

EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA RÁZOVÉ VLNY PROCHÁZEJÍCÍ HOMOGENNÍM IZOTROPNÍM PROSTŘEDÍM PRO PREDIKCI LETÁLNÍCH ÚČINKŮ TÉTO VLNY NA LIDSKÝ ORGANIZMUS

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SHOCK WAVE PASSING THROUGH HOMOGENOUS ISOTROPIC ENVIRONMENT FOR PREDICTION LETHAL INFLUENCE IN HUMAN ORGANISM

Martin HULAN¹, Jan VRÁNA¹, Petr KUBOVÝ², Jiří MICHALEC¹

Abstrakt

V naší studii bychom chtěli názorně ukázat děje, které se mohou odehrávat v živých organismech po jejich zásahu letící střelou a vyvozenou rázovou vlnou. Pro názornou demonstraci fyzikálně biologických stavů jsme pro balistickou simulaci použili diabolu vystřelenou vzduchovou puškou na polymerový terč z materiálu zvaného Kraton, který jsme sledovali vysokorychlostní kamerou s následnou rozměrovou analýzou snímků. Tímto balistickým experimentem byl ukázán průchod rázové vlny homogenním elastickým prostředím a vytvoření dočasného střelného kanálu. Sledováním polohy střely během průniku materiálem v čase jsme schopni kvantitativně hodnotit účinek střely v daném materiálu pomocí průběhu předávané energie po dráze střely. Výsledky je poté je možné zpětně vztáhnout na biologickou tkáň v okolí střelného kanálu.

Klíčová slova: střela, rázová vlna, dočasná dutina, letální, biologická tkáň.

Abstract

In our study we would like to show the processes which we can observe in live organisms after hit by flying projectile and it's caused shock wave. For ballistic simulation of physical and biological processes we used the small lead projectile (diabolo) which was shot to the target by air rifle. The target was made from special polymeric material called Kraton, which we observed by high-speed camera with following distance analysis. This ballistic experiment shows shock wave passing through the homogeneous elastic environment and creation of temporary shoot-canal. When we monitoring the position of projectile in each time frame during penetration, we can quantitatively evaluate the influence to target material. This evaluation is based on computing energy which is transferred to target during trajectory of projectile. These results we can apply back on vital biological tissue around temporary shot-canal.

Keywords: projectile, shock wave, temporary cavity, lethal, biological tissue.

ÚVOD

Interakce překážky a letícího předmětu je významnou oblastí při studiu rázového zatěžování materiálů. Tyto děje zkoumá vědní obor zvaný terminální balistika. Pokud se zabýváme účinky takového letícího předmětu na biologickou tkáň, stává se modelování této interakce pomocí náhradního materiálu velmi důležitým. Zkoušky na vitální biologické tkáni,

¹ Ing. Martin HULAN, Ing. Jan VRÁNA, doc. Ing. Jiří MICHALEC, CSc., Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, jan.vrana@fs.cvut.cz,

² Ing. Petr KUBOVÝ, Katedra anatomie a biomechaniky, FTVS, UK v Praze, kubovy@ftvs.cuni.cz,
Lektoroval: prof. Ing. František ŠIMČÁK, CSc., KAMaM, SJF TU v Košiciach, frantisek.simcak@tuke.sk

zejména na zvířatech, jsou často nehumánní.

Modelování reálné biologické tkáně, pronikané pevným tělesem je ztíženo odlišnostmi mezi tkáněmi zastoupenými v dané oblasti, typickým příkladem je kost obalená svalovou tkání, cévami, nervy a kůží. Pokud se omezíme pouze na modelování interakce měkkých tkání s letícím předmětem, můžeme je při rázovém zatížení zjednodušeně popisovat jako homogenní a nahradit materiálem s podobnými mechanickými vlastnostmi, jako popisovaná tkáň. Jako náhrada za měkkou biologickou tkáň se často používá balistická želatina nebo nověji polymery. Tyto materiály mohou pojmout veliké elastické deformace, které je možno opticky snímat díky jejich průhlednosti. Tyto materiály se označují jako materiály hyperelastické (Balistická želatina, Kraton). Po pohlčení rázu se dutina, způsobená vniklým tělesem zcela uzavře, nedojde tedy ke spotřebování části energie na plastické přetvoření materiálu, kromě zbytkové střední trhliny.

Pro rychlé a snadné stanovení průběhu předávané energie střely na dráze se ve velké míře používá metod nepřímých. Pro kvantitativní hodnocení účinku letící střely na balistickou želatinu byla v minulosti vyvinuta tzv. metoda radiálních trhlín [1]. Tato nepřímá metoda vychází z poznatku, že povrch dočasné dutiny se po zborcení zachová ve formě radiálně probíhajících trhlín na příčných řezech želatinou. Celkový počet a délka těchto trhlín odpovídají povrchu dočasné dutiny a předané energii. Energie, která byla předána želatině E'_{PR}

na určitém úseku dráhy Δz střely je přímo úměrná součtu délek $\sum_{i=1}^n r_i$ těchto radiálně odstupujících trhlín na daném řezu. Konstantu úměrnosti c , která vyjadřuje balistické vlastnosti želatiny je nutno stanovit z experimentů pro použité materiály a okrajové podmínky.

$$\sum_{i=1}^n r = c \cdot E'_{PR} \dots\dots\dots \text{suma délek trhlín pro jeden plošný řez } E'_{PR} [J/m].$$

$$\sum_{j=0}^s \left(\sum_{i=1}^n r_i \cdot \Delta z \right)_j = c \cdot \sum_{j=0}^s \left(E'^i_{PR} \cdot \Delta z \right)_j \quad \text{suma délek trhlín v } s \text{ řezech s tloušťkou } \Delta z [m].$$

Metodika, která byla použita při našem experimentu umožňuje sledovat přímo dráhu střely v měřených časových krocích a tak zjistit průběh energie, kterou střela předává okolí v závislosti na její dráze. Tato předávaná energie během dráhy střely, slouží k hodnocení ranivých účinků střely na biologickou tkáň, z tohoto grafu je patrné v kterém místě proniku střela předá maximum energie. Známé tři po sobě jdoucí polohy z_{k-1} , z_k , z_{k+1} odměřené s pevným časovým krokem Δt , potom okamžitá rychlost diaboly v_k je dána vztahem

$$v_k = \left(\frac{dz}{dt} \right)_k = \frac{z_{k+1} - z_{k-1}}{2\Delta t}$$

Hodnota první derivace je pro větší hladkost počítána jako průměr ze difference dvou sousedních bodů. Okamžitá kinetická energie je definována vztahem:

$$(E_K)_k = \frac{1}{2} m_{diab} \cdot v_k^2$$

Velikost energie, která střela ztrácí po své dráze $(E_K)'_k$ vypočteme jako derivaci průběhu kinetické energie podle její dráhy, v diskrétním tvaru:

$$(E_K)'_k = \frac{(E_K)_{k+1} - (E_K)_k}{z_{k+1} - z_k}$$

MĚŘÍCÍ METODA

Hodnocení dějů vznikajících vniknutím projektilu do speciálního polymerového bloku a stanovení jeho rychlosti před dopadem jsme provedli na základě záznamu z vysokorychlostní digitální videokamery. Pro tento účel se ukázal vhodným přístroj firmy REDLAKE MOTIONXTRA HG 100 K. Systém kamery je založen na barevném 24-bitovém CMOS čipu s rozlišením 1504 x 1128 bodů a snímací frekvencí 1 000 obrázků za vteřinu, při redukovaném rozlišení ovšem dovoluje rychlost záznamu až 100 000 fps. Obrazová data ukládá kamera do vestavěné paměti, odkud jsou exportována přes síťové rozhraní 100/1000Base-T Ethernet, přes které je také plně ovládána, ať již speciální kontrolní jednotkou, osobním počítačem či notebookem, jako v našem případě, pomocí firemního softwaru MotionCentral. Délka záznamu je limitována 2 GB vnitřní paměti (rozšiřitelné až na 4 GB) a je funkcí pouze daného rozlišení a frekvence záznamu. Frekvenci lze volit v rozmezí 25 až 100 000 Hz, celkové maximální rozlišení je závislé na užití frekvenci, lze však nastavit libovolný poměr stran, což se ukázalo velkou výhodou. Konstrukce kamery umožňuje použití libovolného objektivu s C, F, nebo High-G Box přípojkou. Pro naše měření jsme použili širokoúhlý objektiv firmy Nikon: Nikkor AF 24 – 85 mm, f/2,8-4, tedy s velmi slušnou aperturou a s 2 asférickými členy pro korekci monochromatických i barevných vad. Natáčení jsme prováděli při ohniskové vzdálenosti cca 50 mm s naplnou otevřenou clonou. V tomto nastavení se promítla snaha o dosažení dostatečné hloubky ostrosti a co nejmenší míry zkreslení při zachování přijatelné ztráty osvětlení. Právě dostatek světla je při vysokých snímacích frekvencích a tedy velmi krátkých expozičních časech jedním z limitujících faktorů. Testy probíhaly v uzavřené laboratoři, k nasvícení scény byly použity pouze 4 halogenové reflektory, každý s výkonem 2 x 1 000 Wattů.

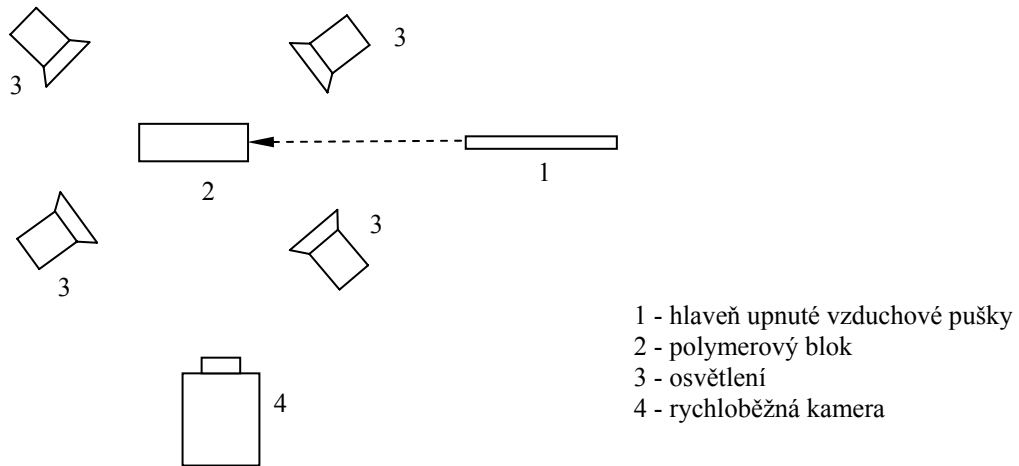
Stěžejní problémem u našeho pokusu byla volba vhodného kompromisu mezi snímací frekvencí a rozlišením snímku pro danou intenzitu osvětlení. Rychlost šíření trhliny a její smršťování jsme díky tlumení předpokládali nižší než dopadová rychlost diaboly. Jako dostačující, pro analýzu dynamiky šíření účinků střely v terči se ukázala rychlost snímkování 15 000 snímků za vteřinu. Pro tuto frekvenci nám kamera dovolila maximální rozlišení ve vhodném tvaru 512 x 144 pixelů. Při takto rychlém natáčení je expoziční doba jednotlivých snímků pouhých 52 μ s, takže dostatečné osvětlení scény bylo na hranici možností našich světlometů. Délka celého děje od výstřelu do dokmitání celého želatinového bloku nepřekročila 0,1 sekundy, kapacita paměti kamery umožňovala více než 3 sekundy záznamového času při daném rozlišení a frekvenci. Konstrukce kamery dává možnost nahrávat záznam před spouštěcím impulsem. Pro další zpracování jsme provedli export snímků bez komprese ve formátu jpeg i tiff, pro účely názorné demonstrace děje jsme vytvořili videozáznamy ve formátu avi.

Software MotionCentral umožňuje pouze ovládání kamery a export dat ve formátech tiff, jpeg, nebo avi barevně (24-bit), nebo monochromaticky (8-bit), s nastavitelným stupněm komprese. Rozměrová analýza snímků byla provedena pomocí softwaru Matlab (v.7), po stanovení poměru mm/pixel pomocí měřítka vloženého do snímaného prostoru, lze vzdálenosti ve snímcích stanovit z diferencí pixelů viz. obr.3.

POUŽITÝ MATERIÁL

Jako střela nám posloužila klasická diabola do vzduchové pušky. Diabola je vyrobena z olova, její jmenovitá hmotnost je $m_{\text{diab}} = 0,5$ g, úst'ová rychlost vzduchové pušky je udávána přibližně 190 m/s. Tato hodnota je průměrná, konkrétní rychlost diaboly těsně před vnikem do terče a tím i její počáteční dopadovou kinetickou energii jsme schopni snadno odměřit ze snímaného videa.

Jako materiál terče byl zvolen butadienstyrenový kopolymer s obchodním názvem Kraton. Tento materiál lze použít jako simulátor měkkých biologických tkání, má želatinovou strukturu a je velmi pružný, je také průhledný, takže lze opticky snímat předměty uvnitř bloku a také jeho vnitřní deformace. Tento materiál je skoro dokonale hyperelastický, snáší velké deformace a po odlehčení se elasticky vrací do původního tvaru. Zhroucením povrchu dočasné dutiny, po odeznění elastických deformací, vzniká pouze drobná zbytková vnitřní axiální trhlinka, která je úplně uzavřená.



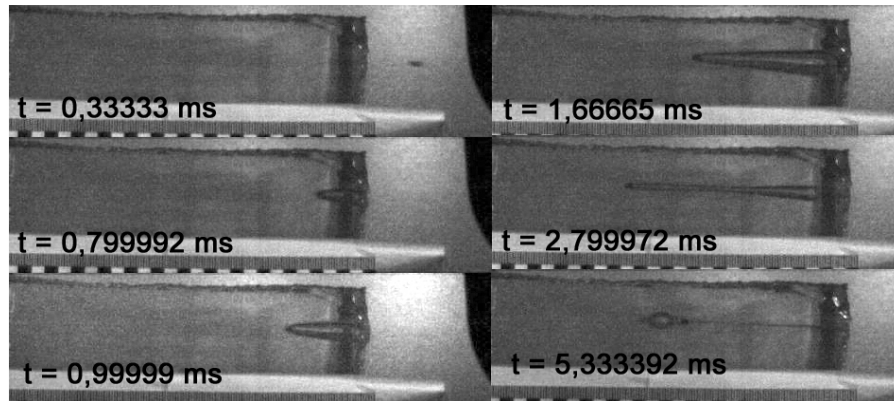
Obr.1 Schéma půdorysného rozmístění měřící aparatury

VÝSLEDKY

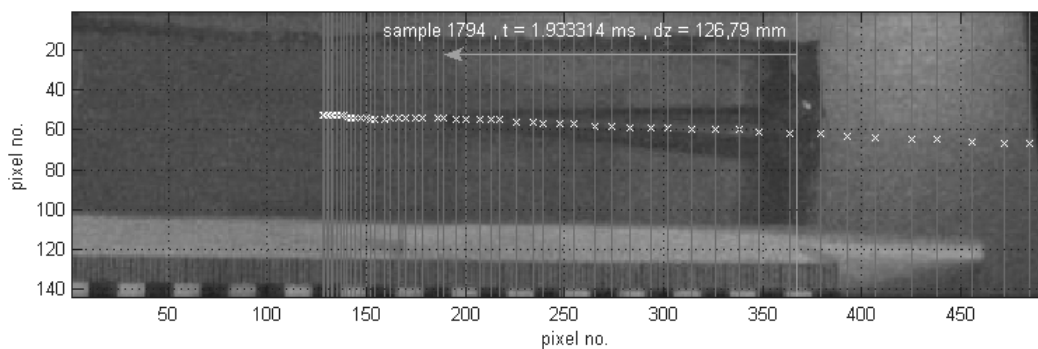
Na obr.2 můžeme vidět ukázkou sekvence snímané vysokorychlostní kamerou. Při nastavené snímací frekvenci 15000/s je časový krok záznamu 0,06666 ms (expozice + zpracování). Rozlišení snímků je 512 x 144 pixelů, z referenčního měřítka, které je součástí každého snímku, bylo odměřeno, že na 365 pixelů připadá 260 mm, měřítko obrazu je tedy $\frac{260\text{mm}}{365\text{pix}} = 0,7123\text{ [mm/pix]}$. Při vniku do polymerového bloku byla diabolka zaregistrována 47x.

Tudíž celkový čas, za který diabolka předala veškerou svojí energii bloku je 3,1333 ms a za tuto dobu urazila cca 170 mm. To je dostatečně krátká doba na to, aby diabolka nebyla ovlivněna odrazy elastických vln od vnějších hranic bloku. Tyto elastické vlny, které probíhají polymerovým blokem, po vnesení rázu diabolou, sice dráhu diabolky nakonec ovlivní, ale až poté, co střela dosáhne své maximální polohy z_{max} a dojde k dopružení materiálu, případně pulsaci dočasné dutiny, někdy i se vzduchovou bublinou uvězněnou v dočasné dutině.

Dalším vyhodnocením v softwaru Matlab byly odměřeny souřadnice čela diabolky v každém vyhodnocovaném snímku. Vyhodnocení poloh s jedním vyznačeným snímkem je na obr.3. Přesnost tohoto odečtu je rozhodující pro celé vyhodnocení experimentu. Velikost chyby určení dráhy se dalšími výpočty jen zvyšuje. Toto vyhodnocení tedy musí být tedy co nejpřesnější. Tuto přesnost ovlivňuje rozlišení snímku, a expoziční čas snímku. Čím delší je tento čas, tím je střela rozmazanější a má špatně čitelné hranice. Pro naše podmínky, limitované hlavně intenzitou osvětlení, se primární chyba vyhodnocení dráhy pohybuje okolo cca $\pm 1\text{pix} = \pm 0,7123\text{mm}$.



Obr.2 Průnik diaboly polymerovým blokem



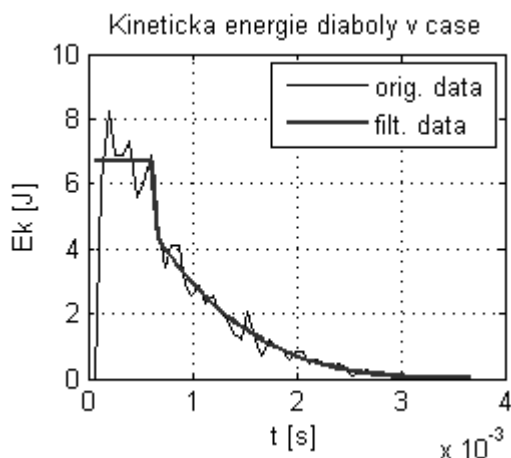
Obr.3 Analýza záběrů z vysokorychlostní kamery, vyznačená jedna poloha.

Chybu měření lze částečně snížit použitím vhodné filtrace záznamu. Jako vyhovující pro náš problém se ukázal filtr Savitzky-Golay. Je to polynomiální aproximační filtr, který v plovoucím okně, které se posouvá po signálu, nahrazuje signál polynomem zvoleného stupně a to metodou nejmenších čtverců. Pokud zvolíme velikost okna stejnou, jako je velikost signálu (záznamu polohy diaboly), tak filtr vykonává prostou polynomiální regresi signálu, pokud velikost okna zmenšujeme, tak se postupně zohledňují lokální závislosti v signálu. Optimální nastavení pro náš experiment je takové, kdy odfiltrujeme pouze vysokofrekvenční šum ze signálu a zůstane nám hladká křivka. Filtrace proběhla až pro křivku rychlosti diaboly. Pro náš experiment se ukázalo jako optimum stupeň polynomu $n = 2$ a velikost okénka $u = 45$ bodů signálu. Ukázka filtrovaného signálu je na obr.4 a obr.5. Na snímcích, kde je diabola před vnikem do terče, jsme předpokládali, že její rychlost je přibližně konstantní, průměrná z těchto hodnot, $v_d = 163,3$ m/s. Z toho plyne počáteční dopadová kinetická energie $E_{K0} = 6,67$ J. Tyto hodnoty se blíží běžným údajům u vzduchových pušek, konkrétní hodnoty jsou ovlivněny opotřebením pušky.

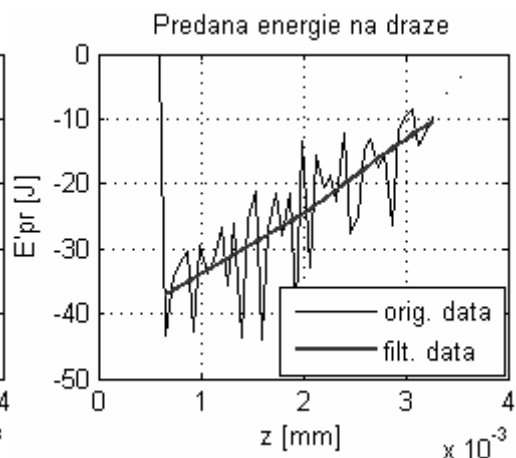
ZÁVĚR

Experiment, který jsme provedli jasně demonstuje možnosti představené metody snímkování rychloběžnou kamerou a následné vyhodnocování veličin z pořízeného záznamu.

Velkou výhodou této metody je možnost kalibrace vzdáleností pomocí měřky, která je součástí snímaného prostoru. Velmi důležitým faktorem je rozlišení snímků a osvětlení scény, potažmo čas expozice snímků. Tyto faktory v podstatě determinují chybu následného odečítání polohy, které by mělo být co nejpřesnější, kvůli výpočtům derivací. Jak je patrné z obr. 4 a 5 filtrací signálu lze přesnost ještě o něco zvýšit.



Obr.4 Velikost kinetické energie diaboly v čase, naměřená a filtrovaná data (S-G filtr).



Obr.5 Velikost předávané energie v závislosti na dráze, naměřená a filtrovaná data (S-G filtr).

Konstantní úsek v grafu filtrované energie (obr.4) je počáteční průměrná hodnota dopadové energie před vnikem do bloku terče. Hodnoty energie jsou filtrovány až po vniku do terče. Je nutné také dodat, že použitá střela (diabola) je poměrně málo energetickým projektilem, v porovnání s běžnými střelnými zbraněmi. Tomu také odpovídají výsledky. Střela většinu své kinetické energie předává materiálu na počátku dráhy v terči, a během vniku je stabilní. Pro většinu střel vyšších ráží a energií je typické, že po vniknutí do elastického terče ztrácí stabilitu a začnou se převracet nebo cíleně rozpadat. V oblastech, kde putují terčem strnou, převrácené na bok, dochází k mnohem většímu předávání energie a to odpovídá také profilu zranění. Často dojde k nejvýraznějšímu předávání energie až uvnitř střelného kanálu, podpovrchově. U tkání, které jsou přímo součástí povrchu dočasné dutiny můžeme očekávat totální destrukci rázovou vlnou na čele střely [1]. U tkání, které jsou v okolí střelného kanálu (zhruba 2x průměr střelného kanálu) můžeme očekávat masivní ruptury a krvácení [1]. U nejvzdálenější ovlivněné tkáně, nacházející se kolem 4 násobku průměru dočasné dutiny [1], můžeme očekávat lehčí lokální poškození. Pokud se střela během průniku tkání rozpadne na stěpiny, je rozsah destruktivního účinku ještě mnohem markantnější [1].

LITERATURA

- [1] JUŘÍČEK, L. *Fyzikální modely biologických systémů člověka v balistickém experimentu pro hodnocení ranivých účinků malorážových střel*. Habilitační práce, VA v Brně, 2003.
- [2] *Dokumentation for Matlab 7.0.0.19920 (R14)*, May 06, 2004.