



**ANALIZA PARAMETRÓW BALISTYCZNYCH XVI-WIECZNEGO  
ARKEBUZA UŻYTEGO W BITWIE POD PAWIĄ**  
**ANALYSIS OF BALLISTIC CHARACTERISTICS OF 16<sup>th</sup> CENTURY  
ARQUEBUSES USED IN BATTLE OF PAVIA**

Mariusz MAGIER

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Mechaniki i Poligrafii,  
Zakład Mechaniki i Techniki Uzbrojenia  
*Warsaw University of Technology, Faculty of Production Engineering, Institute of Mechanics  
and Polygraphs, Establishment of Mechanics and Armament Technologies*

Adrian NOWAK

Uniwersytet Łódzki, Wydział Filozoficzno-Historyczny  
*University of Łódź, Faculty of Philosophy & History*

Tomasz MERDA, Paweł ŻOCHOWSKI

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Zakład Balistyki  
*Military Institute of Armament Technology*

DOI 10.5604/01.3001.0010.6326

**Streszczenie:** W artykule przeprowadzono symulację toru lotu oraz procesu penetracji zbroi ciężkiej jazdy z początku XVI wieku, przez ołowianą kulę wystrzeloną z arkebuza, stosowaną podczas bitwy pod Pawią, która rozegrała się 24 lutego 1525 roku. Użycie podczas tej bitwy masowo broni palnej w postaci arkebuzów przez piechotę przeciwko opancerzonej jeździe rozstrzygnęło wynik tej bitwy i wpłynęło na zmianę taktyki walki na rzecz gruntownego rozwoju formacji piechoty wyposażonej w broń palną. Podstawowe parametry balistyczne XVI-wiecznego arkebuza, niezbędne do procesu symulacji, uzyskano na podstawie informacji ze źródeł historycznych. Na podstawie obliczeń numerycznych wyznaczono parametry toru lotu pocisku ołowianego na odległość zapewniającą penetrację ówczesnej zbroi jeźdźca. Dzięki zastosowaniu metody elementów skończonych (AUTODYN) oszacowano zdolność penetracji zbroi XVI-wiecznego jeźdźca przez kulę ołowianą.

**Słowa kluczowe:** arkebus, pocisk kinetyczny, pancerz

## 1. Wprowadzenie – bitwa pod Pawią

Bitwa pod Pawią, która rozegrała się 24 lutego 1525, była decydującą bitwą w toczono-

**Abstract:** The paper presents simulation of flight path of a lead ball fired with an arquebus and its penetration process through an armor of heavy cavalry knights of the beginning of the 16<sup>th</sup> century used during the Battle of Pavia on 24 February, 1525. The mass use of firearms by the footmen against the cavalry decided the result of the battle and started a large deployment of infantry formations armed in firearms. The basic ballistic characteristics of 16<sup>th</sup> century arquebus necessary for the simulation process are based on historical information. The numerical calculations were used to identify the flying characteristics of the lead ball at the distances securing the penetration of that time horseman's armour. Penetration capacity of the lead ball through the 16<sup>th</sup> age horseman armour was estimated by using the finite element method (AUTODYN).

**Keywords:** arquebus, kinetic projectile, armour

## 1. Introduction – Battle of Pavia

The battle of Pavia took place on 24 February, 1525 and had a decisive meaning

nych w latach 1494–1559 wojnach włoskich.

Początek wojen włoskich przypada na rok 1494, gdy władca Francji Karol VIII, starając się umocnić panowanie we Włoszech, został pokonany przez ligę hiszpańsko-austriacką, do której dołączyły Anglia i miasta włoskie. Następca Karola Ludwik XII ponownie przystąpił do wojny i w roku 1500 zajął Mediolan oraz starł się w roku 1504 z Hiszpanami w bitwie o Neapol. Francuzi toczyli walki z wojskami Maksymiliana I Habsburga oraz króla angielskiego Henryka VIII. Po krwawych bitwach pod Ginegate oraz Novarą 1512-1513 r. zmuszeni jednak zostali do opuszczenia Mediolanu. Większy sukces odniósł następca Ludwika, Franciszek I, który już na początku swojego panowania odnosząc wspaniałe zwycięstwo pod Marignano w roku 1515, ponownie zajął Mediolan. Kolejny władca Habsburgów, Karol V, uznał postanowienia traktatu z Noyon za nieważne i w roku 1521 walki we Włoszech wybuchły na nowo.

W październiku 1524 r. w wyniku nowej kontrofensywy wojska francuskie zawładnęły Mediolanem, rozbite zaś wojska cesarskie zamknęły się w Pawii, obleganej przez Francuzów.

Do oblegania Pawii król francuski Franciszek I zaangażował cztery i pół tysiąca landsknechtów z Czarnego Legionu, pięć tysięcy Szwajcarów, około dwóch tysięcy jazdy włoskiej i francuskiej [1]. Pavia została obsadzona przez wojska hiszpańskie, cesarskie i niewielkie korpusy włoskie. obrońcy miasta, przede wszystkim ze względu na silne fortyfikacje, odparli pierwszy szturm wojsk francuskich, który nastąpił 28.X.1524 r. Wojska francuskie bez skutku próbowały odciąć miasto od wody, aż w końcu zdecydowano o blokadzie Pawii [2]. Wojska francuskie stały pod twierdzą aż do zimy, przez co wojsko francuskie słabło, rosła dezercja i szerzyły się choroby, co pozwoliło wojskom cesarskim uzupełnić straty. W tym celu sprowadzono z Niemiec jedenaście kompanii landsknechtów i osiemnaście kompanii piechoty. Po koncentracji armia cesarska liczyła dwanaście tysięcy landsknechtów, pięć tysięcy piechoty (w tym hiszpańska piechota, która była wyposażona także w broń palną) i tysiąc jazdy hiszpańskiej [3]. Armia Franciszka liczyła wówczas już

for Italian Wars of 1494–1559.

The Italian Wars started in 1494 when the French King Karol VIII was defeated by the Spanish-Austrian League, to which the England and Italian towns also joined, when he tried to enforce his power in Italy. Luis XII the Karol's successor again returned to the war and captured Milan in 1500 and confronted the Spain forces in 1504 fighting for Napoli. The French fought against the troops of Maximilian I and the English King Henry VIII. They were forced to leave Milan after heavy fights at Ginegate and Novara in 1512-1513. Francis I the successor of Luis was more successful as he gained a victory in 1515 at Marignano at the beginning of his reign and captured Milan again. Karol V the next ruler of Habsburg dynasty declared the decisions of Noyon treaty as invalid and the fights in Italy started again in 1521.

In October, 1524 the French troops sized Milan again and the routed caesarean forces contained themselves in Pavia which was besieged by the French.

The French King Francis I deployed four and a half thousand landsknechts from the Black Legion, five thousand Switzerland's troops and ca. two thousand French and Italian cavalrymen [1]. Pavia was manned by Spain and the caesarean troops and small Italian detachments. The first attack of French forces was repelled on 28 October, 1524 mainly in effect of strong fortifications. The Frenchmen tried inefficiently to cut the town out of water and finally decided to continue the blockade of Pavia [2]. French forces stayed at the foot of the stronghold until the winter and it put their morale down and increased the desertion and illnesses whereas the caesarean forces managed to refill the losses. To do it eleven companies of landsknechts and eighteen companies of footmen were brought from Germany. After the concentration the caesarean army counted twelve thousand landsknechts, five thousand footmen (footmen from Spain had the fire-arms) and one thousand of the Spain cavalry [3]. The Francis' army counted then just twenty thousand troops.

dwadzieścia tysięcy wojska.

Wojska cesarskie przeprowadziły szturm w nocy z 23 na 24 lutego.

Zaskoczenie wojsk francuskich było ogromne [4]. Franciszek zbierając rozproszone oddziały zdecydował się na desperacki atak. Z użyciem oddziału jazdy ordynansowej rozbił tylną straż wojsk cesarskich i związał na lewym skrzydle jazdę hiszpańską. Gdy Hiszpanie odskoczyli od ciężkozbrojnych kompanii ordynansowych, cesarscy muszkieterowie i arkebuzerzy zdzieliłkowali ogniem Francuzów i umożliwili kontrnatarcie jeździe hiszpańskiej.

The caesarean forces launched a sortie on the night from 23 to 24 of February.

The surprise of the French forces was complete [4]. Francis tried to collect scattered troops and answered by a desperate attack. By using orderly detachments of cavalry he routed the rear guard of the caesarean forces and engaged the Spanish cavalry on the left wing. When the Spaniards bounced out from the heavy armed orderly companies the fire of caesarean musketeers and arquebusees smashed the Frenchmen and the Spanish cavalry launched a counterattack.



**Rys.1. Słynna hiszpańska mieszana formacja piechoty *tercio* składająca się z pikiera, arkebuzera i szermierza** (źródło: [http:// pl. pinterest.com](http://pl.pinterest.com))

**Fig.1. Well known Spanish mixed formation “*tercio*” consisting of a spearman, arquebuseer and swordman** (source: [http:// pl. pinterest.com](http://pl.pinterest.com))

Następnie doszło do walki między czworobokami piechoty. Dowódca landsknechtów, mimo iż posiadał mniej liczne oddziały, nie dał żadnych szans wojskom Franciszka. Piechota francuska zaatakowana z trzech stron została „wybita do nogi”. Niedobitki jazdy francuskiej uciekając w stronę Pawii wpadły na własną piechotę szwajcarską. Z Pawii wymaszerował w ostatniej fazie bitwy dowódca obrony tego miasta na czele załogi niemieck-

Next the fight started between quadrilateral formations of footmen. Commander of the landsknechts left no chances for the Francis men in spite he had less numerous troops. The French footmen were decimated. The survived groups of French cavalry started to run towards Pavia and dashed into own Swiss footmen. The Pavia stronghold defence commander launched a raid in the last phase of the

ko-hiszpańskiej i szybkim atakiem zdobył obóz francuski [3].

battle on the head of the German-Spanish troops and captured the French camp [3].



**Rys. 2. Silny ogień arkebuzerów dziesiątkuje ciężką jazdę francuską (źródło: [http:// pl. pinterest.com](http://pl.pinterest.com))**  
**Fig. 2. Intense fire of arquebuses decimates the heavy French cavalry (source: [http:// pl. pinterest.com](http://pl.pinterest.com))**

Bitwa pod Pawią ukazała wzrastającą rolę broni palnej. Ogień hiszpańskich muszkietierów nie tylko powstrzymał natarcie Szwajcarów i zdziesiątkował skrzydło kolumny francuskiej piechoty, ale także osłabił i pokonał szwadrony jazdy francuskiej. Ponadto, strzelcy ukryci w krzakach i za płotami prowadzili silny ogień, likwidując żołnierzy i konie, podczas gdy przeciwnicy nie mogli ich dosięgnąć pikami. Brak w armii francuskiej dostatecznej liczby piechoty uzbrojonej w broń palną w dużym stopniu zadecydował o ich klęsce. Dalszy rozwój broni palnej kładzie kres świetności jazdy rycerskiej, a na polach bitew od tej pory decydującą rolę zaczyna odgrywać piechota uzbrojona w broń palną w postaci arkebuzów i muszkietów.

## 2. Charakterystyka techniczna arkebuza z początku XVI wieku

Arkebusz wyposażony w zamek lontowy był ładowaną odprzodowo bronią z lufą o długości około 1,2 m o gładkim wewnętrznym przewodzie. Masa broni wahała się od 4 do 7 kg. Śred-

The battle of Pavia shoved increased meaning of fire arms. The fire of Spanish musketeers not only halted the attack of Swiss footmen and decimated the wing of the French troop's column but also weakened and defeated the squadrons of French cavalry. Moreover the shooters had been firing from the hidden positions behind the trees and fences beyond the reach of enemy lances. The defeat of the French troops was decided by the lack of footmen armed with firearms. The further development of the firearms ended the era of the cavalry and since then the infantrymen armed with the piece such as arquebuses and muskets started to dominate the battlefields.

## 2. Technical Characteristics of Arquebus from the 16<sup>th</sup> Century

An arquebus was a piece of firearm loaded from the front and had a safety fuse lock and the smooth barrel bore of ca. 1.2 m length. Its mass was between

nia masa pocisku w postaci kuli ołowianej wynosiła około 30 g (średnica około 18 mm), a prędkość początkowa pocisku około 240 m/s [5].

4 to 7 kg. The average mass of the lead ball was ca. 30 g (diameter ca. 18 mm) and the projectile muzzle velocity of ca. 240 m/s [5].



Rys. 3. XVI-wieczna hakownica (od góry) i arkebus (od dołu) (źródło: AKG/East News)

Fig. 3. The hook musket (top) and arquebus (bottom) from the 16<sup>th</sup> century (source: AKG/East News)

Na krótkich dystansach arkebus zapewniał większą siłę rażenia od łuku, jednakże ustępował mu pod względem szybkostrzelności. Ponowne naładowanie broni trwało ponad minutę. Niezaprzeczalnym atutem arkebuza czy muszkietu była zdolność przebicia każdej zbroi na ówczesnym polu walki [5].

W celu określenia parametrów balistyki zewnętrznej kuli wystrzelonej z powyżej opisanego arkebuza, jak i zdolności penetracji (odległości skutecznego rażenia) ówczesnego pancerza jeźdźca kawalerii przeprowadzono, przedstawione w kolejnych punktach, obliczenia numeryczne.

### 3. Symulacja parametrów toru lotu kuli wystrzelonej z arkebuza

Na podstawie danych literaturowych przyjęto, że pociski wystrzelwane z arkebuza miały masę ok. 30 g. Ponieważ były to kule ołowiane to ich średnica przeliczeniowa do celów symulacji wynosi 17,2 mm. Do analizy wykorzystano model balistyki zewnętrznej oparty na modelu punktu materialnego. W modelu założono stałe parametry atmosfery i prawo oporu dla sfery. Analizowano strzał na odległość 250 m. Kąt wystrzału wynosił 1,96°. Dla tego kąta podniesienia kąty uderzenia są poniżej 3°,

The arquebus provided a greater hitting effect than a bow at short distances but had a lower rate of fire. The reloading lasted more than one minute. An undisputable advantage of an arquebus or musket in the battlefields was that they penetrated every type of armour of that time [5].

The numerical calculations presented in the next chapters were performed to identify the characteristics of external ballistics for the ball that was shot with the above mentioned arquebus and its penetration capacities (distance of effective hitting) through the armour of cavalymen of that time.

### 3. Simulation of Ball Flight Characteristics

It was assumed on the basis of literature data that the projectiles shot with the arquebus have a mass ca. 30 g. As they were the lead balls then their recalculated diameter is 17.2 mm. A model of external ballistics based on the movement of the material point was used for the analysis. Constant parameters of the atmosphere and its drag for a spherical object were assumed for the model. The shot on the range of 250 m was considered. Angle of shooting was 1.96°.

a więc pomijalnie małe. Wierzchołkowa toru lotu wynosi 2,58 m.

Parametry lotu pocisku uzyskane za pomocą obliczeń numerycznych z wykorzystaniem ww. modelu zostały przedstawione w tabeli 1.

This elevation angle gives hitting angles below 3° which are small enough to omit them. Ceiling of the flying path is 2.58 m.

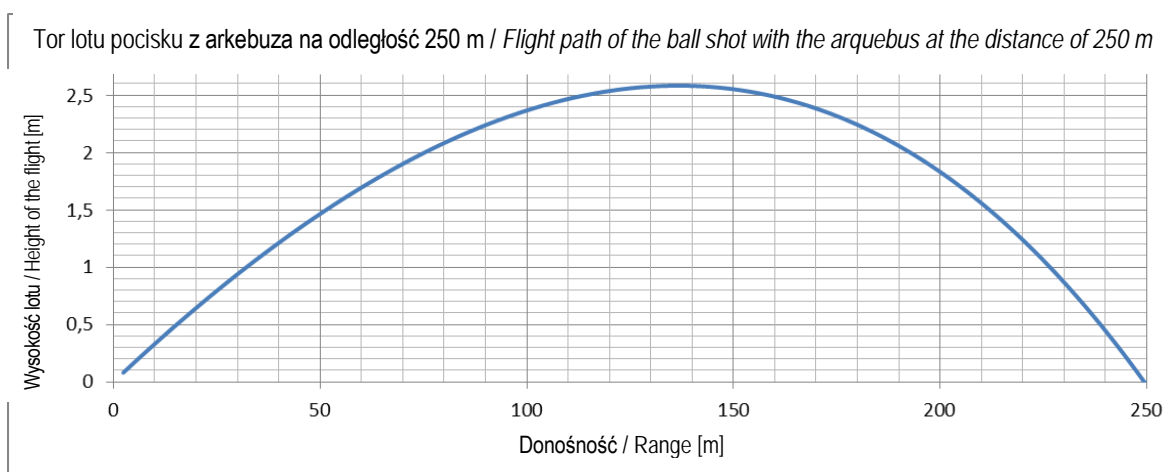
Parameters of ball trajectory received in this model by numerical calculations are shown in table 1.

Tabela 1. Parametry lotu pocisku (kuli) wystrzelonego z arkebuza  
Table 1. Flying characteristics of the projectile (ball) shot with the arquebus

Odległość / Distance [m]	Czas lotu / Flying time [s]	Prędkość pocisku / Projectile velocity [m/s]	Energia pocisku / Projectile energy [J]
10	0,04	235	830
20	0,09	228	780
30	0,13	223	743
40	0,18	216	702
50	0,22	212	672
60	0,27	206	638
70	0,32	201	606
80	0,37	196	578
90	0,42	192	551
100	0,48	187	522
110	0,53	183	500
120	0,59	178	475
130	0,65	174	452
140	0,7	170	434
150	0,76	166	414
160	0,83	162	393
170	0,89	158	376
180	0,95	155	360
190	1,02	151	343
200	1,09	148	327
210	1,15	145	314
220	1,22	141	300
230	1,3	138	285
240	1,37	135	273
250	1,45	132	260

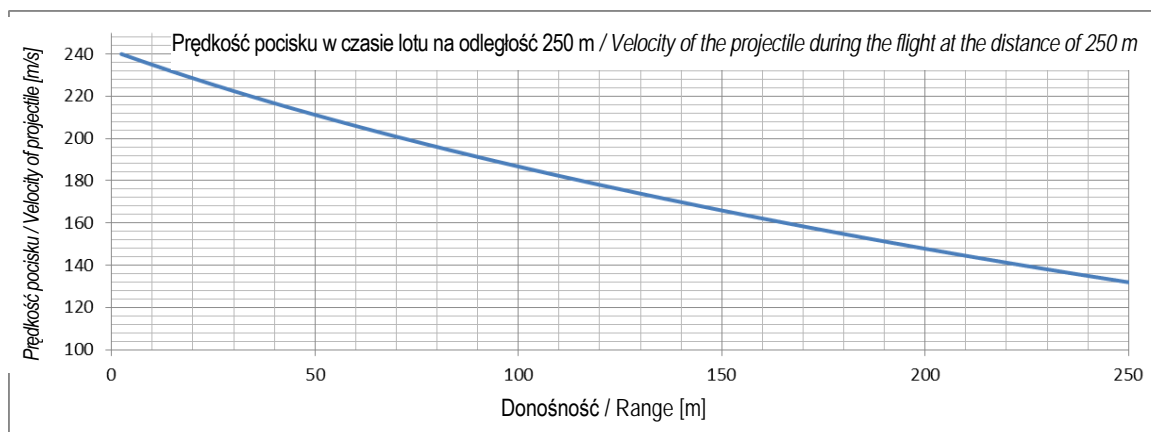
W czasie lotu na 250 m prędkość pocisku (kuli) spada do wartości 55% prędkości wylotowej, a energia kinetyczna pocisku do wartości 30% energii wylotowej. Wykresy toru lotu, prędkości pocisku i energii pocisku zostały przedstawione na rysunkach 4-6.

On distance of 250 m the velocity of the projectile (ball) falls to 55% of the muzzle velocity and kinetic energy of the projectile to 30% of the initial energy. The graphs of ball trajectory, velocity and energy are presented in figures 4-6.



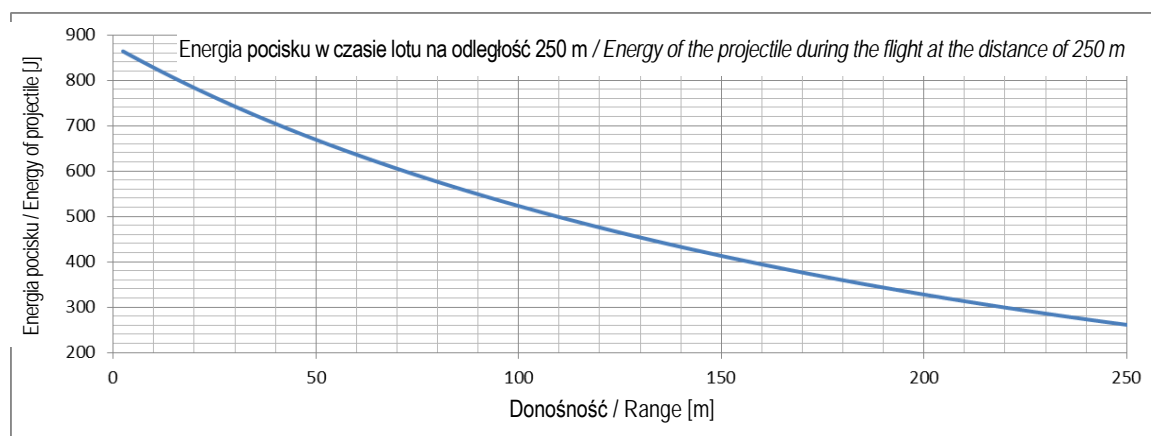
**Rys.4. Tor lotu pocisku na odległość 250 m**

**Fig.4. Flight path of the projectile at the distance of 250 m**



**Rys. 5. Prędkość pocisku w czasie lotu na odległość 250 m**

**Fig. 5. Velocity of the projectile during the flight at the distance of 250 m**



**Rys. 6. Energia pocisku w czasie lotu na 250 m**

**Fig. 6. Energy of the projectile during the flight at the distance of 250 m**

#### 4. Symulacja procesu penetracji zbroi ciężkiej jazdy z początku XVI wieku przez ołowianą kulę arkebuzową

Do wykonania analiz numerycznych procesu penetracji zbroi ciężkiej jazdy z początku XVI wieku przez ołowianą kulę wystrzeloną z arkebuzy zastosowano oprogramowanie ANSYS Autodyn [6, 7]. Według informacji dostępnych w literaturze zdolność penetracji tego typu broni była wystarczająco wysoka, aby przebić każdy rodzaj ówczesnego pancerza. Zatem, decydujący wpływ na skuteczność ostrzału mogła mieć w tym przypadku słaba celność arkebuzów, która z kolei była ściśle uzależniona od odległości ostrzału. Zgodnie z danymi źródłowymi zdecydowana większość salw z broni palnej w analizowanym okresie wykonywana była z odległości około 20-30 m. Według wyliczonych w poprzednim rozdziale parametrów lotu pocisku, prędkość uderzenia w cel wystrzelonej z takiego dystansu kuli ołowianej mogła osiągać wartość około 220 m/s. W celu określenia zdolności penetracji (odległości skutecznego rażenia) ówczesnego pancerza jeźdźca kawalerii, zdecydowano się na przeprowadzenie serii analiz numerycznych, w których zmiennym parametrem była prędkość uderzenia kuli ołowianej w cel (uzależniona od odległości ostrzału). W analizach pominięto zagadnienie celności tego typu broni oraz wpływ kąta uderzenia pocisku w cel, gdyż wyznaczone parametry lotu wykazały, że zmieniał się on w niewielkim zakresie (do  $3^\circ$ ). Celem analiz było zatem określenie granicznej minimalnej prędkości pocisku (odległości ostrzału), która zapewni przebicie pancerza.

Poprawne numeryczne odwzorowanie charakterystycznych cech materiału wymaga zwykle przeprowadzenia wielu badań wytrzymałościowych dla wyznaczenia wiarygodnych wartości parametrów równań opisujących właściwości materiałów. Ponieważ odpowiednie próbki do badań są niedostępne zdecydowano, że parametry równań konstytutywnych zostaną dobrane na podstawie ogólnodostępnych w literaturze danych dla materiałów o podobnych właściwościach. Niewielka ilość dostępnych danych źródłowych wymusiła również przyjęcie kilku uproszczeń i założeń niezbędnych do budowy modeli numerycznych. Na podstawie informacji dostępnych w literaturze [8-9]

#### 4. Simulation of Arquebus' Lead Ball Penetration through Heavy Cavalry Armour of 15<sup>th</sup> Century

In order to perform numerical analyses of arquebus' lead ball penetration through heavy cavalry armour from the beginning of the 15<sup>th</sup> century the computer code ANSYS Autodyn was used [6, 7]. According to literature data the penetration capacities of these firearms were sufficient to pierce every type of armour of that time. Then the accuracy of arquebuses would play a decisive role in this case and it strictly depended on the range of firing. According to source information the volleys of shots were mostly delivered in that time at the distances of ca. 20-30 m. According to the characteristics of flight calculated in the former chapter the ball's hitting velocity at such distance would be ca. 220 m/s. In order to identify the efficiency of penetration (distance of effective hitting) through the armour of a cavalryman of that time a series of numerical analyses has been conducted for different velocities of the ball's hitting into the target (depending on the distance of firing). The questions of such type firearms accuracy and the impact of the hitting angle which changed in small degree (to  $3^\circ$ ) were not considered in the analyses. The analysis was focused then on the identification of a minimal limit velocity for the ball (firing distance) securing the penetration of the armour.

A series of stress-strain tests is usually needed to identify reliable values for parameters of equations describing the material properties and to provide a correct numerical reconstruction of material. As the samples of material to be tested were not available then it was decided that the parameters of constitutive equations would be taken on the basis of commonly accessible literature data on materials of similar properties. On the other hand a scarce amount of available source data had also forced the acceptance of a few simplifications and assumptions needed for building the numerical models. On the basis of literature data [8-9] it was assumed above all



założono m.in., że:

- grubość pancerza we wszystkich analizach odpowiadać będzie wartości charakterystycznej dla najgrubszych napierśników stosowanych w analizowanym okresie, tj. 2 mm. Poszczególne obszary napierśnika zapewne różniły się znacznie pod względem grubości, co wynikało bezpośrednio z niewyrafinowanych metod obróbki materiału,
- zgodnie z danymi dostępnymi w literaturze, materiał pancerza stanowić będzie stal średniowęglowa o granicy plastyczności na poziomie  $R_e=300-350$  MPa, wytrzymałości na rozciąganie  $R_m= 400-450$  MPa oraz wydłużeniu względnym około 12%. Pod względem składu chemicznego oraz właściwości, materiał stosowany na napierśniki przypominał bardziej nawęglane żelazo lub żeliwo niż stal jaka znana jest obecnie [9]. Cechą charakterystyczną napierśników z tego okresu była zapewne bardzo duża niejednorodność struktury oraz właściwości, wynikająca z niedopracowanej technologii obróbki.

that:

- The thickness of the armour in all analyses equals to a specific value for the thickest breast plates used in the considered time i.e. 2 mm. Particular fragments of the breast plate had certainly different thickness caused by not well developed methods of material processing,
- According to data available in literature the armour material is a medium carbonised steel with the plasticity limit on the level  $R_e=300-350$  MPa, tensile strength  $R_m= 400-450$  MPa and relative longitudinal expansion ca. 12%. Chemical composition and properties of the material used for breast plates are closer to carbonised iron or cast iron than to the steel that is used now [9]. The breast plates made of such material were characterised by not uniform structure and properties because technologies of processing in that time were not well developed.

Tabela 2. Parametry równań modeli materiałowych dla komponentów symulacji

Table 2. Parameters of equations for material models of simulated components

Model J-C								
Komponent / Component		$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	$G$ , GPa	$A$ , MPa	$B$ , MPa	$n$	$C$	$m$
Pancerz, stal / Armour, steel		7,85	81	350	50	0,36	0,022	1
		max naprężenie/ Max stress, MPa: □00			max odkształcenie/ Max strain: 0,4			
Model Steinberg Guinan								
Pocisk, ołów/ Projectile, lead		$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	$G$ , GPa	$R_e$ , MPa	$max R_e$ , MPa	Stała umocnienia / Constant of strengthening	wykładnik umocnienia / Exponent of strengthening	
14300	700	11,34	86	8	100	1□0	0□52	0□03

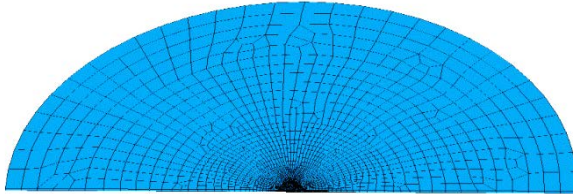
Do prawidłowego opisu zależności konstytutywnych dla materiałów użytych w analizach zastosowano równanie stanu Gruneisena oraz model wytrzymałości Johnsona-Cooka (J-C) [10] dla pancerza oraz model Steinberga Guinana dla ołowiu. Model wytrzymałości dla pancerza został uzupełniony o model zniszczenia, oparty na kryterium maksymalnych dopuszczalnych wartości naprężeń oraz odkształceń głównych.

To get a correct description of constitutive relations for the materials used in the analyses the Gruneisen's equation of state and the Johnson-Cook's strength model (J-C) [10] were used for the armour and Steinberg-Guinan model for the lead. The armour's strength model was supplemented by the destruction model based on the criterion of maximal acceptable main stresses and strains.

Zestawienie wartości parametrów modeli materiałów użytych w analizach numerycznych zawiera tabela 2 [11].

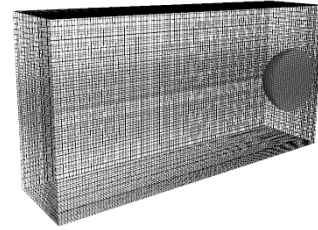
Dyskretyzację przestrzenną komponentów symulacji przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

Pancerz w sformułowaniu Lagrange'a /  
*Armour plate in Lagrange's formulation*

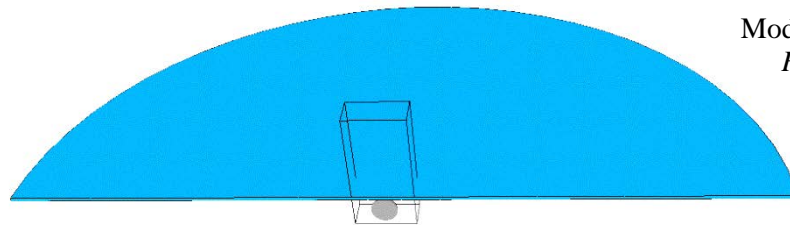


An arrangement of parameters for material models used in numerical analyses is included in table 2 [11].

Space discrimination of simulated components is presented in figures 7 and 8.

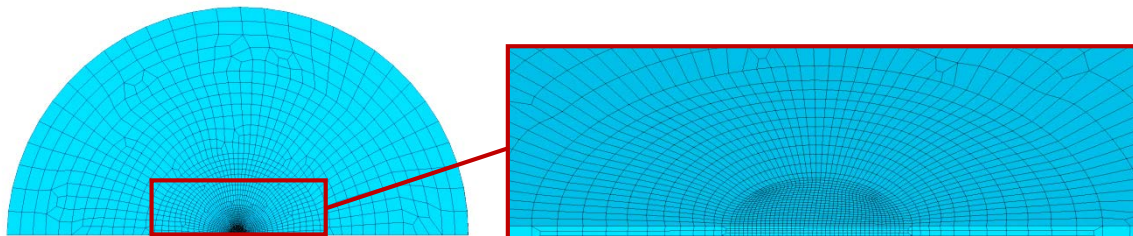


Domena i pocisk w sformułowaniu Eulera'a /  
*Domain and projectile in Euler's formulation*



Model ostateczny /  
*Final model*

**Rys. 7. Model numeryczny analizowanego zjawiska**  
*Fig. 7. Numerical model of the analysed phenomenon*



**Rys. 8. Sposób dyskretyzacji przestrzennej pancerza**  
*Fig. 8. Spatial discrimination of the armour*

Wykonano ją za pomocą programu HyperMesh z zastosowaniem jednej płaszczyzny symetrii. Pozwoliło to zmniejszyć liczbę elementów o połowę i przyspieszyć obliczenia. Do budowy pancerza zastosowano elementy ośmiowęzłowe (HEXAHEDRAL).

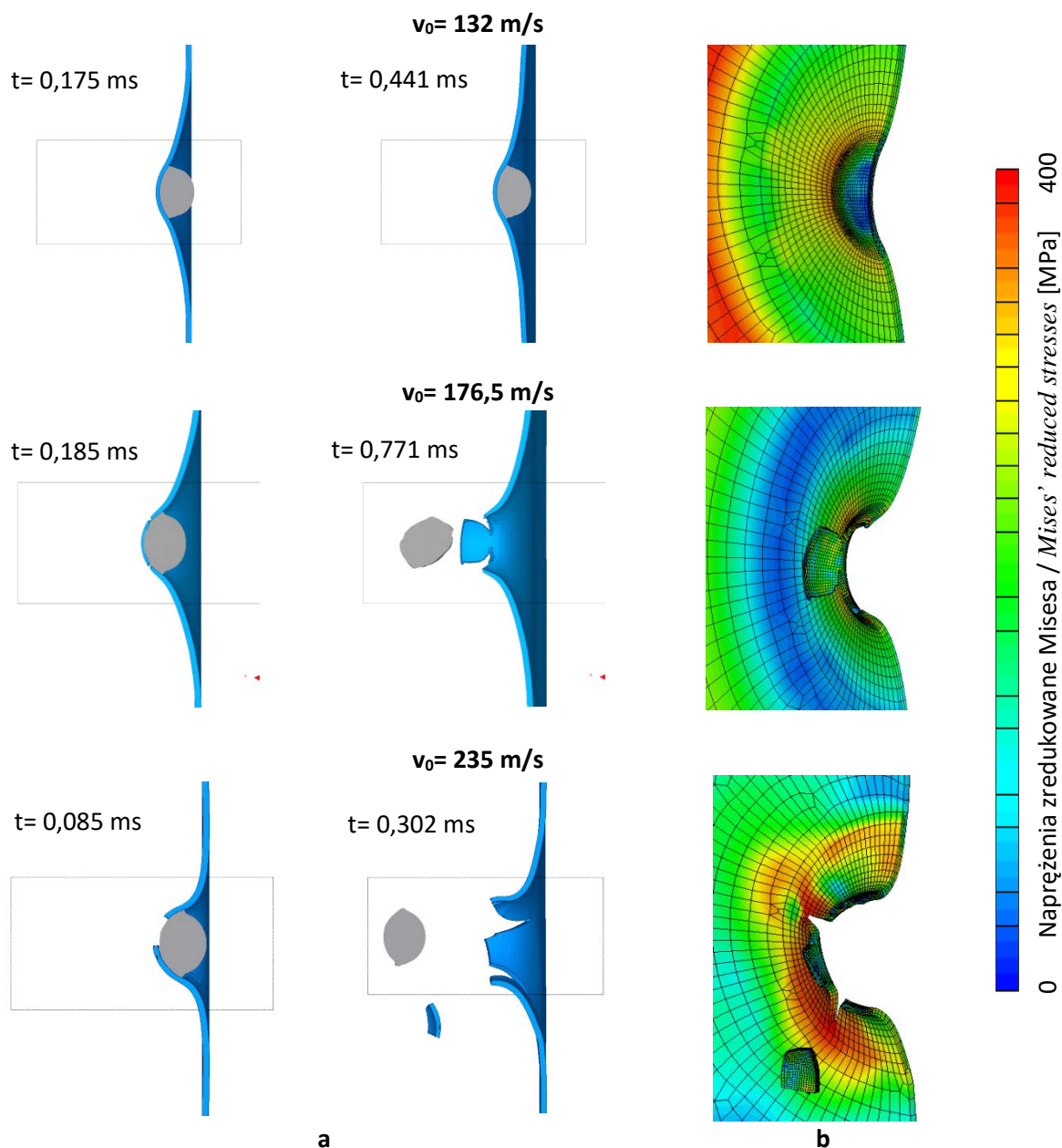
Rozmiar elementów dobrano w taki sposób, aby ich liczba nie spowolniała znacząco obliczeń, a z drugiej strony umożliwiała precyzyjne odwzorowanie geometrii ciał i uzyskanie dokładnych rezultatów. Dodatkowo, w celu ograniczenia liczby elementów w modelu pancerza, zastosowano zagęszczenie siatki wokół stref

It was made by using computer code HyperMesh and one plane of symmetry. It reduced the number of elements by half and accelerated the calculations. Eight-junction elements (HEXAHEDRAL) were used to built the armour.

The size of elements was matched to avoid a significant slowing down the calculations and to get on the other hand a precise reconstruction of geometry for the bodies and accurate results. Moreover in order to reduce the number of elements in the model of armour a denser mesh was

ulegających znacznym odkształceniom (punkt uderzenia pocisku).

applied for the zones subjected to large deformations (ball impact point).



Rys. 9. Wyniki analiz numerycznych uderzenia pocisków w pancerz: a - stan komponentów po uderzeniu, b – naprężenia zredukowane w pancerzu po uderzeniu

Fig. 9. Results of numerical analyses for projectiles hitting into the armour: a – state of components after the hitting, b – reduced stresses within the armour after the hitting

Odległość pomiędzy sąsiadującymi węzłami siatki wynosiła od około 0,25 mm w strefach oddziaływania kuli na pancerz (8 elementów na grubości pancerza) do 2 mm w miejscach pancerza nieulegających odkształceniom (1 element na grubości pancerza).

Ze względu na przewidywane znaczne

The distance between adjacent junctions of the mesh was between ca. 0.25 mm in the zones where the ball interacts with the armour (8 elements within the thickness of the armour) up to 2 mm for places without any deformation (1 element for the armour thickness).

As large deformations of the ball were

odkształcenia pocisku, zdecydowano się zamodelować go za pomocą sformułowania Eulera (rys. 7). W tym celu zbudowano domenę elementów Eulera, którą wypełniono materiałem odpowiadającym powietrzu. Następnie odpowiednie elementy domeny zostały wypełnione ołowiem formując kształt pocisku. Warunki początkowo-brzegowe zostały zadane w taki sposób, aby model numeryczny w możliwie największym stopniu odwzorowywał cechy układu podczas zjawiska rzeczywistego. Pociskom zostały nadane odpowiednie prędkości początkowe, a płyta pancerza została utwierdzona po obwodzie.

Wyniki analiz numerycznych tj. stan komponentów w określonych chwilach zderzenia oraz stan pancerza po uderzeniu przedstawiono na rysunku 9.

## 5. Wnioski

Wyniki analiz numerycznych wskazują jednoznacznie, że prawdopodobieństwo przebicia pancerza o grubości 2 mm (używanego przez jazdę na początku XVI wieku) przez kulę ołowianą wystrzeloną z arkebuzą było bardzo wysokie nawet dla odległości ostrzału do około 140 m.

Potwierdzone zostały informacje źródłowe, według których tego typu broń była w stanie przebić każdy dostępny w analizowanym okresie pancerz. Analizując skuteczność XVI-wiecznej broni palnej należy wziąć pod uwagę jej niską celność oraz długi czas przeładowania. Zgodnie z informacjami dostępnymi w literaturze, w warunkach bojowych problem stanowiło trafienie za pomocą arkebuzą celu na odległości powyżej 50 m.

Pomimo ww. niedoskonałości broni palnej, jej powszechne zastosowanie wpłynęło na zmianę taktyki użycia ciężkiej piechoty, która dzięki wsparciu strzelców (arkebuzerów lub muszkietierów) potrafiła skutecznie przeciwdziałać i prowadzić równorzędną walkę z jazdą.

Rozwój broni palnej, a przede wszystkim jej zdolność rażenia i szybkostrzelność wpłynęły jednoznacznie na stopniowy proces wypierania z uzbrojenia łuków oraz kusz przez następne dwa stulecia.

expected a decision was made to model it by the Euler's formulation (Fig. 7). A domain of Euler's elements filled with the material corresponding to the air was built for this reason. In the next step suitable elements of the domain were filled with the lead forming the shape of the projectile. Initial border conditions of the numerical model were settled to secure a possibly high degree reconstruction of system properties during the real phenomenon. Adequate velocities were given for the ball and the armour plate was fixed on the perimeter.

Results of numerical analyses i.e. the states of components at specific moments of impact and the state of armour after the hitting are presented in Fig. 9.

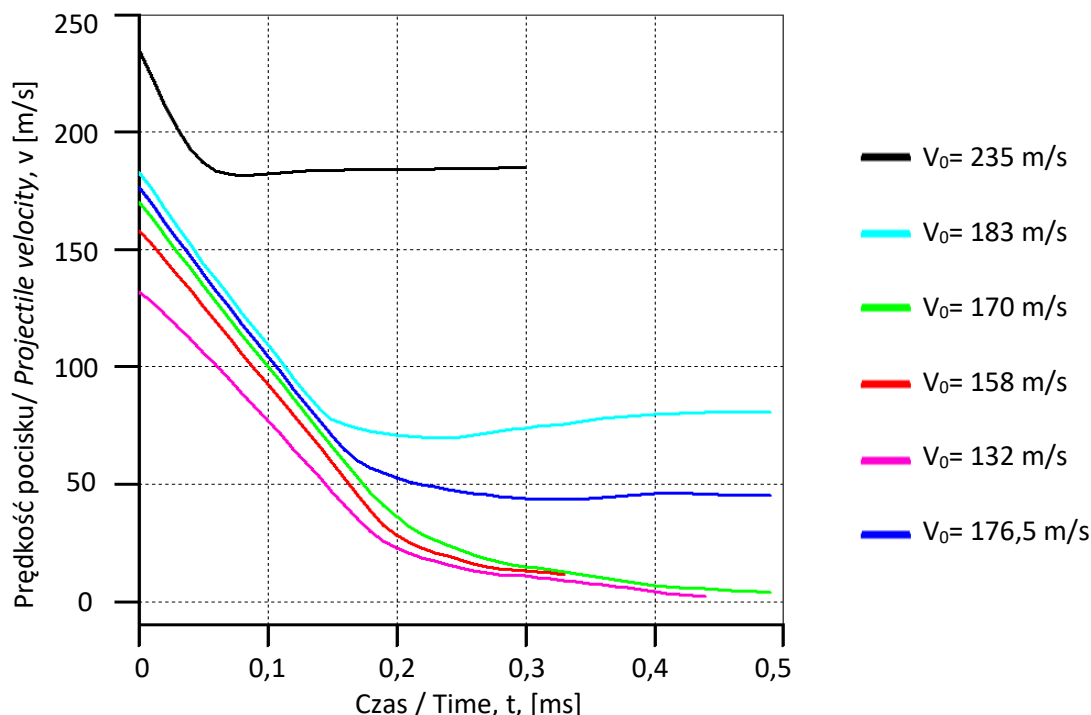
## 5. Conclusions

The results of numerical analyses show clearly that the probability for penetration of 2 mm thickness armour (used by the cavalymen at the beginning of the 16<sup>th</sup> century) by a lead ball fired with the arquebus was very high even for the distances of firing equal to ca. 140 m.

Then the source information was confirmed that the fire arms of this type penetrated every type of armour used in that time. A low accuracy and long time of reloading have to be taken into account at considering the efficiency of the 16<sup>th</sup> century fire arms. The information available in literature shows that it was rather problematic to hit a target from the arquebus at distances above 50 m.

In spite these fire arms imperfections their common use changed the tactics of the heavy footmen who assisted by the fusiliers (arquebuses or muskets) were able to engage effectively the cavalry.

Development of the fire arms and especially their capacities of hitting and the rate of fire had a direct influence into a gradual elimination of bows and crossbows from the equipment within two next centuries.



Rys. 10. Wykresy prędkości pocisków w czasie dla poszczególnych wartości prędkości uderzenia  
Fig. 10. Diagrams of projectiles velocities versus time for particular hitting velocities

Przedstawiony przykład przeprowadzonej analizy numerycznej wskazuje na możliwość zastosowania tej metody w badaniach symulacyjnych dawnej techniki wojskowej, także dla celów historycznych.

Presented example of numerical analysis illustrates a possibility for using it for simulated investigations of the military technology from the past and for the historical purposes as well.

### Literatura / Literature

- [1] D. Miller, *The Landsknechts*, Londyn 1976,
- [2] E. Razin, *Historia sztuki wojennej*, T. II, Warszawa 1960,
- [3] M. Plewczyński, *Daj nam Boże sto lat wojny*, Warszawa 1997.
- [4] J. Sikorski, *Zarys historii wojskowości powszechnej do końca XIX w.*, Warszawa 1972,
- [5] B.T. Carey, J.B. Allfree, J. Cairns, *Wojny średniowiecznego świata. Techniki walki*, Wydawnictwo Bellona, Warszawa 2008,
- [6] ANSYS Help, Release 16.0 - ©SAS IP, Inc, 2015.
- [7] *AUTODYN-2D Technical Specification - The Interactive Non-linear Dynamic Analysis Code*. Century Dynamic - <http://www.centdyn.com>.
- [8] McCants A.: *Engineering the Medieval Achievement: Armor*. [www.web.mit.edu](http://www.web.mit.edu), dostęp lipiec 2017.
- [9] Stretton M. *Testing Arrows Against Plate Armour*. [www.markstretton.blogspot.com](http://www.markstretton.blogspot.com), dostęp lipiec 2017.
- [10] Johnson G. R., Cook W. H.: *A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains and High Temperatures*. Proc. 7th. Symp. on Ballistics, The Hague, The

Nederlands, 1983.

[11] Biblioteka materiałów programu ANSYS Autodyn v.16.

