



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

**Metody testování vlastností materiálů
vhodných pro výrobu ochranných obleků
členů složek IZS**

**Methods of Testing the Properties of
Materials Suitable for the Manufacture of
Protective Suits for IRS Units Members**

Diplomová práce

Studijní program: Civilní nouzové plánování

Autor diplomové práce: Bc. Eliška Fajfrlíková

Vedoucí diplomové práce: Ing. Slávka Čubanová

Kladno 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fajfrlíková** Jméno: **Eliška** Osobní číslo: **511262**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**
Studijní program: **Civilní nouzové plánování**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Metody testování vlastností materiálů vhodných pro výrobu ochranných obleků členů složek IZS

Název diplomové práce anglicky:

Methods of Testing the Properties of Materials Suitable for the Manufacture of Protective Suits for IRS Units Members

Pokyny pro vypracování:

Předmětem diplomové práce bude problematika metod testování vlastností materiálů vhodných pro výrobu nositelných ochranných oděvů pro členy složek integrovaného záchranného systému. Teoretická část se bude zabývat metodami testování a analýzou současného stavu měřených charakteristik kompozitních materiálů používaných na výrobu ochranných oděvů. Zahrnuta bude i analýza nových trendů ve vývoji používaných materiálů. Práce bude zaměřena zejména na odolnost materiálů proti pronikání ostrých předmětů. V praktické části bude provedena analýza mechanické odolnosti vybraných materiálů proti útoku nožem. Použity budou relevantní metody porovnatelného bodného tlaku. Dále budou v praktické části materiály porovnávány a následně doporučovány ty, které jsou vhodné pro výrobu ochranných oděvů proti zmíněnému typu útoku. Dosažené výsledky budou srovnány s výsledky publikovanými v odborné literatuře.

Seznam doporučené literatury:

- [1] AHMAD, S., RASHEED, A., AFZAL, A., AHMAD, F., ed., Advanced Textile Testing Techniques, Boca Raton: CRC Press, 2017, 326 s., ISBN 9781351651684
- [2] PAUL, R., High Performance Technical Textiles, Hoboken: John Wiley, 2019, 504 s., ISBN 9781119325055
- [3] BUTOLA, B. S., UL-ISLAM, S., ed., Advances in Functional and Protective Textiles, Cambridge: Woodhead Publishing, 2020, 678 s., ISBN 9780128226766

Jméno a příjmení vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Slávka Čubanová

Jméno a příjmení konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.09.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2024**

doc. Mgr. Zdeněk Hon, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA
děkan

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Metody testování vlastností materiálů vhodných pro výrobu ochranných obleků členů složek IZS vypracovala samostatně, pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Plzni dne 17.05.2023

.....
Bc. Eliška Fajfrlíková

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych ráda poděkovala vedoucí své práce paní Ing. Slávce Čubanové za odborné vedení, dohled při zpracování práce, cenné rady a trpělivost. Dále patří mé poděkování panu Bc. Janu Hýblovi za technické zajištění testování materiálů. V neposlední řadě bych ráda poděkovala všem, kteří poskytli materiály potřebné k provedení jejich testování, a umožnili tak realizaci praktické části práce.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou materiálů určených pro výrobu ochranných oděvů odolných proti útoku bodnou zbraní. V práci jsou studovány normy a standardy související s problematikou, materiály, ale i nové trendy. Pro splnění cílů práce byly užity metody měření, metody deskriptivní statistiky a komparace.

V teoretické části jsou popsány jednotlivé standardy a normy, které se zabývají testováním materiálů. Dále jsou uvedeny vlákna a materiály, z nichž jsou nejčastěji ochranné prostředky vyráběny. Nechybí ani analýza nových trendů ve vývoji vláken, materiálů, struktur, ale i procesů výroby.

Praktická část se zabývá samotným testováním různých materiálů a měřením průniků zkušební bodné zbraně. Testovány byly čtyři druhy materiálů, a to jak pro následnou výrobu ochranných oděvů, tak k jiným účelům. Výsledné naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a popsány. Následně byla provedena komparace dvou materiálů přímo vyrobených pro ochranu proti útoku bodnou zbraní.

Klíčová slova

ochranné oděvy • materiály odolné proti propíchnutí • vlákna • standardy a normy • testování odolnosti proti propíchnutí

ABSTRACT

The thesis deals with the problematic of materials designated for production of protective suits resistant to stabbing weapon attack. The norms and standards connected with the problematic, materials but also new trends are studied in the thesis. To fulfill the objectives of the thesis, the methods of descriptive statistics and comparison were used.

In the theoretical part of thesis, the individual standards and norms dealing with testing of materials are described. Furthermore, the fibers and materials from which are the protective suits mostly produced are listed. The analysis of new trends in development of fibers, materials, structures but also production processes is not missing.

The practical part deals with the testing of various types of materials itself and measurement of penetration of testing stabbing weapon. Four kinds of materials were tested, both for following production of protective suits and for other purposes. The resulting measured values were statistically processed and described. Then, two materials created with the purpose of protection against stabbing weapon attack were compared.

Keywords

Protective suit • puncture resistant materials • fibers • standards and norms • puncture resistance testing

Obsah

1	ÚVOD	9
2	CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY.....	10
2.1	Cíle práce	10
2.2	Hypotézy.....	10
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU	12
3.1	Testování materiálů	12
3.1.1	ČSN 39 5360	12
3.1.2	ČSN ISO 13 998.....	14
3.1.3	NIJ Standard 0115.00.....	15
3.1.4	VPAM KDIW	19
3.1.5	Body Armour Standard	21
3.2	Materiály pro výrobu ochranných oděvů.....	23
3.2.1	Dělení materiálů	24
3.2.2	Vybraná vlákna.....	25
3.3	Trendy ve vývoji	28
3.3.1	Šupinové materiály.....	28
3.3.2	3D-materiály	29
3.3.3	Textilní tkaniny s keramickým povlakem	31
3.3.4	Textilní tkaniny se smykovou zahušřovací kapalinou.....	31
3.4	Integrovaný záchranný systém.....	32
4	METODIKA	34
4.1	Testování materiálů a měření.....	34
4.1.1	Popis testovacího zařízení.....	34

4.1.2	Energie dopadu zkušební zbraně	38
4.1.3	Měření průniku.....	38
4.1.4	Testované materiály	39
4.2	Statistické metody.....	42
4.3	Komparace balistických materiálů.....	42
5	VÝSLEDKY	44
5.1	Výsledky měření – Rubena dvouvrstvá.....	44
5.2	Výsledky měření – Rubena čtyřvrstvá	47
5.3	Výsledky měření – Dyneema MT220.....	50
5.4	Výsledky měření – Honeywell Gold Shield MT100	53
5.5	Komparace – Dyneema MT220 a Honeywell Gold Shield 100	55
6	DISKUZE.....	58
6.1	Zhodnocení cílů	58
6.2	Zhodnocení hypotéz	65
7	ZÁVĚR.....	68
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	69
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	70
10	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	74
11	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK.....	76

1 ÚVOD

V dnešní době jsou příslušníci některých složek integrovaného záchranného systému neustále vystavováni nebezpečí útoku s použitím širokého spektra zbraní. K jejich ochraně mohou sloužit ochranné oděvy různého druhu, nejčastěji vesty. K výrobě ochranných prostředků je potřeba použít vhodný materiál, který bude vykazovat vysokou odolnost proti průniku cizího předmětu, ale zároveň bude lehký, prodyšný a bude poskytovat nositeli pohodlí. Tyto materiály prochází neustálým vývojem. Řada výzkumů se zabývá hledáním nových materiálů či jejich kombinacemi. Experimentuje se i s inovativními výrobními mechanismy a strukturami.

Nože a další řezné či bodné předměty byly vždy řazeny k nejnebezpečnějším zbraním v situacích, kdy se ochranné složky musí dostat do těsného kontaktu s útočníky. Jejich nebezpečí pramení také z faktu, že jsou snadno dostupné a pro jejich použití není potřeba speciálních dovedností. Jestliže příslušníci zasahujících složek nemají ochranu proti bodnutí/říznutí, jsou v případě přímého konfliktu vystaveni velkému riziku. Bodná rána může být často smrtelná.

Odolnost materiálů proti průniku bodné zbraně je testována. Na světě existuje řada norem a standardů, které stanovují požadavky nejen na ochranné materiály, ale i na proces testování. Při nákupu ochranných oděvů jsou pak tyto standardy ukazatelem úrovně ochrany, které daný výsledný ochranný oděv nabízí.

K testování materiálů se využívá padací zařízení simulující útok bodnou zbraní. Díky tomuto zařízení je možné ovlivnit výšku pádu, a tedy i dopadovou energii, která vyvolá penetraci nebo úplnou perforaci zkoušeného materiálu. V případě perforace materiálu jsou výsledné průniky měřeny a dále vyhodnocovány.

2 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY

2.1 Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce bylo provést testování materiálů a měření odolnosti proti průniku bodné zbraně u materiálů sloužících k výrobě ochranných oděvů, ale i u materiálů používaných k jiným účelům. K dosažení tohoto cíle bylo potřeba nejprve vypracovat rešerši a analýzu současně využívaných norem a standardů, rešerši různých druhů vláken a materiálů, ale i aktuálních trendů ve vývoji ochranných materiálů. Dílčím cílem této práce bylo pomocí deskriptivní statistiky výsledky měření popsat a zpracovat. Dalším úkolem bylo porovnání materiálů sloužících k výrobě ochranných oděvů a určení odpovídající úrovně ochrany podle aktuálně platných norem a standardů.

2.2 Hypotézy

Dále byly určeny následující hypotézy, které byly vytvořeny v souvislosti s hlavními a vedlejšími cíli práce.

H1: Předpokládá se, že u dvouvrstvé Rubeny bude naměřená hloubka průniku dvakrát větší než u Rubeny čtyřvrstvé při stejné dopadové energii.

H2: Předpokládá se, že u čtyřvrstvé Rubeny budou naměřeny menší hloubky průniku než u materiálů sloužících k výrobě ochranných oděvů při ekvivalentní dopadové energii.

H3: Předpokládá se, že materiály sloužící k ochraně proti průniku bodné zbraně (Dyneema MT220 a Honeywell Gold Shield MT100) splní povolené hloubky průniku při dané energie podle některého ze standardů a norem uvedených v přehledu současného stavu.

H4: Předpokládá se, že rozdíly mezi hloubkami průniku u materiálů Dyneema MT220 a Honeywell Gold Shield MT100 nebudou při užití stejné dopadové energie větší než 10 mm.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

3.1 Testování materiálů

Materiál, který se používá pro výrobu ochranných prostředků, je potřeba otestovat. Testují se mechanické, fyzikální, chemické a speciální vlastnosti. Pokud se jedná o odolnost materiálů proti propíchnutí, testují se v souladu s mezinárodními a národními standardy. Tyto standardy se liší. Rozdíly jsou nejen v energii, která na zkoušený vzorek působí, ale i ve zkušební zbraní (různé tvary i rozměry, různá hmotnost), v požadovaném rozměru vzorku, v prostředí, ve kterém je testování prováděno. Odlišnosti pozorujeme i ve vyhodnocení účinku zkušební zbraně, a to nejen na testovaný materiál, ale i na podkladový materiál napodobující lidské tělo (1, 2, 3).

3.1.1 ČSN 39 5360

Česká technická norma 39 5360 se zabývá obecnými metodami zkoušek odolnosti ochranných materiálů proti působení a účinku střel, střepin a bodných zbraní. Určuje také parametry zkoušky a její postup (druh nože, energie pro jednotlivé třídy ochrany, rozměry vzorku materiálu atd.). Vzhledem k zaměření naší diplomové práce se soustředíme pouze na zkoušky odolnosti proti působení bodných zbraní (4).

Technické požadavky

Zkoušeným vzorkem se rozumí vzorek zkoušeného materiálu, jehož rozměry musí umožnit plný počet předepsaných zásahů. Vzorek je nutno dodat s řadou údajů. Mezi ně patří rok, kdy byl vzorek vyroben, typ a druh vzorku, název výrobce, výrobní číslo, předpokládaná třída odolnosti proti bodným zbraním a údaje o směru nástřelu (4).

Podkladovým materiálem je plastelína umístěná pod zkoušeným vzorkem, která má dané vlastnosti napodobující lidské tělo. Před každým testováním prochází zkouškou. Kontrolní těleso, koule z oceli o hmotnosti $1\,000 \pm 10$ g, se spouští z výšky $2\,000 \pm 30$ mm tak, aby jeho část vnikla kolmo do podkladového materiálu. Provádějí se tři zkoušky, během kterých musí těleso proniknout do hloubky 25 ± 3 mm (4).

K zajištění nehybnosti vzorku při testování slouží upevňovací rám. Nejenže obvodně uchycuje zkoušený vzorek, ale umožňuje také přichycení svědečné fólie z hliníku (4).

Zkušební bodná zbraň s předepsanou hmotností $2,6$ kg \pm 50 g a energií dopadu 35 ± 1 J má hrot z nástrojové oceli, který může být různě tvarován. Přesně se jedná o tři typy zakončení: polokoule pro třídu odolnosti proti bodným zbraním I (TON I), jehla pro třídu odolnosti proti bodným zbraním II (TON II), čepel pro třídu odolnosti proti bodným zbraním III (TON III) (4).

Zkoušení třídy odolnosti proti bodným zbraním

Ke stanovení třídy odolnosti proti bodným zbraním se spouští zkušební bodná zbraň na ochranný materiál. Vzorek je zkoušen třemi pády. Po každém pádu jsou vyhodnocovány účinek na vzorek ochranného materiálu a hloubka vtisku do podkladového materiálu, v případě průniku hrotu do podkladového materiálu i hloubka tohoto průniku (4).

Zkoušky třídy odolnosti mohou probíhat za běžných nebo ztížených provozních podmínek. V případě běžných provozních podmínek se testuje v prostředí o teplotě 21 ± 3 °C a relativní vlhkosti 40 % až 80 %. Zkoušky za ztížených provozních podmínek probíhají ve stejném prostředí, ale vzorek je před testováním podroben ponoření do vody nebo uložení do klimatické komory s vysokými, nebo naopak nízkými teplotami (4).

Vyhodnocení probíhá na základě již zmíněných měření účinků zkušební bodné zbraně. Ochrana proti účinkům bodných zbraní je nevyhovující v případě, kdy je vtisk v podkladovém materiálu hlubší než 25 mm, nebo pokud pronikne zkušební bodná zbraň více než 1 mm do podkladového materiálu. O průběhu zkoušek je zhotovován protokol, který kromě dalších informací pojednává o vyhodnocení výsledků a zařazení do třídy ochrany proti bodným zbraním (4).

3.1.2 ČSN ISO 13 998

Česká technická norma 13 998 je českou verzí normy evropské. Pojednává o ochranných zástěrách, kalhotách a vestách, které jsou pro poskytování ochrany využívány při práci s ručními noži. Zabývá se mimo jiné jejich odolností proti řezu a průniku ostrých předmětů. Popisuje také metody zkoušení a klasifikaci úrovně ochrany (5).

Technické požadavky

Zkušební vzorek musí mít rozměry nejméně 400 mm × 400 mm, nesmí být menší. Uchycen je při testování na nádobě s vnitřními rozměry nejméně 300 mm × 300 mm, která je vyplněna podkladovým materiálem. Okolo nádoby je kruhový rám, přes který se napíná zkušební vzorek pomocí závaží zavěšených na lankách (5).

Podkladový materiál – plastická hmota – by měl být tvárný a nepružný. Vnitřní charakteristiky by měl mít podobné lidskému tělu, stejně jako je tomu u České technické normy 39 5360. Jeho hustota by měla být mezi 1 000 kg.m⁻³ a 1200 kg.m⁻³. Takové plastické hmoty lze dosáhnout například smícháním hladké kukuřičné mouky a parafínového oleje. Výsledný podkladový materiál se napěchuje do již zmíněné nádoby tak, aby podpíral zkoušený vzorek. Před samotným testováním vzorku ochranného materiálu se musí ověřit vlastnosti hmoty (5).

Zkouší se pomocí ocelové koule, která má předepsanou hmotnost $1\,043 \pm 5$ g. Koule je 10krát spouštěna z výšky $2\,000 \pm 5$ mm. Poté se vypočte průměrná hloubka vtisku koule do podložné hmoty, která se u hmoty vyhovující pohybuje mezi 18–22 mm (5).

Zkušební čepel má předepsané rozměry, tvar i tvrdost. Podle rozměrů se rozlišují zkušební nože na velmi úzké, úzké a široké. Vyrobeny jsou ze za studena kovatelne korozivzdorné oceli (5).

Zkoušky odolnosti proti průniku nože

Zkušební vzorky procházejí před zkouškou prostředím s teplotou vzduchu 20 ± 2 °C a relativní vlhkostí vzduchu 65 ± 5 %. V tomto prostředí jsou uloženy nejméně 48 hodin. Zkouška pak probíhá ve stejném prostředí, nebo je provedena bezprostředně po vyjmutí vzorku (5).

Podle normy ČSN ISO 13 998 se s ohledem na náročnost zkoušky rozlišuje testování pro oděvní součásti třídy 1 a oděvní součásti třídy 2. Pro oděvní součásti třídy 1 je stanovena základní výška pádu zkušebního nože 250 mm. Tato výška má zajistit náraz s energií $2,45 \pm 0,1$ J. Pro oděvní součást třídy 2 je základní výška pádu 500 mm zajišťující náraz s energií $4,9 \pm 0,2$ J. Každý materiál je zkoušen deseti nárazy. Testuje se ve vodorovné i nakloněné poloze. Následně se vypočítávají a zaznamenávají průměrné a maximální hodnoty průniku (5).

3.1.3 NIJ Standard 0115.00

Standard NIJ 0115.00, původním anglickým názvem Stab Resistance of Personal Body Armor, v překladu Odolnost osobních ochranných pomůcek proti bodnutí, byl vytvořen společným úsilím Spojených států amerických a Spojeného království. Tato norma specifikuje minimální požadavky na neprůstřelné vesty, které jsou odolné proti průpichu špičatými a ostrými zbraněmi, popisuje jejich testovací metody. Omezuje se jen a pouze na odolnost proti bodnutí (6).

Technické požadavky

Testovaný materiál musí mít rozměry nejméně 381 mm na délku a 302 mm na šířku (6).

Podkladový materiál podle tohoto standardu se liší od českých norem. Ve zmíněných českých normách se jedná o různé plastelíny. Při testování podle standardu NIJ 0115.00 se využívá podkladový materiál v podobě desky, která je složena z několika vrstev materiálu. Jedná se o čtyři vrstvy neoprenu o tloušťce 5,8 mm, jednu vrstvu polyetylenové pěny o tloušťce 31 mm a dvě vrstvy gumy – přírodního kaučuku – o tloušťce 6,4 mm. I tento podkladový materiál je před každým testováním podroben zkoušce. Zkoušen je pomocí ocelové koule o hmotnosti 1 042 g, která je na podkladový materiál spouštěna z výšky $1\,500\text{ mm} \pm 15\text{ mm}$. Po každém ze dvou pádů se koule musí odrazit do výšky $450 \pm 102\text{ mm}$. Podkladový materiál je vyměněn, když není možné provést úder zkušební zbraně více než 51 mm od kraje a od předchozích úderů (6).

Na podkladový materiál je umísťován svědečný papír, který představuje, stejně jako je tomu u ČSN 39 5360, jeden z možných prostředků měření penetrace. Pokud dojde k úplnému proražení zkušební vzorku, papír se prořízne. Z rozměrů řezu lze pak snáze určit hloubku průniku (6).

V tomto standardu jsou navrženy druhy čepele zkušební nože tak, aby reprezentovaly typy ostří nejčastěji používané při útocích. První z nich, označovaný P1, představuje typický malý nůž. Má jednu řeznou stranu a je tenčí. Druhý, značený S1, představuje větší čepele nožů, například velké kuchyňské nože. Řezné strany má dvě a je silnější. Tyto dva tvary zkušební zbraně jsou využívány při testování ochranných vest řadících se do první třídy ochrany. Pro testování druhé třídy ochrany se využívá speciální hrot, bodec, který je vzhledem připodobňován k sekáčku na led. Navržen byl tak, aby reprezentoval třídu špičatých zbraní. Před každým testováním se čepel zkušební nože kontroluje, aby se zajistilo, že celková povrchová úprava je

čistá, bez drsných hran a že čepel nože splňuje technické požadavky. Po prohlídce musí být každá čepel podrobena zkoušce tvrdosti, přijatelné jsou hodnoty mezi -50 a -150 na Rockwellově stupnici (6).

Zkoušky odolnosti

Podmínky prostředí pro testování jsou podle standardu stanoveny na teplotu 21 ± 6 °C a relativní vlhkost vzduchu 50 ± 20 %. Tyto podmínky se ověřují a zaznamenávají před zkouškou, po zkoušce a každé čtyři hodiny během zkoušky (6).

Neprůstřelné vesty, kterými se zabývá tato norma, se dělí do tříd ochrany. Rozdělení závisí na typu prostředí, ve kterém se nositel vesty vyskytuje. První třída je určena k řešení hrozeb v prostředí, kde lze očekávat vysoce kvalitní čepel nože. Druhá třída je určena k řešení hrozeb v prostředí, kde je očekáváno použití čepelí nožů nižší kvality nebo improvizovaně vytvořených bodců (například nápravná zařízení) (6).

V rámci každé třídy jsou dále vesty klasifikovány do jedné ze tří protekčních úrovní. Pro každou danou úroveň ochrany se provádí testování se dvěma energiemi úderu. První energie je označována jako E1. Maximální možná penetrace při této energii je 7 mm. Jedná se o limit stanovený výzkumem, neboť při penetraci 7 mm je vnitřní poranění orgánů velmi nepravděpodobné, minimální vzdálenost životně důležitých orgánů od kůže se pohybuje kolem 10 mm. Podle standardu je vyžadováno následné přezkoušení s vyšší energií, která je označována jako E2. Při tomto přezkoušení je povolen průnik maximálně 20 mm. Tato hodnota vyplývá z faktu, že 20 mm je střední vzdálenost životně důležitých orgánů od kůže. Pro lepší přehlednost jsou dané energie pro každou úroveň ochrany uvedeny v tabulce níže (6, 7).

Tabulka 1: Hodnoty energie odpovídající úrovním ochrany (6), vlastní zpracování

Úroveň ochrany	Energie E1	Energie E2
1	24 ± 0,50 J	36 ± 0,60 J
2	33 ± 0,60 J	50 ± 0,70 J
3	43 ± 0,60 J	65 ± 0,80 J

Výše bylo uvedeno rozdělení do tříd ochrany podle prostředí, ve kterém se nositel ochranné vesty bude potenciálně pohybovat. Podle těchto tříd ochrany je rozlišováno i samotné testování (6).

V rámci testování ochranných vest spadajících do první ochranné třídy je provedena série 24 pádů zkušební zbraně s poctivým zásahem. Testují se údery pod úhlem 0° a 45°, střídají se energie dopadu E1 a E2 i zkušební zbraně P1 a S1. Úder číslo 1 je proveden energií E1, zkušební čepelí typu P1 a s úhlem dopadu 0°. Následně je třikrát opakován (úder číslo 2, 3 a 4). Úder číslo 5 je proveden energií E2, zkušební čepel je P1 a úhel dopadu 0°. Tento úder se také třikrát opakuje (úder číslo 6, 7 a 8). Při úderu číslo 9 dochází ke změně zkušební zbraně z P1 na S1. Začíná se opět energií E1 a úhel dopadu je 0°. Následují tři opakování (úder číslo 10, 11 a 12). U testovacího úderu číslo 13 zůstává typ čepel S2, zvýšena je energie na E2, úhel dopadu zůstává 0°, opakuje se opět třikrát (úder 14, 15 a 16). Úderem 16 končí soustava testů s nulovým nakloněním. Následují čtyři údery (17, 18, 19 a 20) s dopadovou energií E1, čepelí P1 a úhlem dopadu 45°. V posledních čtyřech úderech je vyměněna zkušební zbraň z P1 na S1 (úder 21, 22, 23 a 24), energie i naklonění jsou zachovány. Tabulkově jsou údery s dopadovou energií, typem zbraně a úhlem zobrazeny níže (6).

Tabulka 2: Údery a jejich specifika (první ochranná třída) (6), zpracování vlastní

Číslo úderu	Typ čepele	Energie	Úhel dopadu
1, 2, 3, 4	P1	E1	0°
5, 6, 7, 8	P1	E2	0°
9, 10, 11, 12	S1	E1	0°
13, 14, 15, 16	S1	E2	0°
17, 18, 19, 20	P1	E1	45°
21, 22, 23, 24,	S1	E1	45°

Série úderů při testování vesty spadající do druhé třídy ochrany čítá 12 úderů. Testovací údery číslo 1, 2, 3 a 4 jsou uskutečněny energií E1, pomocí zbraně typu špičatého bodce s nulovým nakloněním. U dalších čtyř úderů (údery číslo 5, 6, 7, 8) je navýšena dopadová energie na úroveň E2, vše ostatní zůstává stejné, tedy zkušební zbraň bodec a úhel 0°. Údery 9, 10, 11 a 12 jsou provedeny s energií E1 a úhlem naklonění 45°, typ zbraně je stále stejný (6).

Tabulka 3: Údery a jejich specifika (druhá ochranná třída) (6), vlastní zpracování

Číslo úderu	Typ čepele	Energie	Úhel dopadu
1, 2, 3, 4	Bodec	E1	0°
5, 6, 7, 8	Bodec	E2	0°
9, 10, 11, 12	Bodec	E1	45°

Výsledkem každého testování je souhrnná zpráva o zkoušce, která mimo jiné náležitosti obsahuje třídu a úroveň ochrany, na kterou byl materiál testován, jméno výrobce, označení typu materiálu. Uvedeny musí být i použitá zkušební zbraň, rychlost dopadu, úhel dopadu a hloubka průpichu. Nakonec je testovaný materiál hodnocen (vyhověl/nevyhověl) (6).

3.1.4 VPAM KDIW

Směrnice byla vytvořena Asociací testovacích center pro materiály a konstrukce odolné proti útokům (originální název: Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen

[VPAM]). Tato asociace zahrnuje úřady, instituce a akademie z Rakouska, Belgie, Švýcarska, Německa, Nizozemska a Norska. Směrnice se v překladu nazývá Ochrana proti bodnutí a nárazu (originálně: Stich- und Schlagschutz) a popisuje požadavky na klasifikace a zkušební metody ochranných prostředků, které jsou určeny k ochraně těla před úrazy způsobenými útoky bodnými a nárazovými předměty (8).

Technické požadavky

K provedení testování je potřeba předložit nejméně čtyři identické zkušební vzorky. Směrnice neuvádí jejich přesné rozměry, pouze informaci, že se využívají části ochranného vybavení velikosti S. Zkoušky jiných velikostí je potřeba dohodnout se zkušebním ústavem. Do vzorku je třeba provést požadovaný počet zásahů. Pokud to vzorek neumožňuje, použije se další vzorek stejného typu (8).

Podkladovým materiálem je plastelína, která je umístěna do krabice o vnitřních rozměrech 350 mm × 400 mm × 150 mm. Krabice musí být plastelínou zcela zaplněna až po okraje, vzduchové kapsy by měly být co nejmenší. Při zkoušce vhodnosti plastelíny je též využita ocelová koule o hmotnosti $1\,039 \pm 5$ g, která je pětkrát spuštěna z výšky $2\,000 \pm 5$ mm. Střed bodu nárazu musí být nejméně 80 mm od jakéhokoli okraje krabice. Plastelína je přijatelná, když je hloubka každé jamky 20 ± 2 mm (8).

Pro testování odolnosti proti bodnutí jsou využívány tři typy nástrojů. Jedná se o nůž (čepel), hřebík (trn) a jehlu. Navíc je ve směrnici ještě uvedeno dopadové těleso (kostka), kterým je zkoušena odolnost vůči nárazu (8).

Zkoušky odolnosti

Testování se provádí při okolní teplotě 20 ± 3 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 ± 5 %. Podle směrnice je možné provádět zkoušky, kdy je vzorek materiálu 12 hodin před zkouškou uložen do prostředí s nízkými (-20 ± 2 °C), nebo naopak vysokými teplotami ($+70 \pm 2$ °C) (8).

Zkoušený materiál je klasifikován do čtyř tříd podle užití dopadové energie. V každé třídě se pracuje se dvěma úrovněmi energie nárazu, povoleny jsou v závislosti na energii dvě krajní hodnoty hloubky vpichu (10 mm a 20 mm). Třída 1 pracuje s energiemi 15 J, při které je největší povolená hloubka vpichu 10 mm, a 25 J, s povolenou hloubkou 20 mm. Každá další třída začíná na nejvyšší energii nárazu té předchozí. Ve 2. třídě je tím pádem u energie 25 J povolena hloubka vpichu 10 mm, druhá úroveň energie je 40 J, maximální povolená hloubka vpichu 20 mm a méně. Třída 3 začíná na 40 J, maximální hloubka vpichu činí 10 mm, druhá hodnota je 65 J a maximální hloubka vpichu je 20 mm. Nejvyšší ochranu poskytuje třída 4, první energie nárazu 65 J, hloubka vpichu maximálně 10 mm, druhá 80 J, hloubka vpichu nejvýše 20 mm. Výše uvedené hodnoty jsou platné pro testování nástroji typu nůž (čepel) a trn (hřebík). Klasifikace zkoušek odolnosti proti propíchnutí jehlou podléhají jiným hodnotám (8).

Z označení klasifikace se nedozvídáme pouze třídu, ale i typ použité zkušební zbraně. Skládá se totiž z písmene (typ zbraně) a čísla (třída). Pro testování se užívají zkratky: K pro nůž (čepel) a D pro trn (hřebík) (8).

Testování se provádí nejen pod nulovým úhlem, ale i s nakloněným vzorkem pod úhlem 25° (8).

Jestliže je výsledek testování pozitivní, pak je vystaven certifikát o zkoušce, který obsahuje odpovídající klasifikace. Pokud zkoušený vzorek nevyhoví podmínkám, obdrží zákazník zkušební protokol. Certifikát je platný po dobu pěti let (8).

3.1.5 Body Armour Standard

Norma Body Armour Standard je určena pro donucovací orgány Spojeného království. Na jejím vytvoření se podíleli policejní federace, koncoví uživatelé, výrobci neprůstřelných vest, akreditované testovací zařízení a další techničtí

odborníci. Uvádí minimální požadavky na výkon neprůstřelných vest a zkušební metody. Zabývá se jak ochranou proti střelným zbraním, tak i ochranou proti průpichu. Nevztahuje se na ochranu proti útokům charakterizovaným máchnutím zbraně s čepelí po těle (říznutí), proti produktům výbuchu (malé vysokorychlostní projektily) a proti tupým traumatům (vržené předměty) (9).

Technické požadavky

Pro zkoušky jsou využívány netvarované ochranné panely, na kterých jsou předem označena všechna místa bodnutí. Každý úder by měl být veden v jiné orientaci, ochranný materiál se při zkoušení postupně otáčí (9).

Jako podkladový materiál je určen kompozit skládající se ze šesti listů čtyř různých druhů materiálu. Skládá se ze dvou listů expandovaného nitrilu, jednoho listu expandované neoprenové pryže, jednoho listu polyethylenové pěny a dvou listů přírodního kaučuku. Jednotlivé listy jsou poskládány právě v tomto pořadí a všechny musí mít rozměry 400 × 300 mm. Zkouška podkladového kompozitu se provádí, stejně jako u ostatních norem, pomocí ocelové koule. Koule o hmotnosti $1\,043 \pm 5$ g je třikrát spouštěna z výšky $1,50 \pm 0,02$ m, výška jejího odrazu musí v případě vhodného podkladového materiálů být 425 ± 75 mm. Po této zkoušce podkladového materiálu, před samotným oficiálním testováním ochranného materiálu musí být ponecháno minimálně 10 minut na regeneraci kompozitu a jeho navrácení do původního stavu (9).

Testovací zbraně mají podle normy dvě podoby, jedná se o nůž a špici. Pocházejí od schválených dodavatelů, jejich rozměry nejsou v normě konkrétně uvedeny. Před použitím se zbraně očišťují odmašťovacím prostředkem tak, aby nedošlo k jejich poškození. Po každém bodnutí je zbraň vyměněna za novou (9).

Zkoušky odolnosti

Testování je prováděno při teplotě 20 ± 3 °C a relativní vlhkosti vzduchu 40 až 70 %. Je možné zkoušet materiál i v extrémních teplotách, a to při +50 °C nebo -20 °C. Volitelné je i testování mokrých vzorků materiálu (9).

V rámci normy jsou definovány dvě úrovně ochrany proti bodnutí nožem (KR1 a KR2). Jednotlivé úrovně jsou definovány dopadovými energiemi (E1 a E2) a maximem povolené penetrace. V úrovni značené KR1 se pracuje s dopadovými energiemi 24 J (E1) a 36 J (E2). Úroveň KR2 značí užití energie 33 J (E1) a 50 J (E2). Při užití dopadové energie E1 je povolena penetrace 8 mm a méně. Při energii E2 je nejvyšší přípustná hloubka průpichu 20 mm. V každé sérii zkoušek je však povolen jeden průnik vyšší. U energie E1 je povolen jeden průnik do 9 mm, u energie E2 je přípustný jeden průnik do 30 mm. Všechny ostatní však musí být do výše uvedených povolených hodnot (9).

Zkoušky ochrany proti bodnutí hrotu se provádí pouze při dopadové energii E1. Není povolena perforace materiálu, tudíž po zkoušce nedochází k měření penetrace (9).

Z každého testování se vypracovává hlášení podle předem definované šablony, které je určeno Ministerstvu vnitra, výrobcí a testovacímu zařízení. Uchovává se po dobu minimálně pěti let (9).

3.2 Materiály pro výrobu ochranných oděvů

Materiály používané na ochranu proti bodnutí mají mnoho podob. Většina spadá do kategorie technických textilních vláken a tkanin. Jiné používají ostatní složky jako třeba kapaliny zahušťující stříh, další mohou zahrnovat například kovové prvky (10).

3.2.1 Dělení materiálů

Textilní materiály je možné dále dělit na látky tkané, netkané, pletené, potažené jiným materiálem a kompozity. Zvláštní skupinu tvoří materiály kovové (10).

Látky tkané

Pozitivum tkanin je vysoká hustota příze. Nevýhodou naopak snížené vlastnosti v tahu a tlaku, které jsou způsobeny křížením osnovních a útkových (horizontálních a vertikálních) nití při tkaní (10).

Látky netkané

Výhody netkaných látek spočívají v jejich mechanické odolnosti, flexibilitě a nízké hmotnosti. Navíc mají vynikající vlastnosti v rámci absorpce energie. Rázové napětí se šíří po povrchu tkaniny s minimálním přenosem na zadní stranu vrstev tkaniny (10).

Látky pletené

Pleteniny jsou poměrně flexibilní, a proto poskytují větší pohodlí při nošení než tkané a netkané látky. Použití pletených struktur v ochranném materiálu může být výhodné z hlediska hmotnosti a flexibility, zejména pro výrobu ochranných oděvů pro ženy (10).

Látky potažené dalším materiálem

Přínosem u těchto látek je možnost nanést povlak jiné látky. Povlak lze nanést jako lehce přilnavou plastovou fólii pouze na jednu stranu tkaniny nebo lze tkaninu impregnovat zcela tak, že vytvoří jednolitou vrstvu pryskyřicí vyztužených vláken. Kombinace potahu z vysoce výkonného tvrdého materiálu a vláknitých tkanin zlepšuje ochranné vlastnosti proti bodnutí či pořezání. O trendech ve vývoji tohoto typu materiálu bude pojednáváno níže (10).

Kompozity

Výhodou kompozitních materiálů je, že jsou méně objemné, pružnější a velice odolné proti propíchnutí. Naopak bývají často nepohodlné kvůli nižší flexibilitě a špatným vlastnostem v rámci tepelného managementu (10).

Kovové materiály

Nejčastěji používané materiály proti bodnutí/pořezání jsou titan a nerezová ocel. Kovy mohou být užity buď v řetízkové struktuře, nebo jako souvislá kovová vrstva. Nevýhodou řetízkové struktury je její otevřenost, která nezajišťuje úplnou ochranu proti propíchnutí (10).

3.2.2 Vybraná vlákna

K výrobě materiálů (textilií, kompozitů) zmíněných výše jsou potřeba vhodná vlákna. Vlákno je přírodní nebo syntetická látka, která je výrazně delší než kratší. Ta vyhovující pro balistickou ochranu by měla vykazovat vysokou pevnost v tahu, měla by být pružná, aby vydržela zatížení, odolná proti oděru a stálá v prostředí. Navzdory novým výzkumům nových vláken nejpoužívanějšími stále zůstávají aramidová a UHMWPE-vlákna (11, 12).

Aramidová vlákna

Aramidová vlákna, složená z aromatických polyamidů, jsou vhodným materiálem pro výrobu ochranných oděvů díky svým vlastnostem, mezi které patří vysoká pevnost, dobrá tepelná i chemická odolnost a odolnost proti nárazu a oděru. Jejich užití nacházíme ale i při výrobě lodních plachet, výztuží pneumatik, lan nebo třecích ploch. Aramidová vlákna se také prodávají pod obchodními názvy Kevlar (společnost DuPont), Twaron (společnost Teijin) nebo Heracron (společnost Kolon) (10).

Historie prvního značkového Kevlaru, který vynalezla Stephanie Kwolek, sahá až do 60. let minulého století. V 70. letech se Kevlar používal v konstrukci lehkých a flexibilních neprůstřelných vest. V roce 1988 představila společnost DuPont vylepšený Kevlar 129, který nabízí zvýšenou balistickou ochranu proti

nárazům s vysokou energií. V 90. letech se firma DuPont zaměřila na technologii odolnou proti propíchnutí jak noži, tak jinými ostrými předměty, zejména jehlami. Představila také nový přírůstek – Kevlar Protera. Tato vysoce výkonná tkanina přinesla větší flexibilitu, větší balistickou ochranu a nižší hmotnost. Zvýšena byla schopnost absorbovat energii i pevnost v tahu. Spolu s Kevlarem se řadí Twaron mezi nejznámější aramidová vlákna. Mikrovláknem Twaron CT je až o 23 % lehčí než standardní aramidová příze, která slouží k výrobě ochranných vest. Vyšší počet mikrofilamentů zvyšuje schopnost vstřebávat energii. Výsledná vesta z tohoto materiálu je lehčí, pružnější a nabízí větší pohodlí pro nositele (10).

Aramidová vlákna využívaná v poslední době poskytují větší pohodlí a výhodný poměr výkon/hmotnost než starší aramidové materiály. Tkaniny s aramidovým potahem se ve velké míře používají k výrobě vojenských přileb a vložek uvnitř vojenských a policejních vozidel. Dokonce i tanky mohou být lehčí a bezpečnější při použití aramidových vláken. Hmotnost těchto vozů je možno snížit až o 60 % ve srovnání s užitím ocele. Nyní nabízí balistická ochrana vytvořená z aramidu řadu úrovní, od střelných zbraní až po výbušiny (13).

UHMWPE

V rámci balistické ochrany jsou další často používaná vlákna z ultravysokomolekulárního polyethylenu (UHMWPE). Svou pevnost získávají z délky molekul, na rozdíl od aramidových vláken, která dosahují pevnosti silnými vazbami mezi sousedními krátkými molekulami. Dlouhé molekuly umožňují velmi dobré zatížení v tahu, vlákna UHMWPE jsou asi desetkrát pevnější než ocel (10).

Dyneema nebo Spectra jsou obchodní názvy jednoho z nejpokročilejších balistických vláken. Nad svými konkurenty vyniká zmiňovanou pevností a nízkou hustotou. Pevnost je dokonce asi o 50 % větší než u Kevlaru. Jeho negativem je degradace při vysokých teplotách (10).

Tkaná vysokomolekulární polyamidová vlákna se používají jako materiál pro výrobu jak měkkých balistických vest (flexibilní vesty pro donucovací orgány a armádu), tak i vložek a přileb, které poskytují nejvyšší balistickou ochranu proti střelám a střepinám. Využití nacházejí také při pancéřování vozidel (13).

PBO

PBO, chemickým složením poly(p-fenylen-benzobisoxazol), je dalším z vláken využívaných v balistice. Vlákna se vyznačují teplotní odolností a téměř dvojnásobnou pevností oproti aramidovým vláknům. Společnost Toyobo vyrábí PBO pod obchodním názvem Zylon (10).

Po incidentu ve městě Forrest Hills v Pensylvánii v roce 2003, kdy byl zabit policista kulkou ráže 40, přestože měl na sobě neprůstřelnou vestu právě ze Zylonu, začalo vyšetřování amerického Národního institutu spravedlnosti. Výsledky ukázaly, že dochází k degradaci balistické ochrany vesty z těchto vláken. Z toho vyplývá největší negativum Zylonu. Jeho pevnost postupně klesá, zejména v podmínkách s vysokou vlhkostí, dokonce i při teplotách nižších než 100 °C (10).

Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou vyrobena z různých druhů drceného skla. Jejich výroba probíhá na základě vysokoteplotní přeměny surovin na taveninu, která je dále zpracována do podoby skleněných vláken. Výsledná vlákna jsou velmi odolná proti ohni. Nevýhodou je nízká odolnost při namáhání a snižující se pevnost ve vlhkém prostředí. Pro svá negativa jsou použita spíše jako součást kompozitů (10, 14).

Uhlíková vlákna

Samostatná uhlíková vlákna se v balistické ochraně nevyužívají kvůli jejich křehkosti. Přínosem je ale jejich použití v kompozitních materiálech v podobě jedné či dvou vrstev, například pro zvýšení odolnosti při opakované kompresi materiálu (10, 15).

3.3 Trendy ve vývoji

V rámci rozvoje ochranných oděvů se provádí řada výzkumů, které se zabývají novými technologiemi výroby, materiály, ale i tvary výsledných oděvů, především vest. Důraz je kladen na vhodnou prodyšnost a termopropustnost materiálu, flexibilitu a pohodlí pro nositele. Tyto faktory by měly zvýšit motivaci potenciálních nositelů k užití osobní ochrany (7, 10).

3.3.1 Šupinové materiály

Inovace přináší například inspirace ze světa zvířat. V Číně se Liu a kol. inspirovali luskouny. Šupinové pokrytí těla těchto hmyzožravých savců přivedlo vědce na myšlenku vytvoření dvouvrstvého šupinového úpletu. Základem tohoto kompozitu je příze, šupinovou část tvoří dva druhy pryskyřice, včetně polyethylenu a Surlynu. Výsledný materiál vykazuje výborné vlastnosti. Nejenže je velmi dobře odolný proti bodnutí a říznutí v jakémkoliv směru, ale jeho předností je především flexibilita, kterou zajišťují jednotlivé šupiny. Odvozeniny od tohoto kompozitu by podle jeho autorů mohly znamenat budoucnost v ochranném odívání (16).

Luskouni nebyli jediná zvířata, která přivedla vědce na nové materiály. V Kanadě byla testována odolnost šupin rybích, které podle výzkumného týmu mají vlastnosti využitelné pro výrobu nových osobních ochranných struktur. Mezi tyto vlastnosti zařadili pružnost, lehkost a prodyšnost (17).

3.3.2 3D-materiály

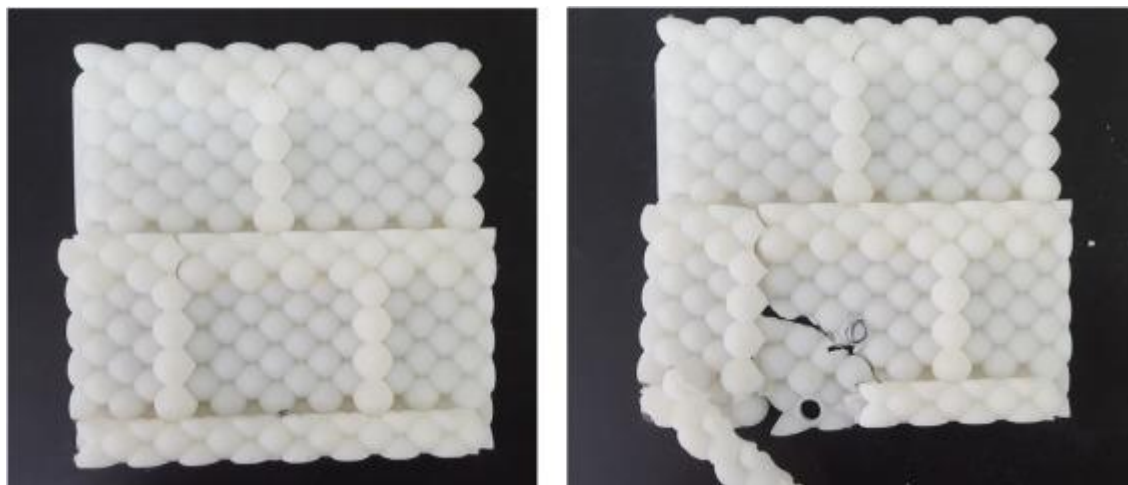
3D-tisk neboli aditivní výroba zahrnuje několik různých technologií. Jednou z nich je fúzované modelování depozice (Fused Deposition Modeling [FDM]), jehož pomocí Cicek a kol. vytvořili čtvercové vzorky materiálu v pěti různých velikostech, jejichž boční rozměry se pohybovaly od 40 do 80 mm a jejich tloušťka od 6 do 10 mm. Materiálem pro výrobu čtverců byla kyselina polylaktidová a akrylonitrilbutadienstyren, a to zejména pro jejich dostupnost na trhu. Tyto vzorky poté testovali pomocí úrovně KR1 – E1 (Body Armour Standard), což znamená testování s hodnotou energie 24 J. Závěrem se zjistilo, že odolnost proti bodnutí významně ovlivňuje nejen typ materiálu, ale i velikost a tloušťka vzorku. U vzorků vyrobených z akrylonitrilbutadienstyrenu byla nalezena vhodná střední hloubka průniku. Pro mechanické vlastnosti a odolnost byly jako nejúspěšnější vzorky vyhodnoceny ty z kyseliny polylaktidové o rozměrech 5 mm, přestože některé během testů praskaly. Linie lomu byla podélná s orientací tisku (18).

Jiang a kol. zaměřili svůj výzkum na konstrukci vzorků. Nejprve prováděli experiment na rovinných vzorcích o různých tloušťkách (tvarově i konstrukcí podobných těm zmíněným výše) tak, aby se vyhodnotila jejich správná tloušťka. Poté navrhli a vyrobili pyramidovou konstrukci. Vzorky byly vyrobeny z polyamidu pomocí laserového spékání. Hladké rovinné vzorky neprošly testy podle čínských standardů. Některé vzorky s pyramidovou konstrukcí testováním prošly, nejlépe ty s tloušťkou 7 mm a úhlem výsledného jehlanu od 25° do 30°. Podle výzkumu vykazovaly vysokou odolnost proti bodnutí a relativně nízkou plošnou hmotnost (19).



Obrázek 1: Ukázka pyramidové struktury po testování (19)

Studována nebyla jen pyramidová konstrukce panelů. He a kol. se nechali inspirovat přírodou, stejně jako několik vědců před nimi, konkrétně vaječnými skořápkami. K výrobě též použili laserové spékání polyamidového prášku. Vzorky byly testovány podle britského standardu (Body Armour Standard, povolený průnik až 7 mm), kterým prošly. Další studie mají za cíl splnit i nároky čínského standardu pro materiály odolné proti bodnutí, který je na materiál přísnější, nepovoluje průnik bodné zbraně vůbec (20).



Obrázek 2: Ukázka panelu se skořápkovou strukturou před testováním a po něm (20)

Aditivní výroba obecně nabízí mnoho možností pro přípravu nových zajímavých tvarů materiálu pro neprůstřelné vesty, které by mohly přinést větší pohodlí pro nositele. To je dáno zejména nižší hmotností jednotlivých komponentů, která bude znamenat nižší hmotnost výsledného ochranného oděvu (7, 20).

3.3.3 Textilní tkaniny s keramickým povlakem

Nanášení keramických povlaků je jednou z možností, jak zvýšit tvrdost materiálu a odolnost proti opotřebení vláken. Povlaky přispívají k poškození ostří zbraně, čímž snižují jeho schopnost vlákna řezat. Úpravou textilních vláken se zabývalo v poslední době několik týmů vědců, kteří používali k vytvoření povlaku různé látky. Například Manaee a kol. navrhli plazmou stříkaný povlak, který zvyšuje odolnost aramidových tkanin. Jako vrchní nátěr byl použit oxid hlinitý spolu s oxidem titaničitým ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 13 \% \text{TiO}_2$). Dále byla odolnost proti bodnutí zvýšena použitím měděného a hliníkového prášku jakožto spojovacího materiálu. Testy odolnosti proti bodnutí ukázaly, že odolnost potažených látek je asi pětkrát vyšší než u látek nepotažených (7, 21).

Jako povlak nebyly zkoumány pouze výše uvedené látky, ale například i karbid boru, karbid křemíku nebo oxid křemičitý. Aplikace všech těchto povlaků několikanásobně zvyšovala odolnost proti průniku ostrého předmětu (7).

3.3.4 Textilní tkaniny se smykovou zahušťovací kapalinou

Smykové zahušťovací kapaliny jsou neneutronovské kapaliny, u kterých se se zvyšujícím se napětím nebo smykovou rychlostí zvyšuje viskozita. Tyto koncentrované koloidní suspenze jsou připravovány rozptylem pevných částic v kapalině. V případě nárazu ztuhnou, ale zároveň nezasahují do pohodlí při nošení oděvů jimi potažených, neboť po přerušení působení vnější síly přejdou zpět do původního stavu (7).

V roce 2006 připravili Decker a kol. smykovou kapalinu rozptylem částic oxidu křemičitého v polyethelynglykolu, ve které smáčeli kevlarové a nylonové tkaniny. Jak kevlarová, tak nylonová tkanina vykazovala vyšší odolnost proti průniku nože ve spojení se smykovou kapalinou. Například u Kevlaru vykazoval 12vrstvý vzorek ve spojení s kapalinou větší odolnost než čistý 15vrstvý vzorek, přičemž jejich plošná hmotnost byla srovnatelná (7, 22).

V posledních letech výzkum zahušřovacích smykových kapalin neustává. Studovány jsou faktory zefektivňující jejich použití, nejčastěji ve vztahu právě s Kevlarem (ale například i u tkanin z vysokomolekulárních polyethylenů). Zkoumán byl například ideální hmotnostní podíl oxidu křemičitého v kapalině. Sun a kol. uvedli jako optimální hodnotu 38 %. Dále byla testována velikost částic oxidu křemičitého (15 nm, 20 nm a 75 nm) a různé podíly kapaliny ve výsledném materiálu (15 %, 20 % a 25 %). Li et al. označují jako optimální velikost částic 15 nm a koncentraci částic oxidu křemičitého 25 % pro optimální odolnost proti propíchnutí (23, 24).

3.4 Integrovaný záchranný systém

Přibývající počet mimořádných událostí a krizových situací si žádal propracovanější přístup k jejich řešení. Pojem *integrováný záchranný systém*, kterým rozumíme koordinovaný postup jeho složek při přípravě na mimořádné události a při provádění záchranných a likvidačních prací, byl poprvé zakotven v zákoně č. 239/2000 Sb. Jeho základy však byly ustanoveny již v roce 1993, kdy v květnu schválila vláda jeho zásady usnesením č. 246 (25, 26, 27).

V rámci integrovaného záchranného systému rozdělujeme složky, které se podílejí na přípravě a řešení mimořádných událostí, na základní a ostatní. Mezi základní složky patří Hasičský záchranný sbor České republiky spolu s jednotkami požární ochrany zařazenými do plošného pokrytí kraje, zdravotnická záchranná služba a Policie České republiky (25).

Právě policie je jediná ozbrojená základní složka integrovaného záchranného systému. Vzhledem k jejím úkolům, jako jsou například ochrana bezpečnosti osob, majetku a veřejného pořádku nebo třeba předcházení trestné činnosti, je zjevné, že osobní ochrana proti ostrým předmětům členů tohoto sboru je velmi důležitá. Policie České republiky disponuje řadou ochranných vest odolných nejen proti střelám, ale i proti bodným zbraním splňující třídu ochrany proti bodným zbraním (TON III) podle ČSN 39 5360 (28, 29).

Jak již bylo zmíněno, jednotlivé složky integrovaného záchranného systému se člení na základní a ostatní složky. Podle zákona č. 239/2000 Sb. jsou ostatními složkami *„...vyčleněné síly a prostředky ozbrojených sil, ostatní ozbrojené bezpečnostní sbory, ostatní záchranné sbory, orgány ochrany veřejného zdraví, havarijní, pohotovostní, odborné a jiné služby, zařízení civilní ochrany, neziskové organizace a sdružení občanů, která lze využít k záchranným a likvidačním pracím“*. Mezi tyto složky, které poskytují plánovanou pomoc na vyžádání, spadá například Vodní záchranná služba Českého červeného kříže, Báňská záchranná služba nebo Armáda České republiky. Právě Armáda ČR představuje hlavní složku ozbrojených sil České republiky a disponuje řadou ochranných prostředků (25).

4 METODIKA

Praktická část diplomové práce obsahuje několik spolu souvisejících částí. První z nich je samotné testování materiálů pomocí zařízení umožňujícího pád zkušební bodné zbraně. Výsledky testování byly následně statisticky vyhodnoceny pomocí grafů a tabulek. V rámci testů jsme měli k dispozici dva balistické materiály různého druhu. Ty byly vzájemně porovnány a následně byl určen materiál odolnější proti propíchnutí.

4.1 Testování materiálů a měření

Schopnost materiálu odolat působení zbraně byla testována pomocí zařízení simulujícího bodnutí. Testovány byly čtyři druhy materiálu, dva balistické k výrobě ochranných oděvů (Dyneema MT220, Honeywell Gold Shield MT100), dva k jiným účelům (dvou- a čtyřvrstvý pryžotextilní materiál Rubena). Testování probíhalo v laboratoři Fakulty biomedicínského inženýrství Českého vysokého učení technického pod odborným vedením Ing. Slávky Čubanové od ledna do března roku 2023.

4.1.1 Popis testovacího zařízení

Zařízení námi používané pro testování vzorků ochranných materiálů je variabilní a po malých úpravách je na něm možné provádět zkoušky v souladu s několika mezinárodními standardy. Zatím nejsou splněny podmínky pro získání oficiální akreditace k provádění testování, neboť zařízení není umístěno v prostorách, kde by se dalo ovlivnit okolní prostředí (teplota, vlhkost vzduchu). Přesto ale umožňuje snadno a rychle testovat celou řadu materiálů pomocí různých typů bodných zbraní. Jeho velkou výhodou je již zmíněná flexibilita. Disponuje vodorovnou podpěrrou, na které je umístěn naklápěcí stůl umožňující pád zkušební čepele pod různými úhly ($\pm 35^\circ$ z vodorovné polohy). Na stole je upevněn kontejner o rozměrech 350×400×150 mm, do něhož je

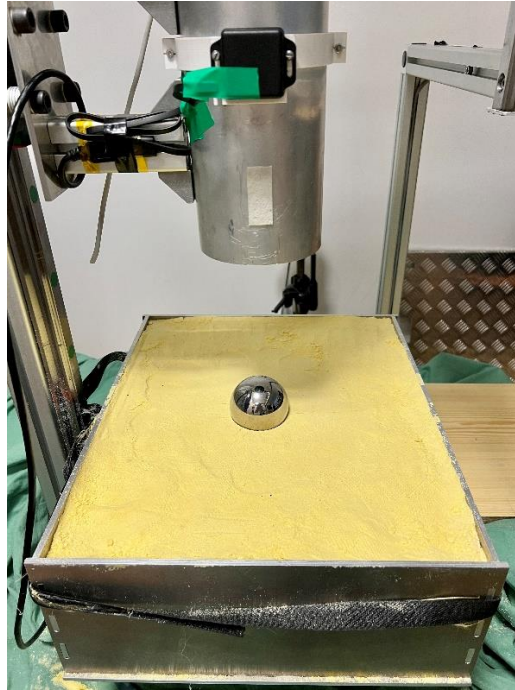
umísťován podkladový materiál pomyslně nahrazující lidskou tkáň, který může mít více podob v závislosti na různých normách a standardech. V našem případě se jednalo o plastickou hmotu vytvořenou (podle doporučení České technické normy) z hladké kukuřičné mouky a parafínového oleje (1 kg mouky na 170 ml parafínového oleje). Na obrázku níže je ukázána plastická hmota napěchovaná v kontejneru.



Obrázek 3: Plastická hmota umístěná v kontejneru

Před testováním materiálu byla tato hmota odzkoušena pomocí ocelové koule. Koule vážící 1 040 g byla spouštěna z výšky 2 000 mm. Před každým testováním bylo dosaženo optimálního vtisku koule do podkladového materiálu (podle ČSN 39 5360 hloubka 25 ± 3 mm). Tato zkouška byla provedena i po samotném testování vzorků ochranných materiálů.

Na obrázku níže je viditelná ocelová koule po dopadu do podkladového materiálu, před měřením hloubky jejího vtisku.



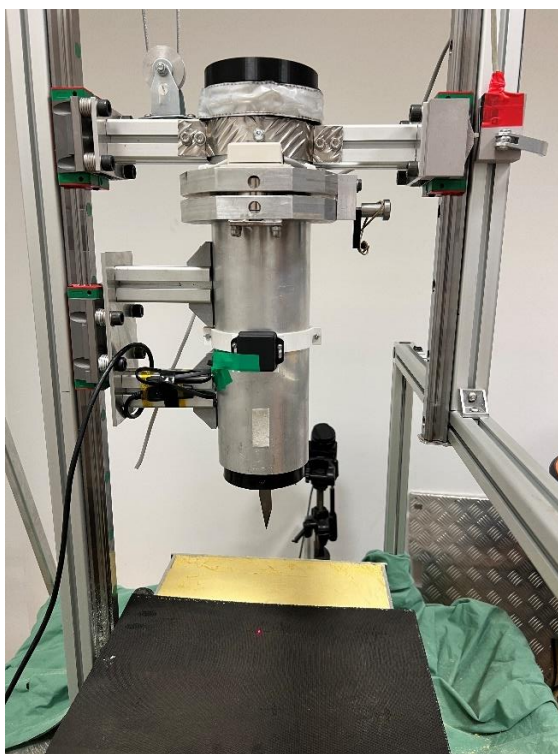
Obrázek 4: Testování podkladové hmoty pomocí ocelové koule

Na kontejner s podkladovým materiálem je umísťován testovaný materiál, nejlépe o rozměrech 400×400 mm, je ale možné testovat vzorky i jiných rozměrů. Jeho nepohyblivost je zajištěna pomocí suchých zipů.

Výhodou námi využívaného zařízení je možnost použití širokého spektra zkušebních zbraní. Námi využívaný zkušební nůž (na obrázku 5) byl používán ocelový, odpovídající řadě standardů. V rámci celého zařízení je umísťován pod soustavu závaží. Je možné jej snadno vyjmout, popřípadě vyměnit. Pro jeho přesný dopad slouží kolejnice, s nimiž je spolu se závažím spojen. Pro dosažení správného bodu dopadu může být nápomocný i laser. Na pohybujícím se závaží s bodnou zbraní je připojen akcelerometr. Ten umožňuje určit nejen rychlost pohybu a chování bodné zbraně, ale pomocí počítačového programu díky němu také získáváme informace o přesné dopadové energii. Proto není nutné se spoléhat pouze na výpočet pomocí vzorce. Dopad čepule se dá blíže zkoumat i pomocí vysokorychlostní kamery. Na obrázku 6 je vidět jak zkušební bodná zbraň, tak závaží, lišty a akcelerometr.

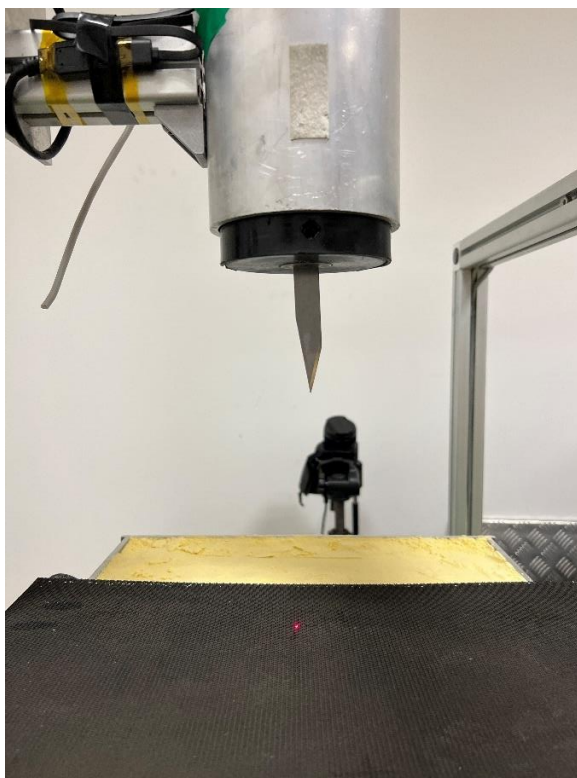


Obrázek 5: Nůž užívaný při testování



Obrázek 6: Závaží a čepel na lištách, akcelerometr

Jak již bylo zmíněno, k dosažení určeného, předem naměřeného místa dopadu zkušební zbraně je využíván laser.



Obrázek 7: Laserem označený bod dopadu hrotu zkušební zbraně

4.1.2 Energie dopadu zkušební zbraně

Základem pro hodnocení odolnosti ochranného materiálu je energie, se kterou zkušební bodná zbraň dopadá. Pro dosažení stanovené energie nárazu je možné ovlivnit výšku pádu a hmotnost padajícího závaží, neboť platí, že $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. E_k je kinetická energie závaží, m je jeho hmotnost a v rychlost pádu. Rychlost pádu je ovlivnitelná výškou, neboť závaží padá volným pádem, a čím déle padá, tím má vyšší rychlost.

Právě výška pádu zkušební čepele byla využívána při hledání hodnot energie, které by vedly k hloubkám průniku přijatelným podle jednotlivých norem.

4.1.3 Měření průniku

V případě, kdy zkušební zbraň pronikne celou tloušťkou testovaného materiálu, je možné tento průnik měřit vícero způsoby. Prvním z nich je měření čepele vyčnívající z materiálu, aniž bychom ji před měřením dislokovali.

Druhou možností je vyjmutí čepele z materiálu a následné měření délky průniku. Tato délka, je-li testování prováděno zkušebními zbraněmi podle standardů, je pak převedena podle tabulky uvedené níže na hloubku průniku. Tento převod umožňuje předem definované zkosení zkušební zbraně. V naší diplomové práci jsme využívali druhé možnosti, a to měření délky průniku na nedopadové straně (strana, na kterou nedopadá zkušební zbraň, ležící na podkladové hmotě), která je poté převedena na hloubku. V tabulkách v kapitole Výsledky je proto uvedena jak délka, tak hloubka průniku. K přesnému měření bylo užito digitální posuvné měřítko.

Tabulka 4: Převodní tabulka (6)

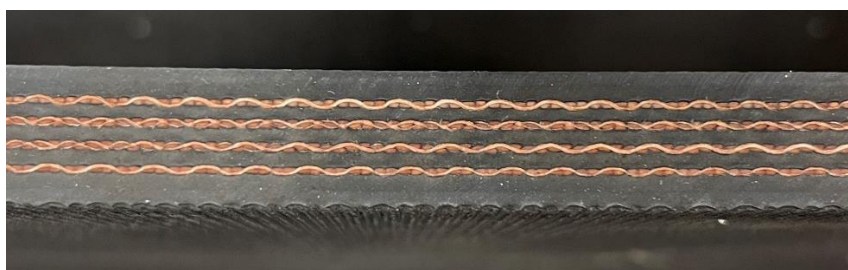
Length (mm)	Depth (mm)	Length (mm)	Depth (mm)	Length (mm)	Depth (mm)	Length (mm)	Depth (mm)
0.42	1	6.04	14	11.41	27	13.56	40
0.85	2	6.46	15	11.82	28	13.71	41
1.29	3	6.87	16	11.97	29	13.85	42
1.72	4	7.28	17	12.11	30	14.00	43
2.16	5	7.69	18	12.26	31	14.14	44
2.60	6	8.11	19	12.40	32	14.29	45
3.03	7	8.52	20	12.55	33	14.43	46
3.46	8	8.93	21	12.69	34	14.58	47
3.90	9	9.35	22	12.84	35	14.72	48
4.33	10	9.76	23	12.98	36	14.87	49
4.77	11	10.17	24	13.13	37	15.00	50
5.22	12	10.58	25	13.27	38		
5.63	13	11.00	26	13.42	39		

4.1.4 Testované materiály

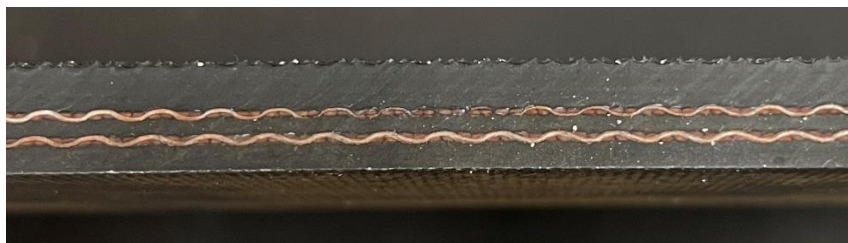
Jak již bylo zmíněno výše, testovány byly dva balistické materiály, jimiž byly MT 220, vyráběný společností Dyneema, a Gold Shield MT100, vyráběný společností Honeywell, a dva materiály sloužící k jiným účelům, kterými jsou dvou- a čtyřvrstvý pryžotextilní materiál, jež vyrábí společnost Rubena. I materiály sloužící k jiným účelům, než je ochrana proti energii zbraně, musí vykazovat odolnost proti propíchnutí.

Pryžotextilní materiál Rubena

Pryžotextilní membrány jsou součástí vakových hradicích jezů, které jsou užívány pro vzduší hladiny vodního toku. Vyrábí je česká firma Rubena technologií postupného lisování neztvulkanizovaných polotovarů do konečné podoby homogenní membrány. Tato technologie odstraňuje spoje pásů a zvyšuje mechanickou odolnost. Vzhledem k užití je nutné tuto mechanickou odolnost testovat. Membrána může mít různou tloušťku, k našemu výzkumu byla použita dvou- a čtyřvrstvá, již lze vidět na obrázku níže (pohled z boku) (30).



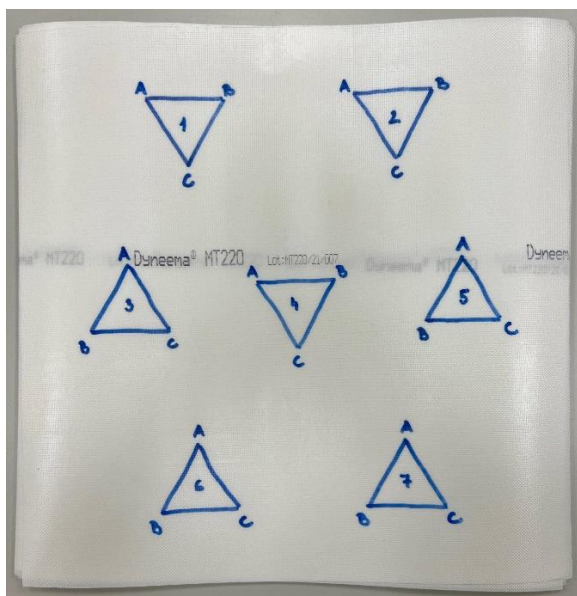
Obrázek 8: Rubena čtyřvrstvá



Obrázek 9: Rubena dvouvrstvá

Dyneema MT220

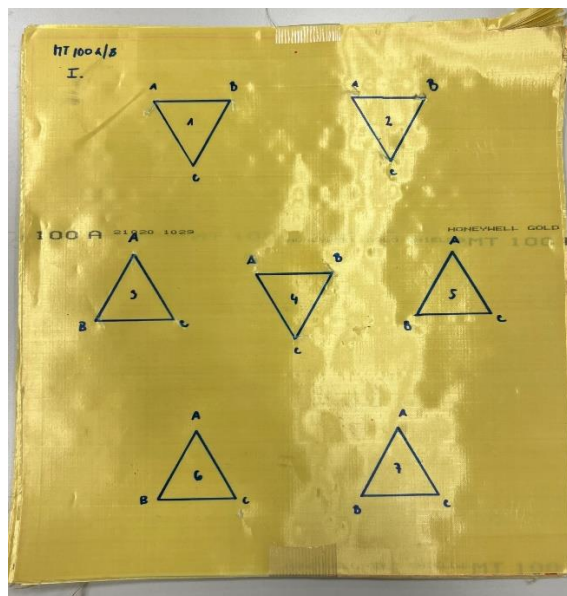
Materiál firmy Dyneema je vyroben z vláken z ultravysokomolekulárního polyethylenu. Byl vytvořený přímo pro ochranu proti působení bodné zbraně. Vyznačuje se svou lehkostí. Na obrázku níže je testovaný materiál s vyznačenými místy úderu zkušební bodné zbraně (31).



Obrázek 10: Dyneema MT 100

Honeywell MT100

Materiál MT100 firmy Honeywell se skládá z jednotlivých extrémně tenkých křížově poskládaných vrstev, které jsou vyrobeny z aramidových vláken. Vyniká především svou lehkostí, která umožňuje výrobcům navrhovat flexibilní a pohodlné ochranné oděvy, především vesty. I tento materiál byl vytvořen speciálně pro odolnost proti bodnutí ostrou zbraní, ale v kombinaci s jiným druhem materiálu může být využit i pro výrobu ochranných oděvů či vest odolných proti širšímu spektru hrozeb (32).



Obrázek 11: Honeywell Gold Shield MT100

4.2 Statistické metody

K uspořádání a popisu naměřených hodnot byla užita deskriptivní statistika. Výsledné naměřené hodnoty byly zpracovány do podoby grafů a tabulek pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel verze 2301.

4.3 Komparace balistických materiálů

V rámci hledání nejlepší možnosti materiálu pro výrobu ochranných oděvů pro zasahující složky je nutné zvážit několik faktorů, naše diplomová práce je zaměřena na odolnost proti propíchnutí. K dispozici jsme měly dva balistické

materiály, jak již bylo zmíněno výše, ze kterých byl srovnávací metodou vyhodnocen odolnější z nich. Pro jejich komparaci byly užity ekvivalentní hodnoty dopadové energie zkušební bodné zbraně.

5 VÝSLEDKY

5.1 Výsledky měření – Rubena dvouvrstvá

Pro měření dvouvrstvé Rubeny byly k dispozici dva stejné vzorky tohoto pryžotextilního materiálu. Testování prováděné na prvním vzorku lze v označení úderů poznat podle čísla jedna před písmenem, testování na druhém vzorku podle čísla dva. Písmeno pak značí pořadí úderů. Během testování se materiál otáčí tak, aby úderu zkušební zbraně byly v různých směrech. Analýza vztahu směru úderu a naměřené hloubky průniku ukázala, že směr u tohoto materiálu nemá vliv na výslednou hloubku. Vzhledem k nutnosti dodržet dostatečné mezery mezi úderu se jich na jeden vzorek testovaného materiálu vešlo devět. Nejprve bylo použito závaží o hmotnosti 9 282 g. S tímto závažím byla postupně snižována výška, ze které zkušební zbraň padala, a sledovaly se postupně se snižující hodnoty dopadové energie. Hledána byla energie dopadu, při které by byl průnik zkušební zbraně materiálem nulový.

První úder, označený jako 1A, byl realizován z výšky 0,3 m, energie dopadu byla 22 J a hloubka vpichu 18 mm. Taková hloubka průniku ve vztahu s energií dopadu 22 J by neodpovídala povolené hloubce průniku ani u jednoho z námi popisovaných standardů uvedených v teoretické části této práce.

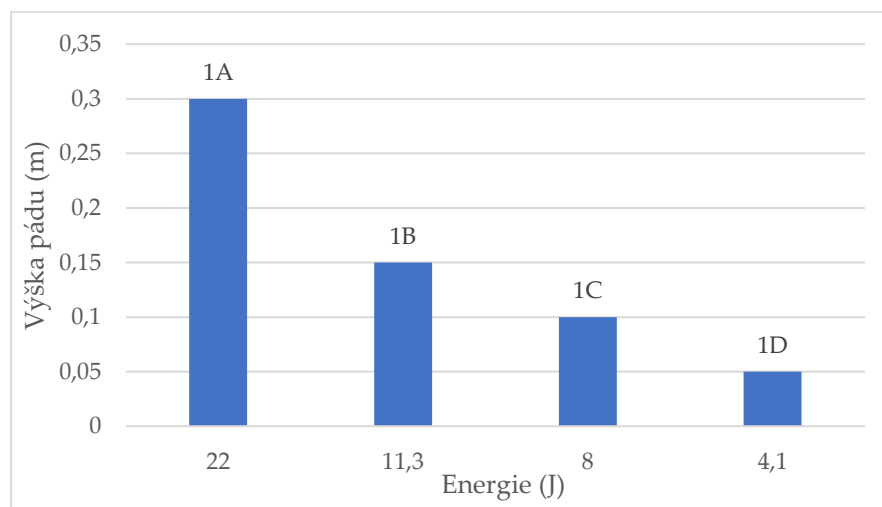
U úderu 1B byla snížena výška na polovinu od prvního úderu. Výška pádu 0,3 m zapříčinila i pokles dopadové energie též téměř o polovinu na 11,3 J. Hloubka průniku byla 13 mm.

Výsledkem úderu 1C z výšky 0,1 m s dopadovou energií 8 J byla hloubka průniku 9 mm. I při takovém snížení výšky byl stále průnik v kladných hodnotách.

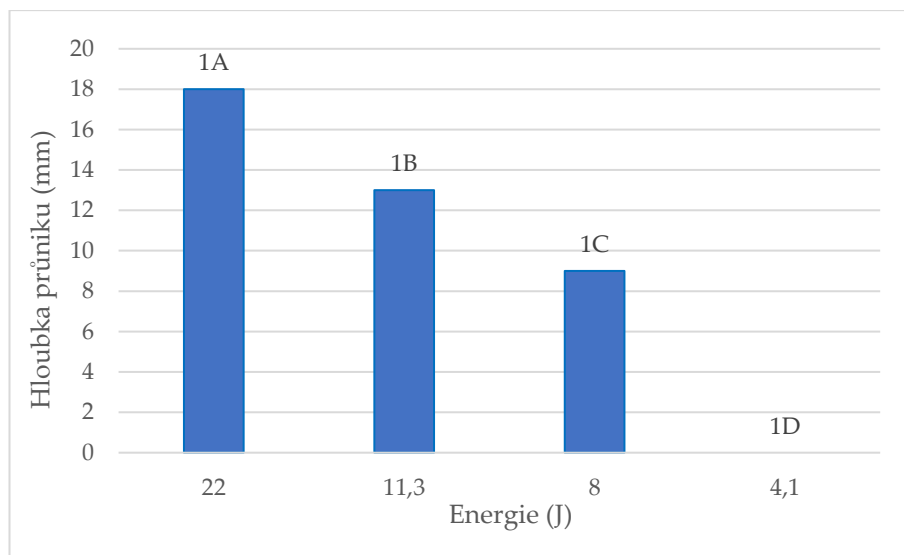
Při hledání hodnot pro nulový průnik byl úspěšný až úder 1D. Opět, jako při prvních dvou úderech, byla výška pádu snížena na polovinu, což vyvolalo snížená dopadové energie téměř na polovinu, na 4,1 J. Při měření nebyl detekován žádný průnik zkoušeným materiálem. Tabulkově je měření zpracováno níže. Na obrázku 12 jsou graficky vyobrazeny jednotlivé údery definované dopadovou energií a výškou pádu, na obrázku 13 pak údery definované energií a výslednou hloubkou průniku.

Tabulka 5: Postupné snižování hodnot – dvouvrstvá Rubena

ÚDER	ENERGIE (J)	VÝŠKA (m)	DÉLKA PRŮNIKU (mm)	HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
1A	22	0,3	7,4	18
1B	11,3	0,15	5,6	13
1C	8	0,1	3,5	9
1D	4,1	0,05	0	0



Obrázek 12: Údery definované energií a výškou pádu – dvouvrstvá Rubena

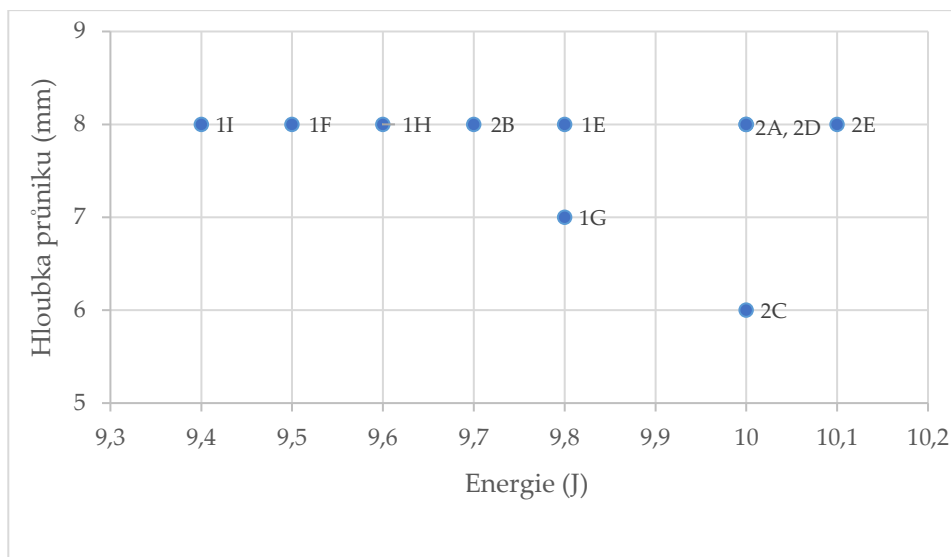


Obrázek 13: Údery definované energií a hloubkou průniku – dvouvrstvá Rubena

Po nálezu energie, která vyvolala nulovou hloubkou průniku, bylo z hmotnosti závaží odebráno 1 040 g a měření bylo několikrát zopakováno se stejnou výškou. Váha závaží byla 8 242 g a výška pádu 0,15 m, provedeno bylo 10 pádů zkušební bodné zbraně. Nejmenší hodnota energie byla 9,4 J, největší 10,1 J. Průměrně byla dopadová energie 9,79 J. Hloubka průniku se pohybovala od 6 do 8 mm, průměrná byla 7,7 mm. Nejčastěji byla naměřena hloubka průniku 8 mm. Tabulkově jsou jednotlivé údery a jejich hodnoty zobrazeny níže, stejně jako graf vztahu energie a hloubky u jednotlivých úderů.

Tabulka 6: Údery z výšky 0,15 m – dvouvrstvá Rubena

ÚDER	ENERGIE (J)	VÝŠKA (m)	DÉLKA PRŮNIKU (mm)	HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
1E	9,8	0,15	3,2	8
1F	9,5	0,15	3,3	8
1G	9,8	0,15	2,7	7
1H	9,6	0,15	3,4	8
1I	9,4	0,15	3,2	8
2A	10	0,15	3,1	8
2B	9,7	0,15	3,4	8
2C	10	0,15	2,6	6
2D	10	0,15	3,1	8
2E	10,1	0,15	3,2	8



Obrázek 14: Grafické znázornění jednotlivých úderů z výšky 0,15 m – Rubena dvouvrstvá

5.2 Výsledky měření – Rubena čtyřvrstvá

Testování čtyřvrstvé Rubeny bylo provedeno podobně jako u dvouvrstvé. Nejprve se s postupně snižující se výškou pádu zkušební čepel zkoumala postupně se snižující energie, která měla za následek snižování hloubky průniku až k nulové hodnotě. Dále bylo realizováno deset úderů z výšky 0,3 m. Hmotnost závaží byla 9 282 g. K dispozici pro účely testování byly též dva vzorky materiálu, na které byly předem vyznačeny body dopadu bodné zbraně. Materiál se opět po každém úderu natočil tak, aby nůž dopadal v různých směrech. Ani u čtyřvrstvé Rubeny nemělo toto natáčení vliv na hloubku průniku.

Nejvyšší výška, ze které bylo měření realizováno, byla 0,65 m. Přesně byly z této výšky uskutečněny čtyři údery. Bylo zjištěno, že strana vzorku materiálu hraje roli ve výsledných hodnotách. Při úderu 1B, kdy bodná zbraň dopadala na hladší stranu materiálu, se ukázalo, že hloubka průniku byla větší a dopadová energie nižší než u ostatních úderů. V tabulce níže jsou zaznamenány hodnoty z těchto čtyř úderů. V tabulce 9 je uveden průměr hodnot z úderů

1A, 1C a 1D. Dopadová energie byla u všech naměřena 44 J. Průměrná šířka průniku byla 7,1 mm, což odpovídá hloubce 17 mm.

Tabulka 7: Údery z výšky 0,65 m – čtyřvrstvá Rubena

ÚDER	ENERGIE (J)	VÝŠKA (m)	DÉLKA PRŮNIKU (mm)	HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
1A	44	0,65	7,4	18
1B (hladká)	43	0,65	8,4	20
1C	44	0,65	7,1	17
1D	44	0,65	6,8	16

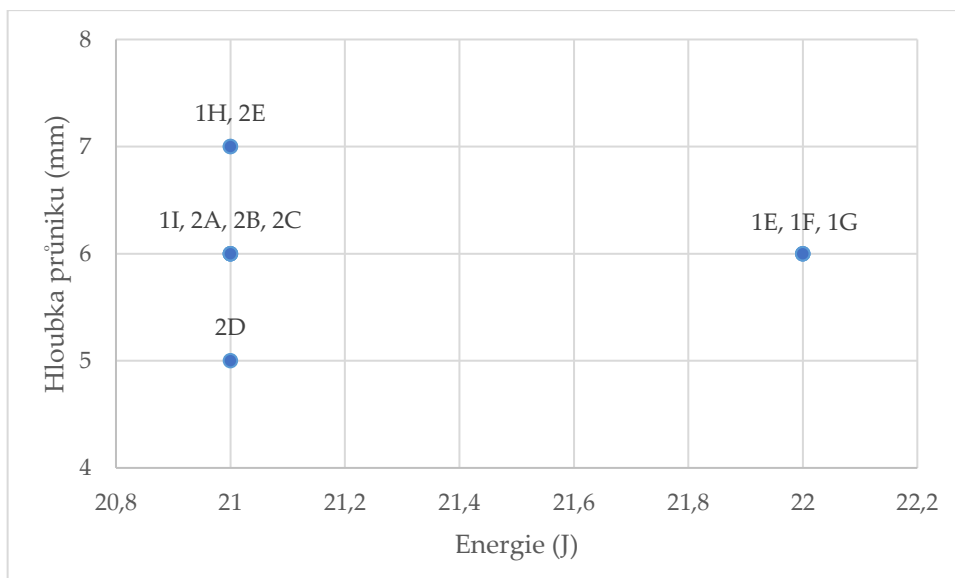
Dále byly provedeny údery z výšky 0,5 m a 0,4 m. Ačkoliv rozdíl mezi jejich dopadovými energiemi byl 7 J (35 J a 28 J), jejich šířka průniku se lišila pouze o 0,2 mm, výsledná hloubka průniku byla dokonce shodná: 12 mm.

Z výšky 0,3 m bylo realizováno 10 úderů. Dopadová energie se pohybovala u všech od 21 do 22 J. Nejmenší hloubka průniku byla 5 mm, největší 7 mm. Nejčastěji se vyskytující hodnota byla 6 mm, a to sedmkrát. Pro zpracování tabulky 9 byly dopadová energie a šířka průniku zprůměrovány. Výsledkem je průměrná energie 21,3 J a průměrná šířka průniku 2,45 mm.

Tabulka 8: Údery z výšky 0,3 m – čtyřvrstvá Rubena

ÚDER	ENERGIE (J)	VÝŠKA (m)	DÉLKA PRŮNIKU (mm)	HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
1E	22	0,3	2,3	6
1F	22	0,3	2,5	6
1G	22	0,3	2,5	6
1H	21	0,3	2,8	7
1I	21	0,3	2,6	6
2A	21	0,3	2,3	6
2B	21	0,3	2,5	6
2C	21	0,3	2,3	6
2D	21	0,3	2	5
2E	21	0,3	2,7	7

Na obrázku 16 jsou graficky znázorněny jednotlivé údery definované energií a hloubkou průniku.



Obrázek 15: Grafické znázornění jednotlivých úderů z výšky 0,3 m – Rubena čtyřvrstvá

Po deseti úderech z výšky 0,3 m byla hledána taková výška, která by měla za následek úder s nulovou hloubkou průniku, tedy takový, který by neprošel celou tloušťkou materiálu. Nejprve se snížila výška o 0,1 m na 0,2 m. Zkušební nůž dopadl s energií 15 J. Naměřena byla hloubka průniku 3 mm.

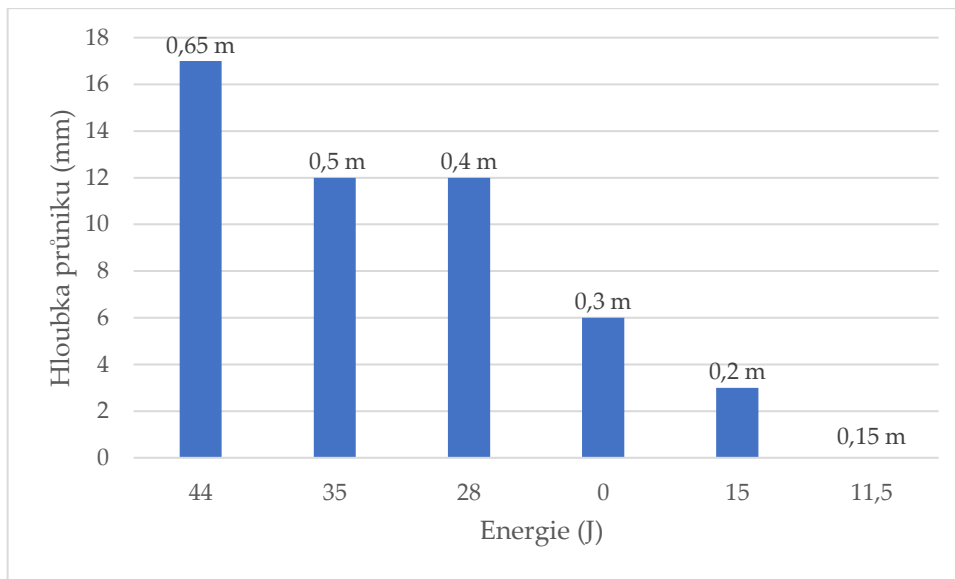
Nulové průniky měly až úder z výšky 0,15 m, dopadová energie dosáhla hodnoty 11,5 J. Pro srovnání: u dvouvrstvé Rubeny bylo nulového průniku dosaženo až po snížení výšky pádu na 0,05 m při stejné hmotnosti závaží.

Tabulka 9: Postupné snižování hodnot – čtyřvrstvá Rubena

VÝŠKA (m)	ENERGIE (J)	DÉLKA PRŮNIKU (mm)	HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
0,65	44*	7,1*	17
0,5	35	5	12
0,4	28	4,8	12
0,3	21,3*	2,45*	6
0,2	15	1,1	3
0,15	11,5	0	0

*průměrné hodnoty z více úderů

Na obrázku 15 jsou zobrazeny postupně se snižující výšky pádu, energie i výsledné hloubky průniku.



Obrázek 16: Grafické zobrazení postupně se snižujících hodnot pádů – čtyřvrstvá Rubena

5.3 Výsledky měření – Dyneema MT220

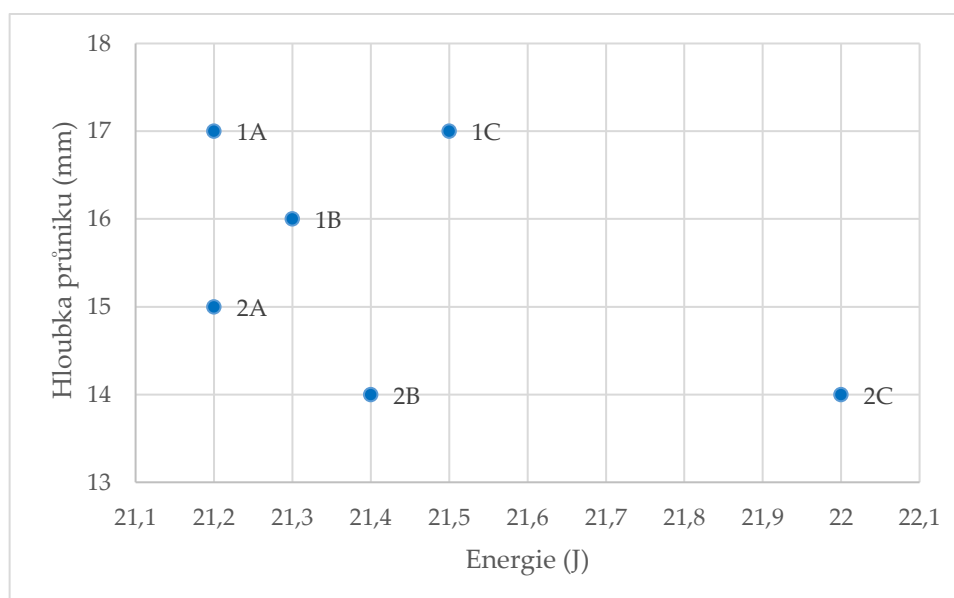
K testování materiálu přímo určeného pro výrobu ochranných vest od společnosti Dyneema bylo použito závaží o hmotnosti 9 284 g. Výška pádu zkušební čepule se postupně snižovala z 0,3 m na 0,2 m. Testovaný materiál s předem zakreslenými body dopadu bodné zbraně tak, aby splňovaly dostatečné rozestupy mezi sebou, je na obrázku v kapitole Testované materiály. Materiál byl během testování natáčen, aby dopad bodné čepule byl uskutečněn v různých směrech.

Pro první měření byla určena výška pádu 0,3 m. Ta vyvolala dopadovou energii od 21,2 J do 22 J, průměrně 21,43 J. Paradoxně nejvyšší energie vyvolala jednu z nejmenších hloubek průniku. Ty se pohybovaly od 14 do 17 mm, průměr činil 15,5 mm. Jednotlivé údery a jejich hodnoty jsou uvedeny níže v tabulce.

Tabulka 10: Údery z výšky 0,3 m – Dyneema MT220

ÚDER	ENERGIE (J)	VÝŠKA (m)	DÉLKA PRŮNIKU (mm)	HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
1A	21,2	0,3	7	17
1B	21,3	0,3	6,5	16
1C	21,5	0,3	7,1	17
2A	21,2	0,3	6,3	15
2B	21,4	0,3	5,7	14
2C	22	0,3	5,9	14

Na obrázku 15 je vidět, že rozdíly mezi jednotlivými energiemi dopadu byly minimální a neplatí zde přímá úměra s hloubkou průniku zkušební čepel (vyšší energie neznámá větší průnik).



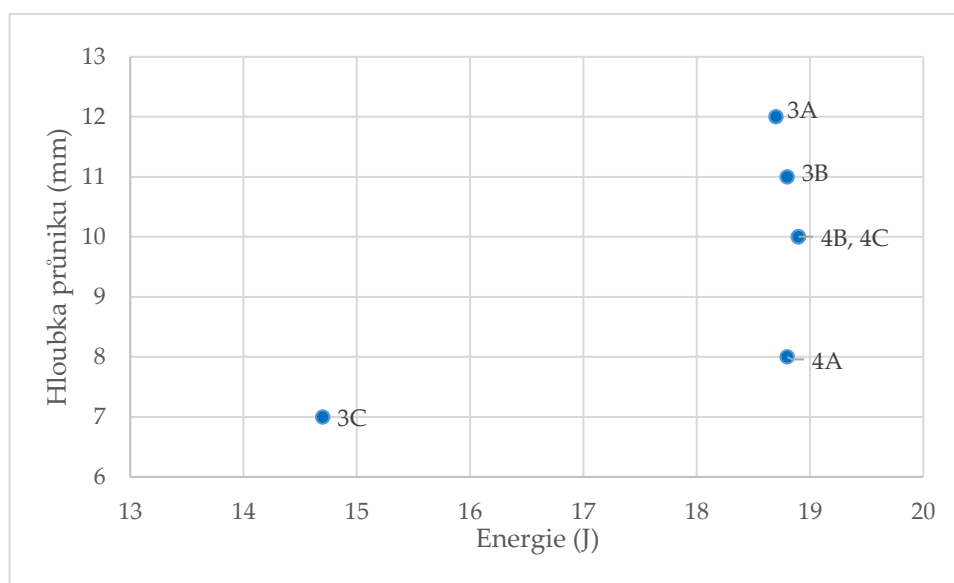
Obrázek 17: Grafické znázornění jednotlivých úderů z výšky 0,3 m – Dyneema MT220

Po otestování materiálu z výšky pádu 0,3 m byla tato výška snížena na 0,25 m. Energie se pohybovala v hodnotách od 14,7 do 18,9 J, průměrná byla 18,13 J. Jak můžeme vidět, energie u úderu 3C je výrazně nižší než všechny ostatní. U tohoto úderu došlo pravděpodobně k chybovosti při měření. Hloubka průniku se však příliš neliší od úderu 4A, rozdíl je zde pouze 1 mm. Celkově se hloubky průniku pohybovaly od 7 do 12 mm, průměrná hloubka byla 9,67 mm.

Tabulka 11: Údery z výšky 0,25 m – Dyneema MT220

ÚDER	ENERGIE (J)	VÝŠKA (m)	DÉLKA PRŮNIKU (mm)	HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
3A	18,7	0,25	5,2	12
3B	18,8	0,25	4,6	11
3C	14,7	0,25	3	7
4A	18,8	0,25	3,4	8
4B	18,9	0,25	4,1	10
4C	18,9	0,25	4	10

Odlišnost úderu 3C můžeme vidět i na grafickém zpracování jednotlivých úderů níže, kde je jasně viditelné, že všechny ostatní energie úderů se nachází mezi 18–19 J.



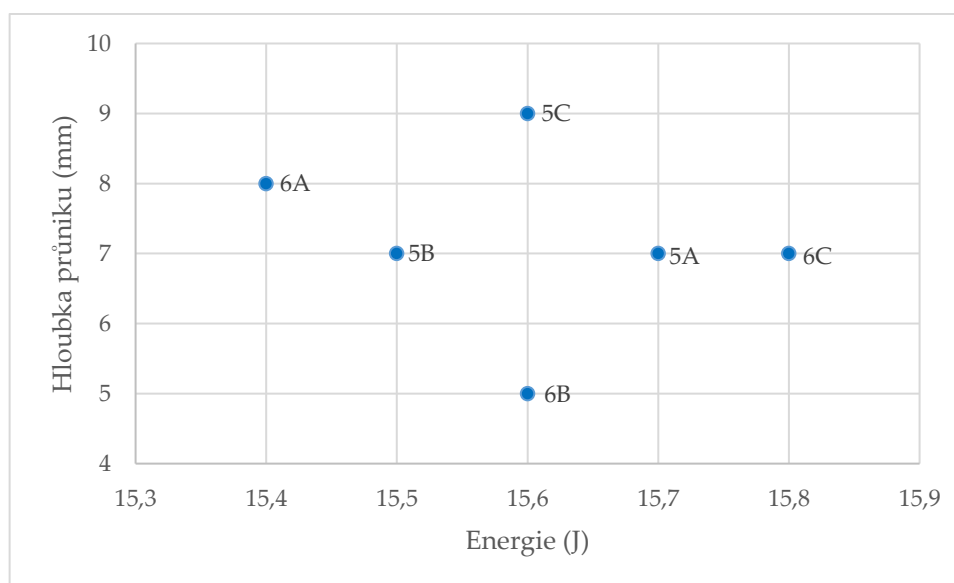
Obrázek 18: Grafické znázornění jednotlivých úderů z výšky 0,25 m – Dyneema MT220

Poslední testování tohoto materiálu bylo provedeno z výšky 0,2 m. Energie se pohybovala od 15,4 J do 15,8 J. Průměrná energie byla 15,6 J. Hloubka průniku byla naměřena od 5 do 7 mm, průměrná hloubka činila 7,17 mm. Tabulka níže opět zobrazuje jednotlivé údery.

Tabulka 12: Údery z výšky 0,2 m – Dyneema MT220

ÚDER	ENERGIE (J)	VÝŠKA (m)	DÉLKA PRŮNIKU (mm)	HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
5A	15,7	0,2	2,95	7
5B	15,5	0,2	2,8	7
5C	15,6	0,2	3,5	9
6A	15,4	0,2	3,4	8
6B	15,6	0,2	1,8	5
6C	15,8	0,2	2,8	7

Na obrázku 17 jsou graficky zpracovány jednotlivé údery definované energií a hloubkou průniku. Jsou zde lépe viditelné minimální rozdíly mezi dopadovými energiemi u jednotlivých úderů.



Obrázek 19: Grafické znázornění jednotlivých úderů z výšky 0,2 m – Dyneema MT220

5.4 Výsledky měření – Honeywell Gold Shield MT100

Měření druhého materiálu pro výrobu ochranných oděvů, speciálně vytvořeného pro obranu proti zraněním bodnými zbraněmi, bylo technicky náročnější. Materiál je vyroben z několika tenkých vrstev. To způsobilo obtížnosti při testování, neboť po sobě jednotlivé vrstvy klouzaly. Dokonce došlo k poškození zkušební bodné zbraně, na obrázku níže je možné vidět

zlomení její špičky. Materiál je také, jako i ty předchozí, vyobrazen v kapitole Testované materiály i s vyznačenými místy pro úder zkušební zbraně.



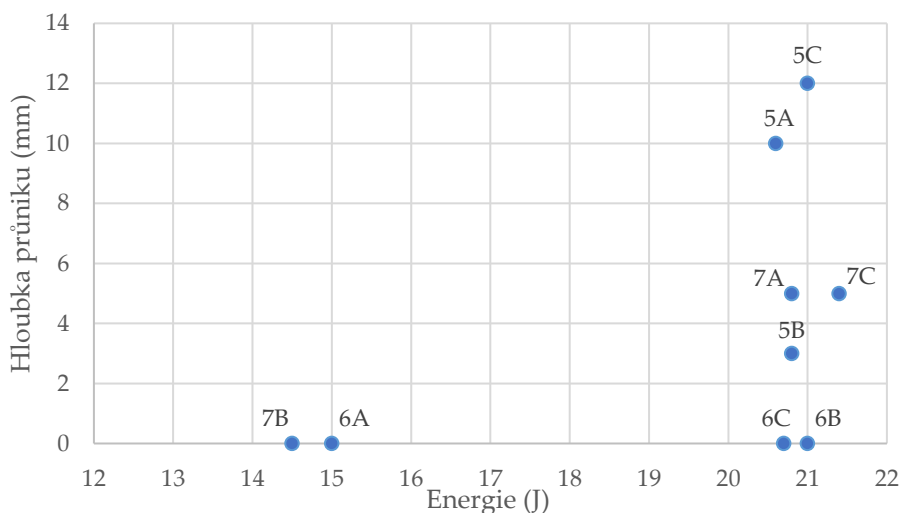
Obrázek 20: Zalomení špičky zkušební zbraně

Pro testování bylo použito stejné závaží jako u materiálu společnosti Dyneema o hmotnosti 9 284 g. Výška pádu zkušební zbraně byla 0,3 m. Provedeno bylo devět úderů, nuž dopadal na materiál v různých směrech. Energie byla u všech v rozmezí od 20,6 do 21,4 J, až na údery 6A a 7B, kde byla výrazně nižší, a to 14,5 a 15J. Tyto údery lze považovat za chybné. Měly za následek nulové hloubky průniku, nebyly to však jediné naměřené nulové průniky. Podrobně jsou jednotlivé údery tabulkově shrnuty níže.

Tabulka 13: Údery z výšky 0,3 m – Honeywell Gold Shield MT100

ÚDER	ENERGIE (J)	VÝŠKA (m)	DÉLKA PRŮNIKU (mm)	HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
5A	20,6	0,3	4	10
5B	20,8	0,3	1,17	3
5C	21	0,3	4,86	12
6A	15	0,3	0	0
6B	21	0,3	0	0
6C	20,7	0,3	0	0
7A	20,8	0,3	2	5
7B	14,5	0,3	0	0
7C	21,4	0,3	1,9	5

Na obrázku 18 je jasně viditelný rozdíl v hodnotách energie u úderů 6A a 7B a ostatních úderů.



Obrázek 21: Jednotlivé úderý – Honeywell Gold Shield MT100

5.5 Komparace Dyneema MT220 a Honeywell Gold Shield 100

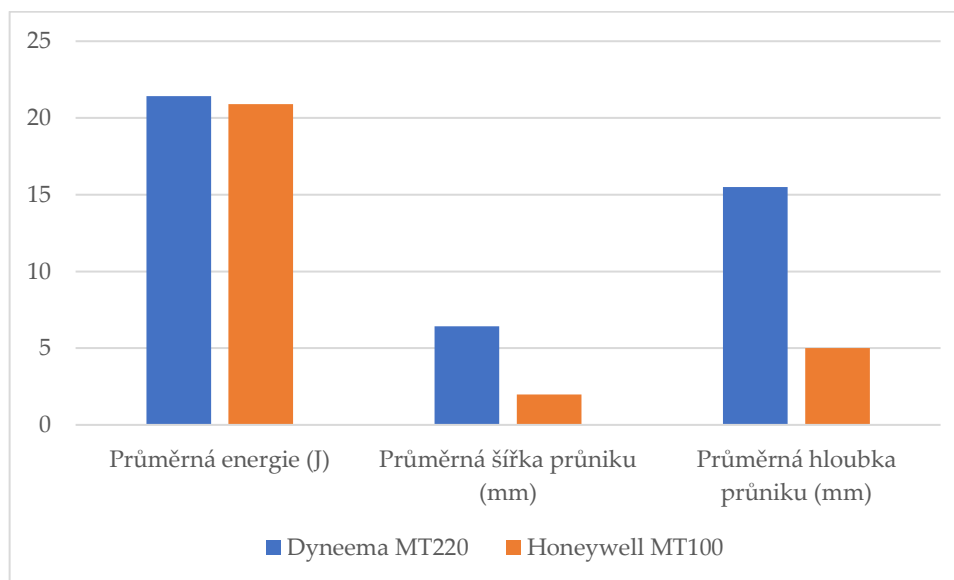
Výše byly uvedeny výsledky testování obou materiálů sloužících přímo k výrobě ochranných oděvů zajišťujících ochranu proti bodným zraněním. Vzhledem k tomu, že každý materiál je vyroben z jiného druhu vlákna (Dyneema MT220 z ultravysokomolekulárního polyethylenu a Honeywell Gold Shield MT100 z vláken aramidových), nabízí se možnost jejich porovnání a vyhodnocení toho, který přináší vyšší úroveň ochrany proti bodným zbraním.

Pro jejich porovnání byly využity naměřené hodnoty z jejich samostatného testování. Zvolily jsme výsledky testování z výšky 0,3 m, kdy hmotnost závaží činila 9 284 g. Nejprve byly naměřené hodnoty jednotlivých materiálů zprůměrovány. U materiálu Honeywell Gold Shield MT100 byla u dvou úderů naměřena výrazně nižší energie než u ostatních. Tyto dva úderý proto nebyly zahrnuty do průměrných hodnot, a tudíž ani do porovnání. V tabulce 18 jsou

uvedeny výsledné průměrné hodnoty. U materiálu z vláken z ultravysokomolekulárního polyethylenu byla dopadová energie vyšší. Výrazně vyšší byl ale i naměřený průnik zkušební čepel. To je možné vidět i na obrázku 22, na kterém jsou hodnoty vyobrazeny graficky.

Tabulka 14: Průměrné hodnoty – Dyneema MT220 a Honeywell MT100

	PRŮMĚRNÁ ENERIE (J)	PRŮMĚRNÁ DÉLKA PRŮNIKU (mm)	PRŮMĚRNÁ HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
Dyneema MT220	21,43	6,42	15,5
Honeywell MT100	20,9	1,99	5



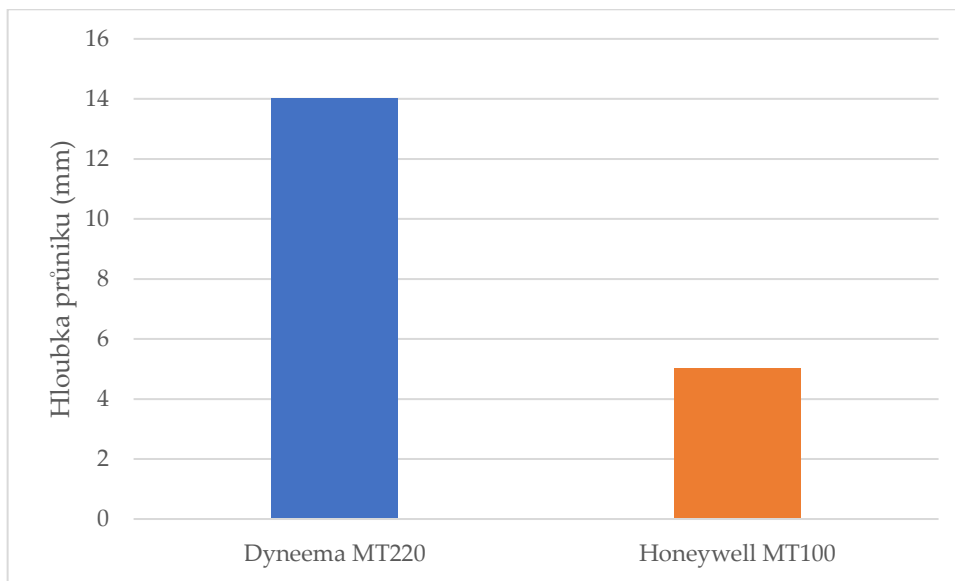
Obrázek 22: Graficky znázorněné průměrné hodnoty

Vzhledem k tomu, že průměrná energie byla u materiálu společnosti Dyneema vyšší, předpokládala se větší hloubka průniku. Z toho důvodu byly vybrány úder, u kterých byla dopadová energie totožná. Jednalo se o úder s energií 21,4 J. Jak je vidět v tabulce 15, i při stejné energii byl u materiálu Dyneema MT220 naměřen větší průnik zkušební bodné zbraně.

Tabulka 15: Srovnání průniku materiálů Dyneema MT220 a Honeywell MT100 při stejné dopadové energii

	ENERGIE (J)	DÉLKA PRŮNIKU (mm)	HLOUBKA PRŮNIKU (mm)
Dyneema MT220	21,4	5,7	14
Honeywell MT100	21,4	1,9	5

Na obrázku 23 jsou graficky znázorněné hloubky průniku – u materiálu Dyneema MT220 14 mm a u materiálu Honeywell Gold Shield MT100 5 mm. Jejich rozdíl činí 9 mm. Výsledkem je, že materiál Honeywell MT100, vytvořený z aramidových vláken, by měl poskytovat vyšší úroveň ochrany při útoku bodnou zbraní.



Obrázek 23: Graficky znázorněná hloubka průniku při stejné energii

6 DISKUZE

6.1 Zhodnocení cílů

Hlavním cílem této diplomové práce sestával ze samotného testování materiálů pomocí zařízení simulujícího útok bodnou zbraní a následného měření průniku zkušební čepele. Aby bylo dosaženo hlavního cíle a výsledky testování byly relevantní a zhodnotitelné, bylo potřeba provést rešerši aktuálně platných norem a standardů. Těch je hned několik a navzájem se od sebe liší v metodách testování, hodnotách, ale i v nárocích na zkušební zbraň či podkladový materiál a dalších parametrech. Pro jejich bližší studium jich bylo vybráno pět, z toho dva české a tři zahraniční. U každého byly uvedeny technické požadavky – nároky na testovaný materiál, typ podkladového materiálu a jeho zkouška, zkušební zbraň. Poté následovaly požadavky na samotné testování – teplota prostředí, vlhkost vzduchu a hodnoty dopadové energie spolu s přijatelnými hloubkami průniku.

Dalším zájmem studia pro splnění hlavního cíle byly vlákna a nejčastěji používané materiály pro výrobu ochranných obleků. Byly vytyčeny jejich přednosti, ale i nevýhody. Co se týká vláken, k nejčastěji používaným se řadí vlákna aramidová a vlákna vyrobená z ultravysokomolekulárního polyethylenu. Důvodem je jejich nízká hmotnost. Materiály z nejčastěji využívaných vláken jsme měly k dispozici i pro testování v rámci praktické části práce.

Vzhledem k tomu, že osobní ochrana je neustále se vyvíjející obor, součástí kapitoly Přehled současného stavu je i podkapitola s názvem Trendy ve vývoji. V této podkapitole byly studovány nejnovější výzkumy a inovace v oblasti materiálů vhodných pro osobní ochranu. Zjištěno bylo, že většina těchto výzkumů pochází od asijských vědeckých týmů. U velké části nových studií je zmiňováno hlavně pohodlí pro nositele, neboť dříve využívané ochranné oděvy,

především vesty, byly značně nepohodlné, jelikož byly těžké, a potenciální nositel tak ztrácel motivaci k jejich aktivnímu používání. Vývojem prochází nejen složení jednotlivých materiálů, ale i jejich struktura a konstrukce, což je umožněno novými technologiemi výroby. Inspiraci pro vytváření inovativních konstrukcí přináší svět zvířat, neboť u mnoha živočichů byla pozorována přirozená ochranná vrstva těla. Pro tyto účely byli zkoumáni luskouni, některé druhy ryb nebo například želvy. Do popředí se i v tomto, stejně jako v celé řadě dalších oborů dostává 3D-tisk, a to zejména pro možnost tvoření složitějších konstrukčních útvarů z již běžně užívaných materiálů. Zkoumáno je také zvyšování tvrdosti a pevnosti materiálů pomocí různých povlaků nebo spojením látek. Přínosem by mohly být smykové zahušťovací kapaliny, které při nárazu ztuhnou, a jsou tak mechanicky odolnější. Zároveň však není omezeno pohodlí nositele výsledného oděvu, neboť tyto kapaliny přechází zpět do počátečního stavu po přerušení působení vnější síly. Zkoušeno bylo spojení těchto kapalin ve vztahu s běžně používanými materiály, jako jsou Kevlar nebo Nylon. Další možností pro zvýšení odolnosti jsou keramické povlaky. Mezi ty testované patří například oxid hlinitý spolu s oxidem titaničitým nebo třeba karbid boru, karbid křemíku či oxid křemičitý. Základem pro povlaky zůstává tradiční aramidové vlákno, ideální pro svou nízkou hmotnost. Předpokládáme, že se v budoucnosti můžeme dočkat dalších zajímavých objevů v tomto oboru. Možnost pokroku mohou přinést především nové metody výroby a spojení těchto konstrukčních inovací nejen s běžně využívanými materiály pro výrobu ochranných oděvů, ale i s moderními povlaky či jinými látkami.

Samotné testování bylo provedeno na čtyřech materiálech. Jak již bylo zmíněno, jednalo se jak o materiály přímo sloužící pro výrobu ochranných oděvů, zejména vest, odolných proti průniku ostrého předmětu, tak o materiály sloužící k jiným účelům, které ovšem také – vzhledem ke svému následnému uplatnění – musí vykazovat určitou míru mechanické odolnosti. Materiály

sloužící pro výrobu ochranných oděvů byly vzájemně následně porovnány na základě shodných hodnot dopadových energií. Tato komparace byla dílčím cílem diplomové práce.

Dvouvrstvá Rubena

Prvním testovaným materiálem byla dvouvrstvá pryžotextilní membrána Rubena, používaná k výrobě vakových hradicích jezů, které slouží k vzednutí hladiny vodního toku. Samotné testování vyžaduje řadu úkonů, a to jak před samotným spuštěním zkušební zbraně, tak po něm. Nejprve byla na zkoušený vzorek materiálu vyznačena místa pro dopad hrotu čepele tak, aby mezi nimi byly dostatečné vzdálenosti, na jeden vzorek se jich vešlo devět. Vzhledem k pevnosti materiálu se ale předpokládá, že i kdyby vzdálenosti mezi jednotlivými údery byly menší, neovlivnilo by to výsledné hloubky průniku. Manipulace s tímto materiálem byla poměrně jednoduchá, pro jeho pevnost nebylo nutné většího úsilí k zajištění jeho nepohyblivosti na podložním stole padacího zařízení. Před zkouškou byl zkontrolován a podle normy otestován podkladový materiál, který měl podobu plastické hmoty vyrobené smícháním mouky a oleje. Poté bylo provedeno několik zkušebních úderů, po nichž započalo samotné měřené testování materiálu.

Nejprve byla hledána hodnota dopadové energie, při které by zkušební bodná zbraň nepronikla celou šířkou materiálu. Této hodnoty bylo dosaženo po spuštění zkušební čepele se závažím (9 282 g) z výšky 0,05 m. Hodnota dopadové energie byla naměřena 4,1 J. Jediná z norem uvedených v teoretické části práce, jež pracuje s takto nízkými hodnotami dopadové energie, je ČSN ISO 13 998. Ta ale určuje přesnou výšku, z níž zkušební zbraň padá, která je větší než 0,05 m. Co se týká energie 22 J, která byla naměřena z výšky 0,65m, a vyvolala hloubku průniku 18 mm, je srovnatelná s energiemi ve standardu VPAM KDIW. Tento standard definuje u první třídy ochrany povolený průnik 10 mm při energii 15 J, a průnik 20 mm při dopadové energii

25 J. Lze tudíž předpokládat, že druhá uvedená povolená hloubka průniku 20 mm by byla splněna, kdyby byla naše naměřená dopadová energie 22 J navýšena o 3 J.

Následně bylo provedeno 10 úderů z výšky 0,15 m s hmotností závaží 8 242 g. Dopadová energie u všech úderů se pohybovala od 9,4 do 10,1 J. Hloubky průniku dosahovaly od 6 do 8 mm. Tyto celkem konstantní hodnoty ukazují na správně provedené testování i následné měření.

Čtyřvrstvá Rubena

Čtyřvrstvá Rubena slouží ke stejným účelům jako dvouvrstvá. Testování probíhalo podobně jako u Rubeny dvouvrstvé. Hmotnost závaží činila 9 282 g. Nejprve byly na zkoušený vzorek zaznačeny body dopadu zkušební čepel, následně byl připraven a otestován podkladový materiál a bylo provedeno několik zkušebních neměřených úderů.

Čtyřvrstvá Rubena byla testována z hrubé i z hladké strany. Naměřené hloubky průniku u úderů dopadajících na hladkou stranu byly větší. U tohoto materiálu tudíž záleželo na straně dopadu zkušební čepel. Ostatní údery proto dopadaly na hrubší stranu vzorku. Nulových průniků bylo u čtyřvrstvé Rubeny dosaženo pády z výšky 0,15 m, které vyvolaly dopadovou energii 11,5 J. Před dosažením nulového průniku bylo provedeno několik dalších úderů z výšek od 0,65 do 0,2 m. Celá série úderů, deset, byla provedena z výšky 0,3 m, dopadové energie dosahovaly hodnot od 21 do 22 J a hloubky průniku byly od 5 do 7 mm. Rozdíly mezi jednotlivými údery byly minimální. I čtyřvrstvá Rubena by, stejně jako dvouvrstvá, splnila první třídu ochrany definovanou ve standardu VPAM KDIW (25 J, povolený průnik 20 mm).

Dyneema MT 220

Prvním z materiálů, které jsou přímo určeny k výrobě ochranných oděvů, byl materiál MT220, vyráběný společností Dyneema. Jeho základem jsou jednotlivé vrstvy vyrobené z vláken z ultravysokomolekulárního polyethylenu.

Na tomto materiálu byly též vyznačeny jednotlivé body dopadu zkušební čepelí, ale jiným způsobem než u Rubeny. Zatímco u Rubeny tvořily jednotlivé body pomyslný čtverec se středem, na balistické materiály bylo vyznačeno sedm trojúhelníků, jejichž vrcholy měly mezi sebou dostatečné rozestupy. Tyto vrcholy byly cílem pro zásah špičkou čepelí. I u balistických materiálů došlo k přípravě před měřeným testováním (zmíněné vyznačení bodů, příprava a zkouška podkladového materiálu, zkušební údery). Použito bylo závaží o hmotnosti 9 284 g.

Měřené testování bylo realizováno z výšek 0,3 m, 0,25 m a 0,2 m, z každé série šesti úderů. Výška 0,3 měla za následek dopad čepelí s průměrnou energií 21,43 J (od 21,2 J do 22 J) a průměrnou hloubku průniku 15,5 mm (od 14 mm do 17 mm). Opět byly mezi jednotlivými údery minimální rozdíly. Poté byla výška snížena na 0,25 m, ta vyvolala průměrnou dopadovou energii 18,3 J (od 14,7 J do 18,9 J) a průměrnou hloubku průniku 9,67 mm (od 7 do 12 mm). U jednoho ze šesti úderů byly naměřeny nižší hodnoty než u ostatních. Jeho dopadová energie byla o cca 4 J nižší a vyvolala také nejmenší hloubku průniku. Tento úder lze označit za chybný, přestože hloubka průniku se příliš nelišila od následného úderu. Z výšky 0,2 m byly údery celkem stálé, jejich průměrná dopadová energie byla 15,6 J (od 15,4 J do 15,8 J), průměrná hloubka průniku 7,17 mm (od 5 mm do 7 mm).

I tento materiál by splnil limity pro první třídu ochrany standardu VPAM KDIW (dopadová energie 15 J – povolená hloubka průniku 10 mm a dopadová energie 25 J – povolená hloubka průniku 20 mm). Nejnáročnější pro splnění požadavků je Česká technická norma 39 5360, která požaduje dopadové energie 35 ± 1 J. Požadavky této normy by materiál nesplnil.

K materiálům Dyneema MT220 a Honeywell MT100 byly pro porovnání k dispozici výsledky testování z laboratoře akreditované k provádění certifikovaného testování. Toto testování proběhlo dle standardu VPAM KDIW. Materiál Dyneema splnil podmínky pro první ochranou třídu. Provedeno bylo 10 testů s dopadovou energií 15 J, průměrná hloubka průpichu byla 7 mm. Tyto hodnoty odpovídají námi provedenému měření (průměrná dopadová energie 15,6 J a průměrná hloubka průniku 7,17 mm. Dále bylo v akreditované laboratoři provedeno testování s energií dopadu 20 J, průměrná hloubka průniku 9 mm. Lze tedy říct, že výsledky našeho testování a testování certifikovaného mají velmi podobné naměřené hodnoty a stejný výsledek (Dyneema MT220 splnila požadavky pro první třídu ochrany dle standardu VPAM KDIW).

Honeywell Gold Shield MT100

Druhým testovaným materiálem odolným přímo proti působení bodné zbraně byl Gold Shield MT100 firmy Honeywell. Též je složen z několika tenkých vrstev, ale na rozdíl od MT220 jej tvoří vlákna z aramidů.

Testování tohoto materiálu bylo nejobtížnější a technicky nejnáročnější. Jednotlivé vrstvy po sobě klouzaly, materiál je docela poddajný. Při jednom z úderů byla zalomena špička zkušební čepel.

Celkově bylo provedeno devět úderů z výšky 0,3 m se závažím o hmotnosti 9 284 g. Zde se projevila náročnost měření, dva údery vykazovaly daleko nižší naměřené hodnoty dopadové energie. Konkrétně se jedná o údery s energií

dopadu 15 J a 14,5 J, zatímco všechny ostatní hodnoty dopadové energie se pohybovaly v rozsahu od 20,6 J do 21,4 J. Tyto dva údery vyvolaly nulovou hloubku průniku. Nejednalo se ale o jediné nulové průniky. Další dva vyvolaly údery s dopadovou energií 20,7 J a 21 J. U ostatních se pohybovala hloubka průniku od 5 do 12 mm. I tento materiál by, stejně jako ty ostatní, splnil první třídu ochrany standardu VPAM KIDW. Nicméně stejně jako u Dyneemy MT220, pro splnění požadavků České technické normy 39 5360, která jsou nejpřísnější, by musela být výrazně zvýšena energie dopadu a materiál by pravděpodobně neprošel.

Co se týče výsledků naměřených v akreditované laboratoři nelze je s našimi úplně porovnat. Při námi prováděném testování byly užity nižší energie. Certifikované testování bylo prováděno dle standardu VPAM KDIW pro druhou třídu ochrany (25 J až 40 J). Jediné srovnatelné výsledky s naším měřením jsou při hodnotách dopadové energie 25 J, kdy byla naměřena průměrná hloubka průniku 4 mm. Nicméně bylo potvrzeno, že materiál Honeywell MT100 splní požadavky standardu VPAM KDIW pro první ochrannou třídu, což se shoduje s námi určeným výsledkem. Navíc, jak ukazují výsledky certifikovaného testování, materiál splní i požadavky pro druhou třídu ochrany.

Komparace – Dyneema MT220 a Honeywell MT10

Fakt, že materiály přímo sloužící k výrobě ochranných oděvů byly vyrobeny z různých vláken, přinesl možnost jejich porovnání a vyhodnocení odolnějšího z nich. Co se týká náročnosti měření, lépe se pracovalo s materiálem MT220 společnosti Dyneema. Materiál byl pevnější, a proto bylo potřeba menší úsilí k zajištění jeho nepohyblivosti na podložním stole i při následném měření průniku. Při testování materiálu MT100 společnosti Honeywell došlo dokonce k poškození zkušební čepel, jak již bylo zmíněno.

Pro porovnání jejich odolnosti byly využity hodnoty z jejich samostatného testování, kdy výška pádu byla 0,3 m a hmotnost závaží 9 284 g. Výsledné hodnoty byly zprůměrovány (u materiálu MT100 nebyly do průměru zahrnuty pravděpodobně chybné údery s nižšími energiemi dopadu). Průměrná hloubka průniku u MT220 činila 15,5 mm při průměrné dopadové energii 21,43 J. Průměrná hloubka průniku u MT100 byla 5 mm při dopadové energii 20,9. Navzdory výraznému rozdílu hloubek průniku, téměř 10 mm, nebyly hodnoty dopadové energie shodné. Aby se s jistotou dal určit odolnější materiál, byly vybrány údery se shodnými hodnotami dopadové energie. Jednalo se o údery s dopadovou energií 21,4 J, ta způsobila u materiálu Dyneema MT220 hloubku průniku 14 mm, zatímco u materiálu Honeywell MT100 hloubku průniku 5 mm. Tím se potvrdilo, že materiál Honeywell MT100 vykazuje větší odolnost proti působení bodné zbraně. Tento fakt potvrzují i výsledky testování akreditované laboratoře, ze kterých vyplývá, že Dyneema MT220 splnila dle standardu VPAM KDIW požadavky pro první třídu ochrany, zatímco Honeywell MT100 splnil i požadavky pro třídu druhou.

6.2 Zhodnocení hypotéz

Hypotéza H1

Hypotéza H1 byla stanovena následovně: *„Předpokládá se, že u dvouvrstvé Rubeny bude naměřená hloubka průniku dvakrát větší než u Rubeny čtyřvrstvé při stejné dopadové energii.“* Tato hypotéza vycházela z faktu, že testovaný materiál, pryžotextilní Rubena, byl k dispozici ve dvou variantách – dvouvrstvé a čtyřvrstvé. Pro ověření této hypotézy byly vybrány údery s dopadovou energií 22 J. U Rubeny čtyřvrstvé vyvolala dopadová energie 22 J hloubku průniku 6 mm. U Rubeny dvouvrstvé vyvolala stejná energie hloubku průniku 18 mm. Hloubka průniku je u dvouvrstvé Rubeny tudíž dokonce třikrát větší

než u dvouvrstvé. Tím byla hypotéza vyvrácena, neboť průnik u dvouvrstvé Rubeny je ve vztahu k čtyřvrstvé daleko větší, než bylo předpokládáno.

Hypotéza H2

Hypotéza H2 měla následující znění „*Předpokládá se, že u čtyřvrstvé Rubeny budou naměřeny menší hloubky průniku než u materiálů sloužících k výrobě ochranných oděvů při ekvivalentní dopadové energii, byla stanovena na základě vizuální podoby materiálů.*“ Čtyřvrstvá Rubena byla nejtěžší a na první pohled vypadala jako nejodolnější materiál. Pro srovnání materiálů byly vybrány údery s dopadovou energií 21,4J (u čtyřvrstvé Rubeny 21,3 J – výsledek průměru deseti pádů s dopadovými energiemi od 21 do 22 J). Materiál Honeywell MT100 měl při této energii hloubku průniku 5 mm, Dyneema MT220 14 mm a čtyřvrstvá Rubena 6 mm (hodnota převedená z průměrné hodnoty délky průniku). Z toho vyplývá, že průnik u čtyřvrstvé Rubeny není nejmenší, hloubka průniku u MT100 je o 1 mm menší. Tím byla vyvrácena i druhá hypotéza. Na první pohled nejodolnější čtyřvrstvá Rubena měla větší průnik při stejné energii než daleko lehčí materiál MT100.

Hypotéza H3

Hypotéza H3 byla stanovena následovně: „*Předpokládá se, že materiály sloužící k ochraně proti průniku bodné zbraně (Dyneema MT220 a Honeywell Gold Shield MT100) splní povolené hloubky průniku při dané energie dle některého ze standardů a norem uvedených v přehledu současného stavu.*“ Tato hypotéza byla potvrzena. Materiály by s největší pravděpodobností nesplnily podmínky dané Českou technickou normou 39 5360, ta je však považována za nejpřísnější. Všechny materiály, jak bylo uvedeno výše, splnily alespoň podmínky uvedené ve standardu VPAM KIDW pro první třídu ochrany.

Hypotéza H4

Hypotéza H4 ve znění „Předpokládá se, že rozdíly mezi hloubkami průniku u materiálů Dyneema MT220 a Honeywell Gold Shield MT100 nebudou při užití stejné dopadové energie větší než 10 mm“ pramení z jednoho cíle práce, kterým byla komparace materiálů sloužících k následné výrobě ochranných oděvů. Při porovnání hloubek průniku při ekvivalentní dopadové energii (21,4 J) bylo zjištěno, že jejich rozdíl činí 9 mm. Tím byla tato hypotéza potvrzena.

7 ZÁVĚR

Předmětem této diplomové práce bylo testování mechanické odolnosti, konkrétně odolnosti proti propíchnutí různých materiálů. Vzhledem k tomu, že osobní ochranné prostředky slouží k ochraně lidského zdraví a života, je testování materiálů určených pro jejich výrobu velmi důležité. Existují ale i materiály, které musí vykazovat odolnost proti ostrým předmětům z jiných důvodů, než je následná výroba oděvů.

Ke splnění hlavního i vedlejších cílů bylo nutné provést rešerši českých i mezinárodních norem a standardů, které se zabývají testováním odolnosti proti působení bodných zbraní. Podle požadovaných hodnot uvedených v některých z těchto norem byly následně otestované materiály hodnoceny. Studovány byly i jednotlivé druhy vláken a materiálů určených pro výrobu ochranných prostředků či nové trendy ve vývoji těchto materiálů.

Hlavním cílem práce bylo samotné testování a měření vzorků různých materiálů. Tento hlavní cíl byl splněn, otestovány byly čtyři druhy materiálů. Výsledné hodnoty byly pomocí deskriptivní statistiky popsány a zpracovány do grafů a tabulek. Dílčím cílem bylo porovnání dvou materiálů přímo určených pro výrobu ochranných vest. I tento cíl byl splněn, byl určen odolnější a flexibilnější materiál.

Co se týká hypotéz, stanoveny byly čtyři, z čehož dvě byly potvrzeny a dvě vyvráceny. Bylo zjištěno, že na první pohled velice odolné materiály mohou být odolné méně než ty lehké a flexibilní. Výsledky práce mohou sloužit jako podklad pro srovnání odolnosti jednotlivých materiálů.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ČSN – Česká technická norma

ISO – International Organization for Standardization

MT – Multi-threat

NIJ – National Institute of Justice

PBO – poly(p-fenylen-benzobisoxazol)

TON – třída odolnosti proti bodným zbraním

UHMWPE – ultravysokomolekulární polyethylen

VPAM – Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. PAUL, R. *High Performance Technical Textiles*. Hoboken: John Wiley, 2019, 504 s. ISBN 9781119325055.
2. EL MESSIRY, M. *Protective armor engineering design*. Milton: Apple Academic Press, 2019, 328 s. ISBN 9780429615863.
3. AHMAD, S. et al. *Advanced Textile Testing Techniques*. Boca Raton: CRC Press, 2017, 326 s. ISBN 9781351651684.
4. ČSN 39 5360. *Zkoušky odolnosti proti střelám střepinám a bodným zbraním: Technické požadavky a zkoušky*. Praha: Český normalizační institut, 1995. Třídící znak 395360.
5. ČSN EN ISO 13998. *Ochranné oděvy – Zástěry, kalhoty a vesty chránící proti říznutí a bodnutí ručními noži*. Praha: Český normalizační institut, 2003. Třídící znak 832771.
6. U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE: NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. *Stab Resistance of Personal Body Armor, NIJ Standard 0115.00*. Washington, DC: Office of Science and Technology, 2000.
7. PANNEKE, N. a A. EHRMANN. Stab-Resistant Polymers—Recent Developments in Materials and Structures. *Polymers* [online]. 2023, 15(4), 983 [cit. 2023-04-01]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym15040983>
8. *TEST GUIDELINE "Stab and impact protection"*. 3rd ed. Münster: Association of test centers for anti-attack agents, 2008.
9. PAYNE, T., O'ROURKE S. a C. MALBON. *Body Armour Standard* (2017). London: The Home Office, 2017.
10. BUTOLA, B. S. a S. UL-ISLAM ed. *Advances in Functional and Protective Textiles*. Sawston: Woodhead Publishing, 2020, 678 s. ISBN 9780128226766.

11. LI, D. Fundamental of fibers. In: LI, D. *Cut Protective Textiles* [online]. 2020, s. 59–110 [cit. 2023-04-04]. ISBN 9780128200391. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820039-1.00003-1>
12. CHEN, X. Introduction. In: CHEN, X. *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection* [online]. 2016, s. 1-10 [cit. 2023-04-04]. ISBN 9781782424611. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820039-1.00003-1>
13. TAM, T. a A. BHATNAGAR. High-performance ballistic fibers and tapes. In: BHATNAGAR, A. *Lightweight Ballistic Composites* [online]. 2016, s. 1–39 [cit. 2023-04-04]. ISBN 9780081004067. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100406-7.00001-5>
14. EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
15. FINN, N. Types of smart materials for protection. In: CHAPMAN, R. *Smart Textiles for Protection* [online]. 2013, s. 34–86 [cit. 2023-04-04]. ISBN 9780857090560. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857097620.1.34>
16. LIU, Q. et al. Excellent flexibility and stab-resistance on pangolin-inspired scale-like structure composite for versatile protection. *Composites Communications* [online]. 2022, 35 [cit. 2023-03-29]. ISSN 2452-2139. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101266>
17. ZHU, D. et al. Puncture resistance of the scaled skin from striped bass: Collective mechanisms and inspiration for new flexible armor designs. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [online]. 2013, 24, 30–40 [cit. 2023-03-29]. ISSN 1751-6161. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.04.011>

18. CICEK, U. I., SOUTHEE D. J. a A. A. JOHNSON. Assessing the stab resistive performance of material extruded body armour specimens. *International Journal of Protective Structures* [online]. 2022 [cit. 2023-03-29]. DOI: 10.1177/2041419622111214. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/20414196221112148>
19. JIANG, J. H., YUAN M. Q. a T. C. JI. Investigations on laser sintered textiles for stab-resistant application. In: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference. Austin, 2016, s. 2155–2164.
20. HE, J. et al. Egg-shell structure design for stab resistant body armor. *Materials Today Communications* [online]. 2018, 16, 26–36 [cit. 2023-04-10]. ISSN 23524928. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.04.006>
21. MANAEE, P., VALEFI Z. a M. GOODARZ. The effect of bond coat type on the stab resistance of Al₂O₃–13 wt% TiO₂ plasma sprayed ceramic coating on aramid fabrics. *Surfaces and Interfaces* [online]. 2020, 18 [cit. 2023-04-16]. ISSN 24680230. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100432>
22. DECKER, M. J. et al. Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics. *Composites Science and Technology* [online]. 2007, 67(3-4), 565–578 [cit. 2023-03-30]. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.007>
23. LI, W. et al. Dynamic stab resistance of ultra-high molecular weight polyethylene fabric impregnated with shear thickening fluid. *Materials & Design* [online]. 2016, 102, 162–167 [cit. 2023-04-08]. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.006>
24. LI, T. T. et al. Effects of STF and Fiber Characteristics on Quasi-Static Stab Resistant Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-Impregnated UHMWPE/Kevlar Composite Fabrics. *Fibers and Polymers* [online]. 2019, 20(2), 328–336 [cit. 2023-04-16]. ISSN 1229-9197. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12221-019-8446-6>

25. Zákon č. 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů.
26. ŠÍŇ, R. et al. *Medicína katastrof*. Praha: Galén, 2017. 351 s. ISBN 978-80-7492-295-4.
27. VILÁŠEK, J., FIALA M. a D. VONDRÁŠEK. *Integrovaný záchranný systém ČR na počátku 21. století*. Praha: Karolinum, 2014. 189 s. ISBN 978-80-246-2477-8.
28. Zákon č. 273/2008 Sb., o Policii České republiky.
29. BOCÁN, J. Balistické vesty. In: *Policie.cz* [online]. 9. 1. 2019 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.policie.cz/clanek/balisticke-vesty.aspx>
30. RUBENA. Hradící vakové jezy. *Rubena.eu* [online]. © 2022 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.rubena.eu/cz/produkty/flexibilni-nafukovaci-pryzove-vyrobky/hradici-vakove-jezy/>
31. Mt220 Product Specification Sheet. Dyneema, 2016.
32. HONEYWELL INTERNATIONAL. *Honeywell Gold Shield Mt Multi-Threat Resistant Product* [online]. Colonial Heights: Honeywell International, 2021 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://industrial.honeywell.com/content/dam/industrial/en/documents/document-lists/marketing/honeywell-gold-shield-mt-multi-threat-resistant-product-brochure-eng%20.pdf>

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Ukázka pyramidové struktury po testování (19).....	30
Obrázek 2: Ukázka panelu se skořápkovou strukturou před testováním a po něm (20).....	30
Obrázek 3: Plastická hmota umístěná v kontejneru.....	35
Obrázek 4: Testování podkladové hmoty pomocí ocelové koule.....	36
Obrázek 5: Nůž užívaný při testování.....	37
Obrázek 6: Závaží a čepel na lištách, akcelerometr.....	37
Obrázek 7: Laserem označený bod dopadu hrotu zkušební zbraně.....	38
Obrázek 8: Rubena čtyřvrstvá.....	40
Obrázek 9: Rubena dvouvrstvá.....	40
Obrázek 10: Dyneema MT 100.....	41
Obrázek 11: Honeywell Gold Shield MT100.....	42
Obrázek 12: Údery definované energií a výškou pádu dvouvrstvá Rubena.....	45
Obrázek 13: Údery definované energií a hloubkou průniku – dvouvrstvá Rubena.....	46
Obrázek 14: Grafické znázornění jednotlivých úderů z výšky 0,15 m – Rubena dvouvrstvá.....	47
Obrázek 15: Grafické znázornění jednotlivých úderů z výšky 0,3 m – Rubena čtyřvrstvá.....	49
Obrázek 16: Grafické zobrazení postupně se snižujících hodnot pádů – čtyřvrstvá Rubena.....	50
Obrázek 17: Grafické znázornění jednotlivých úderů z výšky 0,3 m – Dyneema MT220.....	51
Obrázek 18: Grafické znázornění jednotlivých úderů z výšky 0,25 m – Dyneema MT220.....	52
Obrázek 19: Grafické znázornění jednotlivých úderů z výšky 0,2 m – Dyneema MT220.....	53

Obrázek 20: Zalomení špičky zkušební zbraně.....	54
Obrázek 21: Jednotlivé údery – Honeywell Gold Shield MT100	55
Obrázek 22: Graficky znázorněné průměrné hodnoty.....	56
Obrázek 23: Graficky znázorněná hloubka průniku při stejné energii.....	57

11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1: Hodnoty energie odpovídající úrovním ochrany (6), vlastní zpracování.....	18
Tabulka 2: Údery a jejich specifika (první ochranná třída) (6), vlastní zpracování	19
Tabulka 3: Údery a jejich specifika (druhá ochranná třída) (6), vlastní zpracování.....	19
Tabulka 4: Převodní tabulka (6)	39
Tabulka 5: Postupné snižování hodnot – dvouvrstvá Rubena	45
Tabulka 6: Údery z výšky 0,15 m – dvouvrstvá Rubena	46
Tabulka 7: Údery z výšky 0,65 m – čtyřvrstvá Rubena	48
Tabulka 8: Údery z výšky 0,3 m – čtyřvrstvá Rubena	48
Tabulka 9: Postupné snižování hodnot – čtyřvrstvá Rubena	49
Tabulka 10: Údery z výšky 0,3 m – Dyneema MT220.....	51
Tabulka 11: Údery z výšky 0,25 m – Dyneema MT220.....	52
Tabulka 12: Údery z výšky 0,2 m – Dyneema MT220.....	53
Tabulka 13: Údery z výšky 0,3 m – Honeywell Gold Shield MT100	54
Tabulka 14: Průměrné hodnoty – Dyneema MT220 a Honeywell MT100.....	56
Tabulka 15: Srovnání průniku materiálů Dyneema MT220 a Honeywell MT100 při stejné dopadové energii	57