i RAM). Wykazano, że w ocenie trwałościowo-operacyjnej tej klasy armat (w tym efektywności ekonomicznej) nie decydują tylko wskaźniki oparte na szybkostrzelności, prędkości wylotowej czy serii sekundowej. Istotniejsze obecnie znaczenie ma możliwość zmniejszania tempa procesów destrukcyjnych luf, wynikająca ze skracania długości serii strzelania. Wykazano, że przy krótkich seriach znacząco zmniejsza się zużycie luf oraz intensywność uszkodzeń mechanizmów przygotowania armaty do powtórnego wystrzału. Ogranicza się również zjawisko przegrzewania luf, a tym samym poprawiają się wskaźniki operacyjne (średni czas do uszkodzenia, czas ciągłej pracy, wykorzystanie amunicji), co znacząco obniża koszt eksploatacji armat.

Abstract: The scientific basis for optimizing the use of work resources of 35 mm anti-aircraft gun barrels, enabling their durability to be increased by 25÷100% while improving operational efficiency indicators are presented in this paper. The development of a new approach to assessing the durability and effectiveness of these barrels results from current solutions and capabilities of navigation and targeting systems, new generation projectiles (programmable ammunition with sub-projectiles) and real-time muzzle velocity measurement applications (while maintaining or even increasing the current muzzle velocity and rate of fire). This increases the probability of hitting floating, coastal and flying targets (especially UAVs and RAM). It has been shown that the durability and operational assessment of this class of guns (including economic efficiency) is not determined only by indicators based on the rate of fire, muzzle velocity or second burst of fire. What is now more important is the ability to reduce the rate of barrel destructive processes, resulting from the possibility of shortening the length of firing series. It has been shown that with short series, the barrels wear and the intensity of damage to the reload mechanisms are significantly reduced. The phenomenon of barrel overheating is also limited, and thus operational indicators are improved (average time to failure, continuous operation time, ammunition usage), which significantly reduces the cost of operating the guns.

Słowa kluczowe: mechanika, balistyka zewnętrzna, broń przeciwlotnicza, efektywność

1. Wstęp

Zwalczanie celów powietrznych z wykorzystaniem przeciwlotniczej broni lufowej cechowało się zazwyczaj niższą efektywnością w porównaniu do ich zwalczania z użyciem kierowanych pocisków raketowych. Aby ograniczyć to zjawisko i zwiększyć prawdopodobieństwo trafienia celu pociskami klasycznymi dążono do zwiększenia szybkostrzelności armat przeciwlotniczych, wydłużenia serii prowadzonego ognia oraz wykorzystania większej liczby armat, z których ogień ten prowadzono. Skutkowało to zużywaniem dużych ilości amunicji i powodowało szybkie zużywanie zasobu pracy luf. Pojęcie zasobu pracy jest zdefiniowane w normie [1] i w nowatorski sposób używane w analizach eksploatacyjnych [2, 3, 4]. Opracowanie nowoczesnych systemów nawigacyjno-celowniczych oraz nowej generacji pocisków (z podpociskami, podkalibrowych) oraz nowoczesnych i szybkich metod badawczo-diagnostycznych w postaci pomiaru prędkości wylotowej pozwoliło wprowadzić możliwość programowania zapalników wystrzeliwanych pocisków przez urządzenia wylotowe, nakręcane na lufy armat. Otworzyło to nowe możliwości w postaci m.in. programowania zapalników po wylocie z lufy (w trakcie każdego wystrzału), w oparciu o aktualnie zmierzoną prędkość wylotową – co radykalnie poprawiło prawdopodobieństwo trafienia celu. Dodatkowym aspektem jest stosowanie szybkich i precyzyjnych mechanizmów naprowadzania armat (podniesieniowego i kierunkowego), które z jednej strony ograniczają błędy, zmniejszając celność broni, a z drugiej zapewniają przemieszczanie luf stosownie do ruchu celu. Powyższe rozwiązania pozwoliły na zwiększenie precyzji strzelania i w konsekwencji skrócenie

Keywords: mechanics, outer ballistics, anti-aircraft weapons, efficiency

1. Introduction

Fighting the aerial targets with the use of anti-aircraft barrel weapons was usually characterised by lower efficiency than with the use of guided missiles. In order to limit this effect and increase the probability of hitting a target by classical projectiles the rates of fire of anti-aircraft guns were increased with the numbers of shots in series, and the numbers of applied guns. As a result great amounts of ammunition were used and the barrels rapidly exhausted their operational resources. The notion of an operational resource is defined in standard [1] and is used in innovative ways at operational wearing analyses [2, 3, 4]. Development of modern navigating-aiming systems and a new generation of projectiles (with sub-projectiles, kinetic), and modern and quick methods of testing and diagnosis in the form of measurement of the muzzle velocity, allowed for programming the fuses of fired projectiles by the muzzle systems fixed into the gun barrels. It opened new possibilities for programming the fuses after leaving the muzzle (for each shot) on the basis of the muzzle velocity which was currently measured – what radically improved the probability of hitting the target. Additionally, there were applied rapid and precise mechanisms controlling the guns (elevation and bearing) which, firstly reduced the errors limiting the accuracy of guns, and secondly provided the movement of barrels to follow the displacement of target. The above mentioned solutions allowed for improvement of firing precision and in consequence for shortening the length of series what was followed by significant reliabilities of barrels and reduced consumption

długości serii, skutkujące uzyskaniem znacznych trwałości luf oraz zmniejszeniem zużycia amunicji [5]. Stosowanie długich serii (realizowane wcześniej) prowadziło do nieefektywnego zużywania zasobu pracy luf [6]. Szczególne znaczenie miało to dla dział kalibru 35 mm, gdyż zmiana obciążeń (termicznych i mechanicznych – zależna od długości serii) w trakcie strzelania powodowała większe zużywanie luf niż dla armat przeciwlotniczych kalibru 23 mm. Wprawdzie przy 23 mm działach dopuszczalna długość serii wywołująca naprężenie krytyczne w lufie jest znacznie większa niż przy armatach kalibru 35 mm, jednak ich efektywność strzelania jest zdecydowanie mniejsza, gdyż jednocześnie to nie długość serii decyduje o skuteczności strzelania, a rodzaj stosowanych pocisków (energia kinetyczna, wielkość ładunku bojowego) oraz jakość systemu nawigacyjno-celowniczego.

Armaty kalibru 35 mm wraz z ich nowoczesnym systemem nawigacyjno-celowniczym i pociskami nowej generacji stanowią nowoczesną broń, która wymaga osobnej analizy niezawodnościowej pokazującej jej zalety w stosunku do systemów przeciwlotniczych z armatami 23 mm (ZUR-23-2, ZSU-23-4). Niezbędnym jest zatem traktowanie zestawów przeciwlotniczych z 35 mm armatą jako precyzyjnych systemów ogniowych i nie wolno dla nich używać archaicznych sposobów ich użycia i oceny wartości bojowej, jak było to realizowane przy armatach kalibru 23 mm.

Wprowadzenie armat kalibru 35 mm zdecydowanie podniosło możliwości obrony przed bezzałogowymi statkami powietrznymi (BSP), nisko lecącymi pociskami manewrującymi (typu CRUISE) oraz zwalczania celów typu RAM (amunicja raketowa, do dział polowych i moździerzowa). Stosowanie do zwalczania tych celów systemów raketowych jest ekonomicznie nieuzasadnione, zwłaszcza że mają one zwykle niewielką jednostkę ognia

of ammunition [5]. The application of long series (applied earlier) brought about inefficient exhaustion of barrel operational resources [6]. The question was of a special importance for 35 mm guns as they suffered significantly greater wearing of barrels at the change of loads (thermal and mechanical – depending on the length of a series) during shooting than 23 mm antiaircraft guns. Even if for 23mm guns the acceptable length of series effecting critical stresses in the barrel is much longer than for 35mm guns, the efficiency of fire is decisively lower as now the length of a series does not decide about the fire efficiency, but a type of used projectiles (kinetic energy, size of warhead) and the quality of navigating-aiming system.

35 mm guns with their modern navigating-aiming system and projectiles of a new generation create a modern weapon system requiring special studies on the reliability to identify its advantages against the antiaircraft systems using 23mm guns (ZUR-23-2, ZSU-23-4). Therefore, it is necessary to treat the antiaircraft systems with 35mm gun as the precise fire systems and any archaic ways of their use and evaluation of combat efficiency cannot be used for them, as it was done for 23mm guns.

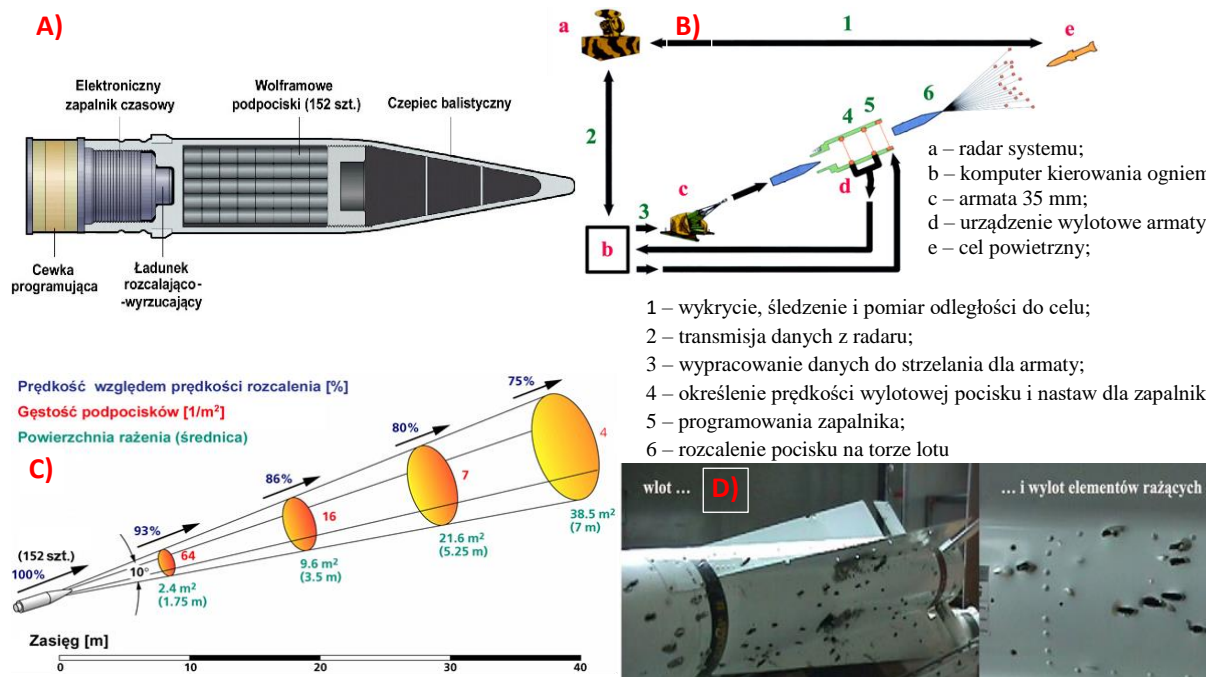
Implementation of 35mm guns significantly increased capabilities of defence against unmanned aerial vehicles (UAV), and low altitude cruising missiles (CRUISE type), and for fighting the targets of RAM type (rocket artillery munitions for guns and mortars). Application of missile systems for fighting these targets is economically unreasonable, especially as they usually have a limited unit of fire (amount of munitions ready for use). Application of 35 mm guns in automatised antiaircraft systems is mainly substantiated by designing performance of the new gen-

(gotową do użycia ilość amunicji). Zasadność wykorzystania w automatycznych armatach przeciwlotniczych dział kalibru 35 mm wynika głównie z uwarunkowań konstrukcyjnych pocisków nowej generacji (z podpociskami), możliwości stosowania zapalników programowalnych w trakcie strzelania (rysunek 1.A.) oraz pomiaru prędkości wylotowej pocisku podczas jego wylotu z lufy (rysunek 1.B.4). Podnosi to znacząco prawdopodobieństwo porażenia celu (rysunek 1.C i 1.D). Te nowe możliwości zmniejszają radykalnie zużycie amunicji niezbędnej do trafienia celu, tempo zużycia zasobu pracy luf, skracają czas potrzebny na ostygnięcie luf oraz wydłużają okres między uzupełnianiem amunicji w magazynach armat, zwiększając tzw. dyspozycyjność czasową armat [5]. Wprowadzenie podobnych rozwiązań do 20 i 23 mm armat byłoby bardzo trudne i nieopłacalne, dlatego też zdecydowano o celowości wykorzystania armat kalibru 35 mm. Przykładami zastosowań z ostatnich lat są: przeciwlotniczy zestaw artyleryjski Loara (rysunek 2J.), holowana armata przeciwlotnicza A-35 (rysunek 2K) [7], OSU z AM-35 na okręcie Kaszub (rysunek 2G) [8] i w nowoprojektowanym systemie okrętowym OSU-35K (AM-35) [8].

Wszechstronna wiedza zespołów naukowych Wojskowej Akademii Technicznej z zakresu konstrukcji uzbrojenia i jego eksploatacji, w szczególności dotycząca zasad projektowania, opracowania technologii wytwarzania, oceny niezawodnościowo-trwałościowej i gotowości technicznej oraz operacyjnej nowoczesnych systemów przeciwlotniczych z armatami kalibru 35 mm [5, 9, 10, 11, 12] pozwoliła na dokonanie wnikliwych badań i analiz procesów związanych z prowadzeniem skutecznego ognia do celów powietrznych oraz zwiększeniem prawdopodobieństwa jego osiągnięcia, niezawodności i trwałości wykorzystywanych armat.

eration projectiles (with sub-projectiles), and possibility for using programmable fuses at firing (Fig. 1.A.), and measurement of projectile muzzle velocity (Fig. 1.B.4). It significantly increases the probability of striking the target (Fig. 1.C and 1.D). These new possibilities radically reduce the amount of ammunition used up for hitting the target, and reduce the barrels operation resources exhaustion rate, and they shorten the time needed for cooling the barrels and extend the gaps between refilling the gun magazines with ammunition what contributes to the increase of the so called time operational readiness of guns [5]. Application of similar solutions for 20 and 23 mm guns could not pay and can be very difficult and for this reason decision was made on using 35mm guns. There are following examples of the applications in recent years: anti-aircraft gun system Loara (Fig. 2J.), hauled anti-aircraft gun A-35 (Fig. 2K) [7], OSU with AM-35 on the ship Kaszub (Fig. 2G) [8] and a newly designed system for ships OSU-35K (AM-35) [8].

Wide knowledge possessed by scientific teams of the Military University of Technology over the designs of weapon systems and their use, especially concerning the principles of designing, development of manufacture technologies, and evaluation of performance in domains of efficiency-reliability, and technical and operational readiness for modern anti-aircraft systems with 35 mm guns [5, 9, 10, 11, 12] allowed for in-depth studies and tests on processes connected with execution of an effective fire to aerial targets and on increased probability for achieving it, and the efficiency and durability of used guns.



Rys. 1. Pociski nowej generacji (z podpociskami) oraz sposób i efekt ich działania [10]:

A. - Przekrój 35 mm pocisku AHEAD z naboju PMD 062; B. Istota działania pocisku AHEAD w systemie SkyShield; C. Rozkład elementów rażących miotanych z pocisku AHEAD na torze lotu w poszczególnych odległościach od miejsca rozcalenia; D. Skutki ostrzału kierowanego pocisku rakietowego typu „powietrze-ziemia” 35 mm amunicją AHEAD

Fig. 1. Projectiles of a new generation (with sub-projectiles) and a way and effect of their operation [10]:
 A. – Cross section of 35 mm projectile AHEAD from cartridge PMD 062; B. Principle of operation for projectile AHEAD in system SkyShield; C. Configuration of striking components projected with projectile AHEAD on the flying path for particular distances from the site of disassembling; D. Results of firing into a guided missile of “air-ground” type with 35 mm ammunition AHEAD

- Cewka programująca – Programming coil
- Ładunek rozcalająco-wyrzucający – Disassembling-ejecting charge
- Elektroniczny zapalnik czasowy – Electronic time fuse
- Wolframowe podpociski (152 szt.) – Tungsten sub-projectiles (152 items)
- Czepiec balistyczny – Ballistic cap
- Prędkość względem prędkości rozcalenia – Velocity versus velocity of disassembling
- Gęstość podpocisków – Density of sub-projectiles
- Powierzchnia rażenia (średnica) – Striking surface (diameter)
- Zasięg – Range
- Radar systemu – Radar of the system
- Komputer kierowania ogniem – Fire control computer
- Armata 35 mm – 35mm gun
- Urządzenie wylotowe armaty – Gun muzzle unit
- Cel powietrzny – Aerial target
- Wykrycie, śledzenie i pomiar odległości do celu – Detection, tracking and measurement of distance to the target
- Transmisja danych z radaru – Data transmission from radar
- Wypracowanie danych dla strzelania z armaty – Elaboration of data for gun firing
- Określenie prędkości wylotowej pocisku i nastaw dla zapalnika – Identification of projectile muzzle velocity and settings for the fuse
- Programowanie zapalnika – Fuse programming
- Rozcalenie pocisku na torze lotu – Projectile disassembling on the flying path
- Wlot i wylot elementów rażących – Flow and outflow of striking components.

W ramach oceny procesu optymalizacji zasobu pracy luf automatycznych armat przeciwlotniczych kalibru 35 mm i ich porównania z armatami kalibru 23 mm proponuje się zastosowanie następujących metod oceny:

- wskaźnika zmian tempa zużywania zasobu pracy luf w funkcji długości serii dla danego kalibru lufy [6, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] – pokazuje on powiązanie długości serii z tempem zużywania zasobu pracy luf (a tym samym dyspozycyjnością czasową armat – przy krótkich seriach nie ma konieczności przerywania pracy ciągłej na schładzanie luf i dłuższy jest czas pracy systemu bez konieczności uzupełniania amunicji w magazynie armaty) oraz z ich celnością i rozrzutem,
- wskaźnika prawdopodobieństwa trafienia/rażenia celu w funkcji długości serii dla danej wartości, rodzaju i trajektorii lotu celu, odległości do celu oraz jakości armaty i pocisku wyrażonej poprzez ich celność i rozrzut [10, 11, 22] – metoda pokazująca jakościowe zmiany w efektywności zastosowań armat (kalibru 35 mm w stosunku do kalibru 23 mm), wynikające z poprawy jakości systemów nawigacyjno-celowniczych, a zwłaszcza jakości nowoczesnych pocisków oraz sposobów określania ich prędkości podczas wylotu z lufy i programowania zapalników bezpośrednio po dokonaniu takiego pomiaru,
- wskaźnika prawdopodobieństwa trafienia lekkiego samolotu myśliwskiego [23] – jako metody oceny wg „starego” typu zastosowań operacyjnych armat – z zaproponowanym nowym wskaźnikiem pokazującym liczbę jednostek ognia (liczbę nabojów w magazynie armaty) przy założonym prawdopodo-

For evaluation of a process of optimisation of operational resources for the barrels of 35mm antiaircraft automatic guns, and their comparison with 23mm guns following methods are proposed:

- indicator of changes for barrels operational resources rate exhaustion as a function of the length of a series for a specific calibre of barrel [6, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] – it shows a connection between the length of a series and the rate of the barrels operational resource exhaustion (and by the same the time readiness of guns – at short series there is no need to interrupt the continuous operation for cooling the barrels and there is a longer time of system operation without refilling the ammunition in gun magazine), and their accuracy and spreading,
- indicator of probability for hitting/ striking a target as a function of the series length for a specific value, type and flight trajectory of the target, and distance to the target, and quality of gun and projectile expressed by their accuracy and spreading [10, 11, 22] – a method showing qualitative changes in the effectiveness of applications of guns (calibre 35 mm in relation to 23 mm) resulting from improved quality of navigating-aiming systems, and especially quality of modern projectiles and methods for identification their muzzle velocities and programming the fuses directly after execution of such measurement,
- indicator of probability for hitting a light fighter jet [23] – as an evaluating method according with the “old” type of operational use of the guns – with a new proposed display showing the number of fire units (number of cartridges in

bieństwie trafiania celu i długości serii, która to prawdopodobieństwo umożliwia.

Wiarygodny model oceny i porównania armat kalibru 35 mm z armatami kalibru 23 mm może powstać po przeprowadzeniu kompleksowej analizy wyników uzyskanych ze wszystkich trzech zaproponowanych metod. Ocenę taką można efektywnie stosować w praktyce eksploatacyjnej w przypadku posiadania bieżącego systemu (automatycznej oceny stanu i prognozy stanu [6, 16, 24]) zarządzania zasobami [3, 4, 25] nie tylko dla luf, ale dla całego systemu przeciwlotniczego, powiązanego z logistycznym zapleczem SZ RP i NATO [11]. Potwierdzenie takiego założenia wykazano poprzez wdrożenie praktyczne w wojsku [26].

Niniejsze opracowanie ma aspekt przeglądowo-analityczny i bazuje na wynikach badań i opracowaniach analitycznych z prac realizowanych w latach 2001 do 2021, dotyczących:

- modelowania niezawodnościowo-trwałościowego szybkostrzelnych armat lotniczych (NR-30, GSz-23, GSz-30-1 [4, 6, 24, 25, 27] – zakończonego wdrożeniem zmodernizowanego systemu eksploatacji NR-30 i NS-23 do Sił Powietrznych RP [26]),
- badań eksperckich uszkodzeń 23 mm armat [28],
- analiz optymalizacji długości serii przy trafianiu w cele powietrzne dla holowanej armaty przeciwlotniczej A-35 [11],
- analiz niezawodnościowych dla nowo-projektowanego systemu okrętowego OSU-35K [5] (z armatą morską AM 35).

gun's magazine) at assumed probability of hitting a target, and the length of series which can secure this probability.

A reliable model of evaluation and comparison for 35mm and 23mm guns may be prepared after a complex analysis of results obtained with all three proposed methods. Such evaluation can be efficiently applied in practice of using in the case when a current system exists (automatic evaluation of status and status prognosis [6, 16, 24]) for management of resources [3, 4, 25] not only for the barrels but for the whole anti-aircraft system, and is connected with the logistic background of the Polish Armed Forces and NATO [11]. Such assumption was confirmed by a practical implementation in the army [26].

Present elaboration has a reviewing-analytical aspect and is based on results of tests and analytical studies prepared in projects performed within 2001 – 2021 and concerning:

- reliability-durability modelling for high rate of fire aircraft guns (NR-30, GSz-23, GSz-30-1 [4, 6, 24, 25, 27] – finalised by implementation of an upgraded system of using for NR-30 and NS-23 in the Air Forces of the Republic of Poland [26]),
- expert investigations on damages of 23 mm guns [28],
- optimisation analyses over the length of series at hitting the aerial targets for the hauled anti-aircraft gun A-35 [11],
- reliability analyses for a newly designed naval system OSU-35K [5] (with naval gun AM 35).



Rys. 2. Porównanie rozrzutu zadziałania 35 mm pocisków AHEAD na cel bez pomiaru prędkości na wylocie z lufy (H) i z uwzględnieniem pomiaru prędkości pocisku (I) przy celu stacjonarnym znajdującym się w odległości 1600 m od wylotu lufy [10]; przykłady zastosowań armat plot: J - przeciwlotniczy zestaw artyleryjski Loara (RADWAR S.A), K - armata holowana San jako model laboratoryjny 35 mm automatycznej armaty KDA (RADWAR S.A) [29] (A. B. C. D. E. - fot. Z. Idziaszek) (F. G. H. I. K. - fot. PIT-RADWAR) (J. - fot. Z. M.)

Fig. 2. Comparison of target scattering pattern for 35 mm AHEAD projectiles without muzzle velocity measurement (H) and with projectile's velocity measurement (I) at a stationary target placed in the range of 1600 m from the muzzle [10]; examples of applications for anti-aircraft guns: J Anti-aircraft gun system Loara (RADWAR S.A), K Hauled gun San as a laboratory model for 35 mm automatic gun KDA (RADWAR S.A) [29] (A. B. C. D. E. - photo Z. Idziaszek) (F. G. H. I. K. - photo PIT-RADWAR) (J. - photo Z. M.)

Zestaw plot ... - Antiaircraft system

Uszkodzona lufa – Damaged barrel

Morski zestaw plot ... - Naval antiaircraft system

Armata morska – Naval gun

Przeciwlotniczy zestaw artyleryjski Loara z 35 mm armatą przeciwlotniczą – Antiaircraft gun system

Loara with 35 mm antiaircraft gun

Armata przeciwlotnicza ... – Antiaircraft gun

Pęknięta komora zamkowa armaty – Broken breech chamber of a gun

Rozrzut przy strzelaniu bez uwzględnienia pomiaru prędkości pocisków przy programowaniu zapalnika – Scattering pattern at shooting without projectile velocity measurement for fuse programming

Rozrzut przy strzelaniu z uwzględnieniem pomiaru prędkości pocisków przy programowaniu zapalnika – Scattering pattern at shooting with projectile velocity measurement for fuse programming

2. Kryteria wpływające na tempo zużycia zasobów pracy luf

Lufy są obciążane zmiennymi impulsami temperaturowymi i ciśnieniowymi, powodującymi impulsowo-zmienne naprężenia, dodatkowo potęgowanym stosowaniem zmiennych długości serii. Ze względu na fakt, że przy strzelaniu w ścianie lufy pozostaje około 20% ciepła wytworzonego w trakcie strzału [9], stosowanie długich serii znacząco zwiększa tempo zużycia luf, zwłaszcza dla dużych kalibrów (duża ilość energii wydzielanej podczas spalania ładunku miotającego). Rozkład temperatury w ścianie lufy po pojedynczym wystrzale (A [9]), oraz seriach wystrzałów (B [9]), został przedstawiony na rysunku 3.

Modelowanie optymalnego zużycia zasobu pracy obiektu technicznego [3, 25] (w tym przypadku lufy armaty przeciwlotniczej [4]) jest zagadnieniem wielokryterialnym. W pierwszej kolejności należy określić co powoduje zużywanie lufy oraz zdefiniować graniczne wartości jej zużycia. W pracy [4, 9] nie uwzględniano m.in. sztywności luf i sposobu ich mocowania, gdyż uznano je za zagadnienia drugoplanowe w kontekście zużycia luf. Za istotne uznano następujące parametry:

- liczba i wielkość impulsów cieplnych w jednej serii lub rytmie strzelania (serie przedzielone czasowymi przerwami bez

2. Criteria Affecting the Barrels Operational Resources Exhaustion Rate

Barrels are loaded with changeable pulses of temperature and pressure causing pulsating-changeable stresses which are additionally increased by using changed lengths of series. Regarding the fact that the wall of the barrel arrests ca. 20% of heat produced at firing [9], the using of long series significantly increases the rate of barrels wearing – especially for large calibres (high amount of energy produced at combustion of propelling charge). Distribution of temperature in the barrel's wall after an individual shot (A [9]) and after series of shots (B [9]) is presented in Fig. 3.

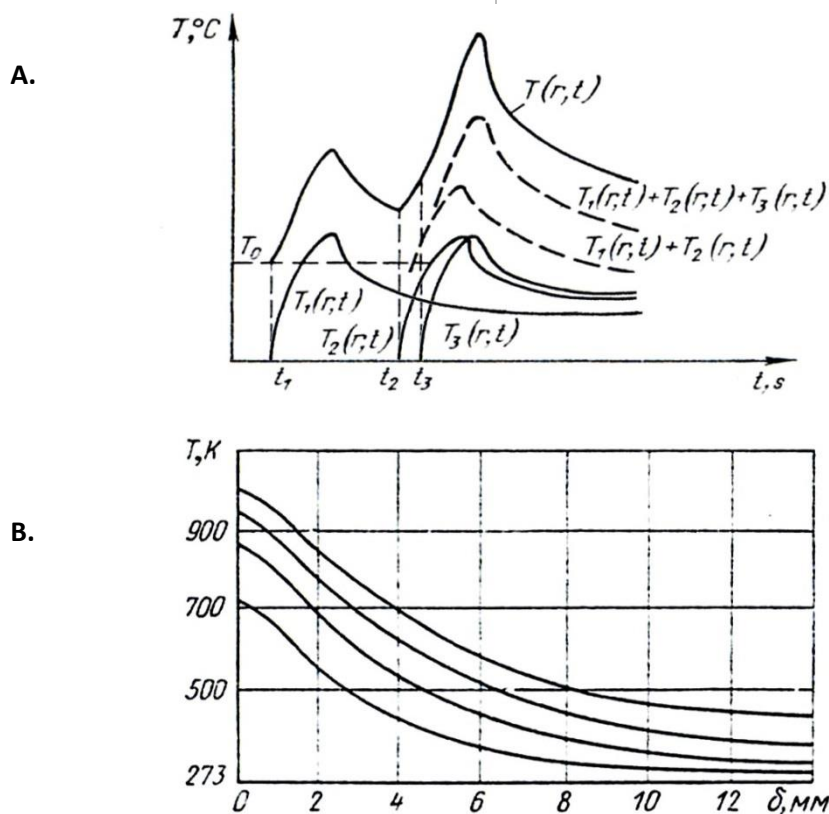
Modelling an optimal exhaustion of technical object operational resources [3, 25] (in this case a barrel of antiaircraft gun [4]) is a multicriterial question. Firstly, the reason of a barrel wearing has to be identified with extreme values of its wearing. In works [4, 9] the rigidity of barrels and methods of their fixing were not regarded as they were accepted as some secondary questions for wearing of barrels. Following parameters were accepted as important:

- Number and amplitude of thermal pulses in one series or sequence of shooting

- zwalniania spustu) – przekładająca się w konsekwencji na temperaturę końcową lufy po serii/rytmie – zależna też od typu broni (zależnej głównie od masy pocisku, ciśnienia gazów prochowych i szybkostrzelności),
- stosunek temperatury stożka przejściowego do temperatury wcinającego się pierścienia wiodącego – zależny od temperatury spalania prochu i szybkostrzelności,
 - liczba i wielkość impulsów cieplnych, wywołujących naprężenia w ściankach lufy od ciśnienia gazów prochowych napędzających pocisk w jednej serii lub rytmie strzelania,
 - udarowe obciążenia wywołane wcinaniem się pierścieni wiodących pocisków w bruzdy lufy (rosnące wartości wraz ze wzrostem zużycia stożka przejściowego i długości serii),
 - rozrost pęknięć wewnętrznej powierzchni lufy w wyniku zmiennego obciążania ścianek lufy oraz korozyjnego działania gazów prochowych, nagrzewania się powierzchni pęknięć, detonacyjnego spalania resztek prochu w szczelinach pęknięć, erozyjnego przedzierania się gazów prochowych pomiędzy pierścieniem a ściankami lufy,
 - wartość naprężeń skręcających od nadawania pociskowi prędkości obrotowej na bruzdach lufy – wielkość zależna od skoku bruzd,
 - sposób chłodzenia lufy – warunki przepływu powietrza, temperatura i wilgotność powietrza oraz dodatkowe systemy chłodzące,
 - rodzaj stosowanych materiałów inicjujących w spłonkach zapłonników (wpływający na tempo korodowania) i rodzaj ładunku miotającego w naboju (temperatura spalania, ciśnienie maksimum (series separated by time gaps without trigger releasing) – what is in consequence translated into a final temperature of barrel after the series/sequence – depending also on the type of gun (affected mainly by projectile's mass, powder gases pressure, and rate of fire),
 - Relation between the temperature of the transitional taper and temperature of the notching leading ring – depended on powder combustion temperature and rate of fire,
 - Number and amplitude of thermal pulses generating the stresses in the walls of barrel by the pressure of powder gases propelling a projectile in one series or a cycle of shooting,
 - Impact loads caused by a notching of projectiles leading rings into the furrows of the barrel (increased values along with the wearing of the transitional taper and the length of series),
 - Expansion of cracks on the inner surface of barrel as a result of changeable loads of barrel walls, and corrosive action of powder gases, and a heating of cracked surfaces, and a detonative combustion of powder residues in the gaps of cracks, and the erosive penetration of powder gases between the ring and the barrel walls,
 - Value of turning stresses caused by acceptance of rotating velocity by the projectile on the furrows of barrel – the amplitude depends on the pitch of furrows,
 - Method of barrel cooling – conditions of airflow, and temperature and humidity of air, and additional cooling systems,
 - Type of initiating materials used in the caps of primers (affecting the rate of corrosion) and type of propelling charge

- symalne),
- poziom degradacji (liniowy i osiowy) powierzchni wewnętrznej lufy – zwłaszcza w okolicy stożka przejściowego,
- zastosowany materiał na lufy opisany poprzez jego udarność.

- in the cartridge (temperature of combustion, maximal pressure),
- Level of degradation (linear and axial) of the barrel inner surface – especially in the vicinity of the transitional taper,
- Applied material of the barrel described by its impact resistance.



Rys. 3. Rozkład temperatury w ścianie lufy (kalibru 23 mm) po pojedynczym wystrzale (A [11]) oraz po 4 seriach po 30 wystrzałów w każdej (B [9])

Fig. 3. Distribution of temperature inside the barrel wall (23 mm calibre) after a single shot (A [11]), and after four series, each one of 30 shots (B [9])

Uwzględniając parametry, należy stwierdzić, że proces zużywania się lufy jest bardzo złożony, trudny do opisanego i przewidywania. Decydującym parametrem w ocenie tempa zużywania lufy jest wytrzymałość nieograniczona materiału lufy. Przekraczanie tej wartości jest zależne od długości serii w danych warunkach temperaturowych oraz rodzaju zastosowanych naboju i powoduje przyspieszenie procesów destrukcyjnych, a tym samym zmniejszenie trwałości i efektywności wykorzystania luf w trakcie działań ogniowych.

Considering these parameters, it can be noted that process of barrel wearing is very complex and difficult for description and prediction. An unlimited resistance of barrel material is a fundamental parameter at evaluation of barrel wearing rate. Any crossing of this value depends on the length of a series at given temperature conditions, and on the type of applied cartridges, and brings about the acceleration of destructive processes and by the same the reduction of durability and effectiveness in using the barrels during firing

W armatach automatycznych kalibrów 30-35 mm, o dużej szybkostrzelności (500-1800 strzałów/minutę), dużej prędkości wylotowej (1000 – 1450 m/s) oraz dużej masie pocisku (250 – 750 g), proces narastania temperatury lufy w trakcie strzelania serią, z każdym następnym wystrzelonym pociskiem w serii, nabiera intensywności, powodując wypalanie się powierzchni przewodu lufy, nagrzewanie gradientowe materiału lufy, a w efekcie końcowym (przy dostatecznie długiej serii) nawet uszkodzenie bruzd lufy. Dlatego w tych armatach długość serii musi być ograniczana, a ze względu na wysoką szybkostrzelność (brak wymaganej kontroli długości serii przez operatora), to ograniczenie musi być realizowane programowo [5]. Innym istotnym czynnikiem zużycia zasobu pracy luf jest stan powierzchni jej przewodu. Z teorii badań zmęczenia [29] (w lufach występują naprężenia cykliczne od zmiennego ciśnienia w trakcie strzału, z nakładającymi się gradientami temperaturowymi) wiadomo, że przekroczenie granicznej wartości naprężeń powoduje obniżenie wytrzymałości materiału do poziomu niższego od występujących obciążeń (przekroczony zostaje próg wytrzymałości nieograniczonej). Powoduje to występowanie procesu pęknięcia powierzchni wewnętrznej lufy.

Nałożenie się procesów: zużycia powierzchni wewnętrznej luf od nagrzewania się, naprężeń od ciśnienia gazów prochowych i niszczenia udarowego od pierścienia wiodącego, wcinającego się pocisku, powoduje szereg procesów destrukcyjnych, z których najistotniejszym (z punktu oceny jej stanu) jest zużycie materiału w obrębie stożka przejściowego lufy, powodujące wzrost wymiarów komory naboju (zwłaszcza na kierunku wzdłużnym do osi przewodu lufy). Wzrost ten ma decydujący wpływ na tempo degradacji oraz na obniżenie prędkości wylotowej pocisku. Powoduje to istotne obniżenie przydatno-

operations.

In automatic 30-35mm guns of the high rate of fire (500-1800 shots/minute), and high muzzle velocity (1000 – 1450 m/s), and great mass of projectile (250 – 750 g) the process of barrel temperature increase at serial shooting becomes more intensive with each successful shot of the series, and brings on the burning out of the barrel bore surface, and the increased gradient of barrel material heating, and in the final effect (at sufficiently long series) even the damage of barrel furrows. And for these reasons the length of series has to be limited in such guns, and because of the high rate of fire (lack of required control over the length of series by operator), this limitation must be provided on the programming level [5]. The quality of the barrel bore surface is another essential factor of barrels operational resources exhaustion. It is well known, according with theory of fatigue tests [29] (barrels are subjected to cyclic stresses caused by changed pressure during the shooting with overlaying gradients of temperature), that the crossing of a boundary value of the stresses brings on the reduction of material resistance to a lower level than the existing loads (threshold of the unlimited resistance is crossed). It makes the barrel inner surface break.

Overlaying of following processes: wearing of barrels inner surface by heating, stresses caused by the pressure of powder gases, and impact destruction caused by a notching of projectile leading ring bring on many destructive processes, and the wearing of material in vicinity of the barrel transitional taper is the most crucial (for evaluation of barrel's status) as it increases the size of cartridge chamber (especially along the barrel bore main axis). This increase has a decisive meaning for the rate of degradation and reduction of projectile muzzle velocity. It sig-

ści lufy do celnego strzelania na zadanych odległościach. Kwestiami wymagającymi rozwiązania są:

- niedopuszczenie do przekroczenia wytrzymałości nieograniczonej materiału lufy. Z badań broni będącej w eksploatacji wynika, że nie należy przekraczać granicznej długości serii (jest ona inna dla danego typu armaty, typów stosowanych pocisków i warunków jej chłodzenia).
- realizacja zadania bojowego, wymagającego stosowania długich serii. Istnieje możliwość zwiększenia efektywności prowadzonego ognia bez wydłużania serii, poprzez np. zwiększenie precyzji celowania i nadążania za zmianami kierunku ruchu celu. Jest to możliwe dzięki dzisiejszej jakości i dokładności systemów nawigacyjno-celowniczych. Długość serii należy dobierać na podstawie liczby pocisków potrzebnych do porażenia celu (zniszczenia lub uszkodzenia powodującego niezrealizowanie zadania bojowego). Dla typowych celów powietrznych jest to maksymalnie 6÷15 23 mm pocisków i 3÷6 30 mm pocisków oraz 1÷3 35 mm pocisków (szczegóły w rozdziale 4).

Biorąc powyższe pod uwagę w nowoprojektowanych systemach przeciwlotniczych nie należy stosować niekontrolowanego (z punktu widzenia oceny temperaturowo-naprężeniowej) strzelania długimi seriami, a dopuszczać strzelanie w trybie ciągłym tylko rytмами, dla których weryfikowano gwarancyjną trwałość luf. Oznacza to możliwość strzelania krótkimi seriami przedzielonymi czasem na zredukowanie naprężeń cieplnych i ciśnieniowych w lufie, tak by wartość tych naprężeń nie narastała nieograniczenie, ale zatrzymała się na bezpiecznej wartości, umożliwiającej zachowanie wytrzymałości nieograniczonej lufy albo zapewnienie wymaganej wartości trwałości lufy. Wpływ długości serii na trwa-

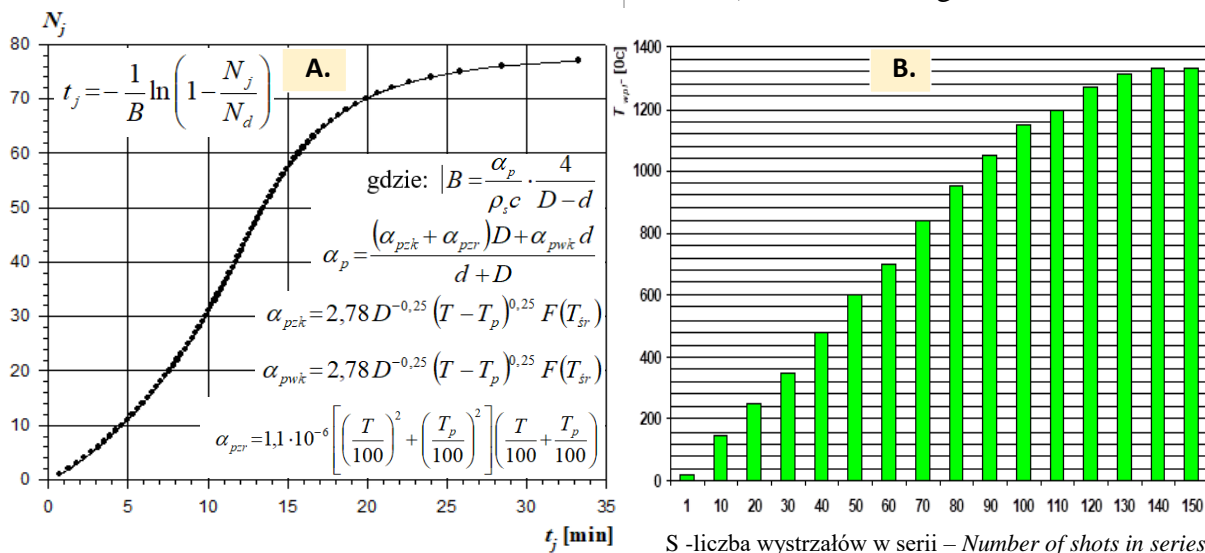
nificantly reduces the usefulness of barrel for accurate shooting at demanded distances. Following questions have to be solved:

- preventing any crossing of the unlimited resistance for barrel material. Investigations of used weapons prove that the extremal length of series cannot be crossed (it is different for a specific type of gun, and conditions of its cooling, and types of projectiles).
- Execution of a combat task requiring the use of long series. It is possible to increase the efficiency of shooting without any increase of series, e.g. by increased aiming accuracy and by following the changes of target movement directions. It is possible due to present quality and accuracy of navigating-aiming systems. The length of series has to be selected on the basis of projectiles needed for fighting the target (destruction or damage causing the failure of a combat mission). For typical aerial targets it is maximum 6÷15 of 23 mm projectiles and 3÷6 of 30 mm projectiles, and 1÷3 of 35 mm projectiles (details in chapter 4).

Considering the above mentioned any newly designed anti-aircraft system cannot apply an uncontrolled shooting (regarding stress-temperature evaluation) with long series, but make available shooting in the continuous mode only in cycles for which the warranted durability of barrels was verified. It means that only short series can be shot which are separated by the time needed for reduction of thermal and pressure stresses in the barrel to prevent unlimited growth of these stresses but to stop it on a safe value preserving the unlimited resistance of the barrel, or providing the required level of barrel durability. The influence of the series length on the barrel durability is shown in point 2. Considering the accepted specific

łość luf pokazano w punkcie 2. Uwzględniając przyjęte ciepło właściwe stali, z której wykonana jest lufa ($c = 550 \text{ J/kgK}$), przyrost temperatury ΔT_l ścianki lufy (w przekroju nr 5 – wylot pocisku z lufy – dotyczący wpływu temperatury na wzrost rozrzutu pocisków) po pierwszym strzale wyniesie $14,0 \text{ }^\circ\text{C}$ [9]. Po kolejnych strzałach w serii, przyrosty temperatury ΔT_n będą maleć. Wiedząc jednocześnie, że dopuszczalna temperatura lufy ze względu na właściwości stali wynosi $800 \text{ }^\circ\text{C}$ oraz przyjmując średni jednostkowy (po jednym strzale) przyrost temperatury lufy $\Delta T=10^\circ\text{C}$, obliczono dopuszczalną długość serii strzałów jako $N_d = 78$ strzałów. Oszacowana wartość N_d dla 30 mm armaty lotniczej NR-30 w jednej serii wynosi 68 strzałów [6], po których musi zostać schłodzona lufa. Po ewentualnym oddaniu takiej serii strzałów użytkownik powinien wymienić lufę albo przerwać strzelanie w celu jej ochłodzenia. Oszacowany czas chłodzenia (dla 35 mm armaty AM 35) pokazano na rysunku 4.

heat of steel used for fabrication of the barrel ($c = 550 \text{ J/kgK}$) the increment of temperature ΔT_l of barrel wall (in cross-section No 5 – outflow of projectile from the barrel – concerning the influence of temperature into the increase of projectiles spreading) after the first shot equals to $14.0 \text{ }^\circ\text{C}$ [9]. The increments of temperature ΔT_n after the consecutive shots on a series are decreasing. Knowing at the same time that acceptable temperature of barrel, regarding the steel properties, is $800 \text{ }^\circ\text{C}$, and accepting a mean individual increment of temperature (after one shot) of the barrel $\Delta T=10^\circ\text{C}$, it was calculated that the permitted length of a series of shots is $N_d = 78$ shots. Estimated value N_d for 30 mm aircraft gun NR-30 in one series is 68 shots [6], and then the barrel must be cooled. After possible delivery of such a series of shots the user has to replace the barrel or hold on the shooting in order to cool it. Estimated time of cooling (for 35 mm gun AM 35) is shown in Fig. 4.



Rys. 4. Wpływ długości serii na nagrzewanie i chłodzenie lufy 35 mm armaty AM 35
A. Oszacowanie czasu (t_j) powietrznego chłodzenia lufy po strzeleniu i-tą długością serii (N_j) [9]
B. Oszacowanie temperatury (T_{wpl}) osiągananej przy długości serii (S_i) [6]

Fig. 4. Influence of series length into the heating and cooling of barrel of 35 mm gun AM 35
A. Estimation of time (t_j) to cool the barrel by air after shooting with i -th series of length (N_j) [9]
B. estimation of temperature (T_{wpl}) achieved at the series length (S_i)

3. Optymalizacja trwałości luf w funkcji długości serii i kalibru luf

Do porównania automatycznych szybkostrzelnych armat przeciwlotniczych kalibrów 23 mm i 35 mm tj. armat przeciwlotniczych rodziny ZU-23-2 i AM 35 [28] (stosowanych w SZ RP w wersji lądowej i morskiej) wybrano jako armatę bazową (doskonale rozpoznaną trwałościowo-niezawodnościowo [4, 6, 12, 16, 27]) armatę lotniczą NR-30 (w żargonie lotniczym działko lotnicze NR-30). Przy porównywaniu ich wskaźników trwałościowo-operacyjnych wykorzystano metodykę oceny niezawodnościowo-trwałościowej armaty NR-30, dla której w 2007 roku wdrożono zmodernizowany system eksploatacji, umożliwiający przedłużanie jej resursu o 50% [26].

W tabeli 1 zestawiono dane armat (lotniczej NR-30, przeciwlotniczej ZUR-23-2 oraz AM-35) opisujące ich ważniejsze wskaźniki operacyjno-taktyczne, niezbędne przy szacowaniu temperatury lufy (T_{wpl}) w funkcji długości serii z jaką prowadzi się strzelanie. Natomiast w tabeli 2 zestawiono dane niezbędne do wyznaczenia liczby strzałów (określających teoretyczne wykorzystanie zasobu pracy armat) według zależności (1÷4), opisujących trwałość lufy (N) w funkcji temperatury lufy (T_{wpl}) odniesioną do trwałości lufy (N_p) wyznaczoną przy strzelaniu ogniem pojedynczym.

B - współczynnik temperaturowy intensywności zużywania się powierzchni wewnętrznej lufy

3. Optimisation of Barrels Durability in Function of Series Length and Barrel Calibre

The aircraft gun NR-30 (usually named as NR-30 gun with well identified durability and reliability characteristics [4, 6, 12, 16, 27]) was selected for comparison of automatic antiaircraft 23 mm and 35 mm guns with high rate of fire, i.e. antiaircraft guns of ZU-23-2 and AM 35 [28] family (used in the Polish Armed Forces in land and naval versions). Their indicators of durability-operability were compared by using a methodology on reliability-durability evaluation of NR-30 gun for which an upgraded system of servicing was implemented in 2007 enabling extension of its life cycle by 50% [26].

Table 1 includes specification of guns performances (aircraft NR-30, anti-aircraft ZUR-23-2, and AM-35) describing their important operational-tactical characteristics needed for estimation of barrel temperature (T_{wpl}) in function of shooting series length. And table 2 specifies data needed for establishing number of shots (determining theoretical exhaustion of gun operational resources) according with the relation (1÷4) describing barrel durability (N) in function of barrel temperature (T_{wpl}) referred to durability of barrel (N_p) identified at shooting by single-round fire.

B - temperature coefficient for intensity of wearing of inner barrel surface.

$$N = N_p e^B \quad (1)$$

$$B = -n_1 T_{wpl} \quad (2)$$

$$N_p = k_1 k_2 k_3 \rho \frac{d^2 \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right)}{e^{2,2n_1 p_0 \frac{d}{\varepsilon} 10^{-3} + n_2 T_0}} \cdot \frac{1 + \lambda_\omega}{\omega V_w \left[\lambda_\omega \left(\frac{V_1}{V_w} \right)^2 + \left(\frac{V_2}{V_w} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

$$\lambda_\omega = \frac{l_w}{l_0} \quad \text{gdzie:} \quad l_w + l_0 = \text{const} \quad (4)$$

Tabela 1. Zestawienie wskaźników konstrukcyjno-operacyjno-taktycznych [11, 22, 28]

Lp.	Parametry armat do porównania trwałości ich luf		ZUR-23-2	NR-30	AM 35
1.	Operator/Obsługa	[osoby]	2/3	1/0	1/2
2.	Prędkość naprowadzania pionowego - max	[rad/s]	0,7	manewr samolotem	2
3.	Prędkość naprowadzania poziomego - max	[rad/s]	1,2	manewr samolotem	2
4.	Szybkostrzelność teoretyczna	[strzałów /minutę]	2x800 (2x1000)	900	550
5.	Liczba luf	[szt.]	2	1	1
6.	Efektywna odległość strzelania pionowa	[m]	1 500/2 000	nie dotyczy	4 000/5 000
7.	Efektywna odległość strzelania pozioma	[m]	2 000/2 500	2 000	2 500
8.	Maksymalna donośność	[m]	b/d /12190	4000	10500/27170
9.	Prędkość wylotowa: klasyczne/podkalibrowe	[m/s]	970/1170	800/-	1140/1440
10.	Ciśnienie maksymalne	[MPa]	287/298	b.d.	≤ 420
11.	Pojemność magazynu amunicji	[liczba naboji]	2 x 50/100	80	2 x 100/200
12.	Długość serii, przy której występuje wartość krytyczna temperatury lufy (800 [°C])	[liczba wystrzałów]	50	40*/60**	32***
13.	Oszacowana trwałość lufy (N_p) przy strzelaniu pojedynczymi pociskami	[liczba naboji]	6677	4451	5341
14.	Trwałość gwarantowana	[liczba wystrzałów]	3000/lufę	2000	2400/na lufę
15.	Rozrzut – 50% rozrzutu balistycznego	[m/m]	$U_g=U_s=0,9/1000$	b/d	$U_g=U_s=1,0/1000$ (TP-T) $U_g=U_s=0,6/1000$ (FAPDS)

*w warunkach strzelniczy, **w locie w powietrzu,

*** 4 serie po 8 pocisków z przerwami 2-sekundowymi pomiędzy seriami

Ze względu na problematyczne wyznaczenie wartości T_{wpl} po wystrzeleniu serii o różnych długościach, niezbędnej we wzorze (2), przy jej szacowaniu zastosowano inżynierię odwrotną w wyznaczaniu jej rozkładu w funkcji długości serii. Bazując na zawartych w tabeli 1 (lp. 12) danych oraz zakładając (zgodnie z założeniami w pracy [9]), że

Because of a problematic identification of value T_{wpl} after firing the series of different lengths needed in formula (2) a reverse engineering method was used for establishing its distribution in function of the series length. Basing on data included in table 1 (line 12) and assuming (according with assumptions in work [9]) that changes of temperature incre-

zmiany wzrostu temperatury po każdym strzale w serii (dla lufy danego kalibru) można uznać za quasi stałe, wyznaczono średnie wartości zmian temperatury dzieląc temperaturę krytyczną 800 °C przez długość serii (lp. 12), dla której ta temperatura (wg producenta w opisie gwarancyjnym luf) wystąpi. Zestawienie oszacowań zestawiono w tabeli 2.

ments after each shot in a series (for a barrel with given calibre) may be taken as quasi-constant, the mean values of temperature changes were determined dividing the critical temperature of 800 °C by the length of a series (line 12), for which this temperature can be reached (according with barrel manufacturer's warranty data). Specification of estimations is shown in table 2.

Table 1. Specification of tactical-operational-designing characteristics [11, 22, 28]

Line	Parameters of guns for comparison of durability of their barrels		ZUR-23-2	NR-30	AM 35
1.	Operator/crewmembers	[persons]	2/3	1/0	1/2
2.	Rate of laying in elevation - max	[rad/s]	0,7	Plane manoeuvre	2
3.	Rate of horizontal laying - max	[rad/s]	1,2	Plane manoeuvre	2
4.	Theoretical rate of fire	[shots/minute]	2x800 (2x1000)	900	550
5.	Number of barrels	[items]	2	1	1
6.	Effective vertical shooting range	[m]	1 500/2 000	No concern	4 000/5 000
7.	Effective horizontal shooting range	[m]	2 000/2 500	2 000	2 500
8.	Maximal range	[m]	b/d /12190	4000	10500/27170
9.	Muzzle velocity: classical/ kinetic	[m/s]	970/1170	800/-	1140/1440
10.	Maximal pressure	[MPa]	287/298	Lack of data	≤ 420
11.	Capacity of ammunition magazine	[number of rounds]	2 x 50/100	80	2 x 100/200
12.	Length of a series for barrel critical temperature (800 [°C])	[number of shots]	50	40*/60**	32***
13.	Estimated durability of barrel at single-round shooting (N_p)	[number of rounds]	6677	4451	5341
14.	Warranted durability	[number of shots]	3000 _{/barrel}	2000	2400 _{/barrel}
15.	Scattering – 50% of ballistic scattering	[m/m]	$U_g=U_s=$ 0,9/1000	Lack of data	$U_g=U_s=1,0/1000$ (TP-T) $U_g=U_s=0,6/1000$ (FAPDS)

**in conditions of a shooting range, **during flight in the air,*

**** 4 series of 8 rounds with 2-second gaps between the series*

Parametry występujące we wzorach (1-4) opisano szczegółowo w pracy [6, 12]. W tabeli 3 przedstawiono parametry konstrukcyjne rozpatrywanych armat, takie jak:

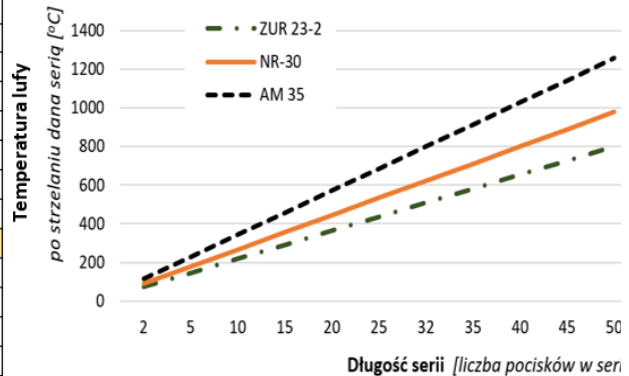
Parameters present in formulas (1-4) are detailedly described in work [6, 12]. Table 3 includes designing parameters of considered guns such ones like: λ_ω , ρ , d , D , ω , V_w .

λ_{ob} , ρ , d , D , ω , V_w . Zmiany wartości T_{wpl} po wystrzeleniu serii o różnych długościach zawarto w tabeli 2. Pozostałe parametry (poza wymienionymi w tabeli 3) dla istniejącej konstrukcji broni przyjęto jako stałe – jednakowe niezależnie od kalibru, gdyż różnice, które wnoszą dla danej optymalizacji są nieistotne statystycznie (mniej istotne niż jakość wytwórcza dla poszczególnych egzemplarzy luf i zmienności warunków środowiskowych w trakcie strzelania).

Changes of values for T_{wpl} after firing the series of different lengths are shown in table 2. The remaining parameters (beside presented in table 3) for the existing design of the weapon were taken as constant – identical independently on the calibre as the differences they can generate for a specific optimisation are statistically neglectable (less important than quality of manufacture for particular items of barrels and changes of environmental conditions during the shooting).

Tabela 2. Wyniki oszacowania $T_{wpl} = f(S_i)$ dla porównywanych luf (opracowanie własne)
Table 2. Results of estimation of $T_{wpl} = f(S_i)$ for compared barrels (own development)

Lp.	ZUR 23		NR-30		AM 35	
	$N_p = 6677$ wystrzałów		$N_p = 4451$ wystrzałów		$N_p = 5341$ wystrzałów	
	S_i [szt.]	T_{wpl} [°C]	S_i [szt.]	T_{wpl} [°C]	S_i [szt.]	T_{wpl} [°C]
1.	2	73	2	89	2	114
2.	5	145	5	178	5	229
3.	10	218	10	267	10	343
4.	15	291	15	356	15	457
5.	20	364	20	444	20	571
6.	25	436	25	533	25	686
7.	32	509	32	622	32	800
8.	35	582	35	711	35	914
9.	40	654	40	800	40	1029
10.	45	727	45	889	45	1143
11.	50	800	50	978	50	1257



Wykres 1. Wyniki oszacowania $T_{wpl} = f(S_i)$ dla porównywanych luf (opracowanie własne)
Diagram 1. Results of estimation of $T_{wpl} = f(S_i)$ for compared barrels (own development)

Temperatura lufy po strzeleniu daną serią – Barrel temperature after shooting a specific series
Długość serii (liczba pocisków w serii) – Length of series (number of rounds in series)

Tabela 3. Zestawienie oszacowanych danych do wyznaczenia trwałości luf (N) [11, 22, 28]

Lp.	Nazwa parametru	Symbol	Jednostka	ZUR-23-2	NR-30	AM 35
1.	Prędkość wylotowa	V_w	[m/s]	970/1170	800	1180/1440
2.	Współczynnik	V_1/V_w	[-]	0,15	0,15	0,15
3.	Współczynnik	V_2/V_w	[-]	0,000008	0,000008	0,000008
4.	Współczynnik	k_1	-	$22,5 \cdot 10^{-3}$	$22,5 \cdot 10^{-3}$	$22,5 \cdot 10^{-3}$
5.	Współczynnik	k_2 i k_3	-	1	1	1
6.	Udarność materiału lufy	ρ	[dN/cm ²]	25	10	45
7.	Kaliber	d	[mm]	23	30	35
8.	Średnica mierzona na brzdach	D	[mm]	23,70	30,90	36,05
9.	Współczynnik	n_1	-	0,001	0,001	0,001
10.	Współczynnik	n_2	-	0,002	0,002	0,002

11.	Współczynnik nagrzewania	$(d/\varepsilon)10^{-3}$	-	1,365	1,365	1,365
12.	Długość lufy	l	[mm]	1880	1600	3150
13.	Część bruzdowana lufy	l_w	[mm]	1654,0	1440,0	2934,2
14.	Długość komory naboju	l_0	[mm]	150,4	160	216
15.	Iloraz długości l_w i l_0	λ_{ω}	[-]	11,0	9,0	13,6
16.	Masa ładunku prochowego	ω	[kg]	0,077	0,095	0,333
17.	Ciśnienie forsowania	p_o	[MPa]	25	35	45
18.	Temperatura spalania	T_o	[°C]	3300	3300	3300

Table. 3. Specification of estimated data for identification of durability of barrels (N) [11, 22, 28]

Line	Name of parameter	Symbol	Unit	ZUR-23-2	NR-30	AM 35
1.	Muzzle velocity	V_w	[m/s]	970/1170	800	1180/1440
2.	Coefficient	V_1/V_w	[-]	0,15	0,15	0,15
3.	Coefficient	V_2/V_w	[-]	0,000008	0,000008	0,000008
4.	Coefficient	k_1	-	$22,5 \cdot 10^{-3}$	$22,5 \cdot 10^{-3}$	$22,5 \cdot 10^{-3}$
5.	Coefficient	k_2 i k_3	-	1	1	1
6.	Impact resistance of barrel material	ρ	[dN/cm ²]	25	10	45
7.	Calibre	d	[mm]	23	30	35
8.	Diameter measured in furrows	D	[mm]	23,70	30,90	36,05
9.	Coefficient	n_1	-	0,001	0,001	0,001
10.	Coefficient	n_2	-	0,002	0,002	0,002
11.	Coefficient of heating	$(d/\varepsilon)10^{-3}$	-	1,365	1,365	1,365
12.	Length of barrel	l	[mm]	1880	1600	3150
13.	Rifled part of barrel	l_w	[mm]	1654,0	1440,0	2934,2
14.	Length of breech chamber	l_0	[mm]	150,4	160	216
15.	Quotient of lengths l_w and l_0	λ_{ω}	[-]	11,0	9,0	13,6
16.	Mass of powder charge	ω	[kg]	0,077	0,095	0,333
17.	Pressure of forcing	p_o	[MPa]	25	35	45
18.	Temperature of combustion	T_o	[°C]	3300	3300	3300

Wykorzystując wzory (1, 2, 3), dane w tabeli 2 i tabeli 3 wyznaczono wartości trwałości całkowitej luf przy strzelaniu ogniem pojedynczym - N_p (wg wzoru 3.), a następnie korzystając z zakresu T_{wpl} (tabela 2.) wyznaczono trwałość luf - N [liczba wystrzałów] kalibru 23 mm (zestaw przeciwlotniczy ZUR-23-2TG), 30 mm (armata lotnicza NR-30) i 35 mm (armata morska AM 35) wg wzoru (1). Wyniki zestawiono w tabeli 4 oraz zilustrowano na wykresie 2.

Using the formulas (1, 2, 3), and data in tables 2 and 3 the values of total durability of barrels were identified at a single-round firing - N_p (according with formula 3.), and next employing the range T_{wpl} (table 2.) the durability of barrels was identified - N [number of shots] for 23 mm calibre (antiaircraft system ZUR-23-2TG), and for 30 mm (aircraft gun NR-30) and 35 mm (naval gun AM 35) according with formula (1). The results are specified in table 4 and illustrated in diagram 2.

Tabela 4. Wyniki oszacowania trwałości całkowitej luf (N) armat w funkcji wartości temperatury lufy (T_{wpl}) w jej przekroju krytycznym na końcu strzelania daną długością serii (S_i) (opracowanie własne na podstawie [12])

Table 4. Results of estimation of gun barrels total durability (N) in function of barrel temperature (T_{wpl}) in barrel's critical cross-section at the end of firing with given length of a series (S_i) (own development based on [12])

Lp.	S_i	ZUR-23-2PG				NR-30				AM 35			
		$N_p = 6677$ wystrzałów shots				$N_p = 4451$ wystrzałów				$N_p = 5341$ wystrzałów			
		T_{wpl}	$-B$	e^B	$N_{/23}$	T_{wpl}	$-B$	e^B	$N_{/30}$	T_{wpl}	$-B$	e^B	$N_{/35}$
[liczba pocisków w jednej serii] projectiles in one series	[°C]	[-]	[-]	[liczba wystrzałów] f shots number	[°C]	[-]	[-]	[liczba wystrzałów]	[°C]	[-]	[-]	[liczba wystrzałów]	
1.	2	73	0,07272	0,92986 1155	6209	89	0,0888 8	0,914955 362	4072	114	0,1142 8	0,89200 8159	4764
2.	5	145	0,14544	0,86464 1767	5773	178	0,1777 6	0,837143 314	3726	229	0,2285 7	0,79567 0598	4250
3.	10	218	0,21816	0,80399 6792	5368	267	0,2666 4	0,765948 763	3409	343	0,3428 6	0,70973 7568	3791
4.	15	291	0,29088	0,74760 5385	4992	356	0,3555 2	0,700808 928	3119	457	0,4571 5	0,63308 537	3381
5.	20	364	0,3636	0,69516 9207	4642	444	0,4444	0,641208 886	2854	571	0,5714 4	0,56471 1668	3016
6.	25	436	0,43632	0,64641 0841	4316	533	0,5332 8	0,586677 508	2611	686	0,6857 3	0,50372 2378	2690
7.	32	509	0,50904	0,601072 331	4013	622	0,6221 6	0,536783 732	2389	800	0,8000 2	0,44931 9978	2400*
8.	35	582	0,58176	0,55891 3812	3732	711	0,7110 4	0,491133 153	2186	914	0,9143 1	0,40079 3078	2141
9.	40	654	0,65448	0,51971 2243	3470	800	0,7999 2	0,449364 912	2000*	1029	1,0286	0,35750 712	1909
10.	45	727	0,7272	0,48326 0226	3227	889	0,8888	0,411148 835	1830	1143	1,1428 9	0,31889 6079	1703
11.	50	800	0,79992	0,44936 4912	3000*	978	0,9776 8	0,376182 831	1674	1257	1,2571 8	0,28445 506	1519

*resurs gwarantowany przez producenta dla strzelania danymi długościami serii

N - resurs (trwałość lufy) oszacowany dla strzelania daną długością serii

*warranted life cycle by manufacturer at firing with specific lengths of series

N - life cycle (durability of barrel) estimated for firing with specific lengths of series

Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że im większy jest kaliber armaty tym bardziej długość serii wpływa na tempo zużywania się luf armat przeciwlotniczych. Zasadnym staje się zatem stosowanie optymalizacji długości serii, a podstawowymi parametrami powinno być prawdopodobieństwo trafienia celu, odległość do celu i jego rodzaj. Jednym ze sposobów (zwłaszcza

The analysis of received results proves that for larger calibres of guns the length of a series has greater influence on the rate of wearing of anti-aircraft gun barrels. Therefore, it is reasonable to optimise the length of series, and the basic applied parameters have to include the probability of hitting the target, distance to the target, and its type. One of the methods (especially at automatic

przy automatycznym strzelaniu w trybie ciągłym) jest wprowadzanie tzw. rytmów strzelania (np. co 8 pocisków są automatycznie wydłużane przerwy między następną 8-mio strzałową serią, a następnie dłuższe przerwy po 32 strzałach – maksymalny rytm składa się z 192 strzałów). Oczywiście im mniej pocisków w serii i rytmie, tym mniejsze jest zużycie lufy [6, 11]. Przekroczenie wymagań określonych przez producenta radykalnie zmienia naprężenia w lufie podczas strzelania i powoduje, że zwiększa się tempo zużywania lufy bez możliwości powrotu do tempa sprzed tego przekroczenia. Dlatego też konstruktorzy 35 mm armaty KDA [30] i 30 mm armaty lotniczej NR-30 [12] rekomendują użytkowanie armat poniżej określonej dla danego działka wartości naprężeń w lufie. Należy nadmienić, że dla AM 35, powyżej serii 8-mio strzałowej, strzelanie odbywa się wg schematu: [8 strzałów – 2 s przerwy – 8 strzałów – 2 s przerwy – 8 strzałów – 2 s przerwy – 8 strzałów – 2 s przerwy] w sumie 32 strzały w serii – przy czym po każdym 32 strzałach 2 minutowa przerwa. Możliwe jest 7 cykli po 32 strzały z przerwami 2 minutowymi – co daje 224 strzały – po czym wymagana jest 2 godzinna przerwa.

Przekroczenie dopuszczalnej temperatury lufy wpływa nie tylko na zwiększenie tempa jej zużywania, ale także na precyzję strzelania – po przekroczeniu temperatury dopuszczalnej rozrzut pocisków może się zwiększyć 2-3 krotnie.

Zbliżona trwałość luf armat NR-30 i AM 35 wynika z faktu, że w przypadku armaty AM 35 zastosowano lepszą gatunkowo stal na lufę (o 6 krotnie większej wytrzymałości na obciążenia udarowe) oraz zagwarantowano realizację przerw czasowych pomiędzy kolejnymi seriami, cyklami i rytmami strzelania. Takie podejście pozwoliło produ-

firing in continuous mode) is based on application of the so called firing cycles (e.g. after each 8 rounds the gaps before a next 8-round series are automatically increased, and the longer pauses are after 32 shots – maximal sequence consists of 192 shots). Of course, the less rounds in a series and cycle, the lower wearing of barrel [6, 11]. Crossing the specifications established by the manufacturer radically changes the stresses in the barrel during the shooting and makes the rate of barrel wearing increase without any possibility for returning to the level of the rate existing before the crossing. It is for this reason that designers of 35 mm gun KDA [30] and 30 mm aircraft gun NR-30 [12] recommend to use the guns below the level of stresses in the barrel which is established for each gun. It can be added that for AM 35 and the larger series than 8-rounds the shooting is carried out according to following schedule: [8 shots – 2 s pause – 8 shots – 2 s pause – 8 shots – 2 s pause – 8 shots – 2 s pause] in total 32 shots in the series – and after each 32 shots is a 2 minute pause. It is possible to shoot 7 cycles of 32 shots with 2 minute pauses – what gives 224 shots – and after that a 2 hours pause is required.

Exceeding the permitted temperature of barrel affects not only the increase of its wearing rate, but also the precision of fire – when the permitted temperature is crossed, the scattering of projectiles can increase 2-3 times.

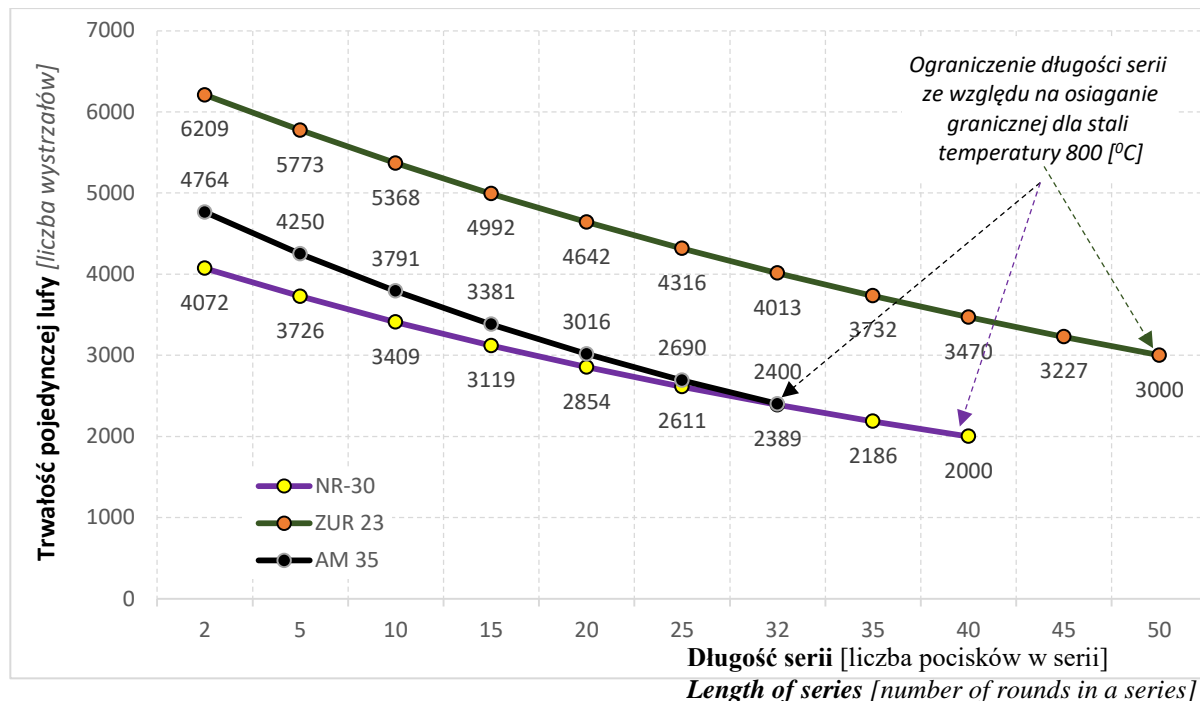
Similar levels of barrel life cycles for guns NR-30 and AM 35 are caused by the fact that the better brand of steel was used for AM 35 gun barrel (with 6 times higher impact resistance), and presence of time gaps between consecutive series, cycles and sequences of firing was warranted. Such approach allowed to specify the warranted

centowi określić trwałość gwarantowaną lufy na poziomie 2400 strzałów.

Dla wszystkich rozpatrywanych armat szacuje się, że temperatura graniczna, przy której nie następuje jeszcze zwiększanie tempa zużycia luf to 350 do 400 °C.

life cycle by the manufacturer on the level of 2400 shots.

It is assumed for all considered guns that the border temperature at which the increased rate of barrel wearing has not started yet, is between 350 and 400 °C.



Wykres 2. Zestawienie wyników oszacowania trwałości luf ($N_{23/30/35}$) kalibru 23, 30 i 35 mm w funkcji dopuszczalnych długości serii (S_i) ze względu na osiągnięcie krytycznej dla stali lufowej temperatury 800 °C (opracowanie własne)

Diagram 2. Specification of estimation results for life cycles of 23, 30 and 35 mm calibre barrels ($N_{23/30/35}$) in function of permissible lengths of series (S_i) due to the reaching of temperature of 800 °C which is critical for the barrel steel (own development)

Trwałość pojedynczej lufy (liczba wystrzałów) – Life cycle of an individual barrel (number of shots)
Ograniczenie długości serii ze względu na osiągnięcie granicznej dla stali temperatury – Limitation of series length regarding the reaching of the border temperature by steel

Na podstawie przeprowadzonej analizy oceny trwałości luf oraz możliwości jak najlepszego wykorzystania ich zasobu pracy można sformułować następujące wnioski:

- należy dążyć do określenia i przyjęcia długości serii, umożliwiających ciągłe strzelanie z armaty (czyli bez przekraczania temperatury lufy wymuszającej przerwanie ognia na niedopuszczalny w trakcie walki okres) do wyczerpania zapasu

Following conclusions can be taken on the basis of the performed analysis on evaluation of durability of barrels and possibilities for the best use of their operational resources:

- measures have to be taken to establish and accept the length of series for continuous firing with the gun (without crossing the barrel temperature enforcing the interruption of fire for

amunicji w magazynach amunicyjnych armaty,

- przekroczenie wartości dopuszczalnej temperatury nagrzewania lufy powoduje zwiększenie tempa zużywania zasobu pracy lufy (z powodu przekraczania naprężeń w materiale lufy i przyspieszony proces degradacji zmęczeniowo-erozyjnej stożka przejściowego) oraz zwiększenie rozrzutu pocisków ze względu na brak zachowania prostoliniowości lufy,
- im dłuższa jednorazowa seria, tym większe prawdopodobieństwo pojawienia się zacięcia w trakcie strzelania w układzie kinematycznym automatyki armaty, ze względu na kumulowanie się naprężeń i nagrzewanie tarciove współpracujących elementów układu przygotowania armaty do kolejnego strzału.

Wykorzystanie do zwalczania celów powietrznych nowoczesnych systemów nawigacyjno-celowniczych oraz zwiększenie doskonałości algorytmicznej predykcji lotu celów, wraz z równoczesnym stosowaniem nowoczesnych środków bojowych pozwala na ograniczenie tradycyjnej metody zwiększania prawdopodobieństwa porażenia celu powietrznego [30], polegającej na zwiększeniu szybkostrzelności i wydłużaniu serii prowadzonego ognia.

Współczesne środki rażenia (nowoczesne pociski – z podpociskami, podkalibrowe, z zapalnikami programowalnymi przy wylocie z lufy i pomiarem prędkości każdego pocisku) umożliwiają realizowanie strzelań precyzyjnych krótkimi seriami, umożliwiając nieprzekraczanie wytrzymałości doraźnej luf i elementów automatyki armat, a tym samym znacznie zwiększając ich trwałość całkowitą w porównaniu z trwałością gwarantowaną przez producenta przy klasycznym podejściu do strzelania długimi seriami.

time which cannot be accepted at the fight) until spending the store of ammunition in gun magazines,

- crossing the permitted temperature of heating the barrel increases the barrel operational resources exhaustion rate (due to exceeded stresses in barrel material and accelerated process of fatigue-erosion degradation of the transitional taper), and increased scattering of projectiles due to the loss of straight-line geometry of the barrel,
- the longer individual series can increase chances of seizures at firing in the gun automatic kinematic system as there is a cumulation of stresses and a process of friction heating for components working together in the system preparing the gun for next shots.

The application of modern navigating-aiming systems for fighting aerial targets, and the increased performance of algorithms predicting the flight path of targets, and concurrent use of modern combat assets allow for limitations in traditional methods used to increase the probability of hitting the aerial target [30] and based on the increased series and rate of fire.

Contemporary fighting assets (modern projectiles – with sub-projectiles, kinetic projectiles, projectiles programmed at the muzzle of barrel with the velocity measured for each projectile) can be used for firing with precise short series preventing the crossing of temporary resistance of barrels and components of gun automatics, and by the same improving significantly their total life cycle compared to the life cycle warranted by manufacturer at classical approach to the long series fire.

4. Oszacowanie prawdopodobieństwa trafienia lekkiego samolotu myśliwskiego i pocisków RAM

Wnioski z przeprowadzonych badań i analiz pokazują, że wzrost prawdopodobieństwa trafienia celów przy znaczącym zwiększeniu długości serii prowadzonego ognia jest w szerszej perspektywie nieefektywny. Efektywny wzrost prawdopodobieństwa trafienia można uzyskać m.in. poprzez:

- lepszą jakość aerodynamiczną pocisku,
- szybsze i dokładniejsze nadążanie linii celowania lufy za wyznaczonym punktem celowania,
- poprawniejsze i szybsze prognozowanie spotkania celu z pociskiem, a tym samym trafniejsze wyznaczanie kąta wyprzedzenia z uwzględnieniem kąta rakusowego celu,
- lepsze oszacowanie optymalnych stref ostrzału o wymaganym granicznym prawdopodobieństwie trafienia,
- zastosowanie amunicji programowalnej z podpociskami,
- zastosowanie amunicji podkalibrowej,
- dysponowanie możliwością przełączania się na korzystniejszy typ amunicji – wykorzystanie armat zasilanych minimum dwudroźnie,
- stosowanie systemów uzbrojenia składających się z broni o różnych kalibrach,
- pełną automatyzację procesu namierzenia, celowania, wyboru celu i doboru długości serii (z uwzględnieniem prawdopodobieństwa trafienia mnożonego przez wskaźnik istotności przy zwalczaniu danego celu) oraz chwili otwarcia i zakończenia strzelania,
- stosowanie wielu luf (systemów wielolufowych lub sprzężonych lub zestawienie baterii z kilku armat zwalczających ten sam cel).

4. Estimation of Probability for Hitting a Light Fighter Plane and RAM Missiles

Conclusions drawn from performed tests and studies show that increase of target hitting probability by a significant increase of the fire series length is ineffective in a wider perspective. The effective increase of hitting may be achieved by:

- Better aerodynamic performance of projectile,
- Following the identified point of aiming by the aiming line in more accurate and quicker way,
- Better and quicker prediction of target meeting with projectile and by the same more accurate identification of angle of allowance with consideration of target radial-course angle,
- Better estimation of optimal zones of firing with the required level for probability of hitting,
- Application of programmable ammunition with sub-projectiles,
- Application of kinetic ammunition,
- Possibility for switching into a better type of ammunition – application of guns with at least two ways of supply,
- Application of weapon systems with different calibres,
- Complete automatization for target finding, aiming and selection, and matching the length of series (regarding the probability of hitting multiplied by the index of significance at fighting a specific target), and deciding on the time of opening and ending the fire,
- Deployment of many barrels (multi-barrel or coupled systems, setting a battery for fighting the same target). Such approach allows for more effec-

Takie podejście pozwoli na efektywniejsze wykorzystanie potencjalnego zasobu pracy luf, tak by nie stanowiły one najsłabszego elementu w broni automatycznej.

tive use of potential barrels operational resources that can prevent these resources to be a weakest component in the automatic weapon.

Tabela 5. Zestawienie danych dla ZUR-23-2 [28], NR-30 [6] i AM 35 [5, 31, 32] do obliczania prawdopodobieństwa zniszczenia lekkiego samolotu myśliwskiego i celów typu RAM (opracowanie własne)

Table 5. Specification of data for ZUR-23-2 [28], NR-30 [6] and AM 35 [5, 31, 32] for calculation of destruction probability for a light fighter plane and targets of RAM type (own development)

Nazwa armaty <i>Name of gun</i>		ZUR-23-2		NR-30	AM 35	
zasada działania <i>Principle of operation</i>	[-]	odprowadzenie gazów prochowych <i>Recuperation of powder gases</i>		odrzut lufy <i>Barrel recoil</i>	odprowadzenie gazów prochowych <i>Recuperation of powder gases</i>	
typ pocisku <i>Type of projectile</i>	[-]	OFZT, BZT	APDS-T, FAPDS-T	HEI	TP-T, HEI	FAPDS-T
kaliber <i>Calibre</i>	[mm]	23	23	30	35	35
prędkość wylotowa <i>Muzzle velocity</i>	[m/s]	970	1170	780	1180	1440
szybkostrzelność teoretyczna <i>Theoretical rate of fire</i>	[strz./min]	2x800 (2x1000)	2x800 (2x1000)	860	550	550
liczba luf <i>Number of barrels</i>	[strz.]	2	2	1	1	1
masa armaty <i>Mass of gun</i>	[kg]	80	80	60	670	670
masa pocisku <i>Mass of projectile</i>	[kg]	0,19	0,13	0,41	0,55	0,38
donośność skuteczna <i>Efficient range</i>	[m]	2000	2500	2000	4000	5000
trwałość <i>Life cycle</i>	[strz.]	6000		2000	2500	
max dł. serii, dla gwarantowanego resursu <i>Max. length of series for warranted resource</i>	[strz.] <i>Shots</i>	50		60	32	
liczba amunicji w magazynach <i>Number of ammunition in magazines</i>	[szt.] <i>Items</i>	100		80	200	

W tabeli 5 przedstawiono dane taktyczno-techniczne analizowanych armat, które pozwoliły na określenia prawdopodobieństwa zniszczenia samolotu myśliwskiego (tabela 6) oraz porażenia celu typu RAM (tabela 7).

Zestawienie uzyskanych wyników poka-

Table 5 presents technical-tactical data of analysed guns which were used for identification of probability for hitting a fighter plane (table 6) and a target of RAM type (table 7).

Specification of received results shows

zuje, że prawdopodobieństwo trafienia celu zależy m.in. od parametrów strzelania, parametrów konstrukcyjnych armat i parametrów balistycznych strzału. Na podstawie uzyskanych wyników nie można jednak ocenić jaki jest wpływ prowadzonego ognia na proces zużywania zasobu pracy luf i jaka jest efektywność wykorzystania tego zasobu przy uzyskaniu obliczonego prawdopodobieństwa trafienia. Dlatego też, tego typu ocena nie jest kompletna z punktu widzenia optymalizacji trwałości luf i wymaga dodatkowych badań i analiz.

that the probability of hitting the target depends among others on firing parameters, designing parameters of guns and ballistic parameters of shot. But on the basis of received results both the influence of conducted fire on the barrels operational resources exhaustion process, and the efficiency of using this resources when the calculated probability of hitting is achieved, cannot be evaluated. For this reason the evaluation of this type is not complete in the aspect of optimisation of barrels life time, and requires additional tests and studies.

Tabela. 6. Zestawienie danych dla ZUR-23, NR-30 i AM 35 i wyniki obliczeń prawdopodobieństwa zniszczenia lekkiego samolotu myśliwskiego (opracowanie własne)

Nazwa armaty		ZUR-23-2		NR-30	AM 35		
typ pocisku	[-]	OFZT, BZT	APDS-T, FAPDS-T	HEI	HEI (TP-T)	FAPDS-T	AHEAD
prawdopodobieństwo trafienia lekkiego samolotu myśliwskiego (P_1)	[-]	0,651	0,711	0,711	0,811	0,851	0,911
średnia liczba trafień potrzebna do zniszczenia celu – założono wymaganą wartość $E_{K/s/s}=42$	ω	4,70	4,72	3,37	1,10	1,07	1,02
względna masa armaty	η_m	421	615	146	1218	1763	893
wykorzystanie masy armaty	η_E	1117	1112	2079	572	588	617
liczba wystrzelonych pocisków w czasie [s]	0,15	5,00	5,00	2,15	1,38	1,38	1,38
	0,25	8,33	8,33	3,58	2,29	2,29	2,29
	0,50	16,67	16,67	7,17	4,58	4,58	4,58
	1,00	33,33	33,33	14,30	9,20	9,20	9,20
energia kinetyczna salwy sekundowej	$E_{K/s/s}$	8,94	8,90	12,47	38,29	39,40	41,34
współczynnik mocy armaty	C_E	7,35	7,31	4,62	8,93	9,19	9,64
energetyczny wydatek sekundowy do masy armaty	K	3452	3436	2761	486	500	524
prawdopodobieństwo zniszczenia lekkiego samolotu myśliwskiego (P_2) przy zadanym prawdopodobieństwie trafienia w cel jednym pociskiem w zależności od długości serii	0,15 [s]	0,5256	0,5579	0,3994	0,8426	0,8893	0,9559
	0,25 [s]	0,7114	0,7435	0,5725	0,9541	0,9745	0,9945
	0,5 [s]	0,9167	0,9342	0,8173	0,9979	0,9993	1,0000
	1 [s]	0,9931	0,9957	0,9666	1,0000	1,0000	1,0000

Im większa jest trwałość luf, tym mniejsze są koszty ich eksploatacji. Dodatkowo istnieje również możliwość dłuższego prowadzenia działań ogniowych (dłuższa trwałość gotowości bojowej armat). Tym samym możliwe są dłuższe okresy pomiędzy niezbędnymi odnowami materiałowymi (smaru, wymian profilaktycznych, wymian przegrzanych luf itp.).

The higher life cycle of barrels provides lower costs of their using. Moreover, the fire can be delivered in longer time (combat readiness of guns can last longer). And by the same the longer time gaps can be made between necessary material renovations (grease, prophylactic replacements, and replacements of overheated barrels, etc.).

Table. 6. Specification of data for ZUR-23, NR-30 and AM 35 and results of calculation for probability of destruction of a light fighter plane (own development)

Name of gun		ZUR-23-2		NR-30	AM 35		
Type of projectile	[-]	OFZT, BZT	APDS-T, FAPDS-T	HEI	HEI (TP-T)	FAPDS-T	AHEAD
Probability of hitting the light fighter plane (P_I)	[-]	0,651	0,711	0,711	0,811	0,851	0,911
Average number of hits needed for destruction of the target – it was assumed the required value of $E_{K/s/s}=42$	ω	4,70	4,72	3,37	1,10	1,07	1,02
Relative mass of gun	η_m	421	615	146	1218	1763	893
The effective use of gun mass	η_E	1117	1112	2079	572	588	617
Number of fired rounds in time [s]	0,15	5,00	5,00	2,15	1,38	1,38	1,38
	0,25	8,33	8,33	3,58	2,29	2,29	2,29
	0,50	16,67	16,67	7,17	4,58	4,58	4,58
	1,00	33,33	33,33	14,30	9,20	9,20	9,20
Kinetic energy of one second burst	$E_{K/s/s}$	8,94	8,90	12,47	38,29	39,40	41,34
Coefficient of gun power	C_E	7,35	7,31	4,62	8,93	9,19	9,64
Second energetic yield against the mass of gun	K	3452	3436	2761	486	500	524
Probability of destruction of light fighter plane (P_z) at given probability for hitting the target with one projectile depending on the length of series	0,15 [s]	0,5256	0,5579	0,3994	0,8426	0,8893	0,9559
	0,25 [s]	0,7114	0,7435	0,5725	0,9541	0,9745	0,9945
	0,5 [s]	0,9167	0,9342	0,8173	0,9979	0,9993	1,0000
	1 [s]	0,9931	0,9957	0,9666	1,0000	1,0000	1,0000

Zgodnie z normą wojskową [1] oznacza to lepszą wartość wskaźnika gotowości technicznej oraz gotowości operacyjnej.

According with military standard [1] it stands for a better value of the technical readiness index and operational readiness.

Wyniki badań pokazują również, że w określonych warunkach, do skutecznego porażenia lekkiego samolotu myśliwskiego wystarczą trzy pociski kalibru 30 mm, dwa pociski 35 mm oraz jeden pocisk 35 mm z podpociskami. W takiej sytuacji nie ma potrzeby prowadzenia ognia długością serii w salwie sekundowej. Należy wtedy minimalizować długość serii, przy zachowaniu maksimum prawdopodobieństw trafienia, co dodatkowo ograniczy zużywanie się luf oraz całych armat.

Results of tests also prove that at specific conditions the efficient hitting of the light fighter plane can be made by three 30 mm rounds, two 35 mm rounds, or one 35 mm round with-sub-projectiles. In such situation there is no need to fire with a series length in one second lasting burst. The length of series has to be minimised then at maintaining the maximum of hitting, what additionally limits the wearing of barrels and the whole guns.

Tabela. 7. Zestawienie danych dla ZUR-23, NR-30 i AM 35 i wyniki obliczeń prawdopodobieństwa zniszczenia celu typu RAM (opracowanie własne)

Table. 7. Specification of data for ZUR-23, NR-30 and AM 35 and results of calculations for probability of destruction of a target of RAM type (own development)

Nazwa armaty <i>Name of gun</i>	Zur-23-2			Nr-30	AM 35		
typ pocisku <i>Type of projectile</i>	[-]	OFZT, BZT	APDS-T, FAPDS-T	HEI	TP-T, HEI	FAPDS-T	AHEAD
prawdopodobieństwo trafienia celu typu RAM (P_I) <i>Probability of hitting RAM type target</i>	[-]	0,1860	0,2031	0,2031	0,2317	0,2431	0,2603
średnia liczba trafień do zniszczenia celu – założono wymaganą wartość $E_{K/s}=42$ <i>Average number of hits needed for target destruction – it was assumed the required value of $E_{K/s}=42$</i>	ω	4,70	4,72	3,37	1,10	1,07	1,02
liczba wystrzelonych pocisków w czasie [s] <i>Number of fired rounds within time</i>	0,15	5,00	5,00	2,15	1,38	1,38	1,38
	0,25	8,33	8,33	3,58	2,29	2,29	2,29
	0,50	16,67	16,67	7,17	4,58	4,58	4,58
	1,00	33,33	33,33	14,30	9,20	9,20	9,20
prawdopodobieństwo zniszczenia pocisku RAM ($P_{z/RAM}$) przy zadanym (P_I) w zależności od długości serii <i>Probability of destruction of RAM projectile ($P_{z/RAM}$) for given (P_I)</i>	0,15 [s]	0,1829	0,1974	0,1252	0,2784	0,2995	0,3344
	0,25 [s]	0,2858	0,3069	0,1999	0,4195	0,4475	0,4925
	0,50 [s]	0,4899	0,5196	0,3598	0,6630	0,6947	0,7425
	1,00 [s]	0,7398	0,7692	0,5901	0,8864	0,9068	0,9337

Praktyka nowoczesnych systemów uzbrojenia samolotów wielozadaniowych i samodzielnych zestawów przeciwlotniczych pokazuje, że osiągnięcie takiego efektu możliwe jest dzięki ciągłemu udoskonalaniu systemów nawigacyjno-celowniczych, umożli-

Practice of modern multitask aircraft weapon systems and independent anti-aircraft systems shows that such effect can be reached by continuous perfection of navigating-aiming systems what provides a precise localisation of target's position and

wiając przez to precyzyjne określenie położenia celu oraz predykcji zmiany tego położenia. Systemy naprowadzania mogą realizować wtedy celowanie nadążne, by zwiększyć do maksimum prawdopodobieństwo spotkania się w przewidywanym punkcie zarówno celu jak i pocisku. To algorytmizacja predykcji spotkania pocisku z celem w czasie rzeczywistym stanowi o nowej jakości systemów przeciwlotniczych. W opracowaniu [21] opisuje się systemy nawigacyjno-celownicze, potrafiące działać w tempie takim, że gdy pierwszy pocisk jest w połowie drogi do celu, następuje na podstawie parametrów jego lotu, dopracowanie nastaw strzelania dla kolejnych pocisków. Dlatego też nie ma potrzeby strzelania długimi seriami, jak to pokazano w analizach wykorzystujących wzór (1), co więcej jest ono wręcz niewskazane. Dodatkowy wzrost prawdopodobieństwa trafienia uzyskuje się poprzez zastosowanie pocisków nowej generacji (podkalibrowych, z podpociskami i zapalnikami programowanymi w czasie strzału) oraz poprzez bieżący pomiar prędkości wylotowej, szybkostrzelności (uwzględnianie w czasie lotu pocisku do celu - czasu cyklu pracy automatyki armaty) i warunków temperaturowych (wpływ na prędkość wylotową i szybkostrzelność), ciśnieniowych, wilgotności i wiatru (wpływ na poprawki dla balistyki zewnętrznej lotu pocisku).

Z badań doświadczalnych i doświadczeń bojowych wynika, że tak liczone prawdopodobieństwo trafienia celu jest tylko pewnym przybliżonym opisem, służącym do oceny porównawczej danego typu broni automatycznej. Dlatego tak ważne jest przy optymalizowaniu wykorzystania zasobu pracy luf (maksymalizacji ich trwałości), uwzględnienie większej liczby kryteriów. Należy do nich zaliczyć rozpoznanie typu celu, dobór typu pocisku, bieżący pomiar odległości do celu,

prediction of changes of this position. The bearing systems may operate then in the mode of a following aiming to maximally increase the probability of meeting in a predicted point of both the target and the projectile. It is the algorithmicising of prediction of the meeting in the real time which constitutes about a new quality of the antiaircraft systems. Elaboration [21] describes navigating-aiming systems operating at rates which are high enough to calculate corrections of settings for the second and next rounds on the base of flying parameters of the first round when it just covers half a way to the target. For this reason there is no need for firing with long series, as it was proved by analyses using formula (1), and what's more it is even not recommended. An additional increase of hitting probability can be achieved by application of projectiles of a new generation (kinetic, with sub-projectiles, and with fuses programmed at firing), and by a current measurement of the muzzle velocity, and the rate of fire (regarding during the flight of projectile to the target – the time of gun automatics operation cycle), and temperature conditions (influence into the muzzle velocity and rate of fire), and pressure, humidity and wind conditions (influence into corrections for external ballistics of projectile flight).

The experimental tests and combat experience show that the probability of hitting the target calculated in such way is only an approximated description used for a comparative evaluation of a specific type of automatic weapon systems. Therefore, it is important to consider a greater number of criteria at optimisation of using the barrels operational resources (maximalisation of their life cycle). They include the identification of target type, selection of projec-

miar prędkości pocisku przy wylocie z lufy oraz dobór długości serii/rytmu strzelania, dla uzyskania jak największego prawdopodobieństwa trafienia danego celu lotniczego. Już tylko stosowanie różnych armat powoduje, że prawdopodobieństwo trafienia zmienia się w sposób znaczący. W tabeli 8 zestawiono wskaźniki efektywności rozpatrywanych armat w odniesieniu do 35 mm armaty AM 35. Wyniki pokazują, że dla osiągnięcia porównywalnych efektów należałoby zużyć ponad siedmiokrotnie więcej amunicji 23 mm i prawie czterokrotnie więcej amunicji 30 mm.

tile type, current measurement of target range, measurement of muzzle velocity, and selection of the length of fire series/cycle to achieve the highest probability of hitting a specific aerial target. Merely, the use of different guns significantly changes the probability of hitting. Table 8 specifies effectivity indexes for considered guns referred to 35 mm gun AM 35. The results show that comparable effects can be achieved by spending over seven times more of 23 mm ammunition, and at least four times more of 30 mm ammunition.

Tabela. 8. Zestawienie wskaźników porównujących efektywność operacyjną i logistyczną armat ZUR-23-2, NR-30 i AM 35 (opracowanie własne)

Table 8. Specification of indexes comparing the operational and logistic effectiveness of guns ZUR-23-2, NR-30 and AM 35 (own development)

Nazwa armaty / Name of gun		ZUR-23-2	NR-30	AM 35
krotność zwiększonego zużycia pocisków w stosunku do salwy sekundowej dla AM 35 <i>Multiplication of the increased use of rounds in relations to a fire burst of second duration for AM 35</i>	Krotność <i>Multiplication</i>	3,6	1,6	1,0
liczba dostępnych jednostek ognia (x_{jo}) bez uzupełniania zasobu amunicji wyznaczona z $P_{z/AM}$ (Tabela 7) <i>Number of available units of fire (x_{jo}) without refilling of ammunition store identified from $P_{z/AM}$ (Table 7)</i>	Liczba <i>Number</i>	5,6	3,0	21,8
resurs luf na X_{jo} (x_{jo} jednostek ognia) <i>Barrels life cycle for X_{jo} (x_{jo} units of fire)</i>	Liczba <i>Number</i>	180	140	273
liczba amunicji wymagana do uzyskania efektów porównywalnych z zapasem amunicji w AM 35 <i>Amount of ammunition needed for achieving the effects comparable with the store of ammunition in AM 35</i>	Liczba <i>Number</i>	1455	782	200
liczba amunicji wymagana do uzyskania efektów porównywalnych z zapasem amunicji w AM 35 dla całego resursu (bez wymiany lufy) <i>Amount of ammunition needed for achieving the effects comparable with the store of ammunition in AM 35 for the whole life cycle (without barrel replacement)</i>	Liczba <i>Number</i>	18182	9804	2500

5. Komputerowe wspomaganie zarządzania zasobami pracy armat

Zapewnienie właściwego sterowania zasobami pracy systemu przeciwlotniczego (zwłaszcza luf armat) wymaga opracowania

5. Computer Assisted Management of Guns Operational Resources

Provision of a sensible management of operational resources of the anti-aircraft system (especially gun barrels) requires a prep-

dedykowanego systemu baz danych [33], z którego pobierane będą informacje o elementach składowych systemu oraz dokonującego w sposób automatyczny (wg opracowanych algorytmów przetwarzania) oceny i prognozy stanu technicznego. Realizowane one będą zarówno na potrzeby określenia możliwości bojowych w danych działaniach operacyjnych [34, 35], jak i do planowania logistycznego terminów obsług i wymaganej dostępności zestawów części zamiennych i zapasów materiałów eksploatacyjnych.

Zarządzanie zasobami armat opiera się o wybrane parametry, opisujące na bieżąco stan systemu przeciwlotniczego. Dodatkowo, parametry te powinny zostać zweryfikowane w trakcie planowanych obsług technicznych, poprzez dokonanie odpowiednich pomiarów. Ze względu na zmienne warunki użytkowania systemów przeciwlotniczych (zwłaszcza w trakcie działań bojowych) planowanie procesu eksploatacji nie może polegać tylko na ocenie stanu. Niezbędna jest eksploatacja wg stanu technicznego oraz prognozowanie stanu zdatności z odpowiednim wyprzedzeniem – głównie w celach logistycznych i oceny możliwości bojowych w zaplanowanych działaniach bojowych. Takie opracowania (bazujące na wdrożonym systemie baz danych, umożliwiającym przedłużanie rezerwy armat lotniczych NR-30 i NR-23) komputerowego wspomaganie zarządzaniem zasobami pracy systemu przeciwlotniczego są obecnie realizowane przy wdrażaniu nowoczesnych systemów przeciwlotniczych, np. dla systemu okrętowego OSU-35K.

6. Bieżąca ocena efektywności bojowej i eksploatacyjnej armat

Aby można było oceniać efektywność bojową i eksploatacyjną systemu przeciwlotniczego należy powiązać wskaźniki opi-

aration of a dedicated data bases system [33] from which the information could be collected about the antiaircraft system components, and which could evaluate and prognose in automatic mode (according with developed processing algorithms) their technical status. They will be performed both for identification of combat capacities in specific operational activities [34, 35], and for logistic planning of maintenance schedules, and required accessibility to sets of spare parts and stores of maintenance materials.

The management of gun resources is based on selected parameters describing the current status of the antiaircraft system. Additionally, these parameters have to be verified during the scheduled technical overhauls by relevant measurements. The planning of the process of using cannot be based exclusively on the evaluation of the status because of changing conditions for using the antiaircraft systems (especially during combat operations). It is necessary to use them according with the technical status, and to prognose the status of efficiency with a suitable advance – mainly for the logistic reasons and for assessment of combat capacities in planned combat operations. Such projects (basing on the implemented data bases system for prolongation of resources of aircraft guns NR-30 and NR-23) of computer assisted management of operational resources of antiaircraft system are carried out now at implementation of modern antiaircraft systems, e.g. for naval system OSU-35K.

6. Current Evaluation of Guns Combat and Using Effectiveness

The evaluation of combat and using effectiveness of the antiaircraft system can be made by combining the indexes describing

sujące te dwa zagadnienia w jednym modelu matematycznym. Dopiero takie podejście pozwoli na pełną ocenę efektywności zużycia zasobów pracy luf armat automatycznych w systemie przeciwlotniczym.

Dlatego bez podania w Założeniach Taktyczno-Technicznych (ZTT) wymaganych dla systemu przeciwlotniczego wartości granicznych niezbędnych do oceny stanu wskaźników technicznych i operacyjnych trudno, a właściwie niemożliwe jest podanie oceny jakościowej, a tym bardziej ilościowej danego systemu przeciwlotniczego.

Pojawiające się w niektórych publikacjach popularno-naukowych skrócone – niekompleksowo zrealizowane analizy i oceny systemów przeciwlotniczych lub samych armat mogą prowadzić do błędnych wniosków co do ich walorów technicznych i bojowych.

Na podstawie dokonanych analiz można sformułować wnioski końcowe:

- 1) mając wymagane prawdopodobieństwo trafienia celu oraz odległość i czas jego przebywania w polu rażenia możemy dobrać wymaganą długość serii (dla jednej lub kilku armat/luf) z posiadanego potencjału obrony przeciwlotniczej;
- 2) istotna różnica w jakości armat przeciwlotniczych staje się widoczna dopiero przy ocenie liczby dostępnych jednostek ognia (Tabela 8.) bez uzupełniania zasobu amunicji - czyli zdolności pracy ciągłej systemu bez przerw na doładowanie amunicji;
- 3) bardzo duże znaczenie ma też rodzaj używanej amunicji (dla prawdopodobieństwa trafienia - rozrzut max. i gęstość - liczba pocisków na m^2 , a dla zniszczenia - skuteczność energetyczna i liczba punktów wrażliwych celu);
- 4) jeszcze większe wrażenie ze względu na koszty amunicji i logistyczne poka-

these two questions into one mathematical model. Only such approach can provide a complete evaluation of effectiveness of guns barrels operational resources exhaustion in the antiaircraft system.

Therefore, without including in Tactical-technical Specifications (TTS) the border values required for the antiaircraft system and indispensable for evaluating the status of technical and operational indexes, it could be difficult, or even impossible, to provide a qualitative evaluation, not mentioning about quantitative, of a specific antiaircraft system.

Some short and incomplete analyses and evaluations of antiaircraft systems, or alone guns, appearing in many popular-scientific publications may lead to wrong conclusions over their technical and combat performance.

Basing on performed studies following conclusions may be formulated:

- 1) having the required probability of hitting the target and the range and time of its presence in the hitting zone we can select a demanded length of series (for one or a few guns/barrels) from a disposable antiaircraft defence potential.
- 2) the important difference in the quality of antiaircraft guns can be only noted at evaluation of available units of fire (Table 8.) without refilling the ammunition stores – what is a capability of the system for continuous operation without any pauses for recharging the ammunition.
- 3) the type of used ammunition is also of a high importance (for probability of hitting – maximal scattering and density – number of rounds per m^2 , and for destruction – energetic efficiency and number of target's sensitive points).
- 4) even more important meaning, regarding the logistic and ammunition costs, is

zuje wskaźnik - wymagana liczba amunicji do uzyskania efektów porównywalnych z zapasem amunicji w AM 35;

- 5) dla obiektywizmu porównawczego jakości armat – średnią liczbę trafień w potrzebną do zniszczenia celu można powiązać z konieczną wartością wskaźnika $E_{K/s/s}$ do zniszczenia celu (na potrzeby oszacowania założono jej wartość = 42, zarówno dla celów typu RAM, jak i dla samolotu myśliwskiego).

7. Podsumowanie

Ocena niezawodnościowa oceny procesu zużywania zasobu pracy luf automatycznych armat przeciwlotniczych kalibru 35 mm w powiązaniu z ich efektywnością bojową może być dokonana właściwie dopiero po uwzględnieniu danych uzyskanych w ocenach zrealizowanych według minimum trzech schematów postępowania ocenowego zawartych w tym artykule.

Porównywanie armat automatycznych różnych kalibrów musi być rozpatrywane w kontekście ich zadań i należy uznać, że każde z dział może być najlepsze w pewnym zakresie strefy obrony i rodzaju celu (zwłaszcza jego odporności na porażenie pociskiem z danego dział). Stąd jednym z rozwiązań jest tworzenie systemu obrony okrętu złożonego z kilku analizowanych środków rażenia jak to ma miejsce na ORP Kaszub, gdzie są zarówno pociski raketowe krótkiego zasięgu, jak i karabin wielkokalibrowy 12,7 mm oraz armaty 23 mm i 35 mm.

Wszystkie te systemy stanowią komplementarne powiązanie w ramach ochrony okrętu jak i ochraniających innych obiektów, a ich użycie może być w krytycznych sytuacjach zespolone, zwiększając zdecydowanie zdolności bojowe w ochronie.

shown by the index – required amount of ammunition for achieving the effects comparable with the store of ammunition in AM 35.

- 5) for comparative objectivism on evaluation of guns quality – average number of hits w needed for target destruction may be combined with a value of index $E_{K/s/s}$ needed for target destruction (for estimation reasons the value was estimated to be 42, both for targets of RAM and fighter plane types).

7. Summary

Evaluation of reliability for the estimation process of the automatic antiaircraft 35mm guns barrels operational resources exhaustion in combination with their combat efficiency may be performed only after considering the data received according with minimum three schematic evaluation procedures included in the paper.

Comparison of automatic guns of different calibres has to be considered within the context of their tasks and it has to be acknowledged that each of these guns may be a best one in a certain range of zone of defence and type of a target (especially its resistance against hitting with projectile of a specific gun). Hence, development of a ship defence system containing some of the analysed striking assets is one of solutions, as it is in the case of ORP Kaszub with both the short range missiles, and large calibre 12.7 mm gun, and 23 mm and 35 mm guns.

All these systems are complementary combined in the frame of ship defence and other protected objects, and they may be used jointly at critical situations to fundamentally increase defence combat capacities.

The modern navigating-aiming sys-

To co decyduje o wzroście efektywności bojowej i eksploatacyjnej systemu przeciwlotniczego to nowoczesne systemy nawigacyjno-celownicze, a zwłaszcza algorytmizacja pola walki powietrznej i automatyzacja procesu wyboru stref strzelania jak i długości serii, a tym samym racjonalizacja zużycia zasobu pracy luf armat przeciwlotniczych.

Racjonalizacja z punktu widzenia zasobu pracy luf jest tym istotniejsza, im kaliber armaty jest większy. Oczywiście istotna przy mniejszych kalibrach jest również racjonalizacja w zużyciu zapasów amunicji, które ze względu na warunki ich przechowywania (przestrzeń i bezpieczeństwo) mogą być na małych okrętach ograniczone.

tems, and especially the algorithmicising of the aerial combat field and automatization of decision process for selection of zones of fire and length of series, decide both on the increased combat and using effectiveness of the antiaircraft system and on the reasonable exhaustion of the antiaircraft guns barrels operational resources.

The reasonable approach to the barrel operational resources is of a higher importance for greater calibre guns. It is obvious for smaller calibres that the reasonable spending of ammunition stores is also important as they may be limited on small ships regarding the conditions of storing (safety and space).

Literatura / Literature

- [1] Ministerstwo Obrony Narodowej (2005). Norma Obronna NO-06_A102:2005, „Uzbrojenie i sprzęt wojskowy. Ogólne wymagania techniczne, metody kontroli i badań. Wymagania niezawodnościowe”.
- [2] Idziaszek Z., (2021) „Metoda wyznaczania Zasobu Pracy i Zasobu Obsług Maszyn w procesie optymalizacji Dostępności Produkcyjnej Maszyn” w monografii naukowej pt.: "Technologie XXI wieku – aktualne problemy i nowe wyzwania. Tom 1", <http://bc.wydawnictwo-tygiel.pl/publikacja/74E0E328-70D1-CE05-4D54-60FA9EB3F5EA>.
- [3] Idziaszek Z., *Method of analysis of productivity with an innovative model of the working capability of the object in the body (C) for the new resource allocation on inherent and non-inherent*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2018; 20 (4): 671–681, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.4.18>.
- [4] Idziaszek Z. (2019). An Ordnance Reliability and Life Model for the Estimation of the Component Kits in Preventive Replacement in Terms of Production and Operating Costs. *Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*, 10(2), 103–130. doi:10.5604/01.3001.0013.2119.
- [5] Sprawozdanie nt. „Opracowanie modeli matematycznych wyznaczania wskaźników oceny stanu zdadności armaty AM-35 oraz układu sterowania OSU-35K”, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, czerwiec 2021.
- [6] Idziaszek, Z., Zarys metody oceny wpływu warunków użytkowania luf szybkostrzelnych armat automatycznych na ich trwałość. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, 2005 Vol. 40, nr 2 139-154.
- [7] <https://www.pitradwar.com/oferta/390,holowana-armata-przeciwlotnicza-kal-35-mm-a-35-ag-35> - <https://www.pitradwar.com/oferta/391,system-armaty-morskiej-kal-35-mm-am-35>.
- [8] <http://www.zmt.tarnow.pl/wordpress/en/item/23mm-przeciwlotniczy-morski-zestaw-artyleryjsko-rakietowy-zu-23-2mr/>.
- [9] Leciejewski Z., i inni, „Analiza cykli strzelania (przyjętych przez producenta) ze względu na

- nieprzekroczenie dopuszczalnej wartości temperatury lufy i urządzenia wylotowego” w ramach sprawozdania nt. „Wykonanie analizy teoretycznej i optymalizacji cykli strzelania zdalnie sterowanego systemu przeciwlotniczego w zależności od rodzaju zwalczanego celu oraz wykorzystywanej do zwalczania amunicji” z projektu nr O R00 0021 09, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2011.
- [10] Furmanek W., Sprawozdanie nt. „Wykonanie analizy teoretycznej i optymalizacji cykli strzelania zdalnie sterowanego systemu przeciwlotniczego w zależności od rodzaju zwalczanego celu oraz wykorzystywanej do zwalczania amunicji” z projektu nr O R00 0021 09, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2010.
- [11] Woźniak R., Sprawozdanie nt. „Wykonanie analizy teoretycznej i optymalizacji cykli strzelania zdalnie sterowanego systemu przeciwlotniczego w zależności od rodzaju zwalczanego celu oraz wykorzystywanej do zwalczania amunicji” z projektu nr O R00 0021 09, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2011.
- [12] Sprawozdanie nt. „Analiza niezawodności i trwałości szybkostrzelnych armat automatycznych” z 0 T00B 004 21, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2004.
- [13] Moszczyński A., Zborowski J. „Badanie charakteru i przyczyn niszczenia przewodu lufy szybkostrzelnej armaty automatycznej”. Biuletyn WAT, Warszawa nr 6(310) czerwiec 1978.
- [14] Olejniczak E., Kucharczyk M. „Zjawisko przyspieszonego zużycia luf automatycznych działek lotniczych w rejonie otworów gazowych”. WITU - Problemy techniki uzbrojenia i radiolokacji Rok X Zeszyt 22, Warszawa, 1980.
- [15] Świętek T., „Wpływ oddziaływań cyklicznych obciążeń mechaniczno-ciepłych na własności mechaniczne luf moździerzowych”. WITU - Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji, Rok XXIV, Zeszyt 55, 1995.
- [16] Tomaszek H, Idziaszek Z. Zarys metody oceny trwałości luf działek lotniczych. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2004; Z.1: 99-110.
- [17] Idziaszek Z., Kamiński R., Torecki S. Modelowanie podstawowych czynników wpływających na zmianę wydłużenia komór naboju w szybkostrzelnych armatach automatycznych. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2004 Vol. 39, nr 4 147-159.
- [18] Atferow W.W. „Konstrukcja i rascziet awtomatyczieskowo oruzija”. *Maszinstrojienie*, Moskwa, 1997.
- [19] Bajew I.W. „Teorija i rascziet artilierijskich orudij”. Ministerstwo Obrony SSSR, Moskwa, 1980.
- [20] Kamiński R. *Balistyczno-termiczne uwarunkowania procesu zużywania się luf broni automatycznej*. Rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2007.
- [21] Oerlikon GDF, WeaponSystems.net. WEAPONSYSTEMS.NET. Retrieved 5 July 2021.
- [22] Woźniak R. „Encyklopedii najnowszej broni palnej”. Tom II i III Dom Wydawniczy Bellona. Warszawa, 2001.
- [23] http://www.armyrecognition.com/germany_german_army_artillery_vehicles_systems_uk/skyguard_iii_1_oerlikon_air_defense_system_cannon_missile_technical_data_sheet_specifications.html.
- [24] Piechna S, Idziaszek Z., *Teoretyczne podstawy oceny trwałości eksploatacji obiektów*. *Mechanik* 2010; Nr 7: str. 145-152.
- [25] Typer P, Idziaszek Z., *Aspekty badawcze i wdrożeniowe oraz analiza możliwości zastosowania 12,7 mm WLKM*. Warszawa: Problemy Techniki Uzbrojenia 2016; T. 45, nr 138: 7–23.
- [26] Departament Nauki i Szkolnictwa Wojskowego, „Biuletyn eksploatacyjny Nr U/4988/E/07; Modernizacja systemu eksploatacji działek lotniczych typu Nr-30, NS-23 użytkowanych

- w Siłach Powietrznych RP”, 30 październik 2007.
- [27] Modrzejewski P., “Dynamic tests on flight overloads of the NR-30 cannon rammer system”, April 2020 PROBLEMY TECHNIKI UZBROJENIA 152(4):33-55, DOI: 10.5604/01.3001.0014.0821.
- [28] Piechna S., (współautor) „Sprawozdanie z usługi naukowo-badawczej nt. „Opracowanie ekspertyzy dwóch 23 mm armat: ZUR-23-2... oraz ZUR-23-2..., celem określenia przyczyny powstałych uszkodzeń” i „Opracowanie ekspertyzy 23 mm lufy zestawu plot. ZSU-23-4 MP BIAŁA ...”, Wojskowa Akademia Techniczna, 2015, Warszawa.
- [29] Kocańda Stanisław, „Zmęczeniowe pękanie” Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa 1985 r., wydanie III rozszerzone.
- [30] MON, „35 mm Armata KDA. Warunki techniczne na wykonanie i odbiór”, 2001.
- [31] Oerlikon, „Oerlikon 35 mm Ammunition – Instruction Manual” Brochure No. WSRS 60 325 E, Edition May 1982.
- [32] Sienicki K., Motyl K., *Modelowanie prawdopodobieństwa porażenia celu amunicją rozcalaną programowo*. Mechanik, 2012, R.85, nr 7CD: 885-894.
- [33] Idziaszek, Z., & Olearczuk, E. (2005). Zarządzanie trwałością szybkostrzelnych armat automatycznych w systemie eksploatacji z wykorzystaniem bazy danych eksploatacyjnych. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 1(25), 47–57. Retrieved from <http://ein.org.pl/pl-2005-01-06>.
- [34] Ważny, M., Idziaszek, Z. (2005). Model symulacyjny ruchu pocisku po jego wylocie z przewody lufy. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, (3 (27)), 30–40. Retrieved from <http://www.ein.org.pl/sites/default/files/2005-03-05.pdf>
- [35] Ismail Esen, Mehmet Akif Koç, Dynamics of 35 mm anti-aircraft cannon barrel during firing, Conference: ISCSE 2013, October 2013.

