

MODELOVÁNÍ PRŮSTŘELU OCELOVÉ DESKY MALORÁŽOVOU PRŮBOJNOU STŘELOU

Ludvík JURÍČEK, Pavel NOVOTNÝ
Vojenská akademie, Brno

Souhrn

Článek analyzuje možnosti simulace průbojného účinku **malorážové kinetické střely** působící na **homogenní ocelový pancíř** omezené tloušťky s využitím dostupných matematických modelů a simulačních nástrojů ještě před provedením vlastního balistického experimentu. V článku je věnována pozornost predikci průbojného chování běžné protipancéřové puškové střely malé ráže bezprostředně po nárazu na pancéřovou desku různé tloušťky.

Výsledky matematického modelování a počítačové simulace byly porovnány s praktickými výsledky postřelování pancéřové desky nábojem ráže 7,62×39 PZ.

Klíčová slova: Počítačová simulace; Matematický model; Metoda konečných prvků; Malorážová kinetická střela; Průbojný účinek.

Modeling of Small Arm Projectile Penetration Through a Steel Plate

Summary

An armoured-piercing effect of a small arm projectile is analyzed by this article. The small arm projectile penetration through a homogenous armoured plate of limited thickness was calculated by several available mathematical models and simulation tools. These methods were used before the ballistic experiment was conducted. This article discusses prediction of the impact behavior of a common small arm armoured-piercing shell immediately after the impact on a steel armoured plate of different thickness.

The results of mathematical models and numeric simulations were compared with experimental results from ballistic tests of 7.62×39 PZ caliber projectile penetration through a steel armoured plate.

Key words: Mathematic model; Finite element method; Homogenous armour plate; Small arm armour-piercing projectile; Penetration process.

Úvod

Důležitým problémem spadajícím do oblasti terminální balistiky malorážových střel a střepin, kterému je nutné věnovat patřičnou pozornost, je případ vyřazení živé síly ukryté za překážkou (krytá živá síla). Stupeň balistické ochrany člověka před účinky průbojných střel (střepin) je do značné míry závislý na vlastnostech použitých materiálů balistické ochrany, jejich uspořádání a začlenění do konstrukce bojového vozidla, ale také na konstrukčních a balistických parametrech samotných protipancéřových střel.

Chování průbojné střely při zásahu tuhé desky a v průběhu jejího průniku, je složitý dynamický proces. U homogenních balistických překážek omezené tloušťky (ocelový plech, dřevo, sklo nebo tenký homogenní pancíř), kdy se dá očekávat průnik střely s přebytkem kinetické energie, je důležitá predikce stavu střely a jejího chování za touto překážkou.

Je velmi pravděpodobné, že střela po průniku překážkou se vedle ztráty podstatné části kinetické energie bude vyznačovat určitým stupněm deformace svého těla, ztrátou hmotnosti a nestabilitou pohybu za touto překážkou.

Důležitou otázkou, na kterou je nutné v takovém případě odpovědět, je, zda si střela po průniku překážkou uchovala dostatečně velký ranivý potenciál k ničení živé síly, která je ukryta za touto překážkou.

V další části tohoto článku chceme čtenářům představit určité možnosti použití vybraných empiricky sestavených matematických modelů v minulosti používaných pro výpočet **limitních dopadových rychlostí** protipancéřových střel nutných k probití tuhých překážek předem definovaných tloušťek a vlastností. Použití takových modelů považujeme pouze za první přiblížení při řešení výše popsané dynamické úlohy. Dalším postupným krokem se může stát **počítačová simulace** procesu průniku malorážové průbojné střely nebo jejího jádra oce-

lovou deskou s využitím metody konečných prvků (MKP). Nakonec byly výsledky predikce průbojného chování malorážové střely puškového náboje ráže 7,62×39 PZ porovnány s jejími skutečnými účinky na homogenní pancíř 2P.

Pozn.: Skutečné průbojné chování střely náboje 7,62×39 PZ při probíjení homogenního pancíře 2P tloušťek 6 a 12 mm, bylo potvrzeno střeleckým experimentem provedeným katedrou zbraňových systémů Vojenské akademie v Brně.

Terminálně-balistická charakteristika problému

Použitím dostupných matematických modelů a počítačové simulace predikovat průbojné chování protipancéřové střely (kaleného jádra) při průniku ocelovou deskou a její působení na biologický cíl ukrytý za překážkou bezprostředně po jejím průniku.

Výsledky matematického modelování a počítačové simulace porovnat s výsledky provedeného střeleckého experimentu.

Balistickému zkoumání byly podrobeny:

a) Vojenský puškový náboj:

- 7,62×39 PZ s celoplášťovou střelou byl vyvinut během 2. světové války, ale do výzbroje armád zaveden až po jejím skončení. Nábojnice tohoto náboje je vyráběna z oceli plátované tombakem, z oceli fosfátované a lakované a také z mosazi. Je známo rovněž experimentální provedení z duralu. Průbojná střela (použitá v experimentu) je biogivální, má ocelové kalené jádro, olověnou košilku a plášť z oceli plátované tombakem. Zápalka je u vojenského

provedení typu Berdan a obsahuje slož na bázi třaskavé rtuti.

Vojenský náboj má střelu o hmotnosti 8,05 g s počáteční rychlostí $v_0 = 740 \text{ ms}^{-1}$. Tomu odpovídá počáteční kinetická energie střely $E_0 = 2205 \text{ J}$.

b) Balistická ochrana:

K simulaci balistické ochrany byly použity desky ocelového homogenního pancíře s označením 2P, tloušťky 6 a 12 mm. Jednotlivé vzorky o rozměrech 0,5×0,5 m byly na střelnici uloženy na stůl a fixovány proti pohybu při postřelování ve vzdálenosti 5 m od ústí balistické hlavně. Technické parametry použité zkušební balistické hlavně uvádí tabulka 1.

Použitý pancéřový plech podrobený terminálně-balistickému zkoumání je vyráběn z oceli 2P, jež je ve srovnání s ostatními typy ocelí (mimo Armox 400 S) velmi úsporně legována (Ni, Cr). V současnosti tvoří tento materiál základ pro výrobu jednovrstvého homogenního pasivního pancéřování většiny BV a OT v AČR. Materiál tohoto pancíře je odolný proti penetraci všech typů průbojných střel, vzniku trhlin a jejich šíření do okolí střelného kanálu a proti vzniku výtrží na vnitřní straně pancíře. U oceli 2P lze předpokládat zlepšení balistické odolnosti v souvislosti s modifikováním jejich chemického složení (vyšší tvrdost a pevnost při zachování dostatečné houževnatosti).

V tabulkách 2 a 3 jsou uvedeny střední hodnoty chemického složení a mechanických veličin této oceli.

Tabulka 1

Konstrukční a balistické údaje zkušební balistické hlavně (poskytnuto katedrou zbraňových systémů VA v Brně)

Zkušební balistická hlaveň (označení)	$L_{HL}^{1)}$	d	v_0	Stoupání drážek			$\alpha^{2)}$	$n^{3)}$
	[mm]	[mm]	[ms^{-1}]	[mm]	[ráž]	[in]	[°]	[s^{-1}]
R. 7,62 vz. 43 - H 4667	520	7,62	700	235	31	9,25	5,80	2979

Poznámky:

¹⁾ délka zkušební balistické hlavně

²⁾ úhel stoupání závitu vývrtu hlavně (měřen vzhledem k podélné ose hlavně)

³⁾ počet otáček střely na ústí hlavně

Tabulka 2

**Chemické složení pancéřové oceli 2P
(střední hodnoty udávané výrobcem)**

Značka oceli	Chemické složení oceli [%]									Tvrdość HB, tloušťka plechu [mm]
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	B	
2P	0,23 0,29	1,2 1,6	1,2 1,6	max 0,30	max 0,50	0,15 0,25	max 0,030	max 0,035	–	444-514, tl. 4-7 388-495, tl. 8-14 363-495, tl. 15-20

Tabulka 3

**Mechanické vlastnosti pancéřové oceli 2P
(střední hodnoty udávané výrobcem)**

Veličina	Jednotka	Teplota popouštění	
		250 °C	480 °C
Mez kluzu ($R_{p0,2}$)	MPa	1347	1058
Mez pevnosti (R_m)	MPa	1659	1155
Tažnost ($A \sigma$)	%	8,6	13,6
Zúžení (Z)	%	40,8	48,6
Nárazová práce (KV)	J	18,1	26,4
Vrubová houževnatost (KCV)	J cm ²	22,3	33

Matematické modely

Schopnost protipancéřové střely prorazit pancíř určité tloušťky závisí do značné míry na její dopadové kinetické energii.

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot m_q \cdot v_d^2, \text{ [J] (1), kde}$$

v_d – dopadová rychlost střely [ms^{-1}] a
 m_q – hmotnost střely [kg].

Ze vztahu (1) vyplývá, že se zvyšováním hmotnosti střely (lineárně) a její dopadové rychlosti, jež ve vztahu vystupuje ve druhé mocnině, průbojný účinek poroste. Při určování průbojného účinku je velmi důležitý pojem **limitní dopadové rychlosti** střely v_{lim} , kterou lze chápat jako dopadovou rychlost střely, jež je nezbytná k tomu, aby střela dané ráže a hmotnosti právě pronikla pancířem určité tloušť-

ky a mechanických vlastností (pozn.: na konci průniku bude rychlost postupující střely nulová). Pro její stanovení dnes existuje řada analyticky odvozených i empiricky sestavených vztahů, které vycházejí z následujících předpokladů:

- střela se při průchodu pancířem nedeformuje,
- energie spotřebovaná na rozrušení povrchových vrstev pancíře a na přeskupení jeho částic se neuvažuje,
- ztráta kinetické energie přeměněné na teplo se neuvažuje.

Pozn.: „Vujič“ při řešení problematiky hloubky vniku střely do překážky předpokládá využití dopadové energie E_d střely na energii vynaloženou na překonání statické složky odporu prostředí (tj. rozrušení molekulární soudržnosti hmoty překážky) e_s a energie vynaložené na překonání dynamické složky odporu prostředí (uvedení částic hmoty pronikajícího prostředí do pohybu) e_d .

a) Vzorec de-Marre

Při odvození svého modelu **de-Marre** vycházel z předpokladu, že střela ve tvaru válce dopadá kolmo na nekonečně velký pancíř, který je vyroben z dokonale pružné hmoty. Dále autor předpokládal, že nedochází ke stranové deformaci ani u střely, ani u pancíře, kdy střela proniká pancířem bez tření.

Za předpokladu, že celá dopadová kinetická energie střely E_d se spotřebuje na probití pancíře, je možné její dopadovou rychlost považovat za rychlost limitní ($v_d = v_{lim}$). Pro skutečnou protipancéřovou střelu a skutečné podmínky probíjení pancíře byl odvozen empirický vztah pro výpočet její limitní rychlosti:

$$v_{lim} = K \cdot \frac{d^\alpha}{m_q^\beta} \cdot s^\gamma. \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (2).$$

Na základě střeleckých zkoušek stanovili někteří autoři hodnoty exponentů α , β , γ (viz tabulka 4).

Tabulka 4

Hodnoty experimentálně získaných koeficientů α , β , γ

Koeficient	α	β	γ
Euler	1,0	1/2	1/2
Noble	1/2	1/2	1,0
Kruppova laboratoř	5/6	1/2	1/3
de-Marre	0,75	1/2	0,7

Nejlepší výsledky pro stanovení průbojnosti protipancéřové střely dává vztah v **de-Marreově** tvaru:

$$v_{lim} = K \cdot \frac{d^{0,75} \cdot s^{0,7}}{m_q^{0,5}}, \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (3).$$

Rovnice platí pro kolmý dopad střely na pancíř a k nejlepšímu souladu (shodě) mezi výpočtem a experimentem dochází v případech, kdy se tloušťka pancíře jen málo liší od hodnoty ráže střely a její dopadová rychlost dosahuje nižších hodnot (pod 1500 ms^{-1}).

Jednoduchost de-Marreova vzorce (3) a dobrý soulad střeleckých experimentů s výpočtem vedly ke snaze rozšířit použitelnost tohoto vzorce i na pod-

mínky probíjení pancíře při **šikmém dopadu** střely na pancíř. Z nejrůznějších úprav se nejlépe osvědčil následující tvar:

$$v_{lim} = K \cdot \frac{d^{0,75} \cdot s^{0,7}}{m_q^{0,5} \cdot n \cdot \cos \alpha}, \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (4), \text{ kde}$$

v_{lim} – limitní dopadová rychlost střely [ms^{-1}],

d – ráže střely [dm],

m_q – hmotnost střely [kg],

K – konstanta průbojnosti [1],

s – tloušťka pancíře [dm],

α – úhel dopadu střely na pancíř* [$^\circ$]

n – opravný koeficient [1].

*Úhel, který svírá podélná osa střely s kolmicí na rovinu pancíře v místě zásahu.

Pozn.: Konstanta průbojnosti K byla autorem stanovena empiricky a svou hodnotou vyjadřuje vlastnosti probíjeného pancíře a protipancéřové střely. V případě homogenního pancíře vyrobeného z legované oceli a střely s tupou hlavou (homogenně kalenou) dosahuje hodnot v rozmezí 2350–2450.

Někteří autoři vyjádřili konstantu průbojnosti ve tvaru $K = \rho \cdot H$, kde koeficient ρ vyjadřuje vliv konstrukčního uspořádání střely a konstanta H vliv mechanických vlastností probíjeného pancíře. Praktické zkušenosti však ukázaly, že se tímto způsobem soulad pokusů s výpočtem nijak výrazně nezlepšil.

Opravný koeficient vyjadřuje skutečnost, že při dopadovém úhlu $\alpha \approx 60^\circ$ prakticky všechny typy protipancéřových střel zaznamenají odraz. Pro úhel dopadu $\alpha \leq 30^\circ$ je $n = 1$ a pro úhel $\alpha > 30^\circ$ má n hodnotu 1,5.

b) Vzorec Gabeaudův

Jedná se rovněž o empirický vztah určený k výpočtu limitní rychlosti střely, v němž jsou podmínky probíjení dány kvalitou probíjeného **homogenního pancíře*** (Brinellovou tvrdostí HB) a tvarovým součinitelem střely, který je zastoupen výškou hlavové části těla střely h_H .

$$v_{lim} = 125 \cdot \sqrt{\Delta} \cdot \sqrt{\frac{d^2 \cdot s^2}{m_q \cdot (s + h_H) - 3d^2 \cdot s^2}}, \quad [\text{ms}^{-1}]$$

(5), kde

d – ráže střely [dm],

m_q – hmotnost střely [kg],

h_H – výška hlavové části těla střely [dm],

s – tloušťka probíjeného pancíře [dm] a

Δ – Brinellova tvrdost pancíře [HB].

*Pozn.: Dr. Pobořil a Dr. Primus rozšířili platnost Gabeaudova vztahu (5) i na povrchově kalené (tvrzené) pancíře, které se vyznačují zvýšenou tvrdostí povrchových vrstev na straně před-

pokládaného zásahu protipancéřovou střelou. Do hloubky tvrdost pancíře postupně klesá a zvyšuje se jeho houževnatost.

Výpočet v_{lim} střely náboje 7,62×39 PZ – vzorec de-Marre

(Dosazované rozměrové a balistické parametry střely do vztahů (3) a (5) odpovídají kalenému ocelovému jádru uvažované malorážové průbojné střely.)

Dáno:

$$d_j = 4 \cdot 10^{-2} \text{ dm}, m_j = 4 \cdot 10^{-3} \text{ kg}, v_d = 740 \text{ ms}^{-1}, s_1 = 6 \cdot 10^{-2} \text{ dm}, s_2 = 12 \cdot 10^{-2} \text{ dm},$$

$$K = 2400.$$

1) Deska tloušťky $s_1 = 6 \text{ mm}$:

$$v_{\text{lim}6} = 2400 \cdot \frac{(4 \cdot 10^{-2})^{0,75} \cdot (6 \cdot 10^{-2})^{0,7}}{(4 \cdot 10^{-3})^{0,5}} = 473,6 \text{ ms}^{-1}.$$

2) Deska tloušťky $s_2 = 12 \text{ mm}$:

$$v_{\text{lim}12} = 2400 \cdot \frac{(4 \cdot 10^{-2})^{0,75} \cdot (12 \cdot 10^{-2})^{0,7}}{(4 \cdot 10^{-3})^{0,5}} = 769,4 \text{ ms}^{-1}.$$

Výpočet v_{lim} střely náboje 7,62×39 PZ – vzorec Gabeaudův

Dáno:

$$d_j = 4 \cdot 10^{-2} \text{ dm}, m_j = 4 \cdot 10^{-3} \text{ kg}, h_H = 2 \cdot 10^{-2} \text{ dm}, s_1 = 6 \cdot 10^{-2} \text{ dm}, s_2 = 12 \cdot 10^{-2} \text{ dm},$$

$$\Delta = 480 \text{ HB}.$$

1) Deska tloušťky $s_1 = 6 \text{ mm}$:

$$v_{\text{lim}6} = 125 \cdot \sqrt{480} \cdot \sqrt{\frac{(4 \cdot 10^{-2})^2 \cdot (6 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot 10^{-3} \cdot [(6 \cdot 10^{-2}) + (2 \cdot 10^{-2})] - 3 \cdot (4 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 6 \cdot 10^{-2}}} = 377,8 \text{ ms}^{-1}.$$

2) Deska tloušťky $s_2 = 12 \text{ mm}$:

$$v_{\text{lim}12} = 125 \cdot \sqrt{480} \cdot \sqrt{\frac{(4 \cdot 10^{-2})^2 \cdot (12 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot 10^{-3} \cdot [(12 \cdot 10^{-2}) + (2 \cdot 10^{-2})] - 3 \cdot (4 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 12 \cdot 10^{-2}}} = 593,3 \text{ ms}^{-1}.$$

Dílčí závěry

Matematické modely autorů de-Marra a Gabeauda, které byly použity k výpočtu limitní dopadové rychlosti malorážové protipancéřové střely nutné k probití homogenní ocelové pancéřové desky předem definované tloušťky a vlastností, byly původně odvozeny k řešení průbojného účinku dělostřeleckých ráží uvedeného typu střeliva.

Porovnáním výsledků provedených výpočtů s balistickým experimentem bylo dosaženo lepší shody u limitní dopadové rychlosti stanovené de-Marrem, a to u obou tloušťek plechů. Výpočtem těchto rychlostí pomocí matematického modelu Gabeauda jsme pro jednotlivé mezní tloušťky pancéřové desky dospěli k výrazně nižším hodnotám, které v podstatě znamenají, že i ocelovou desku tloušťky 12 mm uvedená střela spolehlivě probije s přebytkem kinetické energie.

Pozn.: Pancéřová deska tloušťky $s_1 = 6$ mm potřebuje k úplnému probití limitní dopadovou rychlost $v_{lim6} = 473,6 \text{ ms}^{-1}$. Naopak deska dvojnásobné tloušťky vyžaduje rychlost střely $v_{lim12} = 769,4 \text{ ms}^{-1}$.

Při $v_d = 740 \text{ ms}^{-1}$ skutečné střely se dá tedy očekávat, že k úplnému probití dojde pouze u desky tloušťky 6 mm, a to s přebytkem dopadové rychlosti střely $266,4 \text{ ms}^{-1}$, kterou lze považovat za **rychlost výletovou**. K probití desky tlusté 12 mm nedojde, neboť uvažovaná průbojná střela disponuje cca o 30 ms^{-1} nižší dopadovou rychlostí než je rychlost limitní.

Tento nesoulad matematické predikce průbojného účinku a výsledků vlastního střeleckého experimentu nás opravňuje k závěru, že využití matematického modelu Gabeauda pro puškové ráže je spojeno se značnými zkresleními a nepřesnostmi. Proto se v budoucnosti při řešení balistických úloh podobného typu omezíme na požití matematického modelu odvozeného de-Marrem.

Metoda konečných prvků a rychlé děje

Metoda konečných prvků (MKP) je matematická metoda pro řešení úloh mechaniky kontinua.

Pozn.: Základní odvození MKP zde nebude odvozeno. Bude zde pouze naznačena hlavní podstata explicitní metody řešení pohybové rovnice.

Daný spojitý fyzikální problém obsahuje nekonečně mnoho stupňů volnosti a je popsán parciálními diferenciálními rovnicemi. Jejich přímé řešení je nejen příliš složité, ale ve většině případů i ne-

realizovatelné. Z těchto důvodů jsou daná tělesa diskretizována na konečný počet prvků. V každém prvku je aproximován posuv uzlu pomocí báze funkce.

$$\{u_{i(x,y,z,t)}\} = [N_{(x,y,z)}] \{\delta_{(t)}\}, \quad (6), \text{ kde}$$

N – matice báze funkcí,

δ – sloupcový vektor deformačních parametrů.

Ve většině případů se báze funkce volí jako lineární, ale je možné volit i jiné speciální funkce. Po dalších úpravách, které jsou obecně známé a nebudeme je zde proto uvádět, obdržíme základní pohybovou rovnici (7):

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\}, \quad (7), \text{ kde}$$

$\{U\}$ – sloupcový vektor všech přemístění modelu,

$[M]$ – matice hmotnosti,

$[C]$ – matice tlumení,

$[K]$ – matice tuhosti a

$\{F(t)\}$ – sloupcový vektor vnějšího zatížení.

Tuto parciální diferenciální rovnici řešíme pomocí některé metody přímé integrace pohybové rovnice (7). V případě rychlých dějů je velmi výhodné použití explicitní metody centrálních diferencí. Při jejím použití je zapotřebí, aby matice $[M]$ (obdobně $[C]$) byla diagonální, to znamená všechny prvky, které neleží na diagonále jsou rovny 0 (viz rovnice 8). Potom se řešení stává triviální.

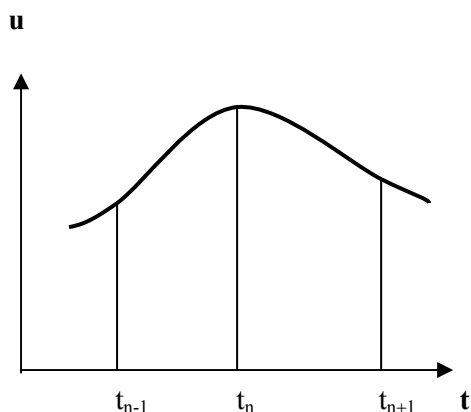
Pozn.: Většina MKP systémů používá implicitní metody řešení pohybových rovnic (popř. obsahují obě možnosti). Implicitní metody jsou mnohem efektivnější při řešení statických úloh, modálních úloh nebo přechodových dlouhotrvajících dějů apod. Tyto „klasické“ metody a jejich použití v praxi naprosto převládají.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

Podstatu metody centrálních diferencí lze zapsat podle následujících rovnic:

Pohybová rovnice v čase t_n :

$$[M]\{\ddot{u}_n\} + [C]\{\dot{u}_n\} + [K]\{u_n\} = \{F_n\} \quad (9)$$

**Rovnice pro výpočet rychlosti (10) a zrychlení (11):**

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t}(u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (10)$$

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{\Delta t^2}(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) \quad (11)$$

Po dosazení rovnic (10) a (11) do rovnice (9) řešíme pro čas t_{n+1} :

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] + \frac{2}{\Delta t}[C]\right)u_{n+1} = \{F_n\} - \left([K] - \frac{2}{\Delta t^2}[M]\right)\{u_n\} - \left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] - \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\{u_{n-1}\} \quad (12)$$

Další otázkou je stabilita řešení, kdy toto řešení je pouze podmíněně stabilní, a proto se při výpočtu vyžaduje extrémně krátký integrační krok.

Pro ilustraci kritického časového kroku Δt_{crit} použijeme rovnici (13):

$$\Delta t_{CRIT} = \frac{l}{c} \quad (13)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (14), \text{ kde}$$

l – délkový rozměr elementu [m],

c – rychlost šíření rázových vln v daném prostředí [ms^{-1}],

l – délkový rozměr elementu [m],

c – rychlost šíření rázových vln v daném prostředí [ms^{-1}],

E – modul pružnosti daného prostředí [MPa] a

ρ – hustota daného prostředí [kgm^{-3}].

Čas Δt je časový úsek nutný na to, aby rázová vlna prošla tyčí o délce l . Tato podmínka vymezuje použití výše uvedené explicitní metody pro řešení rychlých dějů, u nichž celková doba trvání je velmi krátká.

Řešení průstřelu ocelové desky MKP

V současné době je použití metody konečných prvků (MKP) v problematice interakce střely a desky velmi efektivní matematickou metodou. Použití MKP bude předvedeno na průniku střely ocelovou deskou. K řešení této dynamické úlohy jsme použili program ANSYS/LS-DYNA. Uspořádání geometrického modelu celoplášťové průbojné střely a probíjené ocelové desky je vidět na obr. 1 (barevná příl. s. III), který je uspořádán jako 3D model.

a) Zadání a balistická charakteristika problému

Celoplášťová střela pěchotního náboje ráže 7,62×39 PZ je sestavena z kaleného ocelového jádra, olovené košilky a tenkého pláště vyrobeného z oceli plátované tombakem. Z důvodů zjednodušení návrhu geometrického modelu těla střely byly rozměr a mechanické vlastnosti pláště střely zahrnuty do olovené košilky (barev. příl. s. III, obr. 2).

- Základní konstrukční a balistické parametry střely náboje 7,62×39 PZ:
 - d – průměr střely (ráže) (7,62 mm),
 - m_q – celková hmotnost střely (8,5 g),
 - d_j – maximální průměr jádra střely (4 mm),
 - m_j – hmotnost jádra (4 g) a
 - v_d – dopadová rychlost střely (740 ms⁻¹)
- Základní parametry pancéřové desky (homogenní pancíř z nízkolegované oceli):
 - rozměry pancéřové desky 0,5×0,5 m,
 - tloušťka desky 6 a 12 mm,
 - mez pevnosti v tahu $R_m = 1200$ MPa a
 - mez kluzu $R_{p0,2} = 1058$ MPa.

b) Příprava modelu (preprocessing)

Volba materiálového modelu

Volba **materiálového modelu** je nejdůležitější část celého řešení. Na jeho správné volbě zásadním způsobem závisí přesnost obdržených výsledků. Proto je nutné, aby byly současně k dispozici materiálové pevnostní charakteristiky, a to jak **statické** (σ_k , σ_{Pt} atd.), tak i **dynamické** (závislé na rychlosti deformace).

Program ANSYS/LS-DYNA nabízí velké množství materiálových modelů (cca 130). Pro řešení byly zvoleny tyto:

• Ocelové jádro střely PZ:

Elastický materiál (vysoká pevnost a tvrdost, tvarová a hmotnostní stabilita).

Zadávané hodnoty: E , μ , ρ , kde

E – modul pružnosti v tahu (MPa),

μ – Poissonovo číslo [1],

ρ – hustota (kg m⁻³).

• Olovená košilka střely PZ:

Plastický materiál s kinematickým zpevněním (velké plastické deformace, značná tvarová a hmotnostní nestabilita, porušení materiálu oloveného jádra).

Zadávané hodnoty: E , μ , ρ , E_T , σ_0 , ε_{KR} , p , C , β , kde

E_T – tangenciální modul pružnosti [MPa],

σ_0 – statická mez kluzu [MPa],

ε_{KR} – kritické přetvoření,

β – koeficient zpevnění,

p , C – rychlostně závislé koeficienty.

Tento model umožňuje zahrnout vliv **rychlosti** deformace na hodnotu meze kluzu. Tuto závislost vyjadřuje vztah (15):

$$\sigma_K = \left(1 + \frac{(\dot{\varepsilon}_p)^{1/p}}{C} \right) (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}), \quad (15)$$

$$\text{kde} \quad E_p = \frac{E_T \cdot E}{E - E_T}. \quad (16)$$

• Ocelová deska (2P):

Plastický materiál s kinematickým zpevněním (plastické deformace a porušení materiálu). V první fázi průniku střely převládá namáhání desky **tlakem** a **smykem**, ve druhé fázi přistupují ještě **tahová napětí**, která jsou dominantní.

Zadávané hodnoty: E , μ , ρ , E_T , σ_0 , ε_{KR} , p , C , β .

• Vytvoření konečně prvkového modelu

Problematika interakce průbojné střely a ocelové desky bude řešena jako třídímní kontinuum. Na obr. 2 (barev. příl. s. III) je znázorněna 1/4 MKP modelu střely a ocelové desky.

Geometrický model byl vygenerován v prostředí ANSYS. Všechny prvky jsou typu SOLID 164

(objemové 8uzlové prvky).

• Počáteční a okrajové podmínky

Ocelovému jádru i olovené košilce je zadána počáteční rychlost v ose z . Z důvodů rozměrové i tvarové symetrie těla střely je úloha řešena pouze modelem. Tomu odpovídají i okrajové podmínky: V rovině symetrie ZY jsou posuvy $u_x = 0$ m a v rovině symetrie XZ jsou posuvy $u_y = 0$ m.

Pozn.: Rotační pohyb střely v průběhu jejího průniku ocelovou deskou omezené tloušťky nebyl uvažován, neboť v reálných časech (10^{-5} s), pro které byl pronik řešen, je tento pohyb zanedbatelný.

• Volba kontaktů

Problematika kontaktů je další velmi obtížnou oblastí. V programu ANSYS/LS-DYNA existuje opět velké množství různých typů kontaktů. Pro námi řešený příklad byly použity kontakty typu *ERODING SURFACE TO SURFACE*. Tyto kontakty umožňují řešení dynamické úlohy i po odstranění vrstvy prvků (důležité pro případ porušení kontinuity tělesa).

V námi popisovaném případě se jedná o oddělení olovené košilky od ocelového jádra průbojně střely v první fázi jejího průniku.

c) Řešení (solution) a jeho výsledky (postprocessing)

Při vlastním řešení je třeba dbát na energetická hlediska. Do výpočtu byly zahrnuty všechny druhy energie (Stonewall, Hourglass, Sliding, Rayleigh). Při výpočtu probíhá změna kinetické energie průbojně střely na vnitřní energii (popř. třecí energii) probíjené ocelové desky. Je nutné kontrolovat, zda např. Hourglassova energie (parazitní nulová energie) nepřekračuje 5 % vnitřní energie atd.

• Ocelová deska tloušťky 6 mm:

Na diagramu 1 (barev. příl. s. IV) jsou znázorněny rychlosti čela a dna střely ve směru její podélné osy. Jejich rozkmitání je způsobeno délkovou pulsací těla střely během jejího průniku pancířem a také hustotou diskretizace geometrického modelu střely.

Podobnost tvaru otvoru a jeho okolí v ocelové desce vzniklého průnikem skutečné střely a střely modelové je dobře vidět na obr. 3 (barev. příl. s. III). Rovnoměrné ohraničení okolí otvoru na PC modelu je způsobeno homogenitou materiálových vlastností modelové desky, která byla předpokládána v celém jejím objemu. Naproti tomu u skutečné desky (viz experiment) je nutné počítat s určitým stupněm nehomogenity rozložení mechanických vlastností a

balistické odolnosti probíjené desky.

Uvedené rozdíly mohou v praxi nastat také při změně podmínek zásahu ocelové desky průbojnou střelou, kdy dojde k odchýlení podélné osy střely od ideální (kolmé) polohy v okamžiku nárazu na pancíř. Tato ideální poloha střely, kdy její podélná osa je kolmá na rovinu čela pancíře, byla námi stanovena jako základní podmínka pro matematické modelování.

• Ocelová deska tloušťky 12 mm:

Na diagramu 2 (barev. příl. s. IV) jsou znázorněny délkové změny těla střely (jádra), ke kterým dochází ve směru dráhy jejího průniku. Záporné hodnoty těchto změn znamenají zkracování těla střely vyvolaného mechanickým odporem pronikajícího prostředí. Kladné hodnoty délkových změn naproti tomu vyjadřují prodlužování těla střely, k němuž dochází působením setrvačných sil v rozsahu pružných deformací materiálu těla střely.

Na obrázku 4 (barev. příl. s. III) jsou znázorněna I. hlavní napětí při průniku ocelového jádra průbojně malorážové střely ocelovou deskou tloušťky 12 mm. V první fázi průniku ocelovou deskou postupuje střela jako kompaktní balistický systém (ocelové jádro s olovenou košilkou tvoří jeden celek), po oddělení olovené košilky pokračuje v průniku pouze kalené ocelové jádro. Tato hlavní napětí byla použita k jednomu z dílčích kritérií porušení.

Podobnost účinku malorážové průbojně střely shodných balistických parametrů jako v prvním případě na stejný pancíř ovšem větší tloušťky (12 mm) je patrná z obr. 5 (barev. příl. s. IV). Je zřejmé, že došlo ke shodě modelového účinku s praktickými výsledky balistického experimentu. V daném případě se jedná o zástřel (vryp), kdy kalené jádro PZ střely ocelovou deskou této tloušťky neproniká a dochází k jeho odražení. Pouze v jednom z pěti případů jádro střely při experimentu uvízlo v překážce.

Na diagramu 3 (barev. příl. s. IV) je patrný vývoj rychlosti dna střely při jejím průniku pancířem různých tlouštěk. Pancéřovou deskou tloušťky 6 mm proniká průbojná střela s přebytkem kinetické energie a v okamžiku průstřelu desky vykazuje výletovou rychlost asi 400 ms^{-1} . Ve druhém případě 12 mm tlustá ocelová deska znamená pro střelu daných balistických parametrů natolik tuhé prostředí, že se střela po určité době ($\approx 3 \cdot 10^{-5}$ s) průniku v překážce zastaví. Oscilace křivky rychlosti dna střely při průniku ocelovou deskou tloušťky 12 mm (modrá), na jejím konci vznikla již popsaným způsobem a vyjadřuje pohyb dna ve směru podélné osy střely v mezích pružných deformací až do jejího úplného

zastavení.

Závěr

Předložená úloha, spadající do oblasti terminální balistiky malorážového střeliva, byla řešena v postupných krocích s využitím dostupných matematických modelů a PC simulace. Výsledky predikce průbojného účinku malorážové průbojné střely vojenského náboje 7,62×39 PZ jsou velmi dobře využitelné v oboru ranivé balistiky biologických cílů chráněných pevnou překážkou.

Námi navržený způsob řešení umožňuje predikci chování a ranivého účinku malorážové střely při jejím působení na cílové objekty po překonání balistické ochrany. Z výpočtu provedeného de-Marrem proniká homogenní ocelové jádro střely pancéřovou deskou s přebytkem kinetické energie ≈ 140 J a pokračuje za deskou rychlostí $v \approx 270$ ms⁻¹. Tato rychlost a energie byla rovněž potvrzena PC simulací (viz diagram 3), kdy se srovnatelnou rychlostí opouští desku po jejím probití dno jádra střely v čase $t \approx 5 \cdot 10^{-5}$ s.

Porovnáme-li kinetickou energii, kterou disponuje průbojné jádro za překážkou s hodnotami dnes používaného kritéria účinnosti puškových střel v podobě **limitní kinetické energie** zjistíme, že jádro je schopno způsobit zasaženému člověku vážná zranění nebo i smrt.

Pozn.: Pro nechráněnou živou sílu jsou hodnoty **limitní kinetické energie** uváděny v rozsahu 40–240 J, nejčastěji však v rozsahu 80–100 J. Velké rozpětí uvedených hodnot limitní kinetické energie udávaných různými autory ukazuje na to, že je velmi těžké až nereálné toto kritérium postavit jako standard pro hodnocení účinnosti puškových střel.

Matematické modelování průbojného účinku kineticko-energetických střel pomocí MKP na PC zahrnuje několik podstatných problémů. Prvním a nejdůležitějším je volba **materiálového modelu** spolu s určením materiálových konstant. Druhým neméně důležitým problémem je volba **kritéria**, popř. kritérií **porušení**, která mohou být přímo zahrnuta v použitých materiálových modelech nebo mohou být doplněna o další kritéria vyhovující konkrétnímu typu úlohy a zadání.

Z provedené PC simulace je zřejmé, že dojde v první fázi průniku, v důsledku značného odporu prostředí, k odstranění olověné košilky a dále pak deskou proniká pouze kalené ocelové jádro. Tyto naše závěry potvrdil rovněž balistický experiment. Použitý materiálový model neumožňoval řešení hydrodynamických jevů, ke kterým při penetraci

ocelové desky průbojnou střelou dochází. Proto jsme neřešili u jednotlivých objemových elementů pancéřové desky a průbojného jádra jejich přechod z pevné fáze do fáze kapalné.

Návrhem a použitím složitějšího typu materiálového modelu, který by reálněji postihoval hydrodynamické chování materiálových struktur pancéřové desky a průbojné malorážové střely, se budeme zabývat v nejbližším období. Bude rovněž zajímavé porovnat materiálové změny povrchových vrstev pancíře na straně vstřelu v okolí střelného kanálu (odtavený lem) s výsledkem střeleckého experimentu (viz barevná příloha s. IV obr. 5).

Použitá a související literatura

1. BOCK, G. – WEIGEL, W. *Handbuch der Faustfeuerwaffen*. Melsungen, Neumann-Neudamm, 1989.
2. GREXA, J. – ŘEBÍČEK, V. *Munice I. VAAZ* v Brně, 1972.
3. HALLQUIST, J. *LS-DYNA Theoretical Manual*. LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, digital manual. May 1998.
4. HALLQUIST, J. *LS-DYNA Keyword User's Manual. Non-linear Dynamic Analyses of Structures*. LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, digital manual. May 1999.
5. HALLQUIST, J. *LS-DYNA Examples Manual*. LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, digital manual. March 1999.
6. HIRT, M. *Střelná poranění v soudním lékařství*. Brno, MU, 1996.
7. HIRT, M., et al. *Forensic Medical*. Brno, MU, 1999.
8. HIRT, M., aj. *Vybrané kapitoly ze soudního lékařství*. Brno, MU, 1998.
9. IMAOKA, S. Implicit vs. Explicit Dynamics. ANSYS, Inc. on 6.28.2001. www.ansys.net/tnt_sheldon13.htm
10. JUŘÍČEK, L. *Simulace a hodnocení účinků malorážových střel na živou sílu*. Doktorská disert. práce. Brno, VA, 2000.
11. KOHNKE, P. *ANSYS Theory Reference*. Release 5.7, ANSYS Inc., 1999.
12. NOVOTNÝ, P. – PÍŠTĚK, V. *The conversion of FE models between ANSYS and ADAMS systems*. Ansys User's Meeting 2002. National conference with international participation, Čejkovice, 26.–27. září 2002.
13. PÍŠTĚK, V. – ŠTETINA, J. *Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů*. Brno, VUT, 1991.
14. SELLIER, K. – KNEUBÜHL, B. *Wundballistik und ihre ballistischen Grundlagen*. 2. völlig überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin, Springer-Verlag, 2001.

Korespondence: Doc. Ing. Ludvík Juříček, Ph.D.
Vojenská akademie
Kounicova 65
612 00 Brno
e-mail: ludvik.juricek@vabo.cz

Do redakce došlo 28. 2. 2003