

Zjištění mechanických vlastností balistické vložky

Jakub Petřek

Bakalářská práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav bezpečnostního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub Petřek**
Osobní číslo: **A20050**
Studijní program: **B1032A020001 Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Zjištění mechanických vlastností balistické vložky**
Téma práce anglicky: **Determination of Mechanical Properties of a Ballistic Insert**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši v oblasti balistických materiálů se zaměřením na balistické vesty a pláty.
2. Vyberte vhodné balistické vesty a pláty.
3. Navrhněte vhodný postup mechanického testování vybraných materiálů a připravte zkušební vzorky.
4. Otestujte zkušební vzorky.
5. Statisticky vyhodnoťte naměřená data.
6. Diskutujte získané výsledky.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ZEMAN, L. 2009. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN.
2. KUBANOVÁ, J. 2004 Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi. Bratislava: STATIS. ISBN 80-85659-37-9.
3. CHEN, X. 2018. Advanced fibrous composite materials for ballistic protection. Boston: Woodhead Publishing, Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier. Woodhead Publishing series in composites science and engineering, no. 66. ISBN 978-1782424611.
4. PLÍHAL, B. 2012. Balistická ochrana. Brno: Univerzita obrany. ISBN 978-80-7231-862-9.
5. MESSIRY, M. 2020. Protective armor engineering design. Palm Bay, Florida: Apple Academic Press. ISBN 9781771887878.
6. ABTEW, A., BOUSSU, F., BRUNIAUX, P., LOGHIN, C. a CRISTIAN. I. 2019. Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. Composite Structures. 223. ISSN 02638223. Doi: 10.1016/j.compstruct.2019.110966.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michaela Karhánková**
Ústav bezpečnostního inženýrství

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Aleš Mizera, Ph.D.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **13. prosince 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **5. června 2023**



doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Jan Valouch, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 13. prosince 2022

Jméno, příjmení: Jakub Petřek

Název bakalářské práce: Zjištění mechanických vlastností balistické vložky

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 5. 6. 2023

Jakub Petřek v. r.

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá testováním mechanických vlastností balistické vložky. Cílem práce je testování balistické vložky a připraveného kompozitního materiálu v laboratorních podmínkách a na střelnici. Teoretická část práce popisuje základní pojmy v oblasti balistiky a balistické ochrany se zaměřením na vesty. Praktická část je zaměřena na analýzu vybrané balistické vesty a na mechanické testování měkkých balistických vložek. Na základě výsledků práce byl vytvořen kompozitní materiál, který může odolat i střelám ráže 9 mm.

Klíčová slova: Balistika, Balistická ochrana, Materiály balistické ochrany, Mechanické testování

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on testing the mechanical properties of a ballistic pad. The objective of the thesis is to test the ballistic pad and the prepared composite material in laboratory conditions and on the firing range. The theoretical part of the thesis describes the basic concepts in the field of ballistics and ballistic protection with a focus on vests. The practical part is focused on the analysis of a selected ballistic vest and on mechanical testing of soft ballistic inserts. Based on the results of the work, a composite material has been developed that can resist even 9 mm calibre bullets.

Keywords: Ballistics, Ballistic protection, Ballistic materials, Mechanical testing

Tímto chci poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Michaele Karhánkové za cenné rady a vedení. Taktéž chci poděkovat panu Ing. Aleši Mizerovi, Ph.D., za cenné připomínky a rady při laboratorním testování a vypracovávání praktické části bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 BALISTIKA	11
1.1 DRUHY BALISTIKY.....	11
2 BALISTICKÉ VESTY	13
2.1 HISTORIE.....	13
2.2 ROZDĚLENÍ BALISTICKÝCH VEST	15
2.2.1 Měkká balistika	16
2.2.2 Tvrdá balistika.....	17
2.2.3 Kombinovaná balistika.....	19
2.2.4 Anti šoková vložka.....	20
2.3 NORMY TÝKAJÍCÍ SE BALISTICKÉ OCHRANY	21
2.3.1 ČSN 39 5360 – Zkoušky odolnosti ochranných prostředků – Zkoušky střepinám a bodným zbraním – Technické požadavky a zkoušky	21
2.3.2 NIJ Standard–0101.06.....	22
2.3.3 STANAG 2920 – Balistická zkušební metoda pro osobní pancéřové materiály a bojové oděvy	24
3 MATERIÁLY PRO VÝROBU BALISTICKÝCH VEST	26
3.1 KLASICKÁ VLÁKNA	27
3.2 SYNTETICKÁ VLÁKNA	27
3.2.1 Para-aramidová vlákna.....	27
3.2.2 Polyetylenová vlákna s ultra vysokou molekulární hmotností	28
3.2.3 PBO vlákna	29
3.2.4 Skelné vlákna	30
3.2.5 Karbonová vlákna	32
3.2.6 Keramická vlákna.....	33
3.3 KOMPOZITY.....	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
4 PŘÍPRAVA NA TESTOVÁNÍ	37
4.1 VÝBĚR VHODNÉ BALISTICKÉ VESTY A PLÁTU	37
4.1.1 Analýza balistické vesty.....	37
4.2 NAVRŽENÍ TESTOVACÍCH VZORKŮ	42
4.3 PŘÍPRAVA NAVRŽENÝCH VZORKŮ	44
5 PRŮBĚH TESTOVÁNÍ	47
6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE	60
ZÁVĚR	62
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	64

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	68
SEZNAM OBRÁZKŮ	69
SEZNAM TABULEK.....	71

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá oblastí týkající se balistické ochrany. Cílem bakalářské práce je podrobit připravené vzorky z dodané balistické vesty mechanickému zatěžování, kdy následným výstupem testování bude vyhodnocení a vytvoření návrhu vlastního vzorku se závěrečnou diskuzí získaných poznatků.

Toto téma práce jsem si vybral nejen z důvodu, že se jedná o velmi zajímavou tematiku, avšak také vzhledem k aktuálnosti současného dění na Ukrajině. Dalším zdůvodněním výběru bych rád uvedl, že jsem absolventem Vyšší policejní školy a Střední policejní školy v Holešově, kde jsem měl možnost se s balistickou ochranou setkat.

Denno denně jsou složky policie, soukromé bezpečnostní služby či armáda a jiné, ohroženy možnému vzniku střelného poranění či poranění z důvodu exploze. Oblast balistické ochrany a balistických materiálů je také žádaným tématem v rámci vědy a výzkumu. Balistická ochrana byla jako taková řešena již v dávné minulosti.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je dle dostupné literatury vypracovaná rešerše a základní terminologie balistiky. Dále v teoretické části je rozebrána historie balistické ochrany, kategorizace balistických vest a normy týkající se balistických ochrany, kdy jedna z norem, která je celosvětově uznávaná, má původ v České republice. Závěr teoretické části se věnuje materiálům využitých pro výrobu balistických vest.

Začátek praktické části práce se věnuje návrhu a přípravě vzorků k laboratornímu testování. Tyto vzorky budou podrobeny mechanickému zatížení, kdy budou šetřeny jejich vlastnosti. Dále se práce věnuje průběhu testování jednotlivých vzorků za pomoci zařízení pro pádové zkoušky. Následně byly vybrány vzorky, které byly otestovány na střelnici. Závěr praktické části se věnuje vyhodnocení výsledků a závěrečné diskuzi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 BALISTIKA

Balistika je vědní obor zkoumající nejen zákonitosti pohybu střely, ale rovněž způsobený účinek v daném prostředí. Balistika se zaměřuje na výstřel střely, let a konečný dopad střely včetně způsobeného účinku na cíl. Balistiku lze považovat za komplexní vědní obor, jelikož pro zkoumání jsou využity znalosti nejen fyziky, ale též aerodynamiky, termomechaniky, hydromechaniky a mnohé jiné vědní disciplíny. Je využívána v různých oblastech, jako je kriminalistika, vojenství a jiné. [1]

1.1 Druhy balistiky

Balistika je dělena do několika druhů, zabývá se střelou jako takovou, od zažehnutí až po dopadení na/do cíle. Každá fáze má jiné podmínky, nejen skrze střelu, ale taktéž třeba prostředí, ve kterém se střela v daný moment nachází. [1]

Zkoumání průběhu střely dělíme na čtyři základní fáze, které se nazývají:

1. První fáze – vnitřní balistika
2. Druhá fáze – přechodová balistika
3. Třetí fáze – vnější balistika
4. Čtvrtá fáze – terminální balistika [1]

Vnitřní balistika

Vnitřní balistika zkoumá jevy probíhající uvnitř palné zbraně. Dokud střela neopustí hlaveň palné zbraně, jedná se o vnitřní balistiku. V této fázi jsou zkoumány informace a fakta jako složení použitého náboje, tlak v nábojové komoře způsobený výstřelem, rychlost střely a jiné. V dnešní době jsou tyto fakta vypočítána díky různým počítačovým softwarům. V daném softwaru může být simulován nejen vnitro balistický děj, ale také zde lze provádět balistické projektování nebo počítat vnitřní balistiku palných zbraní. Do balistického děje jsou zařazeny opravové součinitele, díky kterým jsou zvoleny náboje nebo výmetné prachové náplně, kdy jako výsledek dostáváme žádanou velikost vnitro balistických veličin. Proces pro výpočet vnitřní balistiky palné zbraně spočívá v určení veličin týkající se vnitřní balistiky, jako teplota plynů, rychlost střely, tlak plynů nebo dráha střely a jiné v závislosti na čase. [1]

Přechodová balistika

Přechodová balistika zkoumá stav střely po opuštění z hlavně, přičemž je tento děj sledován až do doby vyprchání účinku urychlení střely za pomoci plynů, které vznikly chemickou reakcí při výstřelu, přičemž vliv těchto plynů zůstává i po opuštění střely z hlavně. [1]

Vnější balistika

Vnější balistika zkoumá střelu ihned po ukončení účinku působení plynů vzniklých při výstřelu střely až se samotným zásahem daného cíle. [1]

Vnější balistika je fáze při výstřelu střely, kdy na danou střelu již neúčinkují plyny způsobeny výstřelem. Dále zkoumá pohyb střely za podmínek ideálních nebo taktéž podmínek s řadou rušivých elementů. Balistika se rozděluje na experimentální a teoretickou. [1]

Koncová neboli terminální balistika

Terminální balistika, též známá jako koncová balistika, zkoumá střelu od chvíle, kdy střela zasáhne daný cíl až po konečné zastavení střely, kdy střela předala veškerou energii. To samé platí pro úlomky střely. [1]

Koncovou balistiku lze považovat jako jeden ze základních stavebních kamenů ohledně taktické střelby nejen z pistole, ale i jiných druhů zbraní. Koncová balistika se využívá hlavně u vojenských a policejních složek odstřelovačů. [1]

2 BALISTICKÉ VESTY

Balistická ochrana je ochranný prvek, který je zkonstruován k absorpci útoku ze střelných zbraní, odolný vůči útokům noži a jinými bodnými či sečnými zbraněmi. Balistickou ochranu lze dělit nejen podle materiálu, ale také dle užití, stylu nošení, úrovně požadované ochrany. Důležité je zmínit, že k tvorbě balistických ochranných prvků nejsou využívány jednotlivé materiály, ale většinou jsou využívány tzv. „kompozity“. Kompozit je prvek, který je tvořen z více možných materiálů, minimálně ze dvou, mají různé fyzikální vlastnosti a jsou spojeny v jeden prvek. Do balistické ochrany se řadí balistické vesty, balistické helmy, balistický oděv a jiné. Balistická ochrana se nemusí týkat pouze člověka, jelikož zde lze přiřadit i konstrukční balistická ochrana pro vozidla. [2][3][4]

2.1 Historie

V dávné historii se lidé potřebovali bránit, ať už od různých zranění způsobena zvířaty, tak od možných zranění při boji proti sobě. K této ochraně bylo využíváno od různých zvířecích kůží, které poskládali do „bariér“, čímž vznikaly první „kompozity“. Postupem času a technických pokroků bylo možné vytvořit lepší ochranný prvek z materiálu jako je dřevo, železo a mnoho dalších. [2][5]

Na začátku 16. století se zrodila myšlenka první balistické vesty. Za touto myšlenkou stála Italská a Římská královská rodina. Zanedlouho byl vytvořen balistický ochranný prvek, který se skládal z několika vrstev železa. Díky seskládání vrstev měl tvořit ochranu proti střele. Vnější balistická vrstva měla absorbovat dopad střely. Vnitřní vrstva sloužila vůči průniku střely a zabránění poranění osoby. Nakonec se došlo k závěru, že navržený ochranný balistický prvek není efektivní vůči palným zbraním. [2][5]

S další ideou a pokusy přišli začátkem 19. století Japonci, kterým se povedlo takovou ochranu vytvořit z hedvábí. Vytvořená vesta byla efektivnější než vesta tvořená pouze ze železa. Bohužel tento záměr nebyl ideální, protože tehdy bylo hedvábí dosti drahé. [2][5]

Roku 1901, kdy byl úspěšně spáchán atentát na tehdejšího prezidenta Williama McKinleyho, se rozhodla americká armáda pro výzkum balistických ochranných prvků z měkkého balistického materiálu. Během výzkumu byla zjištěna jedna zásadní věc, a to, že ochranné oděvy jsou sice odolné a účinné vůči střelám nízké rychlosti, avšak problém spočíval s novou generací střeliva zbraní. Nově navržené střely dosahují mnohem vyšší rychlosti, a tudíž vyrobené oděvy již nebyly účinné a americká armáda od nich opustila. [5]

Dále se k tématu „neprůstřelných“ oděvů věnuje během druhé světové války, kdy tato událost vedla ke spoustě výzkumům a pokrokům. Během této války byla vynalezena balistická bunda. Dokázala být efektivní proti fragmentům střel, ale nebyla efektivní vůči střelám z pušek a některým pistolím. Tyto bundy byly dosti objemné, ale vojáci se díky nim cítili bezpečněji, tudíž byly dosti využívány. K výrobě těchto bund se používal balistický nylon. [2][5]

Další vývoj balistických odolných materiálů a výrobě balistických oděvů nastal po druhé světové válce, přesněji v 60. letech 20. století. Byla objevena nová vlákna, která dokázala být použita k výrobě balistických vest. Díky tomuto objevu již roku 1970 byla vytvořena balistická tkanina, konkrétně balistický kevlar značky DuPont. Zajímavostí je, že tato látka měla původně hlavně sloužit k nahrazení ocelových výztuží v pneumatikách, a to zejména z důvodu extrémní pevnosti této látky. [2][5]

Ke kevlaru byly přidány nejen voděodolné látky, ale i vrstvy látky, díky kterým vesta byla odolnější, příjemnější a pohodlnější na nošení. Vyrobená balistická vesta z kevlaru byla několikrát otestována Národním institutem spravedlnosti (National Institute of Justice). Provedené testy vedly ke zjištění, že takto navržená a vyrobená balistická vesta dokáže zastavit běžné olověné střely ráže .22 Long rifle a také .38 Speciál. [5]

Poslední testování bylo zaměřeno na efektivitu kevlaru. Tímto testováním bylo zjištěno, že po zásahu střelou ráže .38 kalibr, kdy tato střela dosahuje 800 stop za sekundu, což je při převodu na metrický systém celých 243,84 metrů za sekundu, šance na přežití je až 95 %. Dále bylo vysledováno, že nutnost operace po zásahu střelou je až o 10 % menší. Takto vyrobené kevlarové vesty byly využívány od roku 1976, kdy se dopracovalo k závěru, že kevlar je vůči střele dostatečně odolný, ale také voděodolný a samozřejmě dostatečně lehký k tomu, aby mohl být využíván každodenně u bezpečnostních složek. [5]



Obrázek 1 Historická balistická ochrana [6]

2.2 Rozdělení balistických vest

Základní dělení balistických vest je tvořeno měkkou balistikou a tvrdou balistikou. Měkká balistika je vyráběna z odolných a pružných materiálů, které jsou určeny právě pro balistickou ochranu. Tyto měkké balistické ochranné prvky jsou určeny hlavně k dennímu nošení k ochraně trupu. V dnešní době je mnoho druhů vest, ať už pro skryté nošení, vesty speciálně určené pro speciální zásahové jednotky. Vybaveny jsou tímto také policisté, pracovníci soukromých bezpečnostních služeb a vojáci. Takto vyrobený měkký balistický ochranný prvek je vhodný pro skryté nošení pod uniformou nebo pod jiným oděvem, kdy takto oblečené například měkké balistické vestě nazýváme jako skrytá balistika. Prvky měkké balistické ochrany lze nosit přes uniformu. Měkká balistika zajišťuje ochranu proti střelám z ručních palných zbraní. [2][3][7]

Druhým balistickým prvkem je tvrdá balistika. Tvrdá balistika je určena pro mnohem nebezpečnější hrozby oproti měkké balistice. Tvrdá balistika většinou bývá složena z tvrdých a pevných desek, nebo také plátů, které jsou vyrobeny z odolných balistických materiálů. Balistické vesty dále jsou vybaveny tzv. protišokovými vložkami, které se nachází co nejbližší tělu. Protišoková vložka má za úkol absorbovat kinetickou energii střely. Speciálním druhem tvrdé balistiky je tzv. taktická balistika nebo též nazývána kombinovaná

balistika. Taktická balistika je utvořena z kombinace z tvrdých a měkkých plátů vytvořených z odolných balistických materiálů. Takto zkombinovaná taktická balistika je nejen těžší, ale hlavně silnější.[2][7]

2.2.1 Měkká balistika

Měkké balistické ochranné prvky jsou vyráběny z měkkých plátů látek, které jsou tkány a tvořeny z různých odolných balistických materiálů. Pláty jsou spojovány do vrstev, čímž se docílí požadovaného efektu ochrany. Nejen počet vrstev, ale také jejich pořadí zapříčiňuje výkonnost v celku. Energie je absorbována a rozptýlena každou následující vrstvou. [2][7]

Princip funkčnosti je založen právě na absorpci a rozptýlení energie při dopadu střely. Střela, jakmile zasáhne plát, je zachycená do sítě odolných a pružných vláken, čímž se následně energie nárazu střely rozptýlí do jednotlivých vrstev. Následně je střela při dopadu deformována. Schopnost rozptylu a absorpce energie je klíčová, aby bylo možné daný tupý náraz způsobený střelou snížit co nejvíce. [2][7]

I když nedojde k průniku střely skrze balistický ochranný prvek, například balistickou vestou, materiál vesty je natolik stlačen při nárazu a tím je umožněn vznik zranění trupu, kdy toto zranění může být například vážně pohmožděná část trupu, nebo možnost šance způsobení vnitřního zranění. Mezi vnitřní zranění zařazujeme například poškozenou cévní soustavu, poškozené svalstvo, orgány a taktéž zlomené kosti, kdy takto vzniklá zranění můžou taktéž vést k úmrtí.[2][7]



Obrázek 2 Balistická vesta ARDOS [8]

2.2.2 Tvrdá balistika

Tvrdá balistika je tvořena z pevných plátů, které jsou vkládány do vesty, tzv. „nosiče plátů“. Jsou vyráběny z různých typů materiálů, ke kterým se řadí keramika, kovové desky, stlačené laminátové desky, různé kompozity a jiné. Pláty jsou umístovány na vitální zónu vesty, buď z přední strany nebo z přední strany i zadní strany. Oproti měkké balistice, u tvrdé balistiky dochází buďto k deformaci střely nebo přímé destrukci střely. K absorpci a rozptýlení energie dochází při obou možnostech.[2] [3][7]



Obrázek 3 Set nosiče plátů [9]



Obrázek 4 Balistické pláty pro nosič plátů [9]

2.2.3 Kombinovaná balistika

Důležité je zmínit, že daná balistika se užívá častěji kombinovaně než zvlášť, jelikož při kombinaci dvou zmíněných druhů se dokáže vytvořit takový ochranný balistický prvek, který dosahuje potřebných účinků a výkonnosti. Takto vytvořené balistické prvky nazýváme kombinovaná balistika, nebo taktéž taktická. [7][10]

Kombinace funguje vytvořením vesty z měkké balistiky, kdy je přizpůsobena doplněním kapes na přední, zadní a v některých případech i boční stranu, do kterých se následně vkládají například tvrdé pancéřové pláty. Tvrdé pláty musí být specificky vybrány k měkké balistice, nelze je použít s každou měkkou balistikou, jelikož by mohlo dojít k nedosažení požadované úrovně ochrany. Kombinovaná balistika je tvořena z různých částí ochran, jako je chránič krku, ramen, chránič třísel, protišoková vložka a jiné. Kombinovaný balistický ochranný prvek je využíván hlavně při vysoce nebezpečných situacích, kdy je předpoklad, že budou proti bezpečnostním složkám užity zbraně a munice vojenského typu. Spolehlivost a funkčnost kombinované balistiky je značně vysoká, jelikož odolné balistické pláty dokážou střelu nejen zastavit, ale taktéž pohltit větší část energie střely. O zbytek energie je postaráno dalšími vrstvami balistické ochrany, jako je měkká balistika, případně anti šokovou vložkou. [7][10]

Speciálním případem balistické ochrany je v případě potřeby likvidace výbušných zařízení, výbušnin nebo jiné nevybuchlé bomby a munice, a to ve vojenské a veřejné sféře bezpečnosti při teroristických útocích. Pro tento případ je ochrana tvořena ze silného pancíře, aby byla ochránila přední i zadní část těla nositele, dále jsou zde chrániče paží a také zesílené boční strany balistickými vložkami. Nositel je díky obleku chráněn nejen vůči množství traumat, ale také vůči nárazu, teple, střepin nebo nebezpečí přetlaku. Důležitost se také klade na volnost pohybu při zásahu, což zapříčinilo maximální redukci hmotnosti, aby nositel dokázal odvést práci efektivně. [11]



Obrázek 5 Kombinovaná balistická ochrana [12]

2.2.4 Anti šoková vložka

Anti šoková vložka je další prvek, který zajišťuje zvýšení a zlepšení balistické vesty. Nachází se ve vrstvě nejbližší přiléhající k tělu, čímž je energie rozložena na větší část plochy. Vložka dopomáhá ke snížení průhybu materiálu balistické vesty způsobený střelou. Díky tomu je traumatický šok z velké části redukován, čímž je snížen i šokový otisk. Anti šoková vložka je vyráběna z materiálů, které dokážou zachytit nejen střelu, ale i střepiny či alespoň zredukovat způsobený průhyb daných předmětů. K zastavení střely nebo střepin se vyrábějí anti šokové vložky z vícevrstevných aramidových materiálů ve spojení s fóliemi z polykarbonátů, které jsou odolné vůči tříštění. Vložky redukující pouze průhyb jsou vyráběny z polyuretanových materiálů. [3]

Působení anti šokové vložky je značné, kde jako příklad lze uvést zásah měkké balistiky střelou 9 mm. Bez použití anti šokové vložky byl zaznamenán průhyb 29 až 32 mm. S použitím anti šokové vložky tento průhyb byl až o 40 % snížen. Dalším prvkem pro zvýšení ochrany lze použít například protišokové tričko, které taktéž redukuje průhyb způsobený střelou. [3]

2.3 Normy týkající se balistické ochrany

Jako mnoho jiných věcí, i balistické ochranné prvky musí být kontrolovány danými normami, které se starají právě o dostatečnou odolnost, kvalitu těchto prvků a zaručují, že prošly předepsanými zkouškami. [13]

2.3.1 ČSN 39 5360 – Zkoušky odolnosti ochranných prostředků – Zkoušky střepinám a bodným zbraním – Technické požadavky a zkoušky

Na návrh Policie České republiky začala být balistická odolnost testována dle určených speciálních zkoušek. Návrh byl podán v 70. letech 20. století, kdy tuto činnost zajišťoval Český úřad pro zkoušení zbraní a střeliva. [10][13]

Po dlouhém sběru informací a proběhlém testování, došlo jmenovaným úřadem, k zpracování a následně vydání roku 1996 české státní normy, která byla následně schválena a evidována jako ČSN 39 5360. Tato norma byla tak důkladně a technicky vypracována, že postupem času přibývalo počtu mezinárodních normalizačních organizací, které sbíraly poznatky ze jmenované normy, přičemž největší zájem byl o poznatky ohledně balistické odolnosti proti střelám, typ užitých střeliv a v neposlední řadě tvar testovacího nože. [10][13] [14][15]

V normě je popsáno nejen průběh testování, včetně výsledků, balistických materiálů pro výrobu balistických ochranných prvků, ale také udává minimální požadavky pro dané testované balistické materiály. Balistická ochrana a požadavky na balistickou odolnost je normou rozdělena do sedmi tříd (viz obrázek č. 6). Norma byla roku 2018 aktualizována a zůstává platná až doposud, jelikož vývoj zbraní, střeliva, různých balistických materiálů stále pokračuje. [10][13][14][15]

Tabulka 3 – Technické požadavky pro hodnocení TBO

TBO	Ráže	Střela	Rychlost $v_{2,5}$ m/s	Hmotnost m g
1	22LR	Pb/O	300 ± 10	2,6 ± 0,05
2	9mm Luger	CP/Pbj./O	410 ± 10	8 ± 0,05
3	357 Magnum	CP/Pbj./KK	430 ± 10	10,2 ± 0,05
4	44 Magnum	CP/Pbj./KK	440 ± 10	15,6 ± 0,05
5	223 Rem.	CP/Pbj.	920 ± 10	4 ± 0,05
6	7,62 × 51	CP/Pbj.	830 ± 10	9,5 ± 0,05
7	7,62 × 51	CP/AP	850 ± 10	9,55 ± 0,05

Vysvětlivky: CP – celoplašt, Fej. – ocelové jádro, Pbj. – olověné jádro, O – ogivál, KK – komolý kužel, AP – průbojná střela

Tabulka 4 – Technické požadavky pro hodnocení TBO

TBO	Ráže	Střela	Rychlost $v_{2,5}$ m/s	Hmotnost m g
2 CZ	7,62 × 25	CP/Pbj./O	470 ± 10	5,5 ± 0,05
3 CZ	9mm Luger	CP/Fej./O	440 ± 10	6,45 ± 0,05
4 CZ	7,62 × 25	CP/Fej./O	550 ± 10	5,50 ± 0,05
5 CZ	7,62 × 39	CP/Fej.	710 ± 10	8 ± 0,05
6 CZ	5,56 × 45	(SS109)	950 ± 10	3,95 ± 0,05
7 CZ	7,62 × 54 R	CP/Fej.	860 ± 10	9,75 ± 0,05

Vysvětlivky: CP – celoplašt, Fej. – ocelové jádro, Pbj. – olověné jádro, O – ogivál

Obrázek 6 Technické požadavky dle normy ČSN 39 5360 [15]

2.3.2 NIJ Standard–0101.06

Norma NIJ Standard-0101.04 byla postupně nahrazována aktualizovanou a přísnější normou NIJ Standard-0101.06. Americká norma NIJ Standard-0101.04 vydaná roku 2000 Národní Institucí Spravedlnosti (National Institute of Justice) se zabývala pouze balistickou odolností, přičemž zde nejsou zahrnuty hrozby spočívající od ostrých špičatých nástroj, nožů, sečných a bodných zbraní. To je jeden z rozdílů oproti normě ČSN 39 5360, kde tyto hrozby jsou zahrnuty. U americké normy tyto hrozby jsou upravovány rozdílnou normou. [10][15]

V této normě jsou brány aspekty jako tvar střely, její hmotnost, ráže, ale taky rychlost a úhel dopadu. Střeliva, které jsou užívány pro zkušební účely balistických odolných materiálů, jsou typické pro hrozby policii. Rozdělení normy je jednoduché, jelikož jsou zde definovány základní čtyři třídy, které jsou doplněny dalšími dvěma třídami odolnosti. Důležité je zmínit, že na světě existuje mnoho typů munice, což zapříčiňuje možnost hrozby proražení ochranného balistického prvku, i když testovací náboj, který by byl stejné ráže, toto proniknutí nedokázal. Tato norma byla později nahrazena normou NIJ Standard-0101.06. [10][15]

Došlo zde k přísnějšímu hodnocení úrovně balistické odolnosti IIIA, jelikož zde byl testovací náboj nahrazen za výkonnější střelivo (viz obrázek č. 7 a č. 8 pro porovnání). Ovšem balistický ochranný prvek musí stále zastavit dané výkonnější střelivo, kdy průhyb při dopadu střely zůstává stejný. Tato změna vedla k pozměnění skladby balistického ochranného prvku, kdy může být ovlivněna hmotnost daného prvku. Záleží, zda dojde k potřebnému nárůstu vrstev balistického materiálu.[10][17]

Dle nové normy je zavedeno testování životnosti. Danému balistickému ochrannému prvku se uměle provede proces „stárnutí“. Taktéž bylo vylepšené testování po kontaktu daného prvku s vodou, jelikož při starší normě byl daný prvek pouze postříkán vodou. Nyní je prvek plně ponořen do vody, kdy zároveň je proveden test vodotěsnosti. Poslední důležitou zmínkou je navýšení počtu vzorků testovaných střeliv a navýšení počtu střel, které je nutné zastavit daným balistickým ochranným prvkem.[7][10]

Performance level	Test bullet	Bullet mass (gram)	Distance muzzle – target (m)	Velocity (m/s)	Performance requirements			
					Shots/panel 0° NATO impact angle	Shots/panel 30° NATO impact angle	Maximum Back Face Signature (mm)	Total shots per bullet threat
1	.22 caliber LR LRN	2.6	5	329 ± 9	4	2	44	24
	.380 ACP FMJ RN	6.2	5	322 ± 9	4	2	44	24
2A	9 mm FMJ RN	8.0	5	341 ± 9	4	2	44	24
	.40 S&W FMJ	11.7	5	322 ± 9	4	2	44	24
2	9 mm FMJ RN	8.0	5	367 ± 9	4	2	44	24
	.357 Magnum JSP	10.2	5	436 ± 9	4	2	44	24
3A	9 mm FMJ RN	8.0	5	436 ± 9	4	2	44	24
	.44 Magnum SJHP	15.6	5	436 ± 9	4	2	44	24
3*	7.62 mm NATO Ball	9.6	15	847 ± 9	6	0	44	12
4*	.30 caliber M2 AP	10.8	15	878 ± 9	1	0	44	2

Obrázek 7 Tabulka technických požadavků dle normy NIJ 0101.04 [18]

Test variables						Performance requirements			
Armor Type	Test Bullet	Bullet Mass (gram)	Bullet Manufacturer	Conditioned Armor Test Velocity* m/s	New Armor Test Velocity* m/s	Hits Per Panel at 0° Angle	Maximum BFS Depth	Hits Per Panel at 30° or 45° Angle ¹	Shots Per Panel
IIA	9 mm FMJ RN	8.0	Remington 23558	355 ± 9	373 ± 9	4	44 mm	2	6
	.40 S&W FMJ	11.7	Remington 23686	325 ± 9	352 ± 9	4	44 mm	2	6
II	9 mm FMJ RN	8.0	Remington 23558	379 ± 9	398 ± 9	4	44 mm	2	6
	.357 Magnum JSP	10.2	Remington 22847	408 ± 9	436 ± 9	4	44 mm	2	6
IIIA	.357 SIG FMJ FN	8.1	Speer 4362	430 ± 9	448 ± 9	4	44 mm	2	6
	.44 Magnum SJHP	15.6	Speer 4453 or 4736	408 ± 9	436 ± 9	4	44 mm	2	6
III	7.62 mm NATO FMJ	9.6	US/NATO M80 ammunition	847 ± 9	-	6	44 mm	0	6
IV	.30 Caliber M2 AP	10.8	US Military	878 ± 9	-	1 to 6	44 mm	0	1 to 6

Obrázek 8 Tabulka technických požadavků dle normy NIJ 0101.06 [18]

2.3.3 STANAG 2920 – Balistická zkušební metoda pro osobní pancéřové materiály a bojové oděvy

Norma STANAG 2920 se zabývá balistickými zkouškami v oblasti osobních pancéřových materiálů včetně bojových oděvů. Označení STANAG je standardizační dohodou NATO. Tato norma je specifická, jelikož pojednává o zkouškách v měření schopnosti materiálů zastavení šrapnelů a střepin. Původní záměr byl zaměřen na testování balistických vest. Do této normy se řadí i zkušební postupy pro přídavnou pancéřovou ochranu obrněným vozidlům. [19][20]

Zkoušky byly vyvinuty v důsledku statistiky střelných zranění a smrtelných střelných zranění, kdy bylo zjištěno, že takovému typu zranění jsou bojové jednotky málo kdy vystaveny. Větší riziko hrozí právě primárními a sekundárními fragmenty (střepiny). Proto se provádějí zkoušky dle normy STANAG 2920 jinak než u předchozích norem. Při zkouškách jsou na zkoušené vzorky vystřelovány projektily, které simulují již zmíněné střepiny (fragmenty), v různých vzrůstajících rychlostech. Každý vystřelený projektil je měřen, přičemž díky změnám rychlostí je získán potřebný odhad pro balistickou mez zkoušeného vzorku. Střepiny jsou navíc v různých hmotnostech, které se odvíjí od

binomického průměru. Díky této mezi lze odhadnout, jaká je průměrná rychlost střepiny, která dokáže prorazit zkušební prvek, a rychlost střepiny, který je zkušební prvek ještě schopen odrazit či zastavit. [19][20]

Metoda nazývána V50 je mezinárodně uznávaný standard pro zkoušení a následné hodnocení odolnosti obranných prvků osobní ochrany vůči šrapnelům (fragmentům), kterou používá společnost Intelligent Armour Limited.[19][20]

3 MATERIÁLY PRO VÝROBU BALISTICKÝCH VEST

Historie balistických ochranných prvků sahá hluboko do minulosti, čímž užívaných materiálů a postupů pro výrobu je znatelný počet. V této kapitole rozebereme materiály, které se využívají v dnešní době k výrobě těchto balistických prvků.[4][5]

Závratný krok nastal v roce 1960, kdy byla vynalezena velice odolná a pružná vlákna, což zapříčinilo začátek éry pro možnost vytvoření nových ochranných prvků. Brzy díky tomuto vynalezení byla americká armáda schopná představit odolnou balistickou vestu, kterou nazvali Interceptor. Vesta se skládala z vnější a vnitřní vrstvy, přičemž vnější vrstva byla klasická taktická vesta a vnitřní vrstvu tvořily pevné keramické pláty, které se vkládaly do kapes.[2][5]

V dnešní době se využívají hlavně dva druhy materiálu pro výrobu těchto balistických vest, které lze různě kombinovat. Jedná se o vláknité materiály a pevné materiály, v praxi se takto vyrobeným balistickým prvkům nazývá měkké a tvrdé. Tyto možnosti kombinace záleží, pro koho jsou určeny, respektive na stupni ohrožení a určení dané jednotky. [2]

Prvky měkké balistiky jsou vyrobeny z vláknitých materiálů, kdy tyto látky zastavují penetraci střely vestou, následně rozprostře a absorbuje kinetickou energii dané střely. Tato energie je rozprostřena dle tzv. balistických mechanismů, kdy se jedná například o průnik a deformace svrchní vrstvy, pnutí v primárních nitích, kdy následně nastává deformace v sekundárních nitích.[2][7]

Vláknité materiály jsou výhodné pro výrobu balistických vest díky vlastnostem jako je vysoká ochrana, nízká cena, a hlavně obstojná hmotnost. Balistické tkaniny jsou tvořeny z různých materiálů, díky čemuž jsou využívány nejen v oblasti balistické ochrany. Významnou roli u tkanin spočívá v úspěšném vývoji vysokopevnostních přízí utvářených z vláken s vysokou pevností, vysokým modulem a také vysokým stupněm anti degradace, díky čemuž jsou utvářeny tkaniny pro výrobu výkonných balistických vest. Nízká hmotnost, absorpce značné energie a odolnost vůči nárazům, jsou specifické pro tyto balistické tkaniny, čímž jsou využívány v mnoha inženýrských oblastech. [2]

Tvrdá balistika je navržena pro znatelně horší balistické hrozby. K výrobě tvrdé balistiky je možné použít materiál jako kov, keramiku, ale také kombinaci laminátových desek a vláknových materiálů. Tvrdá balistika je kombinována spolu s měkkou balistikou, kdy pláty jsou vkládány do kapes balistických vest. [4]

3.1 Klasická vlákna

Mezi klasická vlákna v dnešní době lze zařadit vysoce výkonná vlákna, která se používají buď ve formě netkané anebo tkané textilie, v jiných případech tkaniny. Taktéž zde můžeme zařadit netkané výztuhy, které jsou použity v oblasti soukromých vojenských složek. Všechny tyto materiály jsou užívané pro výrobu nejen balistických ochranných prvků, jako jsou balistické vesty, ale taktéž jsou použity pro výrobu různých ochranných balistických prvků.[2]

Jak již bylo zmíněno výše, v minulosti byly používány různé druhy materiálu pro výrobu ochranných prostředků, od kůže, hedvábí nebo také kombinace různých materiálu, přičemž byly později přidávány například kovové pláty. Jako další materiály začleněné ke klasickým vláknům zde lze řadit len, bavlna, kašmír a mnoha dalších.[2][11]

Období druhé světové války, kdy pokrok byl důležitý, přišla na řadu také balistická ochrana. Vývin vedl k použití etylcelulózy a skelných vláken typu E-sklo, které se ale řadí pod syntetická vlákna. Takto vytvořené balistické vesty nebyly účinné vůči střelám, avšak dokázaly poskytnout ochranu vojákům vůči nejen šrapnelům z bomb a granátů, čímž byl zvýšen pocit bezpečí u vojáků.[2][5]

3.2 Syntetická vlákna

3.2.1 Para-aramidová vlákna

Para-aramidové vlákna jsou vysoce pevným materiálem, disponující dobrou tepelnou odolností a pružností. Slabé stránky vláken spočívají v náchylnosti vůči UV záření. Vlákna byla představena na začátku 60. let 20. století společností DuPont. Para-aramidové vlákna jsou syntetická vlákna tvořena polyamidy. Řadí se mezi polymerní vlákna, která jsou nejběžněji využívána při výrobě ochranných balistických prvků. Další výhodou je velice dobrá adheze neboli přilnavost, mezi amidovými látkami s aromatickými látkami, díky čemuž existuje možnost lepší přilnavosti oproti nylonovým vláknům, včetně lepší tepelné odolnosti.[2][3]



Obrázek 9 Balistický materiál Kevlar [21]

Důležité je zmínit, že takto vyrobený kompozit není úplně levný, je to jedna z nejlepších možností vláken díky jejich vlastnostem. Takto navržená a vyrobená látka se dnes prodává pod názvem Kevlar® a Twaron®. Aby se ale snížila cena, bylo nutné snížit počet potřebných aramidových vrstev, avšak ne až na takovou úroveň, aby byla ohrožena bezpečnost a účinnost dané vesty. [2][3]

3.2.2 Polyetylenová vlákna s ultra vysokou molekulární hmotností

Polyetylenová vlákna jsou vysoce odolná a pružná vlákna využívající se pro výrobu různých prvků balistické ochrany. Vlákna byla představena tehdejší společností Allied-Signal, dnes známá pod názvem Honeywell Advanced Fibres and Composites, a to kolem roku 1980. Kompozity vyrobené z polyetylenových vláken jsou vedena pod značkou Dyneema®. [2]

Materiál je zhotoven z polyethylenových řetězců, které jsou nesmírně dlouhé. Nejčastější technikou výroby je lisování a následné vytlačení pod tlakem. Důležité je zmínit, že k výrobě balistických vest jsou užity polyetylenová vlákna, která jsou mimořádná svým vysokým modulem pružnosti. kdy tato vlákna jsou vyráběna gelovým zvlákňováním. [2]

Gelové zvlákňování je proces, kdy se určený materiál pro výrobu změní tažením rozpuštěného ethylenu na gelový materiál. Touto technologií lze zaručit nejen dostatečnou chemickou odolnost, ale taktéž tuhost a odolnost vůči odírání. Vysoký modul vláken s velkou pevností a pružností, kdy nechybí ani odolnost vůči opotřebení v ohybu, je výsledkem techniky, kdy je dvojitý kus gelového materiálu vtlačen a zataven pod folií polyethylenu. [2]

Takto vyrobený balistický kompozit je vhodný například do měkké balistiky, nebo taktéž jako jedna ze složek plátů tvrdé balistiky. Jako slabé stránky tohoto materiálu lze uvést nízkou teplotu tavení, kdy při této degradaci je navíc zhoršena pevnost materiálu. Dále může nastat při značném zatížení snadné pnutí.[2]



Obrázek 10 Balistický materiál polyetylenová vlákna s ultra vysokou molekulární hmotností [22]

3.2.3 PBO vlákna

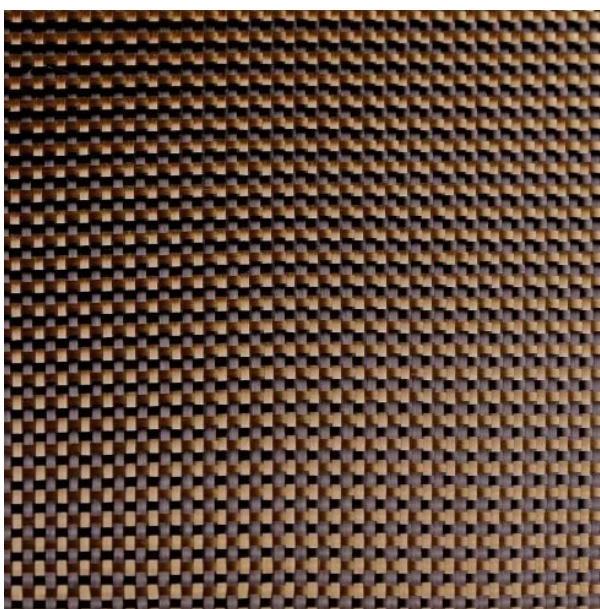
Kolem roku 1998 představila firma Toyobo Co. LTD nový typ vlákna, které mělo pozoruhodné vlastnosti v oblasti balistiky a balistických ochranných prvků. Materiál byl nazýván obchodním jménem Zylon a byl vytvořen díky různým technologiím a za pomoci mnoha výzkumných aktivit. [2][4]

Zylon disponuje vysokou úrovní pevnosti, kdy je tato vlastnost doplněna vysokým modulem pružnosti. Značnou výhodou je vlastnost materiálu v oblasti absorpce energie, kdy je zde hodnota až dvojnásobná oproti Kevlaru nebo Spectru. Důležité je zmínit, že při testech byl testovací vzorek materiálu uchycen všemi hranami. [2]

Dalším porovnáním lze uvést vůči hliníkovému potahu trupu, jelikož zde Zylon dokázal pohltit energii až 12x vyšší. Avšak cena je několikanásobná oproti materiálům jako je polyethylen nebo para-aramid. [2][4]

Na druhou stranu zde spočívá problém v oblasti výdrže balistických vest ze Zylonu, jelikož tento materiál vykazuje nízkou výkonnostní stránku v oblasti stárnutí. Dle firmy Toyobo, která provedla výzkum ohledně problému s degradací, tento pokles výkonnosti byl až o 15 %, přičemž podmínky prostředí jako je vlhkost, teplota nebo sluneční záření neměly na tuto vlastnost vliv. [2][4]

Degradace byla potvrzená také jinou studií, která provedla testování, kde kromě vlhkosti nebo slunečního záření, byla navíc zařazena například kyselina. Při testování byly zjištěny různé výsledky, kde například po použití kyseliny došlo ke změně struktury látky, přesněji k jejímu uvolnění vláknové struktury. Ke stejnému výsledku došlo při testování s UV zářením. [2]



Obrázek 11 Balistický materiál Zylon [23]

3.2.4 Skelné vlákna

Skelné vlákno, jeden z nejuniverzálnějších materiálů využívaných v průmyslu, se také používá k výrobě balistických prvků. Je vyráběn procesem, při kterém se roztaví oxid křemičitý s určitými minerály, dále se rychlým ochlazením zformuje do skelných vláken, procesem známým jako fibrilace. Rychlým ochlazením se navíc zabrání, aby se daná látka znovu zkrystalizovala. [2]

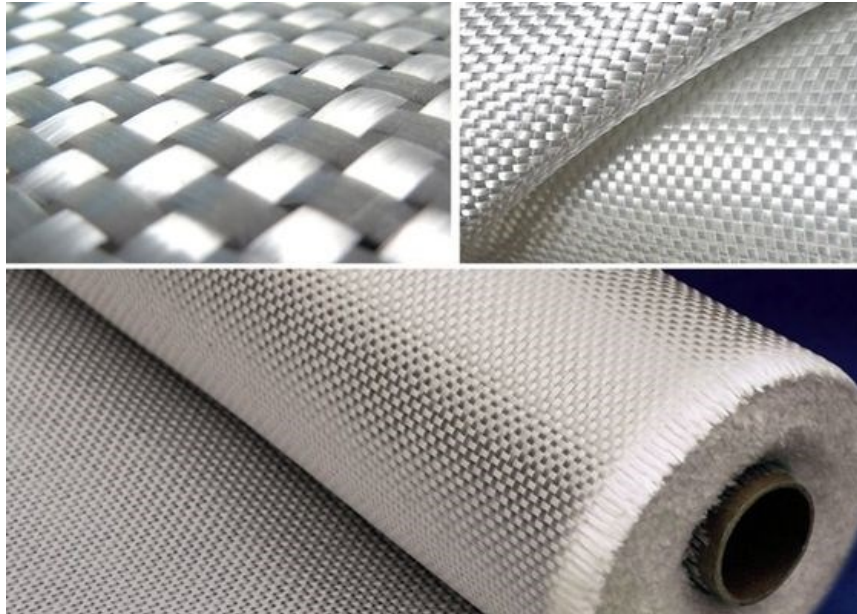
Existuje mnoho různých druhů skel, přičemž každý z nich má své klady a zápory. Skelná vlákna jsou v dnešní době široce využívána, například při izolacích domů, různé filtrace, kompozitní výztuže.[2]

Vhodné je zmínit, že druhů skelných vláken stále vzrůstá, což zapříčiňuje velké množství oblastí aplikace tohoto materiálu. Jako první z druhů skelných vláken lze jmenovat C-sklo, které bylo vytvořeno v 60. letech 20. století. V 70. letech 20. století se aplikace těchto materiálů začala využívat pro výrobu balistických prvků. Je tvořeno chemickými prvky jako je oxid křemičitý, oxid hlinitý a hořčík.[2]

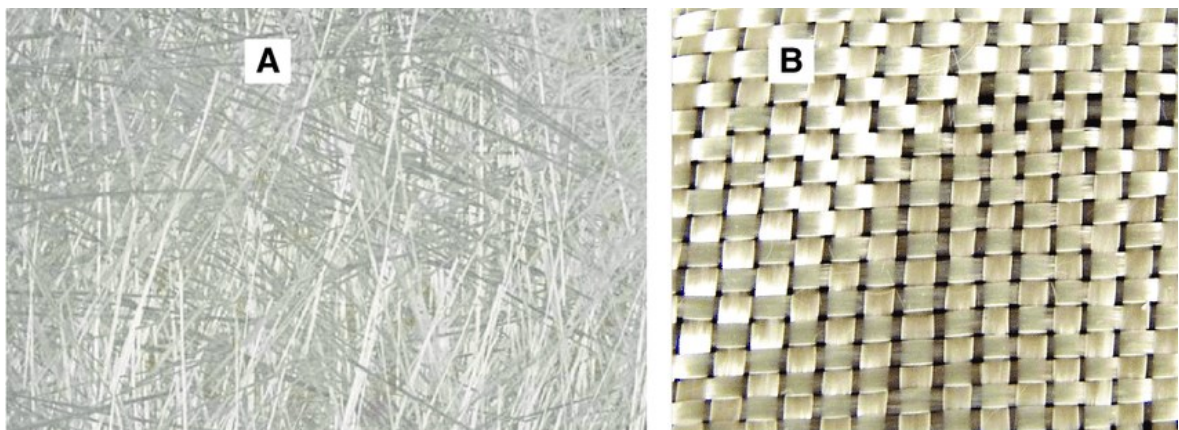
Další na seznamu druhů skel je E-sklo, které je vhodné do různých možností aplikace. Díky vyztužení právě těmito vlákny s jinými materiály dokáže spolehlivě fungovat kvůli mechanické, ale taky chemické a elektrické ustálenosti. E-sklo je tvořeno z chemických prvků oxidu vápenatého, oxidu hlinitého, oxidu křemičitého. K výrobě je dále potřeba použít oxid boritý, ovšem pouze v procentuální hmotnosti 0 až 10 %.[2]

Je některý z popsaných prvků lepší pro balistické odvětví? Ano, z popsaných druhů je lepší C-sklo, jelikož tento druh nabízí oproti E-sklu mnohem lepší pevnost, téměř až o 40 %. Další z důvodu lepší využitelnosti tohoto druhu je díky pevnosti, která je vysoká nejen v tahu, ale i v tlaku. Tyto vlastnosti jsou zásadní pro balistické využití, jelikož umožňují dynamicky absorbovat náraz balistického typu. Oheň, kouř ani toxické látky těmto vláknům taktéž nedělají problém, a to díky strukturálním vlastnostem.[2]

Celkově jsou skelná vlákna pro obranný průmysl značně využitelná, jelikož jejich nízká cena, nárazová, tahová a chemická odolnost, jsou velice výhodnými kandidáty. Ovšem i skelná vlákna mají svoje nevýhody, kdy lze jmenovat vysoká abrazivita (brusnost) vláken nebo slabá přilnavost matricovým pryskyřicím, zapříčiněno vysokou odolností vůči chemikáliím a v neposlední řadě nízký modul pružnosti.[2]



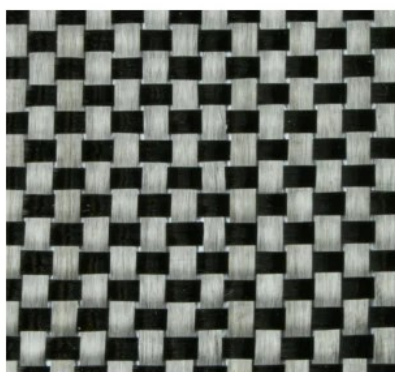
Obrázek 12 Balistický materiál skelná vlána typu E-sklo [24]



Obrázek 13 Typy skleněných vláken - (A) CSM a (B) tkaná [25]

3.2.5 Karbonová vlákna

Karbonová, též uhlíková, vlákna jako materiál je jeden z důležitějších materiálů v oboru balistické ochrany. Důležitost vláken je díky vykazovaným vlastnostem. Mezi tyto vlastnosti se řadí nejen vysoká tuhost a tahová pevnost, ale také nízká tepelná roztažnost. Ideálnost pro tvorbu balistických prvků je způsobena z důvodu, že dokáže být oproti oceli nejen tužší a až pětkrát pevnější, ale především je stále mnohem lehčí. Karbonová vlákna se pyšní širokou paletou využití a aplikaci v různých oborech napříč celým světem. [2][4]

**CARBON FIBER PLAIN WEAVE****CARBON FIBER TWILL WEAVE**

Plátňová vazba z uhlíkových vláken Keprová vazba z uhlíkových vláken

Obrázek 14 Druhy karbonového pletení jako balistického materiálu [29]

3.2.6 Keramická vlákna

Keramická vlákna mají taktéž širokou paletu aplikací napříč různými odvětvími jako je například letecký a vesmírný průmysl. Tato vlákna jsou využívána hlavně pro svou odolnost proti vysokým teplotám, což zapříčiňuje vysoké využití pro mechanicko-tepelné zařízení. Další vlastností keramických vláken je vysoká tvrdost a pevnost vůči tlaku, což navíc při své nízké hustotě způsobuje jeho široké využití. [2][4]

V balistickém odvětví lze vlákna využít pro výrobu osobních balistických plátů, či využít k tvorbě ochranné prvku automobilů. Nevýhodou pro výrobu tímto materiálem je nejen vysoká cena, ale také obtížnější možnost zpracování. [2][4]

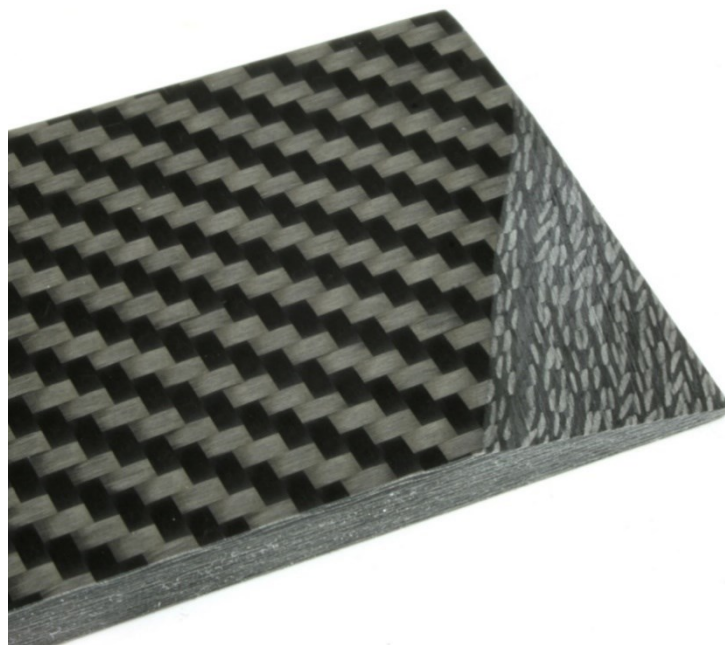


Obrázek 15 Balistický materiál – keramické vlákno tkané [26]

3.3 Kompozity

Pro výrobu balistických vest se nepoužívají látky samotné, ovšem se z nich vytvářejí kompozity. Kompozit je materiálová struktura, která je tvořena minimálně dvěma materiály určitou technikou zpracování. Důležitým poznatkem a výsledkem je, aby spojením dvou a více materiálů, které mají odlišné vlastnosti, bylo dosaženo synergie. Dále, aby byl kompozit kompletní, je nutné využít materiály spojit pojivem, jinak nazýváno maticí, kdy se jedná například o polymer s aditivou, doplněno výztuží. Výztuže se dodávají do kompozitu kvůli zvýšení tuhosti, pevnosti a jiných požadovaných vlastností.[27][28]

K výrobě kompozitu se využívá právě materiálů s vlastnostmi, jako je lehkost, vysoká tvrdost a pevnost v tlaku, dlouhá trvanlivost, o nízké hustotě a samozřejmě i cena zde hraje svoji roli. Důležité je, aby tyto materiály byly schopné zpomalit, či zcela zadržet střelu daných ráží. Využívané materiály lze definovat do 4 základních používaných druhů, kde řadíme kovové materiály, polymery, keramiku anebo kombinaci těchto materiálů. Mezi kovové materiály řadíme pancéřovou ocel nebo slitinu hliníku. U polymerů lze jmenovat aramidy nebo polyethyleny. Za keramiku řadíme například oxid hlinitý, borid titanu či karbid křemíku nebo boru.[28]



Obrázek 16 Karbonový balistický materiál vyztužující stabilní epoxidovou maticí[29]

3.4 Možné nastupující trendy v oblasti balistické ochrany

Vývoj balistických ochranných prvků je stále aktivní. Mnoho výzkumných organizací, armády a jiné společnosti se pokouší zdokonalit možnost výroby balistických ochranných prvků, ať se jedná o způsob výroby či využití jiných materiálů. Dále je snaha o inovace v oblasti balistických vest, nejen měkkých, ale také nosičů plátu a zvýšit možnou mobilitu. Například u armády by touto inovací došlo ke změně v každodenním aktivním režimu. Společnosti v dnešních dnech zkoumají možnosti nejrůznějších materiálů. Mezi tyto materiály se řadí spřádaná vlákna bource morušového, pláty z grafenu nebo polymerní nano kompozity. [30]

Jeden z podobných výzkumů je veden ministerstvem obrany ve spolupráci s univerzitou RMIT. Zjistili, že použití lehkého titanu a 3D tisku má potencionální šanci pro využití balistické ochrany vojenských vozidel, čímž by byla zvýšena ochrana vojáků. V dnešní době je využíván pro ochranu vojenských dopravních prostředků ocel, která je pevná a tvrdá, avšak taktéž těžká, čímž je nejen ovlivněna rychlost vozidla, ale také výdrž či řízení vozidla.[31]

Další výzkum veden armádou a námořnictvem vedl ke zjištění ohledně nano materiálových architektur. Díky tomuto by bylo možné v budoucnu zdokonalit ochranné balistické prvky, které by dokázaly být odolnější vůči střelám než donedávna. Díky vlastnostem nano materiálové struktury by bylo možné lépe absorbovat a rozprostřít energii než u kompozitu z kevlaru a jiných materiálů. Navíc by využití nano materiálových architektur nebylo omezeno pouze v oblasti balistické ochrany, ale lze zde zařadit využití v kosmu či v letectví.[32]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 PŘÍPRAVA NA TESTOVÁNÍ

V následující kapitole se práce věnuje přípravě vzorků k testování.

4.1 Výběr vhodné balistické vesty a plátu

K vypracování bakalářské práce bylo nutné si stanovit zkušební balistickou vestu a plát, které budou později podrobeny testování. Na trhu je nabízeno neskutečné množství různých balistických vest, které jsou užívané dennodenně v různých odvětvích, kde existuje riziko střelného poranění, proti čemuž dokáže ochránit balistická vesta. Rozdíl mezi těmito vestami a pláty je nejen cenový, ale také v možnosti úprav, balistické odolnosti, nebo způsobu nošení. Pro účely testování bylo vhodné se zaměřit na vesty měkké balistiky, do kterých je možné přidat dodatečný balistický plát. Také se při výběru nebraly v potaz vesty pro skryté nošení, jelikož bylo zamýšleno testovat klasickou vestu, nošenou jako svrchní, často používanou například Policií ČR. Vesty určené pro armádu ČR byly také mimo výběr pro testy. Pro jmenované požadavky se výběr balistických vest poněkud zúžil. Jedna z možností se nabízela balistická vesta ARDOS, kterou má v oblibě Policie ČR, ale také je používána soukromými složkami a městskou policií. Další možností byla balistická vesta SAVALON. Tuto vestu využívají zejména záchranné složky. Poslední možností byla balistická vesta SIGYN, která je oblíbená u Policie ČR. [33]

Balistický plát byl taktéž vybírán dle oblíbenosti u používání zásahových složek, ale hlavním důvodem byl použitý materiál k výrobě samotného plátu. Na trhu lze nalézt mnoho různých výrobců balistických plátů splňující různé třídy balistické odolnosti, vyrobené z různých materiálů v různých cenových částkách. Na internetovém obchodě, kde byla vybrána testovaná balistická vesta, byla nabídka balistických panelů různorodá. Lze zde zakoupit balistické panely konstruované jako keramicko-kompozitové panely nebo panely vyrobené z vrstveného vysokomolekulárního polyethylenu. Právě balistické panely z vysokomolekulárního polyethylenu byly lepší volbou pro naši zvolenou vestu. Balistický panel bude nošen na přední straně vesty k zajištění vyšší ochrany trupu. [34]

4.1.1 Analýza balistické vesty

Pro testování byla zvolena balistická vesta od značky Argun, konkrétně model SIGYN, jiným označením LV15. Jedná se o balistickou vestu obsahující vložky měkké balistiky. Tato vesta je oblíbená u složek Policie ČR. Vesta je navržena pro dodatečné úpravy jako přidání chrániče klínu nebo různé úpravy obvodové velikosti s výškovým nastavením

předního a zadního dílu v úrovni ramen. Balistická vesta a všechny její součásti spadají pod normu NIJ STD 0101.04. Základním materiálem pro výrobu vesty je 100 % Nylon typu 500D Cordura. Popruhy vesty jsou tvořeny už pouze ze 100 % Nylonu. U této vesty je zapínání řešeno suchým zipem, a to na bočních stranách a ramenních popruzích. Rychlé odepínání u této vesty není možné. [35]



Obrázek 17 Čelní strana balistické vesty [vlastní]



Obrázek 18 Zadní strana balistické vesty [vlastní]

Balistická vesta byla doplněna balistickým panelem. Tento panel je taktéž značky Argun s označením III+ SAPI LBP24. Panel se doporučuje pro vesty se třídou odolnosti II nebo III. A, čímž je pro testovanou balistickou vestu vhodným kandidátem. Materiál panelu je vysokomolekulární polyethylen čistě bez přidaných materiálových vrstev jako je pancéř nebo keramika. Samotný plát splňuje normu NIJ STD 0101.04 včetně balistické třídy III. Z dostupných informací dodavatele by panel měl být schopný zastavit střelu i 1 cm od okraje. Dle zmíněné normy je panel testován vůči 6 střelám stejné munice, avšak by panel dle dostupných informací měl zastavit více než 6 střel. Tento panel je vyráběn ve tvaru SAPI, čímž může být lehce zhoršena mobilita, avšak tento „nedostatek“ je kompenzován větším pokrytím trupu. [36]



Obrázek 19 Balistický panel [vlastní]

Ve vestě jsou zabudovány vložky s měkkou balistikou, které jsou strategicky rozmístěny. Na čelní a zadní straně trupu se nacházejí velké vložky s měkkou balistikou (viz obrázek č. 20). Dále jsou vložky umístěny na ramenních popruzích a bočních stranách vesty (viz obrázek č. 21 a č. 22).



Obrázek 20 Vložka měkké balistiky na trup [vlastní]



Obrázek 21 Vložka měkké balistiky na boční straně vesty [vlastní]



Obrázek 22 Vložka měkké balistiky na boční straně vesty [vlastní]

Po otevření vložky měkké balistiky byl zjištěn nejen samotný materiál, ze kterého jsou jednotlivé vrstvy vyrobeny, ale také jejich specifické poskládání (viz obrázek č.23). Prvních 17 vrstev bylo zcela stejných, avšak 18. vrstva byla tlustší, oproti minulým. Následně další 4 vrstvy měkké balistiky byly tenké, a poslední vrstva z vložky byla tlustá. Po důkladnějším prozkoumání bylo zjištěno, že se jedná o aramidová vlákna.



Obrázek 23 Vrstvy měkké balistiky – tlustší (nalevo) a tenčí (napravo) [vlastní]

4.2 Navržení testovacích vzorků

Pro testování vlastností balistické vložky byly vybrány vložky z ramenní části. Rozměry vzorků jsou dány tak, aby byla manipulace vhodná se zařízením pro pádové zkoušky. Vzorek má na délku 63 mm a na šířku 88 mm. Vzorky byly z jednotlivých materiálů, které byly navrženy pro testování. Základním materiálem pro mechanické zkoušky byly jednotlivé vrstvy z měkké balistiky ramenního popruhu, které se skládaly z 21 tenkých aramidových vrstev a 2 tlustých aramidových vrstev. Pro další testování bylo vhodné odzkoušet tkaniny aramidu dvou typů, konkrétně typu STYLE 282 a STYLE 281. Dalším vhodným materiálem pro testování byla tkanina z uhlíkových vláken. Pro různorodost materiálů byl přidán k testování také polykarbonát Samsung Infino 3.

Následovala příprava všech testovaných vzorků, včetně různých kombinací všech materiálů. Z originálního balistického materiálů byly připraveny tyto vzorky, které byly podrobeny testování:

- 1× tenká aramidová vrstva,
- 5× tenká aramidová vrstva,
- 10× tenká aramidová vrstva,
- 1× tlustá aramidová vrstva,

- 5× tlustá aramidová vrstva,
- 1×23 originálně poskládaných aramidových vrstev.

Z materiálů, které byly uznány za vhodné otestovat, byly zhotoveny tyto zkoumané vzorky:

- 1× aramidová tkanina 282,
- 1× aramidová tkanina 281,
- 1× uhlíková tkanina,
- 5× aramidová tkanina 282,
- 5× aramidová tkanina 281,
- 5× uhlíková tkanina,
- kombinace materiálu v pořadí Aramid 282 / Uhlíkové vlákno / Aramid 281,
- 1× polykarbonát Samsung Infino 3,
- 3× Polykarbonát Samsung Infino 3.

Posledním návrhem pro testování byl složen kompozit ze všech testovaných materiálů, a to díky získaným datům z testování výše zmíněných materiálů. Mnou navržený kompozit se skládá:

- polykarbonát Samsung Infino 3,
- 5× tenká aramidová vrstva,
- 1× tlustá aramidová vrstva,
- 2× v kombinaci materiálů Aramid 282 / Uhlíkové vlákno / Aramid 281,
- 5× tenká aramidová vrstva,
- 1× tlustá aramidová vrstva.

Všechny materiály a také vytvořené kompozity byly testovány v laboratoři. Pro testování přímé střelbě na střelnici byly podrobeny pouze 3 vybrané vzorky. Mezi tyto vzorky byl zařazen vlastní navržený kompozit, originální kompozit z balistické vesty a vzorek ze 3 vrstev polykarbonátu. Všechny vzorky pro testování na střelnici byly v obalu, ve kterém byl dodán originální vzorek měkké balistiky.

4.3 Příprava navržených vzorků

K testování bylo nutné vytvořit testované vzorky, které byly tvořeny z měkké balistiky umístěné v ramenních popruzích. Rozměry testovacích vzorků byly zvoleny na délku 63 mm a 88 mm na šířku pro optimální manipulaci a testování se zařízením pro pádové zkoušky. Důležité pro testování bylo také změření tloušťky jedné vrstvy, kdy měření proběhlo na 5 různých pozicích vzorku pro všech 23 vrstev (viz tabulka č. 1), čímž se poté dokázala spočítat průměrná tloušťka vrstvy (viz tabulka č. 2). Následoval totožné měření pro zbytek testovaných vzorků (viz tabulka č. 3, tabulka č. 4).

Tabulka 1 Tloušťka jednotlivých vrstev

Číslo vrstvy	1. Měření	2. Měření	3. Měření	4. Měření	5. Měření
	Tloušťka vrstvy (mm)				
1.	0,189	0,186	0,189	0,183	0,191
2.	0,196	0,189	0,191	0,192	0,198
3.	0,191	0,194	0,195	0,192	0,194
4.	0,194	0,198	0,194	0,197	0,196
5.	0,192	0,188	0,190	0,189	0,191
6.	0,190	0,192	0,191	0,193	0,194
7.	0,187	0,196	0,195	0,197	0,199
8.	0,192	0,190	0,193	0,189	0,196
9.	0,197	0,199	0,194	0,190	0,192
10.	0,200	0,193	0,195	0,196	0,195
11.	0,196	0,195	0,197	0,193	0,196
12.	0,198	0,200	0,209	0,203	0,201
13.	0,196	0,194	0,201	0,195	0,188
14.	0,189	0,185	0,186	0,190	0,183
15.	0,200	0,201	0,210	0,199	0,193
16.	0,193	0,188	0,199	0,190	0,193
17.	0,196	0,193	0,186	0,182	0,198
18.	0,345	0,340	0,334	0,339	0,341
19.	0,187	0,180	0,189	0,184	0,187
20.	0,184	0,185	0,189	0,188	0,190
21.	0,190	0,189	0,184	0,190	0,184
22.	0,187	0,185	0,194	0,187	0,183
23.	0,332	0,329	0,330	0,331	0,335
Celková tloušťka (mm)	4,721	4,689	4,735	4,689	4,718

Tabulka 2 Průměrná tloušťka vrstvy

Číslo vrstvy	1. Měření	2. Měření	3. Měření	4. Měření	5. Měření	Průměrná hodnota tloušťky vrstvy (mm)
	Tloušťka vrstvy (mm)					
1.	0,189	0,186	0,189	0,183	0,191	0,188
2.	0,196	0,189	0,191	0,192	0,198	0,193
3.	0,191	0,194	0,195	0,192	0,194	0,193
4.	0,194	0,198	0,194	0,197	0,196	0,196
5.	0,192	0,188	0,190	0,189	0,191	0,190
6.	0,190	0,192	0,191	0,193	0,194	0,192
7.	0,187	0,196	0,195	0,197	0,199	0,195
8.	0,192	0,190	0,193	0,189	0,196	0,192
9.	0,197	0,199	0,194	0,190	0,192	0,194
10.	0,200	0,193	0,195	0,196	0,195	0,196
11.	0,196	0,195	0,197	0,193	0,196	0,195
12.	0,198	0,200	0,209	0,203	0,201	0,202
13.	0,196	0,194	0,201	0,195	0,188	0,195
14.	0,189	0,185	0,186	0,190	0,183	0,187
15.	0,200	0,201	0,210	0,199	0,193	0,201
16.	0,193	0,188	0,199	0,190	0,193	0,193
17.	0,196	0,193	0,186	0,182	0,198	0,191
18.	0,345	0,340	0,334	0,339	0,341	0,340
19.	0,187	0,180	0,189	0,184	0,187	0,185
20.	0,184	0,185	0,189	0,188	0,190	0,187
21.	0,190	0,189	0,184	0,190	0,184	0,187
22.	0,187	0,185	0,194	0,187	0,183	0,187
23.	0,332	0,329	0,330	0,331	0,335	0,331

Tabulka 3 Tloušťka testovacích tkanin

Označení	1. Měření	2. Měření	3. Měření	4. Měření	5. Měření
	Tloušťka vrstvy (mm)				
Karbonová tkanina	0,385	0,326	0,383	0,338	0,341
Aramidová tkanina 281	0,257	0,276	0,289	0,280	0,276
Aramidová tkanina 282	0,294	0,301	0,332	0,293	0,280
Celková tloušťka (mm)	0,936	0,903	1,004	0,911	0,897

Tabulka 4 Průměrná tloušťka jednoho plátu testovacích materiálů

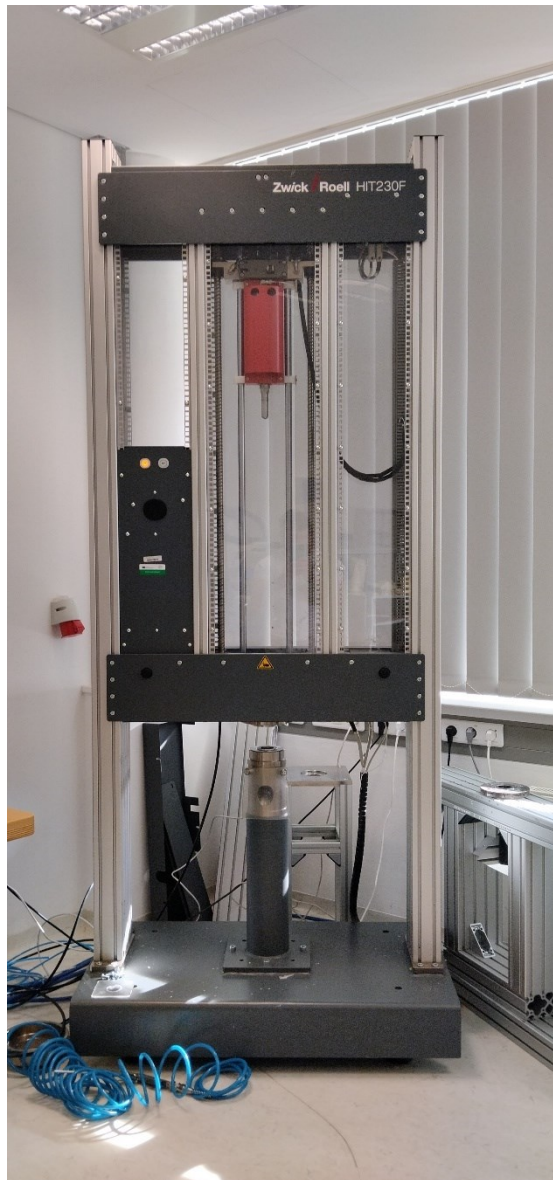
Označení	1. Měření	2. Měření	3. Měření	4. Měření	5. Měření	Průměrná hodnota tloušťky vrstvy (mm)
	Tloušťka vrstvy (mm)					
Karbonová tkanina	0,385	0,326	0,383	0,338	0,341	0,355
Aramidová tkanina 281	0,257	0,276	0,289	0,28	0,276	0,276
Aramidová tkanina 282	0,294	0,301	0,332	0,293	0,280	0,300

Při přípravě vzorků z navržených a dodaných materiálů byly tkaniny z obou stran polepeny transparentní kancelářskou páskou šířky 40 mm z důvodu, aby došlo k fixaci tkaniny při dělení a manipulaci.

K výrobě vzorků bylo využito několika následně jmenovaných nástrojů:

- mikrometr Mitutoyo s rozpětím 0 až 25 mm s přesností 0,001 mm,
- posuvné měřítko Extol Premium s přesností 0,01 mm,
- úhelník,
- pravítko.

5 PRŮBĚH TESTOVÁNÍ



Obrázek 24 Zařízení pro pádové zkoušky
[vlastní]

Pro testování balistické vložky vybrané balistické vesty byla zvolena metoda, kterou bylo možné provést v rámci laboratorního a technického vybavení. K vykonání testů bylo využito zařízení pro pádové zkoušky od značky Zwick Roell, model HIT230F. Toto zařízení bylo připojeno ke stolnímu počítači, na kterém byl spuštěn software textXpert II. Operace byly zaznamenány softwarem. Pro porovnání s vybranými laboratorními výsledky byla provedena střelba ze zbraně na vzdálenost 15 metrů s nábojem ráže 9 mm Luger. Zde je nutno podotknout, že při testování zmíněným zařízením nedochází k rotaci projektilu.

Vybrané vzorky byly postupně vkládány do zařízení pro pádové zkoušky a jeden po druhém testovány. Každý vzorek byl vložen na základnu zařízení a do příslušného softwaru byly zadány jeho rozměry – tloušťka a šířka. Dalším parametrem zadaným v softwaru byla výška, kterou vykonal tlouk se závažím. Rychlost pádu byla nastavena na 4,399 m/s. Hmotnost tlouku se závažím je 23,765 kg a funkční geometrie tlouku je polokoule o poloměru 10 mm.

Prvním testovaným vzorkem byla tenčí vrstva aramidů. Po vložení na základnu zařízení pro pádové zkoušky a došlo k aktivaci pádu tlouku. Po proražení vrstvy bylo zjištěno, že struktura plátu je poskládána vertikálními a horizontálními vlákny (viz obrázek č. 25). K proražení vzorku bylo potřeba 6,026 J.



Obrázek 25 Proražený samotný slabší aramidový plát [vlastní]

Dalším testovaným vzorkem byl 5 tenčích aramidových vrstev. U tohoto testovacího vzorku došlo k proražení, čímž byl tlouk zpomalen ze 4,391 m/s na 3,205 m/s, což je pokles rychlosti o 27,028 %. Energie potřebná k proražení vzorku byla 109,291 J. Na obrázku č. 26 lze vidět proražení tloukem a deformaci jednotlivých vrstev vzorku.



Obrázek 26 Proražený vzorek 5 slabších aramidových plátů [vlastní]

Následovalo testování 10 tenčích aramidových vrstev. Při tomto měření nedošlo k proražení vzorku, ale vzorek byl částečně zaražen tloučkem do otvoru základny, čímž byla způsobena deformace, kterou lze vidět včetně poškození jednotlivých vrstev na obrázku č. 27.



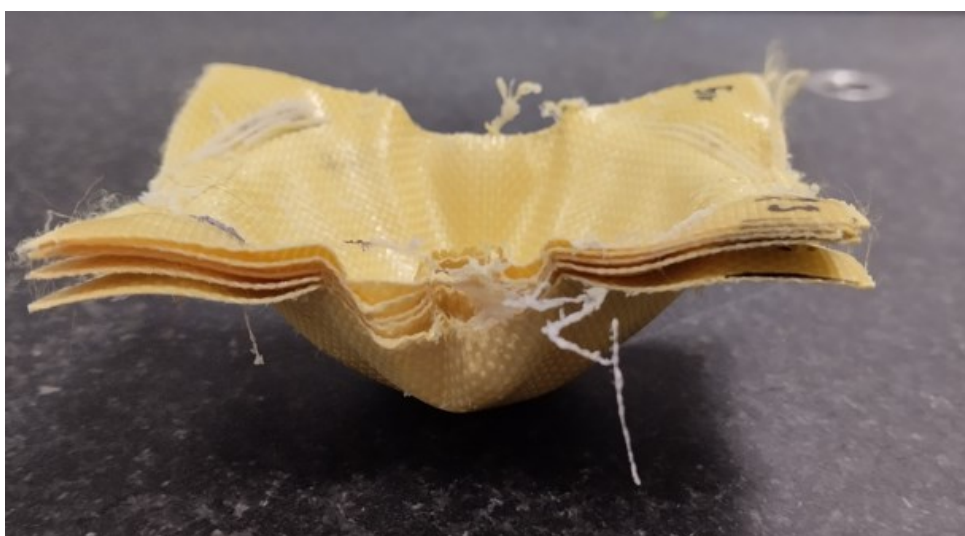
Obrázek 27 Vzorek 10 slabších aramidových plátů [vlastní]

Dalším testovaným vzorkem byla tlustá aramidová vrstva. Při testování samotné vrstvy došlo k tomu, že fixovací mechanismus zařízení nedokázal udržet vzorek při nárazu, tak došlo k zaražení vzorku do otvoru základny. Vrstva vykazuje známky poškození včetně viditelné deformace (viz obrázek č. 28).



Obrázek 28 Samostatný silný aramidový plát [vlastní]

Během testování 5 tlustých aramidových vrstev nedošlo k proražení vzorku, čímž došlo k úplnému zastavení tlouku. Poškození a deformaci vzorku lze vidět na obrázku č. 29.



Obrázek 29 Vzorek 5 silných aramidových plátů [vlastní]

Posledním vzorkem byla originální vložka měkké balistiky z ramenního popruhu balistické vesty. Jedná se tedy o vzorek s 21 tenkými a 2 tlustými aramidovými vrstvami. Během testování došlo k zaražení vzorku do otvoru základny zařízení. Poškození vzorku můžeme vidět na obrázku č. 30. Hlavní poškození nesou svrchní vrstvy a deformace je především na jedné straně vzorku, která byla způsobena právě zaražením do otvoru základny zařízení.



Obrázek 30 Originálně poskládaný vzorek [vlastní]

Následovalo testování vzorků z dodatečně navržených materiálů. Z navržených materiálů byl první samostatný vzorek aramidové tkaniny STYLE 282. Rychlost byla vzorkem snížena ze 4,391 m/s na 4,242 m/s, tedy rychlost byla snížena o 3,409 %. K proražení vzorku bylo potřeba 17,102 J. Na obrázku č. 31 lze vidět poškození vzorku, kdy jsou vlákna viditelně rozestoupěna od sebe. Vlákna nebyla viditelně potrhána.



Obrázek 31 Vzorek: samostatné aramidové vlákno [vlastní]

Dalším testovaným vzorkem je 5 vrstev aramidové tkaniny style 282. Při tomto testování vzorek dokázal snížit rychlost tlouku ze 4,393 m/s na 3,169 m/s. Na obrázku č. 32 lze vidět, že vzorek nebyl proražen, avšak byl zdeformován a svrchní vrstvy tkaniny byly poškozeny.



Obrázek 32 Vzorek 5 vrstev z aramidové tkaniny [vlastní]

Následně byl testován vzorek z aramidové tkaniny style 281. Rozdíl mezi tkaninami style 282 a style 281 je ve způsobu tkání. Tkaninu style 281 je oproti 282 hustěji tkaná. V testování jedné vrstvy vzorek dokázal zpomalit rychlost pádu ze 4,393 m/s na 4,281 m/s, tedy o 2,555 %. Potřebnou energii k průrazu vzorku 13,779 J. Na obrázku č. 33 lze vidět poškození a deformaci vláken.



Obrázek 33 Vzorek z jednoho plátu aramidové tkaniny style 281 [vlastní]

Výsledek testu vzorku z 5 vrstev aramidové tkaniny style 281, bylo snížení rychlosti ze 4,395 m/s na 3,233 m/s, což v přepočtu je pokles rychlosti o 26,437 %. Na obrázku lze vidět značnou deformaci vzorku včetně poškození svrchních vrstev vzorku.



Obrázek 34 Vzorek 5 vrstev aramidové tkaniny style 281 [vlastní]

Předposledním testovaným vzorkem byla vrstva uhlíkové tkaniny. K proražení vzorku bylo zapotřebí vyvinout 21,556 J. Zpomalení rychlosti bylo ze 4,391 m/s na 4,198 m/s, což činí v přepočtu pokles rychlosti o 4,398 %. Na obrázku č. 35 lze vidět proražení vzorku, kdy došlo k přetržení vláken.



Obrázek 35 Vzorek z uhlíkové tkaniny [vlastní]

Následující test vzorku složeného z 5 vrstev uhlíkové tkaniny dokázal zpomalit rychlost ze 4,394 m/s na 1,843m/s, kdy v procentuálním vyjádření je tento pokles rychlosti o 58,044 %. Energie, nutná k proražení vzorku byla 174,241 J. Na obrázku č. 36 je vidět, že vlákna byla přetrhána při dopadu.



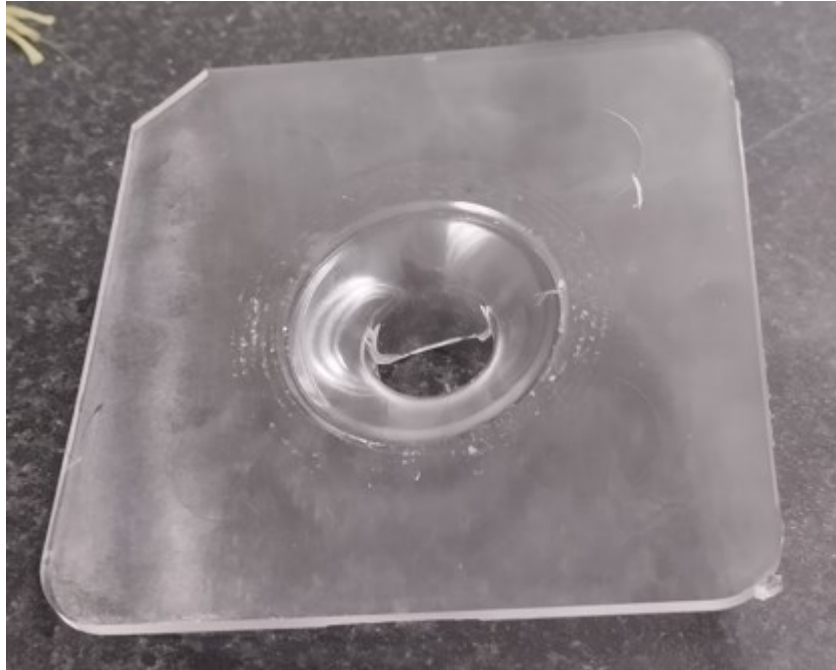
Obrázek 36 Vzorek z 5 vrstev uhlíkové tkaniny [vlastní]

Následující testovaný vzorek se skládal z kombinace tkanin aramidu a uhlíkové tkaniny. Na přiloženém obrázku č. 37 lze vidět, že vzorek nebyl zcela proražen. Došlo zde ke značnému poškození svrchních vrstev tkanin.



Obrázek 37 Vzorek z kombinace tkanin aramidu a uhlíkové tkaniny [vlastní]

Pro různorodost testovaných vzorků byly vytvořeny vzorky z polykarbonátu Samsung infino 3. Samostatný testovaný vzorek dokázal zpomalit rychlost ze 4,388 m/s na 3,077 m/s, pokles rychlosti byl o 29,885 %, kdy bylo potřeba k průrazu 101,572 J. Na obrázku č. 38 lze vidět průnik vzorkem.



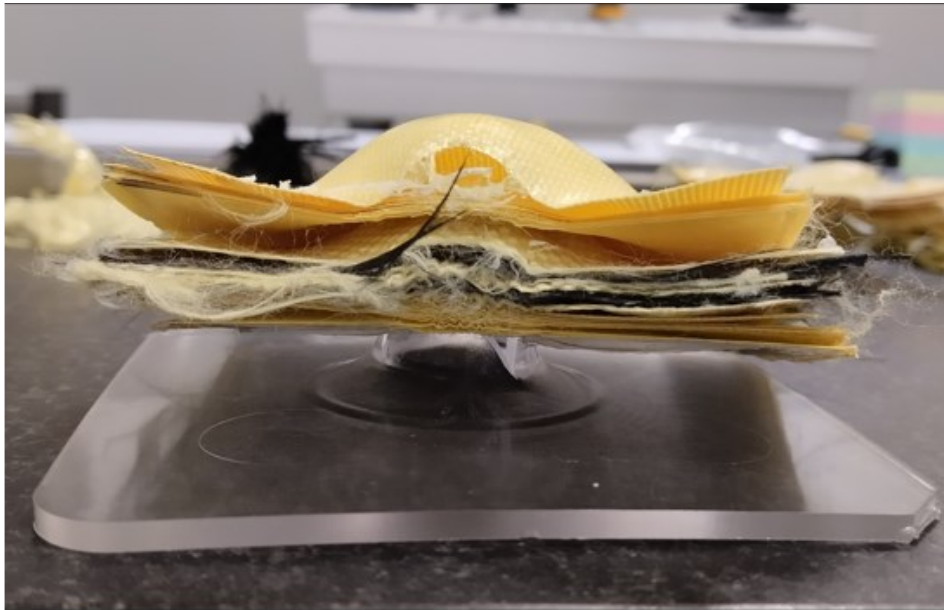
Obrázek 38 Vzorek z polykarbonátu [vlastní]

Následoval test vzorku ze 3 vrstev polykarbonátu. Takto poskládaný vzorek dokázal odolat nastavené energii průrazu 230 J bez průniku. Na obrázku č. 39 lze vidět poškození všech vrstev vzorku.



Obrázek 39 Vzorek ze 3 vrstev polykarbonátu [vlastní]

K poslednímu testování byl využit vlastní navržený vzorek. Vzorek byl poskládán dle získaných dat z předchozího testování vzorků. Takto navržený vzorek dokázal odolat průniku. Vzorek byl poškozen především ve svrchních vrstvách vzorku, jak lze pozorovat na obrázku č. 40. Také zde lze vidět průnik polykarbonátovou vrstvou včetně deformace zbylých vrstev.



Obrázek 40 Navržený vlastní kompozit [vlastní]

Pro porovnání mezi testováním se zařízením pro pádové zkoušky a střelbou z palné zbraně následoval test na střelnici, kde byly vybrány 3 vzorky. Tyto vzorky byly vloženy do vyrobeného „lapače“ střel, kde bylo možné upevnění vzorku, za který se pro zachování možného průrazu nebo průhybu vložila modelovací hmota. Zbraň byla volena, aby úst'ová rychlost byla obdobná častým zbraním jako je například Glock. Avšak dalším požadavkem pro volbu zbraně byl komfort střelby z důvodu velikosti vzorků. Proto tedy jako zvolená zbraň pro testování byla MP5A3 s náboji 9 mm Luger FMJ 124grs.



Obrázek 41 „Lapač“ střel s testovým vzorkem [vlastní]

Jako první testovaný vzorek na střelnici byla originální vložka z ramenního popruhu z dodané balistické vesty. Na obrázcích č. 42 a č. 43 lze vidět, že projektil vystřelený z palné zbraně nezpůsobil průstřel vzorkem. Také lze vidět, že vzorek byl energií střely vtačen do modelovací hmoty.



Obrázek 42 Originální kompozit – pohled z profilu [vlastní]



Obrázek 43 Originální kompozit – pohled ze zadní hmoty [vlastní]

Druhý testovaný vzorek na střelnici byl vlastně navržený kompozit. Na obrázcích č. 44 a č. 45 lze vidět zastavení střely a následky rotace projektilu. Vzorek byl energií střely vtlačen do modelovací hmoty.



Obrázek 44 Navržený kompozit – pohled z profilu [vlastní]



Obrázek 45 Navržený kompozit – pohled ze zadní strany hmoty [vlastní]

Poslední testování se týkalo vzorku složeného z tří vrstev polykarbonátu. Došlo k průstřelu střelou testovaným vzorkem, přičemž byla také vážně poškozena modelovací hmota. Na obrázcích č. 46 a č. 47 lze vidět poškození a průnik střely vzorkem včetně střepin polykarbonátu zaseknuté v hmotě z důvodu průstřelu.



Obrázek 46 Vzorek z polykarbonátu – poškození hmoty [vlastní] Obrázek 47 Vzorek z polykarbonátu – průstřel [vlastní]

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE

U statického vyhodnocení daného zkoumání je důležité zjištění potřebných základních údajů. Mezi tyto údaje se řadí hlavně jejich atributy, které vyžadujeme a zajímají nás. Zpravidla máme k dispozici značný počet atributů, čímž by bylo jejich zpracování velmi časově náročné a pracné. [37]

V práci bylo využito statistického vyhodnocení za pomoci aritmetického průměru při výpočtu průměrné tloušťky jednotlivých vrstev.

V tabulce níže (viz tabulka č. 5) byly využity vypsané atributy. Prvním atributem byl počet vrstev testovaných vzorků vyjádřený v kusech. Tento atribut byl využit pro přímou úměru s pohlcenou energií zpomalení dopadu. Dalším vyžadovaným atributem byla tloušťka vzorků, v jednotkách milimetrů, která byla taktéž důležitá pro stanovení statistického vyhodnocení. Následujícím atributem získaným z testování byla maximální působící síla (F_{\max}), v Newtonech, kterou byl měl vzorek schopný unést. Dalším důležitým atributem byla rychlost, a to počáteční (V_{begin}) a konečná (V_{end}), v metrech za sekundu. Tento atribut je nezbytnou skutečností pro představu účinnosti materiálu z pohledu poklesu rychlosti. Dalším atributem je pokles rychlosti vyjádřen v procentech. Atribut využívá dvou předchozích atributů a zajišťuje lepší vizualizaci procesu zpomalení. Posledním zvoleným atributem je energie potřebná pro proražení vzorků (E_p), v Joulech.

Za pomoci tabulky lze například vyčíst tato data: testovaným vzorkem byl originální vzorek měkké balistiky, kdy byl složen ze 23 vrstev o celkové tloušťce 4,725 mm. Takto sestavený vzorek je schopen odolat síle až 16 101,327 N. Při počáteční rychlosti 4,395 m/s dokázal vzorek zcela zastavit tlouk se závažím.

Z vykonaného testování lze konstatovat, že je potřebné si uvědomit rozdíl mezi testováním v laboratoři a testováním pomocí střelných zbraní. V laboratoři probíhalo testování pomocí zařízení pro pádové zkoušky, kde tlouk zařízení má větší údernou plochu oproti střele, taktéž nedochází zde k rotaci tlouku a rychlost pádu byla mnohem nižší. Pro porovnání, v laboratoři byla průměrná rychlost kolem 4,4 m/s, kdežto při střelbě ze zvolené zbraně byla rychlost kolem 400 m/s.

Na základě laboratorního testování jsem však dokázal sestavit kompozit z testovaných materiálů, který dokázal zabránit průniku při laboratorním testování, tak i průstřelu při testování střelnou zbraní.

Tabulka 5 Statistické vyhodnocení vzorků

Označení vzorku	Počet vrstev (ks)	Tloušťka (mm)	F_{\max} (N)	V_{begin} (m/s)	V_{end} (m/s)	Pokles rychlosti (%)	E_p (J)
Tenká aramidová vrstva	1	0,190	518,731	4,392	4,393	0,000	6,026
Tenká aramidová vrstva	5	0,932	4200,038	4,392	3,205	27,028	109,291
Tenká aramidová vrstva	10	1,886	6224,445	4,393	3,304	24,796	88,189
Tenká aramidová vrstva	1	0,332	6055,617	4,394	2,681	38,974	139,243
Tenká aramidová vrstva	5	1,619	12165,586	4,392	0,000	100,000	230,000
Originální vzorek	23	4,725	16101,327	4,395	0,000	100,000	160,105
Aramid 281	1	0,297	1393,523	4,393	4,281	2,555	13,779
Aramid 281	5	1,469	5903,325	4,395	3,233	26,437	101,177
Aramid 282	1	0,285	1721,378	4,392	4,242	3,409	17,102
Aramid 282	5	1,585	5886,303	4,393	3,169	27,868	90,491
Uhlíkové vlákno	1	0,356	1866,410	4,391	4,198	4,398	21,556
Uhlíkové vlákno	5	1,930	6868,697	4,394	1,843	58,044	174,241
Kombinace A2 + U + A1	3	0,958	5089,698	4,393	3,166	27,931	95,523
polykarbonát Samsung	1	3,090	8414,058	4,388	3,077	29,885	101,572
polykarbonát Samsung	3	9,230	20176,291	4,387	0,000	100,000	229,934
Navržený kompozit	19	7,400	19501,902	4,392	0,000	100,000	206,139

ZÁVĚR

Bakalářská práce se věnovala oblasti balistické ochrany se zaměřením na balistickou vestu včetně balistického panelu. V teoretické části, která je rozdělena do několika kapitol, byla zhotovena rešerše týkající se nejen balistické ochrany, ale také samotné vědní disciplíny zvané balistika. V této kapitole se čtenář dozvěděl, že se balistika zabývá všemi fyzikálními ději od samotného výstřelu až po dopad na cíl, s tím, že každá ze 4 druhů balistiky řeší jinou časovou osu průběhu výstřelu až po dopad střely.

Druhá kapitola rozebírá všeobecné informace týkající se balistické vesty, možnosti výskytu, kde se balistická vesta a celkově balistická ochrana využívá včetně prvopočátku celkového vývoje balistických vest. Dále se zde píše o dělení balistických vest, a to konkrétně, že existuje měkká balistika, tvrdá balistika a kombinovaná balistika, která je tvořena jak z měkké balistiky, tak tvrdé. Také je zde psáno, že balistická vesta může být doplněna anti šokovou vložkou, která zmírňuje následky střelného zásahu. Samozřejmě se zde nesmí zapomínat na normy týkající se balistické ochrany, kdy zde byly zmíněny tři různé normy používající se ve světě. Určitě zajímavou informací je, že jedna z norem má původ v České republice. Normy stanovují požadavky na odolnosti balistických vest a doplňků balistické ochrany při testování.

V třetí kapitole je rozebrán výrobní materiál, který byl a je využíván pro výrobu balistických vest, že vesty jsou vyráběny hlavně z kompozitu, ne ze samostatných materiálů. Dále jsou zde popsány použití nejen tradičních vláken, ale hlavně z rozsáhle palety syntetických vláken, které se nevyužívají jen v oblasti balistické ochrany, ale mají široké spektrum oblastí využití. Poslední podkapitola je věnována kompozitu, jak se vyrábí a proč je kompozit nezbytný pro výrobu balistických vest.

Ve čtvrté kapitole se práce překlápí z teoretické části do praktické, přičemž začátek je věnován samotnému výběru balistické vesty a plátu, včetně poukázání na nabídku trhu v oblasti balistických vest a plátů. V podkapitolách je rozebrána dodaná balistická vesta a panel včetně fotodokumentace, kdy bylo nutné se s vestou a jejím složením seznámit. Díky tomu bylo možné zjistit, že ve vestě jsou strategicky rozmístěny vložky s měkkou balistikou, a to pro oblast trupu, ramen a boků. Balistický panel byl vložen pro dodatečnou ochranu trupu na přední straně vesty. Předposlední a poslední podkapitola je věnována návrhům vzorků pro testování z dodané balistické vesty, na kterou se při testování zaměřilo. Testování bylo zaměřeno na měkkou balistiku, nikoliv tvrdou. Ve zmíněných podkapitolách se dále lze

dočíst, které atributy byly sbírány a zapisovány, jaké rozměry byly dány pro vzorky a celkový seznam testovaných vzorků včetně dodatečných informací.

Předposlední kapitola bakalářské práce je věnována celkovému postupu při testování, kdy jsou rozepsány jednotlivé testy, které proběhly v laboratoři na zařízení pro pádové zkoušky. Nechybí zde dodaná fotodokumentace jednotlivých vzorků po absolvování testů, zjištěné požadované atributy jako pokles rychlosti způsobeným vzorkem nebo procentuální vyhodnocení poklesu rychlosti u daného vzorku.

Poslední kapitola bakalářské práce se zabývá samotným vyhodnocením navrženého a provedeného testování, kde nechybí tabulka se všemi testovanými vzorky včetně požadovaných atributů. Dále je zde rozepsán úspěšný test pro návrh vlastního kompozitu z dodaných testovaných materiálů, přičemž k tomuto návrhu právě bylo nutné zjistit požadované atributy. Je zde také diskuse zabývající se rozdíly mezi testováním pomocí zařízení pro pádové zkoušky oproti střelbě z palné zbraně. Avšak je nutné napsat, že díky zjištěným poznatkům a testům ze zařízení pro pádové zkoušky byl úspěšně složen vlastní kompozit, který střelbě z palné zbraně dokázal odolat a střelu zastavit. Závěrem celé práce lze konstatovat, že cíle práce byly splněny v plném rozsahu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Střelecká příprava – Základy balistiky. Inovace SEBS a ASEBS [online]. Česká republika: Fakulta sportovních studií Masarykovy univerzity, 2013 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.fsps.muni.cz/inovace-SEBS-ASEBS/elearning/strelba/balistika>
- [2] MULAT ALUBEL, Abteu, François BOUSSU, Carmen LOGHIN a Irina CRISTIAN. Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses: Composite structures. Vol. 223. Francie: University of Lille, Nord de France, 2019. ISSN 0263-8223.
- [3] PLÍHAL, Bohumil. Balistická ochrana. Brno: Univerzita obrany, 2012. ISBN 978-80-7231-862-9.
- [4] CHEN, X. Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection. No. 66. Nizozemsko: Elsevier, © 2016. ISBN 978-1-78242-484-0.
- [5] The History of the Bulletproof Vest. BulletSafe Bulletproof Vests [online]. USA: BulletSafe Bulletproof Vests, © 2022 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://bulletSAFE.com/pages/the-history-of-bulletproof-vests>
- [6] Bullet Proof Vests: Then and Now. BulletProof Zone [online]. Honolulu: BulletProof Zone, © 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://bulletproofzone.com/blogs/bullet-proof-blog/bulletproof-vests-then-and-now>
- [7] GUIDE BODY ARMOR: Selection & Application Guide 0101.06 to Ballistic-Resistant Body Armor. 2. USA: National Institute of Justice, 2014. ISBN NCJ 247281.
- [8] ARDOS. ARGUN [online]. Česká republika: ARGUN, © 2021 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: https://argunshop.cz/cs/balisticke-vesty/158-2744-ardos.html#/19-barvy-cerna/28-velikost-xs/37-balistika-bez_balistiky
- [9] KOMPLETNÍ SET NOSIČE PLÁTŮ S BALISTICKOU OCHRANOU (VLOŽKY IIIA NIJ / III+ NIJ), VELIKOST L, 4M. ARMED [online]. Česká republika: ARMED STORE, © 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.armed.cz/kompletni-set-nosic-s-mekkou-balisticickou-vlozkou-iiia-a-panely-iii-s-taskou-velikost-l/>

- [10] BALISTICKÁ OCHRANA NORMA PRO KLASIFIKACI ODOLNOSTI. Military team Diverzanti [online]. Česká republika: Diverzanti®, b.r. [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: https://www.diverzanti.cz/cl_085e#zobraz3
- [11] MESSIRY, M. 2020. Protective armor engineering design. Palm Bay, Florida: Apple Academic Press. ISBN 9781771887878
- [12] BALISTICKÁ OCHRANA KONSTRUKCE A TYPY BALISTICKÝCH VEST. Military team Diverzanti [online]. Česká republika: DIVERZANTI®, © 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: https://www.diverzanti.cz/cl_085g
- [13] Balistická odolnost. Český úřad pro zkoušení zbraní a střeliva [online]. Česká republika: Český úřad pro zkoušení zbraní a střeliva, © 2013 - 2022 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.cuzzs.cz/cs/balisticka-odolnost/>
- [14] ČSN 39 5360 (395360) Zkoušky odolnosti ochranných prostředků – Zkoušky odolnosti proti střelám, střepinám a bodným zbraním – Technické požadavky a zkoušky. TECHNOR – Technické normy ČSN [online]. Česká republika: Český úřad pro zkoušení zbraní a střeliva, 2018 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-39-5360-395360-201505.html#description>
- [15] ČSN 39 5360 (395360). Zkoušky odolnosti ochranných prostředků – Zkoušky odolnosti proti střelám, střepinám a bodným zbraním - Technické požadavky a zkoušky. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [16] Ballistic Resistance of Personal Body Armor. NIJ - National Institute of Justice [online]. USA: National Institute of Justice, 2000 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://nij.ojp.gov/library/publications/ballistic-resistance-personal-body-armor-nij-standard-010104>
- [17] Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06. NIJ - National Institute of Justice [online]. USA: National Institute of Justice, 2008 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://nij.ojp.gov/library/publications/ballistic-resistance-body-armor-nij-standard-010106>

- [18] NIJ BODY ARMOR STANDARD. ENGARDE [online]. Netherlands: EnGarde body armor, © 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.engardebodyarmor.com/nij-body-armor-standard/>
- [19] STANAG 2920 Protection Levels. Intelligent Armour [online]. England & Wales: Intelligent Armour Limited, © 2009-2023 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <http://www.body-armor-protection.co.uk/stanag-protection-levels.html>
- [20] STANAG 2920. Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing. Belgie: North Atlantic Treaty Organization - NATO, 2015.
- [21] What's the Difference Between Carbon Fiber and Kevlar® ?. Tricel Composites [online]. West Yorkshire: Tricel Composites (GB), 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.tricelcomposites.co.uk/blog-carbon-fibre-vs-kevlar/>
- [22] Body armor UHMWPE ballistic fibre. TYZ [online]. China: Beijing tongyizhong New Material Tecchnology Corporation, 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <http://uhmwpefiber.com/2-3-body-armor-uhmwpe-ballistic-fabric/>
- [23] Tessuto di Carbonio-Zylon taffetà. Castro Composites [online]. España: Resinas Castro S. L., 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.castrocompositesshop.com/it/rinforzo-in-fibre-di/2663-tessuto-di-carbonio-zylon-taffeta-180-gm2.html>
- [24] Plain Weave Double Sided 22.5gsm E Glass Fabric. ShunYuan [online]. China: Jiangsu Shunyuan Glass fiber fabric Co., © 2020–2021 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.glassfibrefabric.com/sale-13120230-plain-weave-double-sided-22-5gsm-e-glass-fabric.html>
- [25] The different glass fiber types. (A) CSM and (B) woven. ResearchGate [online]. Germany: ResearchGate, 2018 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/The-different-glass-fiber-types-A-CSM-and-B-woven_fig3_326360652
- [26] Ceramic Fiber Cloth. RongSheng Group [online]. China: ZHENGZHOU RONGSHENG REFRACTORY CO., © 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.rsrefractorygroup.com/ceramic-fiber-cloth-for-sale/>
- [27] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.

- [28] STUPAR, Stevan. Smart and Advanced Ceramic Materials and Applications. Ed. UK: IntechOpen, 2022. ISBN 978-1-80355-865-3. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.102524
- [29] WHAT IS CARBON FIBER?. DragonPlate [online]. USA: DragonPlate, © 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://dragonplate.com/what-is-carbon-fiber>
- [30] The future of ballistic protection is here. Australian Government Defence [online]. Canberra - Austrálie: Australian Government Defence, 2021 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.defence.gov.au/news-events/news/2021-11-17/future-ballistic-protection-here>
- [31] THE FUTURE OF BODY ARMOR AS WE SEE IT IN 2022. ACE LINK ARMOR [online]. Kalifornie: © 2020 ACE LINK ARMOR, 2022 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://acelinkarmor.com/the-future-of-body-armor/>
- [32] Microscopic mesh could be the key to lighter, stronger body armor. Popular Science [online]. US: © 2023 Recurrent, 2021 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.popsci.com/technology/nanoarchitecture-could-create-stronger-armor/>
- [33] ARGUN [online]. Česká republika: ARGUN™, © 2021 [cit. 2023-05-31]. Dostupné z: <https://argunshop.cz/7-balisticke-vesty>
- [34] ARGUN [online]. Česká republika: ARGUN™, © 2021 [cit. 2023-05-31]. Dostupné z: <https://argunshop.cz/13-balisticke-panely>
- [35] SIGYN. ARGUN [online]. Česká republika: ARGUN™, © 2021 [cit. 2023-05-31]. Dostupné z: https://argunshop.cz/balisticke-vesty/157-2850-sigyn.html#/19-barvy-cerna/29-velikost-s/40-balistika-povlak_s_armax_su
- [36] PANEL ICW III+ SAPI LBP24. ARGUN [online]. Česká republika: ARGUN™, © 2021 [cit. 2023-05-31]. Dostupné z: <https://argunshop.cz/balisticke-panely/296-18610-panel-icw-iii-sapi-lbp24.html#/19-barvy-cerna>
- [37] KUBANOVÁ, J. 2004 Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi. Bratislava: STATIS. ISBN 80-85659-37-9

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm Milimetr

ČSN Česká technická norma

NIJ National Institute of Justice

STD Standard

CSM Chopped strand matin – řezaná matice vlákna

ČR Česká republika

m/s Metr za sekundu

PC Personal computer

m Metr

J Joule

kg Kilogram

N Newton

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Historická balistická ochrana [6].....	15
Obrázek 2 Balistická vesta ARDOS [8]	17
Obrázek 3 Set nosiče plátů [9].....	18
Obrázek 4 Balistické pláty pro nosič plátů [9]	18
Obrázek 5 Kombinovaná balistická ochrana [12].....	20
Obrázek 6 Technické požadavky dle normy ČSN 39 5360 [15]	22
Obrázek 7 Tabulka technických požadavků dle normy NIJ 0101.04 [18]	23
Obrázek 8 Tabulka technických požadavků dle normy NIJ 0101.06 [18]	24
Obrázek 9 Balistický materiál Kevlar [21]	28
Obrázek 10 Balistický materiál polyetylenová vlákna s ultra vysokou molekulární hmotností [22].....	29
Obrázek 11 Balistický materiál Zylon [23]	30
Obrázek 12 Balistický materiál skelná vlákna typu E-sklo [24]	32
Obrázek 13 Typy skleněných vláken - (A) CSM a (B) tkaná [25].....	32
Obrázek 14 Druhy karbonového pletení jako balistického materiálu [29].....	33
Obrázek 15 Balistický materiál – keramické vlákno tkané [26].....	33
Obrázek 16 Karbonový balistický materiál vyztužující stabilní epoxidovou maticí [29]...	34
Obrázek 17 Čelní strana balistické vesty [vlastní].....	38
Obrázek 18 Zadní strana balistické vesty [vlastní].....	39
Obrázek 19 Balistický panel [vlastní].....	40
Obrázek 20 Vložka měkké balistiky na trup [vlastní]	40
Obrázek 21 Vložka měkké balistiky na boční straně vesty [vlastní]	41
Obrázek 22 Vložka měkké balistiky na boční straně vesty [vlastní]	41
Obrázek 23 Vrstvy měkké balistiky – tlustší (nalevo) a tenčí (napravo) [vlastní]	42
Obrázek 24 Zařízení pro pádové zkoušky [vlastní]	47
Obrázek 25 Proražený samotný slabší aramidový plát [vlastní].....	48
Obrázek 26 Proražený vzorek 5 slabších aramidových plátů [vlastní].....	49
Obrázek 27 Vzorek 10 slabších aramidových plátů [vlastní]	49
Obrázek 28 Samostatný silný aramidový plát [vlastní]	50
Obrázek 29 Vzorek 5 silných aramidových plátů [vlastní]	50
Obrázek 30 Originálně poskládaný vzorek [vlastní]	51
Obrázek 31 Vzorek: samostatné aramidové vlákno [vlastní]	51
Obrázek 32 Vzorek 5 vrstev z aramidové tkaniny [vlastní]	52
Obrázek 33 Vzorek z jednoho plátu aramidové tkaniny style 281 [vlastní].....	52

Obrázek 34 Vzorek 5 vrstev aramidové tkaniny style 281 [vlastní].....	53
Obrázek 35 Vzorek z uhlíkové tkaniny [vlastní]	53
Obrázek 36 Vzorek z 5 vrstev uhlíkové tkaniny [vlastní]	54
Obrázek 37 Vzorek z kombinace tkanin aramidu a uhlíkové tkaniny [vlastní].....	54
Obrázek 38 Vzorek z polykarbonátu [vlastní]	55
Obrázek 39 Vzorek ze 3 vrstev polykarbonátu [vlastní]	55
Obrázek 40 Navržený vlastní kompozit [vlastní]	56
Obrázek 41 „Lapač“ střel s testovaným vzorkem [vlastní]	57
Obrázek 42 Originální kompozit – pohled z profilu [vlastní]	57
Obrázek 43 Originální kompozit – pohled ze zadní hmoty [vlastní].....	57
Obrázek 44 Navržený kompozit – pohled z profilu [vlastní]	58
Obrázek 45 Navržený kompozit – pohled ze zadní strany hmoty [vlastní].....	58
Obrázek 46 Vzorek z polykarbonátu – poškození hmoty [vlastní]	59
Obrázek 47 Vzorek z polykarbonátu – průstřel [vlastní].....	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Tloušťka jednotlivých vrstev	44
Tabulka 2 Průměrná tloušťka vrstvy.....	45
Tabulka 3 Tloušťka testovacích tkanin.....	45
Tabulka 4 Průměrná tloušťka jednoho plátu testovacích materiálů.....	46
Tabulka 5 Statistické vyhodnocení vzorků	61