

Speciální polymery se zaměřením na balistickou ochranu

Štěpán Chlachula

Bakalářská práce

2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Štěpán Chlachula**
Osobní číslo: **T13294**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Polymerní materiály a technologie**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Speciální polymery se zaměřením na balistickou ochranu**

Zásady pro vypracování:

Vypracujte rešeršní bakalářskou práci na zadané téma, s využitím doporučené literatury v rozsahu zadaném vedoucím práce. V práci se zaměřte na speciální polymery, jejich vlastnosti, výrobu a aplikace těchto polymerů v oblasti balistické ochrany jak osob, tak vozidel.



Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. L. H. SPERLING: Introduction to Physical Polymer Science. 3rd. edition, Wiley-Interscience, 2001. 671 s. ISBN 0-471-32921-5 2. Carreher, Charles E., Introduction to Polymer Chemistry, Boca Raton, 2007, 503 s., ISBN 9780849370472 3. P.R.LEWIS: High-performance polymer fibres, Rapra Technology LTD., 1999, 111 s., ISSN-0889-3114 4

Dostupná databáze vědeckých článků. Odborná literatura. Volně dostupné internetové zdroje. a databáze vědeckých článků.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kalous**
Ústav inženýrství polymerů


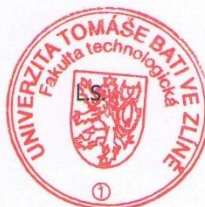
Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 1. března 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Chlachula Štěpán

Obor: PH

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/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 ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/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 diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/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.

Ve Zlíně 19.5.2016

Chlachula

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Seznámení s problematikou balistické ochrany, její historii, vhodné materiály, mechanismy zneškodnění střely a selhání vlákna, zpracuji také rozdělení druhů ochranné výstroje, jejich hodnocení a budoucí materiály pro balistickou ochranu.

Klíčová slova: balistická, ochrana, vlákno, kevlar, vesta, helma,

ABSTRACT

Introduction to the issue of ballistic protection, its history, suitable materials, mechanism of destruction of missiles and fiber failure, I also process different kinds of protective gear, their evaluation and future materials for ballistic protection

Keywords: ballistics, protection, fiber, kevlar, vest, helmet

Rád bych poděkoval panu Ing. Jiřímu Kalousovi, vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné vedení a rady, které mi v průběhu zpracování bakalářské práce poskytoval. Také bych chtěl poděkovat rodině a přítelkyni za klidné prostředí v průběhu studia a podporu.

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

V Uh. Hradišti dne

.....

Podpis

Obsah

ÚVOD.....	10
1 HISTORIE.....	11
2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY OCHRANY.....	13
2.1 MECHANIKA	13
2.2 POKRYTÍ	13
2.3 STŘELY S TRVALÝMI NÁSLEDKY	14
2.4 HROZBY A TESTOVÁNÍ	15
2.5 MECHANISMUS ZNEŠKODNĚNÍ PROJEKTILU.....	17
2.5.1 MECHANISMUS SELHÁNÍ VLÁKNITÝCH MATERIÁLŮ	19
3 VÝBĚR MATERIÁLU.....	21
3.1 VÝBĚR MATERIÁLU	21
3.1.1 NYLON 66	22
3.1.2 ARAMIDY	22
3.1.3 POLYETYLEN S ULTRA VYSOKOU MOLEKULÁRNÍ HMOTNOSTÍ (UHMWPE).....	23
3.1.4 SILIKÁTY	24
3.2 VLIV STRUKTURY PŘÍZE NA BALISTICKOU OCHRANU	24
3.3 DESIGN TKANIN PRO BALISTICKOU OCHRANU	24
3.4 POVRCHOVÉ ÚPRAVY PRO BALISTICKOU OCHRANU.....	25
4 NAVRHOVÁNÍ BALISTICKÉHO OCHRANNÉHO ODĚVU	26
4.1 LEHKÁ BALISTICKÁ OCHRANA.....	26
4.2 TĚŽKÁ BALISTICKÁ OCHRANA	26
5 HODNOCENÍ VÝKONOSTI.....	29
5.1 BALISTICKÁ OCHRANA	29
5.2 ÚČINNÁ VÁHA	30

6 DRUHY OCHRANNÉ VÝSTROJE	31
6.1 BOJOVÉ PŘILBY	31
6.2 BALISTICKÁ OCHRANA TRUPU	32
6.3 OCHRANA PŘI ZNEŠKODŇOVÁNÍ BOMB (EOD)	34
6.4 OCHRANA TRUPU PROTI NOŽŮM.....	35
7 SPECIFIKACE BALISTICKÉ ODOLNOSTI PODLE ČSN 39 5360	37
8 BUDOUCÍ MATERIÁLY BALISTICKÉ OCHRANY	38
8.1 PAVOUČÍ VLÁKNO	38
8.2 KAPALNÁ BALISTICKÁ OCHRANA	38
8.2.1 SMYKEM ZHUŠTĚNÁ TEKUTINA (STF).....	38
8.2.2 MAGNETOREOLOGICKÁ KAPALINA (MR)	40
ZÁVĚR:	43
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	44
SEZNAM OBRÁZKŮ:.....	46
SEZNAM TABULEK.....	47

ÚVOD

Balistická ochrana se zabývá ochrannými prostředky na ochranu osob nebo vozidel před střelami a kovovými střepinami z ručních zbraní a výbušné munice. Použití balistické ochrany za účelem ochrany osob má dlouhou historii a datuje se do přelomu 19 a 20 století. Vzhledem k vynálezu nových zbraní v průběhu let se hledal také nový způsob, jak se proti těmto zbraním chránit. Seznam materiálů, které se používají, zahrnuje jak tradiční (hliník, ocel), tak méně tradiční (kůže a hedvábí). Nejvhodnější způsob ochrany lidského těla v minulosti proti všem druhům průniku bylo použití tuhých materiálů, které odolávaly penetraci a rozptýlily zátěž dopadu střely. S příchodem syntetických materiálů byly vyvinuty lepší ochranné systémy. Ačkoli základní myšlenka rozptýlení zátěže střely na větší plochu je stále aplikována, je lepší absorbovat energii nárazu deformací a rozbitím ochranného materiálu. Nylon, který má velkou houževnatost, byl považován za ideální materiál pro tyto účely. Postupem času začalo být ale jasné, že vysoká houževnatost není jedinou podmínkou pro vhodný materiál na balistickou ochranu. Později, díky faktu, že proces balistické ochrany je komplexní jev zahrnující šíření příčné rychlosti a tažných vlastností, se začaly používat aramidy a v posledních letech vlákna z polyetyleny s ultra vysokou molekulární hmotností (UHMWPE) vyráběné zvlákněním z gelu, které vykazovaly zvětšenou aplikaci v systémech pro balistickou ochranu. S dnešními trendy směřujícími k ekologii a přírodním produktům pro všelijaké aplikace, dostávají v tomto oboru velký význam pavoučí vlákna. Pavoučí vlákno získávané z pavouka Černá vdova, žijícího pouze v Jižní Americe, má výjimečné vlastnosti jako například prodloužení při přetrhu až 270% a pevnost vyšší než vlákna Kevlaru. (1,7)

1 HISTORIE

V průběhu historie se lidé chránili proti zranění různými typy materiálů. Nejdříve používali zvířecí kůže jako ochranu proti zraněním a útokům. Jak se útočné zbraně vyvíjely, lidé přidali dřevěné a kovové štíty do jejich obranných nástrojů.

V 15. století se Italská a Římská vrchnost zaobírala myšlenkou neprůstřelných vest, když vyrobila tělovou balistickou ochranu s vrstvami kovu, které byly určeny k odrážení střel. Venkovní vrstva byla navržena na absorpci nárazu střely, zatímco vnitřní vrstva byla přidána pro zastavení následující penetrace. Kovová balistická ochrana byla však velmi neefektivní proti střelným zbraním.

V 18. století Japonci vytvořili lehčí balistickou ochranu, a to z hedvábí. Tyto hedvábné oděvy dokázaly, že jsou velmi efektivní, ale také velmi drahé. Po vraždě presidenta McKinleyho v roce 1901, také Americká armáda zkoumala použití lehké balistické ochrany. Hedvábné oděvy se ukázaly být odolné proti střelám s malými rychlostmi, ale ne proti nové generaci ručních zbraní. Díky tomu a díky vysoké ceně se Americká armáda rozhodla tuto balistickou ochranu nepoužívat.

Během 2. Světové války byla vynalezena protistřepinová vesta tzv. flak jacket. Byl to první náznak moderní neprůstřelné vesty. Skládala se ze dvou konstrukčních materiálů, byl to nově vynalezený nylon a kovové destičky. Destiček, hlavního ochranného prvku vest bylo mnoho, což se odrazilo ve vysoké hmotnosti. Vesta chránila trup a podbřišek a byla doplňována ocelovou přilbou. Přestože byly tyto vesty značně nedokonalé, jejich nasazení je hodnoceno jednoznačně jako vhodné a úspěšné.

V 60. letech byla objevena nová vlákna, díky kterým byla výroba opravdu neprůstřelné vesty možná. Na začátku 70. let firma DuPont vynalezla tkaninu Kevlar. Tkanina měla původně nahradit ocelové kordy a patní lanka v pneumatikách a byla extrémně pevná. Ke Kevlaru byla přidána hydroizolace a další vrstvy tkaniny, aby byla vesta více odolná a nositelná. Mezinárodní institut spravedlnosti testoval různé verze Kevlarových vest po několik let a zjistil, že vesta může zastavit většinu běžných olověných střel.

Finální fáze testování monitorovala efektivitu Kevlarových vest. Při testování byla zjištěna 95% šance na přežití po zasažení střelou ráže 0.38 při rychlosti 244 m/s. Pravděpodobnost operačního zákroku po zásahu projektilem byla méně než 10%.

V roce 1976 vědci svým testováním dokázali, že Kevlar je neprůstřelný, nositelný a natolik lehký, aby jej policisté mohli nosit stále. Kuriózní věc nastala, když se neprůstřelné vesty dostaly na trh ještě před tím, než Mezinárodní institut spravedlnosti vydal tyto tvrzení. (1, 21)

2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY OCHRANY

2.1 Mechanika

Technické přístupy k zastavení průniku střely a zmírnování nepenetrujícího dopadu jsou různé. Základní principy minimalizace přenosu energie účinkem projektilu jsou pohlcení energie v balistické ochraně tím, že bude vykonávat práci na materiálu před tím, než ho rozbije, to je protahování, a redistribuce energie tak, aby ostatní materiály nebo tělní stěna byly schopny odolat celkové energii.

Helma poslouží jako příklad k demonstraci principů. Zjednodušeně řečeno, helma má tvrdou skořápku podporovanou pěnovým materiálem (polymer, dříve guma). Helma zastaví průnik střely jako například protipěchotní střepiny umožněním střepinám natáhnout balistické vlákna ve skořápce, zlomením některých a stlačením následujících vrstev vláken. Pěnová podpora hraje menší roli. Pro nepronikavé zbraně, jako jsou třeba cihly a zranění při pádu, tvrdá skořápka přerozděluje energii na větší plochu, což vede k malé deformaci, která je absorbována pomaleji a poté se přerozděluje u pěnové vložky. Technické přístupy jsou většinou odlišné, ale hlavní mechanismy jsou absorpce energie, šíření energie a dlouhá doba trvání materiálu. (5)

2.2 Pokrytí

Tělesná balistická ochrana může být těžká a pohyb omezující. Základní je optimální vyvážení ochrany a pohyblivosti. V praxi musí být balistická ochrana relevantní k hlavním balistickým hrozbám a musí chránit nejohroženější části lidského těla. Například hrud' je náchylná k průniku střely. U vojáků a policistů stojících na místě, kde je nutno opětovat palbu, je důležité optimální pokrytí hrudníku. Pro vysoko výkonné střely by to zahrnovalo velký, těžký plát ze silikátu. Mobilní voják pěchoty nemůže nést takový plát a udržet si hbitost a pohyblivost. Tím pádem je balistická ochrana navrhována vzhledem k zdravotnickým zařízením, které jsou k dispozici. V rámci Severního Irsku, vojáci byli vybaveni pouze s malými, lehkými deskami, které pokrývaly pouze srdce a velké cévy. Rány pronikající pouze do plic mají při okamžité lékařské péči nízkou úmrtnost, proto pokrytí na plicích nebylo, ale výrazně se zvýšila pohyblivost vojáků omezením hmotnosti. Tedy pokrytí těla je závislé na možnosti rychlé lékařské pomoci.

Znalost zdravotních následků a nebezpečí života v důsledku nízko výkonných a vysoko výkonných střel je nutno optimalizovat umístěním balistické ochrany. Tabulka č.1 ukazuje procentuální distribuci podle anatomických ploch zabitých v akci (KIA) a smrtí následkem zranění (DOW) a zraněných v Koreji a Vietnamu. Také jsou v tabulce rozlišeny plochy těla do čtyř oblastí osoby v bojové pozici. Je zřejmé, že dopad střely v oblasti hlavy a hrudníku mají velmi častou úmrtnost v poměru k rozloze těchto oblastí. Hlavní body z těchto údajů z Koreje a Vietnamu jsou, že končetiny tvoří asi 61% oblasti těla, ale přeživších zraněných je zhruba 67% a usmrčených pouze 33%, hlava a krk tvoří 12% oblasti těla, okolo 18 a 34% oblast zasažení, ale okolo 42% a 48% úmrtí. Břicho a hrudník představují 27% povrchu těla, ale 37% a 51% úmrtí na bojišti.

Je také důležité si uvědomit, že výraz vedoucí zahrnuje také různé senzorycké struktury, mozek a jiné měkké a kostní tkáně, které mají různé zranění. Například oči tvoří pouze 0,27% z povrchu těla, ale jsou zraněny až u 10% bojových obětí. (7)

	Hlava	Krk	Hrudník	Břicho	Končetiny
Představovaná plocha	12		16	11	61
Korea					
Zabit v akci	38	10	23	17	11
Smrt v důsledku zranění	25	7	20	30	15
Přeživší zranění	7	11	8	7	66
Vientam					
Zabit v akci	34	8	41	10	7
Smrt v důsledku zranění	46	46	23	21	9
Přeživší zranění	17	17	9	6	69

Tabulka č. 1: Procentuální distribuce zranění podle anatomických ploch konfliktů ve Vietnamu a Koreji

2.3 Střely s trvalými následky

Hlavní hrozbou pro donucovací orgány jsou nože a nízko a vysoko výkonné střely. Vojenský personál je vystaven větší škále střel (pokud jde o hmotnost, rychlost a směr střely a intenzita střelení) a jejich balistické systémy musí zabraňovat všem těmto odlišným střelám. Je také třeba uznat, že poměr střel a střepin pro různé vojenské konflikty je různý. Tabulka č. 2 ukazuje, že ve válce proti jiným armádám (např. I. Světová válka, II. Světová válka) jsou střepiny hlavní příčinou zranění, ale v městských operacích proti teroristům nebo domobraně

převládají střely. Policejní úředníci při obecných hlídkových povinnostech nepodléhají těmto ohrožením. Balistické helmy nejsou obvykle používány a osobní ochrana je zaměřena proti nožům a střelám s nízkým výkonem. (7)

	Střely	Střepiny	Ostatní
I. Světová válka	39	61	-
II. Světová válka	10	85	5
Korea	7	92	1
Vietnam	52	44	4
Borneo	90	9	1
Severní Irsko	55	22	20
Falklandské ostrovy	32	56	12

Tabulka č. 2: Distribuce způsobení zranění obětí válek a kampaní ve 20. století

2.4 Hrozby a testování

Při navrhování a testování balistické ochrany je obvyklé rozdělit balistické hrozby na tři hlavní kategorie. Jsou to střepiny, nízko výkonné střely a vysoko výkonné střely.

Balistická ochrana odolná vůči nízko nebo vysoko výkonným střelám jsou většinou specifikovány odolností vůči střelám o specifické rychlosti, často rychlosti, o které opustí hlaveň. Nositel by byl rád ujistěn, že jeho balistická ochrana zastaví požadovanou střelu. Test, který se používá, je označen jako kompletní balistický test. Jedná se o test vyhověl/ nevyhověl, a proto se stanovuje práh, který musí být překročen, aby balistická ochrana mohla obstát v kontrolních testech. Toto ale neposkytuje informace o tom, jak vysoko nad stanoveným prahem je balistická ochrana ještě účinná.

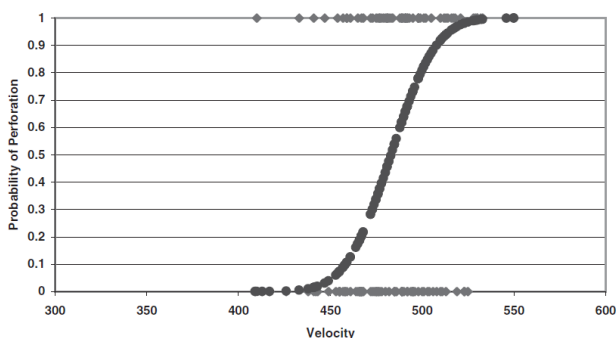
Střepiny mají obvykle vysokou rychlost, velmi blízkou detonaci a většinou nízkou hmotnost, v důsledku toho je jejich energie většinou nízká. Jejich rychlost rychle klesá se vzdáleností. Pro flexibilní lehkou balistickou ochranu není obecně možná ochrana proti specifickým fragmentům na blízkou vzdálenost. Vyznačuje se mnohem větším rozptylem hmotnosti, rychlosti a tvaru střepin. Proto kompletní test ochrany nezahrnuje střepiny. U střepinové ochrany se zadává kritérium známé jako V_{50} . V_{50} je definována jako rychlost, při které se 50% ze střepin zastaví na ochraně a 50% ochranou projde. Je to statistická měření a

vědecká metoda, která umožňuje navrhovateli balistické ochrany seřadit ochranné materiály a systémy. To si neklade za cíl informovat uživatele výzbroje, jak bude účinná v boji, ale pouze jaký je její balistický výkon ve srovnání s jinými materiály a systémy.

Pro balistickou ochranu neexistuje specifická rychlost, nad kterou bude projektil vždy pronikat nebo pod kterou bude vždy zpomalen. Příklad vztahu mezi rychlostí nárazu a výkonem ochrany je znázorněna na obrázku č. 1. Toto bylo získáno sérií střel, které pronikají a sérií střel, které nepronikají, s ohledem na jejich rychlost. Rychlost, u které je pravděpodobnost průniku 50% je V_{50} . Všimněme si značného přesahu v rychlostech identických střel, které pronikly i těch, které nepronikly.

S cílem pokusit se navázat na V_{50} efektivnost balistické ochrany v praxi se začala používat analýza snížení obětí. Provozní dopady na balistickou ochranu s konkrétní V_{50} závisí na velkém počtu faktorů, které musí být zahrnuty do analýzy snížení obětí. Tyto jsou: pokrytí těla ochranou, balistická hrozba (počet, velikost, rozložení rychlosti a trajektorie od specifických projektilů, ohrožená plocha člověka a stínící objekty (např. budovy) a předpoklad, že projektily neproniknou balistickou ochranou nebo nechráněnými částmi těla.

Tyto modely umožňují vývojářům předpovídat vhodné kompromisy mezi hmotností, anatomickou polohou ochrany, výkonem V_{50} a snížení obětí. Další nástroje operační analýzy můžou také řešit dopady snížení pohyblivosti osob plynoucí z používání ochrany, úspěch mise a počet obětí. Umístění balistické ochrany na personál má mnoho důsledků, jak kladných tak záporných. U těchto typů výstroje je nutné posoudit provozní následky. Jestli ochrana zastaví střelu je důležité, ale bere se ohled i na pohyblivost a dostupnost zdravotnického zařízení. (4)



Obrázek č. 1: Křivka V_{50} pro ochranný systém (rychlost [m.s⁻¹])

2.5 Mechanismus zneškodnění projektilu

Některé projektily mohou být zneškodněny použitím pružného materiálu a některé použitím tuhého materiálu. Když projektil o hmotnosti m a rychlosti v narazí na balistickou ochranu, jeho kinetická energie $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. Tato energie působí na velmi malé ploše nárazu a umožňuje projektilu perforovat materiál. Termínem, často používaným na popis energie projektilu na perforaci materiálu, je hustota kinetické energie projektilu (energie projektilu na plochu nárazu). Nicméně když nevezmeme v úvahu materiál projektilu, je tento termín používán zavádějícím způsobem. V obecném případě, systém ochrany zneškodní projektil, když absorbuje jeho kinetickou energii a rozloží ji na větší plochu, než má projektil šanci prorazit.

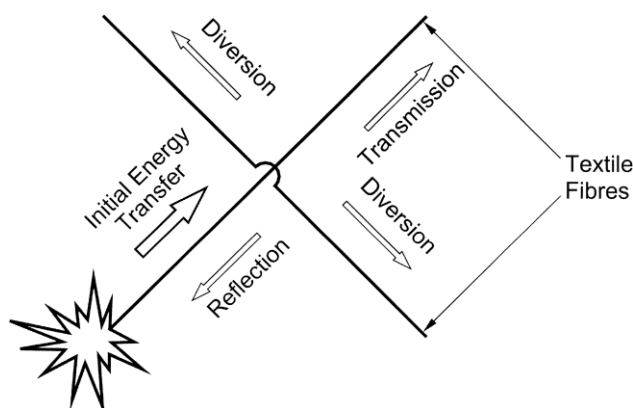


Obrázek č. 2: Silikátový plát oxidu hlinitého podporován kompozitem navrhován na zneškodnění vysoko výkonných střel

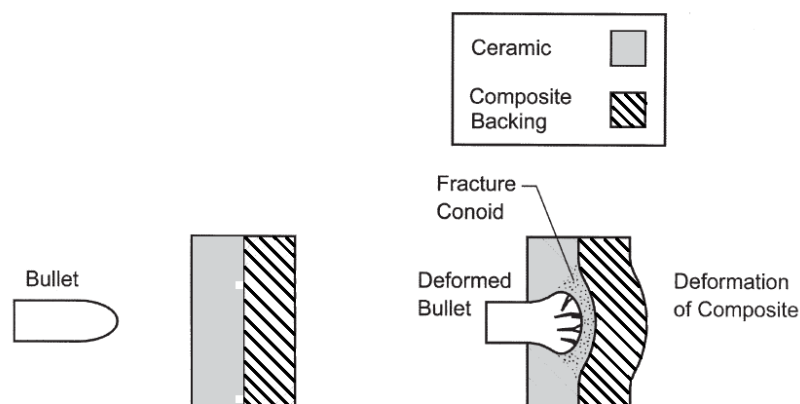
Textilní ochrana, která je používána na zneškodnění střepin nebo nízko výkonných střel, je obvykle tkaná. Příze použité v tkaných balistických textiliích mají vysokou specifickou pevnost a vysoký modul pružnosti. Tyto vlastnosti znamenají, že jsou vlákna těžko zlomitelné. Vysoký modul pružnosti umožňuje energii rozptýlení na podélné rázové vlny, které putují podél příze. Obrázek č. 3 ukazuje jedno křížení ve tkané textili. Pokud projektil narazí na určitý bod na jedné z přízí, předávaná energie putuje podél příze. Když se setká

s křížením, rozdělí se několika možnými způsoby. Energie může pokračovat podél příze, může být odražena zpět od vlákna nebo se může šířit kolmo na dopad. Toto je příklad jediného křížení na jedné vrstvě. V 1 cm² může být více než sto křížení. Žádná balistická ochrana se neskládá pouze z jedné vrstvy, většina se skládá z více než 15 vrstev, některé dokonce více než ze 40 vrstev. Ne všechna energie je rozptýlena v první vrstvě a tím pádem se stejný mechanismus opakuje v dalších vrstvách, dokud projektil neztratí všechnu svou energii. Tento kontinuální proces znamená, že první vrstva byla proražena stříhem (přetrhnutím) přízí. Tento proces (přetržení přízí) je druhým mechanismem absorpce energie a pravděpodobně absorbuje více, než mechanismus podélného šíření vln.

Je-li vystřelena střela o vysoké rychlosti z jakékoliv vzdálenosti, je velmi nepravděpodobné, že by byla zneškodněna pouze textilní ochranou. Pro zneškodnění těchto střel je třeba velmi tvrdý materiál. Ochrana používá tvrdost povrchu na rozbití nebo narušení projektilu, zatímco kompozitní podpora rozloží energii po větší ploše. Obrázek č. 4 ukazuje příčný řez ochrany povrchu ze silikátů s kompozitní podporou. Narazí-li střela na ochranu, která je obvykle tvrdší než střela, špička střely se naruší. V některých silikátech, jako je oxid hlinitý, vzor narušení nabývá kuželovitého tvaru, tím pádem absorpce zbytkové energie kompozitní podporou je na větší ploše. Navíc, když střela prochází silikátovým materiálem, je nejprve rozšiřována plocha její špičky a tím se zvyšuje povrch absorpce a snižuje se hustota kinetické energie. Střela poté pokračuje do kompozitního podkladu. V době, kdy dosáhne tohoto podkladu, je doprovázena úlomky silikátového materiálu. Tyto úlomky jsou zneškodněny kompozitním podkladem pomocí mechanismu, který byl popsán u tkané textilní ochrany. (7)



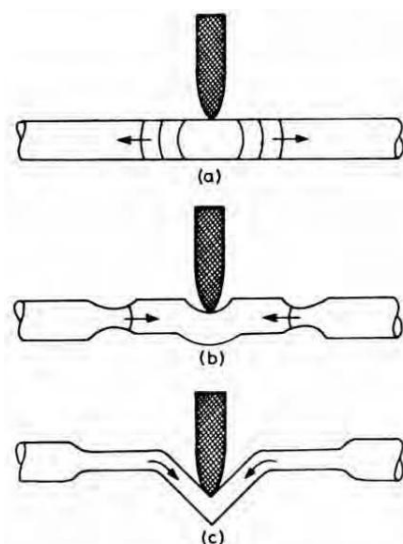
Obrázek č. 3: Distribuce energie střely v textilních vláknech



Obrázek č. 4: Zneškodnění vysoko výkonné střely ochranou složenou ze silikátu a kompozitu

2.5.1 Mechanismus selhání vláknitých materiálů

Základní myšlenkou balistické ochrany z vláknitých materiálů je přeměna kinetické energie na deformační práci. Proto hlavní ovlivňující faktory jsou tahové vlastnosti ochranného materiálu a deformovatelnost střely a balistické ochrany.



Obrázek č. 5: Mechanismus selhání jednoho vlákna balistického nárazu: (a) Šíření podélných vln; (b) Odraz jako tahová vlna; (c) Prodloužení vlákna.

Obrázek č. 5 ukazuje mechanismus deformace, kdy je jedno vlákno podrobena nárazu projektilu kolmo na jeho podélnou osu. Dopad vede k šíření podélné rychlosti vln (C), což není nic jiného, než rychlost zvuku v materiálu. Toto může být vyjádřeno z hustoty a modulu pružnosti jako $C = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2}$, kde C je rychlost zvuku nebo podélná rychlost vln, E je modul pružnosti a ρ je hustota materiálu.

Vlna dosáhne konce vlákna a odráží se jako tahová vlna. Tento odraz je nutný, aby se splnily okrajové podmínky nulového napětí na koncích vláken. Tento pohyb tahové vlny vede zpět k bodu nárazu, způsobí tok materiálu ve stejném směru. Nakonec je tahová deformace v kontaktu s projektilem. Ve stejné době se šíří druhé a pomalejší vlny pohybující se rovnoběžně s pohybem projektilu. Vlákno pokračuje v absorpci energie a vychyluje se, dokud projektil nezastaví nebo napětí vlákna přesáhne svou mez kluzu a praskne. Pokud je rychlost nárazu dostatečně rychlá, vlákno nemůže reagovat dostatečně rychle na vystavované napětí. Nejnižší rychlost, pro kterou se vlákno přelomí, nazýváme kritickou rychlostí. (1)

3 VÝBĚR MATERIÁLU

Žádný návrh balistické ochrany není vhodný pro všechny situace a výkon protekčního systému závisí na interakci různých komponentů. Proto je důležité pochopit mechanismus balistické ochrany, který může být zevšeobecněn vzhledem k balistickému účinku systému.

3.1 Výběr materiálu

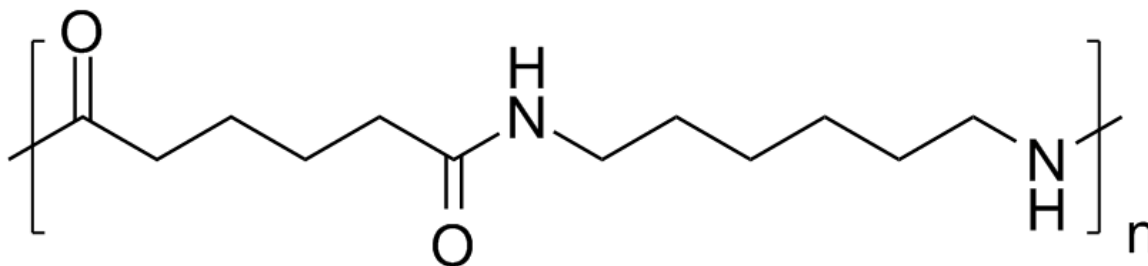
Neprůstřelné oblečení musí zastavit střelu od penetrace a absorbovat její kinetickou energii přeměnou na deformační práci. Proto primární faktory, které ovlivňují výkon neprůstřelných nebo ochranných materiálů jsou pevnost, modul pružnosti a prodloužení při přetržení, deformovatelnost projektilu a rychlost příčné rázové vlny ve vlákně. V následující tabulce jsou porovnány vlastnosti některých materiálů. (1)

Tabulka č. 3: Srovnání vlastností materiálů.

Typ vlákna	Hustota [g.cm ⁻³]	Pevnost [Gpa]	Prodloužení [%]	Modul pružnosti [Gpa]	Maximální teplota použití [°C]	Rychlost vlny [m.s ⁻¹]
ARAMIDY						
Kevlar 29	1,43	2,9	3,6	70	250	6 996
Kevlar 49	1,45	2,9	2,8	135	250	9 649
Kevlar 119	1,44	3,1	4,4	55	250	6 180
Kevlar 129	1,45	3,4	3,3	99	250	8 263
Kevlar 149	1,47	2,3	1,5	143	250	9 863
Ekonol	1,4	3,8	2,6	136	150	9 856
Vectran	1,47	3,2		91	150	7 868
UHMWPE						
Spectra 900	0,97	2,6	3,5	120	100	11 123
Spectra 1000	0,97	3	2,7	171	100	13 277
Carbonfibres						
Thornel P55	1,8	1,7		308	500	13 081
ThornelP100	1,96	1,76	0,38	517	600	16 241
Silikáty						
Boron	2,5	2,55	1	400	2000	12 649
SiC	2,8	4	0,6	420	1300	12 247
Alumina	3,25	1,8	1,2	210	1200	8 083
E-glass	2,55	2,6	3	72	350	5 313

3.1.1 Nylon 66

Nylonové vlákna byly materiálem téměř pro všechny balistické aplikace před objevením kevlaru. Během 2. Světové války Americká armáda vyráběla neprůstřelné vesty z ocelového plátu podporovaného nylonem 66. Nylon obvykle absorbuje dvakrát více energie než para-aramidy. V para-aramidech je rychlost příčné rázové vlny skoro 3-4 krát větší jak u nylonu. Z toho důvodu je šíření napětí více účinné u aramidů. Prodloužení příze okolo bodu nárazu po výstřelu o rychlosti 300 m/s bylo zhruba 10 μm . Je evidentní, že namáhání v para-aramidových tkaninách je rozloženo na mnohem větší plochu a prodloužení je menší. Navíc, nylon degraduje pod tak vysokým napětím, při kterém balistika působí a někdy bylo pozorováno tání a nežádoucí spojování vláken na proplétacích bodech. (1, 19)



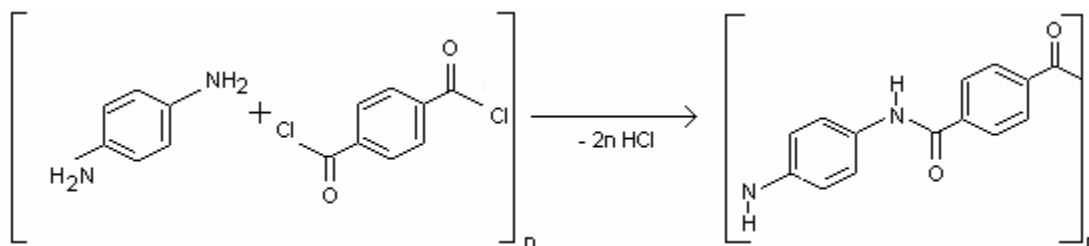
Obrázek č. 6: Chemická stavba Nylonu 66

3.1.2 Aramidy

Od jejich objevu v roce 1973, Kevlar snadno nahradil Nylon 66 v systémech balistického oblečení díky jeho dobrým absorpčním charakteristikám, vysoké specifické pevnosti a modulu pružnosti a excelentním teplotním vlastnostem.

Vysoké T_g a teplotní stabilita zajišťuje celistvost balistické struktury při relativně vysokých teplotách v případě balistického impaktu. Jejich vysoce krystalická a orientovaná struktura vyvolává vysoký dynamický modul, který zvyšuje rychlost vlny na $7700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což je 3-4 krát vyšší, než u nylonu. Tato vysoká rychlost vlny zároveň se specifickým modulem pružnosti je nástrojem pro zapojení většího množství materiálu, což je kritický faktor pro balistickou ochranu. Navíc vysoká houževnatost a mírné prodloužení aramidových vláken zajišťuje vysokou pevnost a výsledkem je poměrně účinná absorpce podélné deformační energie a příčné kinetické energie balistického nárazu.

Kevlar má pevnost 2,3 – 3,4 GPa, dvakrát větší než nylon, při prodloužení pouze o 1,5-4,4% a modulem pružnosti 55-143 GPa. Jeho modul pružnosti leží mezi skelným a uhlíkovým vláknem. (2, 16)



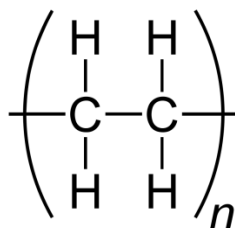
Obrázek č. 7: Chemická stavba Kevlaru

3.1.3 Polyetylen s ultra vysokou molekulární hmotností (UHMWPE)

Komerční úspěch těchto vláken je díky jejich nadstandardním mechanickým vlastnostem, jejich bezkonkurenční tolerance k poškození, odolnost proti únavě a jejich schopnosti selhat ve smyku nebo kompresi bez ztráty velkého množství pevnosti v tahu. Vztaženo na hmotnost, je to ten nejpevnější a téměř nejtužší komerčně dostupný materiál nabízející největší procento absorbované energie versus totální energie nárazu.

Jedna z nejzajímavějších vlastností UHMWPE je vysoké zvětšení modulu pružnosti s vyšší deformací, obzvláště při zvýšené teplotě. Zvýšení až o 40% pevnosti v tahu při balistickém zásahu s vysokou deformací (na pokojové teplotě ze 4 GPa na 5,6 GPa) je díky unikátní struktuře UHMWPE. Kromě toho, díky jeho nízké hustotě ($0,97 \text{ g.cm}^{-3}$ v porovnání s Kevlarem $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$) rychlost podélné rázové vlny dosahuje hodnot skoro stejných jako pro diamant. Všechny tyto faktory dělají UHMWPE nejvyhledávanějším materiálem pro balistickou ochranu.

I přes všechny výhody UHMWPE, jako je vysoká pevnost, lehkost, chemická odolnost, nízká specifická hmotnost a dobré dynamické vlastnosti, je to tečení, nízká tepelná odolnost, přilnavost a kompresní vlastnosti, což omezuje jeho aplikaci. (3, 17, 18)



Obrázek č.8: Chemická stavba UHMWPE (n>100000)

3.1.4 Silikáty

Ačkoliv mají silikáty velmi vysokou hustotu (jako kovy), jsou i tak vhodné pro balistické aplikace díky jejich pevnosti v tlaku a tvrdosti. Vzhledem k vyšším limitům dynamického napětí silikátů, ostrý hrot střely při nárazu zploští. To by mohlo výrazně snížit energii nárazu, což dále zvyšuje účinnost silikátu. Avšak vlastní křehkost a nedostatek pevnosti v ohybu silikátů způsobuje, že nemohou být samostatně použity jako jediný materiál pro výrobu balistické ochrany. (1, 25)

3.2 Vliv struktury příze na balistickou ochranu

Tření, které závisí na způsobu výroby příze, hraje důležitou roli v balistické ochraně. Mnohé z vláken, které se používají na balistickou ochranu, jsou vysoce protažené. Jejich povrch je proto hladký, což znamená, že v případě zásahu jakýmkoliv objektem příze má tendenci se oddělit od sebe jednoduše proto, že má nízký koeficient tření. Snahou proto bylo zdrsnit povrch vlákna chemickými nebo mechanickými způsoby, aby se vyřešil tento problém.

Bylo navrženo, aby se vlákna s vysokým koeficientem tření by zkombinovala s vlákny, které mají vysokou pevnost v tahu a modul pružnosti a nízký koeficient tření. Tyto dva typy vláken jsou do sebe zamotány. Bylo také navrženo, že velmi tlusté vysokovýkonné komponenty by měly být zkombinovány s velmi tenkými komponenty s vysokým koeficientem tření. (1,4)

3.3 Design tkanin pro balistickou ochranu

Balistická reakce tkanin jeví úzkou souvislost s balistickou reakcí jednotlivých přízí. V tkaninách z nití bylo zjištěno, že příčná deformace způsobuje zatížení křížového styků přízí

a až 50% z celkové energie se může objevit v sekundárních nitích, protože tam je rozsáhlá interakce mezi přízemi vzhledem k vysokému proplétání. Konstrukční náležitosti tkaniny mají proto významnou roli v balistické ochraně. Například, když je vazba příliš těsná nebo je materiál příliš tuhý, průhyb bude omezen a způsobí selhání ve smyku vzhledem k vysoké koncentraci napětí v bodě nárazu. Zatímco když je vazba příliš slabá nebo materiál příliš měkký s nízkým třením mezi přízemi, projektil lehce prochází tkaninou roztažením jednotlivých přízí od sebe nebo by se materiál moc prohnul. Toto by mohlo člověku způsobit vážné zranění. Proto je vyvážené rozložení sil s maximálním proplétáním v dané oblasti tkaniny nejvhodnější pro balistickou ochranu. (1,4)

3.4 Povrchové úpravy pro balistickou ochranu

Je zajímavé si povšimnout, že výkon obleků pro balistickou ochranu je silně ovlivněn vlhkostí, velikostí a ostatními mazivy navíc obsaženými ve vazbách tkaniny a ostatních parametrech vazby. Toto je způsobeno tím, že se mění mezifázové chování přízí, takže se mění i pohyblivost příze v tkanině, díky přítomnosti vlhkosti a olejů.

Oblečení pro balistickou ochranu má hydrofobní úpravu. Balistická ochrana se snížila zhruba o 40%, když se tyto oděvy namočily bez jakékoliv změny vlastností příze. Toto ukazuje, že se voda chová jako mazadlo mezi projektilem a přízemi. Proto je důležité čištění tkaniny pro odstranění olejů.

Významným zjištěním bylo, že laminace tkaniny zvyšuje kotvící sílu přízí o faktor okolo 10-15. Následkem laminace je, že příze zasažené střelou nejsou vytahovány z tkaniny. Další pozitivní efekt povlaku je, že brání bočnímu pohybu přízí při ostrém nárazu projektilu. Kevlar potažený neoprenovým chlórsulfonovaným polymerním elastomerem je odolný proti kyselinám, ohni, toxickým plynům a parám a je schopný vytvořit nepropustné těsnění.

V neposlední řadě ochrana vyrobeno z Kevlaru musí mít vrstvu, která redukuje absorpci UV světla, protože Kevlar ztrácí pevnost při vystavení UV světlu. Zatímco u balistické ochrany vyrobeny z UHMWPE se musí snížit tečení. (1,3,4)

4 NAVRHOVÁNÍ BALISTICKÉHO OCHRANNÉHO ODĚVU

V podstatě jsou dvě třídy materiálů, které mají velký potenciál v navrhování balistických ochranných oděvů a kompozitů. Jsou to vláknité materiály a silikáty. V závislosti na jejich aplikaci jsou balistické ochranné oděvy rozděleny na lehkou balistickou ochranu vyrobenou z textilního materiálu a kompozitní laminátovou ochranu, neboli těžkou balistickou ochranu.

(1)

4.1 Lehká balistická ochrana

Lehká balistická ochrana je konstruována z více vrstev tkanin, z vláken bez pryskyřičného pojiva, sešité dohromady meandrem nebo příčným švem. V závislosti na kalibru střely k zastavení a počtu přízí, počet vrstev tkaniny při výrobě neprůstřelných vest čítá od 10 do 50, vážící okolo 3 kg. Různé vrstvy tkaniny jsou v řadách nad sebou paralelně zarovnávané, což zabraňuje riziku, že dva náboje, které mají dopad blízko od sebe, nepoškodí stejné osnovy nebo útky ve všech vrstvách. Tyto vrstvy jsou sešity vysoko pevnostními aramidovými vlákny, které mají lepší výkon, pokud jsou blíže u sebe, vzhledem k tomu, že samotné aramidové vlákna se také podílejí na absorpci energie.

Bylo zjištěno, že tkaniny tkané z Kevlarových vláken do plátnové vazby o hmotnosti cca 200 g/m² při pečlivém ošetření a spojení do tří prošívaných vrstev nabízejí obranu proti střelám z pistole. Nositel při dopadu střely utrpí pouze hematom. Vědci objevili způsob stavby neprůstřelných ochranných oděvů, skládající se z vícevrstvé konstrukce s 20-30 vrstvami, sešité pomocí vláken s vysokým modulem pružnosti a plošných hustot v rozmezí 3,5 - 6,2 vyrobené z Kevlaru nebo UHMWPE. (1, 6, 20)

4.2 Těžká balistická ochrana

Kompozitní laminovaná ochrana neboli těžká balistická ochrana se skládá z vícevrstvé tkaniny kombinované spolu s pryskyřičným pojivem. Další třída těžké balistické ochrany používá pancéřové desky vyrobené ze silikátu a vlákny vyztuženými plasty okolo 10 mm tlusté. Hlavní funkcí takových vest je zredukovat efekt nárazu na tělo absorbováním energie nárazu částečně nebo celkově. Střela se také deformuje při nárazu při snižování její kinetické energie a tím pádem může být lehce zastavena dalšími vrstvami.

Balistická ochrana vyrobená z pryskyřičného pojiva vykazuje menší závislost na konstrukci tkaniny, protože matrice je odpovědná za distribuci energie do dalších vrstev. Proto je volba konstrukce často určena pro konkrétní typ střely. Například proti jemným projektilům je vhodná úzká vazba a jemnější denier, zatímco velké fragmenty mohou být účinně zastaveny volnější vazbou a hrubším denierem.

Volba spojovací pryskyřice má výrazný vliv na balistickou ochranu. Tvárné pryskyřice jako vinylesterové obvykle podávají lepší výkony, než křehčí, jako epoxidové. Pryskyřice vykazující větší tažnost absorbuje více energie jak při vzniku trhliny, tak jejího šíření. Bylo také prokázáno, že pro nejlepší balistickou ochranu by měl být obsah pryskyřice mezi 20 a 25 hmotnostními procenty. Lamináty s menším obsahem pryskyřice sice vykazují zvýšenou balistickou ochranu, ale deformace jsou velmi závažné a nepřijatelné pro většinu aplikací. Pro maximální balistickou účinnost musí být vláknité ochraně dovolen odraz a delaminace, proto by se neměly objevovat v kombinaci s tuhými konstrukčními díly, které nepovolují odraz.

V poslední době bylo objeveno mnoho kombinací. Je používána balistická ochrana s lehkou hmotností vyrobená ze Spectry a aramidů. Vnější konstrukce zahrnuje více vrstev aramidu umístěné před matrix obsahující první vrstvu, druhou vrstvu a hmotnost vláken uspořádaných kolmo na vrstvy. Byla také vyvinuta škála balistických materiálů, většinou založena na kombinaci skelných vláken a Dyneemy (UHMWPE) nebo aramidu. Tyto nové typy materiálů mají nejen nárazabsorbující povrch, ale také tendenci projektil místo odrazu zadržet. Kombinace UHMWPE a jemného skelného vlákna je schopna odolat nárazu většiny malých projektilů a je také schopna zabránit pronikání nožů, dýk a dokonce i šípů.

Neprůstřelné vesty jsou většinou konstruovány tak, aby chránily tělo ze všech stran, přední strana vesty ale může být silnější, protože se předpokládá, že střela obvykle přijde zepředu.

V US patentu byla popsána neprůstřelná košile, která je nastavitelná, aby se mohla přizpůsobit lidem různých velikostí. Je vyrobená ze standardní tkaniny a má vnitřní vrstvy na přední a zadní panely, které jsou vyrobeny z bikomponentních materiálů aby odváděly pot. V oděvu jsou panely, které jsou uzavíratelné, pro vložení vyjímatelných neprůstřelných destiček (např. vrstva Kevlaru nebo kombinace vláknitého Kevlaru s vrstvami Spectry). Na přední straně košile může být další vrstva tkaniny, která zpevňuje košili na životně důležitých

místech nebo pro specifické potřeby. Všechny destičky jsou odnímatelné, aby se mohla košile normálně prát.

Je třeba mít na paměti, že žádný balistický ochranný oděv nemůže poskytnout ochranu před všemi typy střel. Je to kompromis mezi různými faktory, jako je rozsah požadované ochrany, náklady, hmotnost a pohodlí. (1, 8, 9)

5 HODNOCENÍ VÝKONOSTI

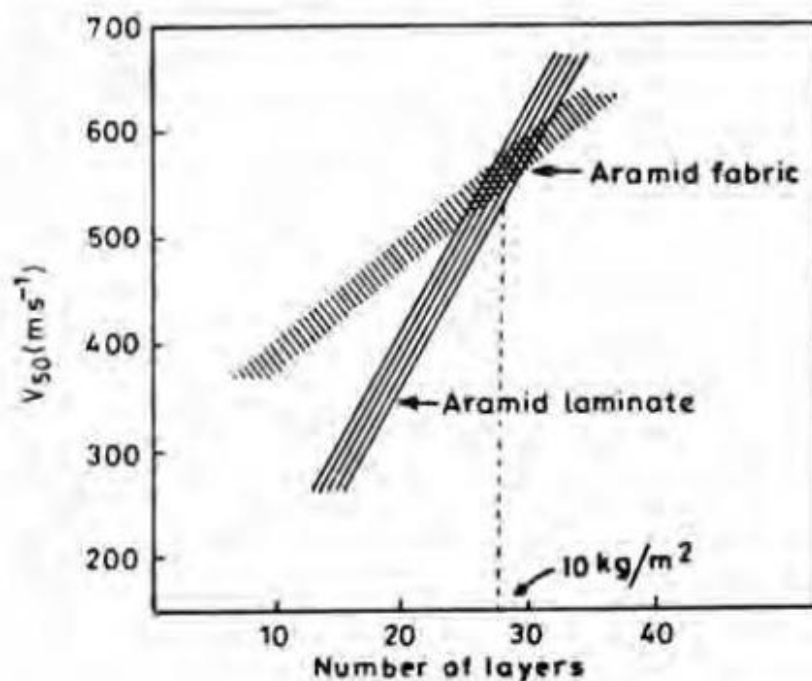
Pro kvantitativní posuzování výkonnosti pro balistické ochranné oděvy jsou dvě základní veličiny – balistická ochrana a účinná váha. (1)

5.1 Balistická ochrana

Uvádí podrobnosti o stupni ochrany balistické ochrany proti zadanému projektilu nebo sérii projektilů.

Nejrozšířenější způsob testování je V_{50} , který je definován jako aproximace rychlosti, při které by 50% ze zásahu mělo za následek úplnou penetraci a 50% jen částečnou penetraci, nebo rychlost střely, při které je pravděpodobnost průniku 50%. Je to dáno aritmetickým průměrem stejného počtu rychlostí nejvyšších dílčích a nejnižších úplných průnicích.

Podle V_{50} bylo zjištěno, že při nízkých plošných hmotnostech je účinnější lehká ochrana, ale když se plošná hmotnost zvedne nad 10 kg m^{-2} , tak je účinnější těžká balistická ochrana, což může být dáno rozdílnou tuhostí mezi těžkou a lehkou balistickou ochranou. (1)



Obrázek č. 9: Balistické chování lehké a těžké balistické ochrany vzhledem k počtu vrstev

5.2 Účinná váha

Toto je měřené pomocí WMR (weight-merit rating), což je užitečná metoda jak uspořádat jednotlivé ochrany se standardem pro zjištění výhody hmotnosti, které nabízí nové balistické ochrany. Je definován jako poměr plošné hustoty referenčních ochran ku plošné hustotě nových balistických ochran. (1, 23)

$$\text{WMR} = \frac{\text{Areal Density (PSF) of MIL-S-12560 Steel, Type I X 100}}{\text{Areal Density (PSF) of Experimental Armor}}$$

Obrázek č. 10: Výpočet WMR.

6 DRUHY OCHRANNÉ VÝSTROJE

Materiály musí být upraveny tak, aby měly minimální vliv na výkon nositele /při zachování dostatečného pokrytí těla) a musí být v souladu s ostatními zařízeními, které nositel používá.

Největším problémem je vojenská balistická helma, která by měla být kompatibilní se zbraňovými zaměřovači, komunikačními soupravami, respirátory, ochranou očí atd.

Neprůstřelná vesta na hrudníku musí umožnit odvod tepla, zaměření nepřítele, sezení ve vozidle, přikrčení, nesení dodatečných zařízení atd. V případě, že balistická ochrana není pohodlná, nadměrně snižuje výkon, nebo když nositel nemá žádnou důvěru k výkonu ochrany, nebude ji nosit. (7, 22, 24)

6.1 Bojové přilby

V rámci společenských zemí NATO jsou bojové přilby vyrobeny z kompozitu na bázi textilu. Helma může být konstruována z balistického nylonu, para-aramidů, UHMWPE nebo PBO. Obrázek č. 11(a) je GS Mk6 bojová helma. V této konfiguraci je používána pro potlačování nepokoju. Je vybavena polykarbonátovou clonou s těsněním v horní části, která slouží k zastavení hořící kapaliny od stékání na obličej a chránič šije odolný proti nárazu a proti ohni.

Většina bojových helem bude ve velmi podobném designu, rozdíly budou pouze v požadavcích na další vybavení. Obrázek č. 11(b) je pro členy obrněných bojových vozidel. Tvar okolo uší umožňuje nosit komunikační zařízení.

Obrázek č. 11(c) je představitelem ochranné helmy pro střely s nízkou energií, která má také vysokou úroveň ochrany proti roztržení. Všechny tyto helmy mají vysokou úroveň ochrany proti nebalistickým nárazům. Toho je dosaženo použitím vložky ve skořepině helmy vyrobené z náraz-absorbujícího materiálu, jako jsou uzavřené bloky naplněné polymerní pěnou. (1, 3, 7, 24)



Obrázek č.11 (a,b,c): (a) základní bojová helma s vybavením pro potlačování nepokojů; (b) přilba pro posádku obrněného bojového vozidla; (c) balistická přilba proti střelám s nízkou energií.

6.2 Balistická ochrana trupu

Tyto ochrany jsou navrženy na ochranu trupu od protipěchotních střepin a od střel jak s vysokou, tak nízkou energií dopadu. Textilní oděv jako takový poskytuje ochranu proti

střepinám a střelám s nízkou energií. Pro zvýšení úrovně ochrany, aby zahrnovala i střely s vysokou energií, je přidána tuhá vložka.

Obrázek č. 12 ukazuje Britskou bojovou neprůstřelnou vestu. V obdélníkové kapse na přední straně vesty je umístěna tuhá keramická deska.

Obrázek č. 13 je policejní neprůstřelná vesta, která chrání před nízkoenergetickými střelami oděvem a před vysokoenergetickými střelami chrání ochrannými deskami většími, než u Britské bojové neprůstřelné vesty a to proto, aby u Britské bojové vesty zůstala hmotnost co nejmenší v místech, kde byla k dispozici rychlá lékařská pomoc. Je několik rozdílů v požadavcích mezi policejní a vojenskou neprůstřelnou vestou. Shrnuty jsou v tabulce č. 2. (6, 7, 8, 10, 24)



Obrázek č. 12(vpravo): Britská bojová neprůstřelná vesta a č.13 (vlevo): neprůstřelná vesta policie

Tabulka č. 4: Srovnání požadavků na policejní a vojenskou neprůstřelnou vestu

Požadavek	Vojenská vesta	Policejní vesta
Hlavní hrozby	Střepiny, vysokoenergetické střely	Bodnutí, nízkoenergetické střely
Váha	Nízká	Může být vyšší
Úroveň ochrany	Obvykle kompromis z důvodu jiných faktorů	Často kompletní ochrana proti nízkoenergetickým střelám
Specifikace	Navrhovány pro specifické potřeby uživatele	Obvykle vzhledem k národnímu nebo mezinárodnímu standardu
Čas nošení	Může být velmi dlouhý	Obvykle standardní pracovní doba, nebo kratší

6.3 Ochrana při zneškodňování bomb (EOD)

Největší soubor balistické ochrany je u jednotek, které jsou zapojeny do zneškodňování bomb. Tito operátoři tráví značnou časovou dobu v blízkosti velkých výbušných zařízení, které jsou navrženy tak, aby zranily nebo zabily osoby, které jsou ve velké vzdálenosti. Z tohoto důvodu jsou požadavky na ochranu u těchto osob mnohem větší, než jakýkoliv jiný typ osobní balistické ochrany. Pro většinu uživatelů balistické ochrany jsou jejich obleky navrženy tak, aby odolávaly střepinám, a nepředpokládá se u nich, že budou dostatečně blízko k výbušnému zařízení. Toto ale není případ u EOD. Tito uživatelé jsou velmi blízko k zařízení a výbuch tlakové vlny bude velký. Z tohoto důvodu, EOD oblek poskytuje ochranu jak ze strany střepin, tak ze strany výbuchu. Obrázek č. 14 je dvoudílná ochrana, skládající se z dvou tuhých desek, jedna z nich je ochranná proti výbuchu a druhá ochraňuje proti střepinám. Ochrana proti střepinám tuhé desky může být až třikrát větší než u balistické ochrany trupu. Přilba pracovníka EOD bude podobné konstrukce, jako bojová přilba, ale bude mít vyšší balistický výkon. Clona helmy by měla mít stejný balistický výkon, jako zbytek helmy, ale také vyžaduje velmi dobré optické vlastnosti. (7, 24)



Obrázek č. 14: EOD oblek

6.4 Ochrana trupu proti nožům

Na rozdíl od předpokladů, balistická ochrana, která odolává vysoko výkonným střelám a střepinám není obvykle účinný při ochraně proti nožům nebo jiným ostrým zbraním. Většina dnešních ochran proti nožům se skládá z kovového pletiva a je podporován aramidem (obrázek č. 6). Nyní vyvíjena textilní balistická ochrana kombinuje ochranu proti nožům i střelám, není potřeba kovové nebo silikátové vnější vrstvy.

Testy standardů pro protekci proti nožům jsou jiné než ty, vytvořené pro střely. Většina standardů odkazuje na zneškodnění specifické geometrie nože, která má specifickou energii při nárazu.

V Anglii jsou tři ochranné úrovně, které závisí na ohrožení. Strážník na obvyklé pochůzce nepotřebuje stejnou úroveň ochrany, jako strážník, který vchází do oblasti, kde je známé ohrožení nožem. S ohledem na různé hrozby, standardy jsou seřazeny podle energie (24, 33 a 43 Joulů a maximálních dovolených prostupech 7 milimetrů). Výrobci mohou zkoušet vyhovění standardům palbou nožů ze vzduchového děla, nebo pádem z věže.

Smyslem ochrany proti bodným nástrojům je zabránění vážného nebo trvalého zranění strážníka, trauma může nastat, když je nízko výkonná ochrana napadena bodem s vysokou energií. Je třeba si uvědomit, že se průnikové trauma může objevit za ochranou, když bude hloubka průniku nižší, než u nechráněného hrudníku. (7, 12, 24)



Obrázek č. 15: Reprezentativní ochrana proti nožům – kovové pletivo podporované aramidem

7 SPECIFIKACE BALISTICKÉ ODOLNOSTI PODLE ČSN 39 5360

Jedná se o časově nejmladší normu pro zařazení a testování nejen balistických ochranných pomůcek, ale i nejtvrdější mezinárodní normu z hlediska splnitelnosti požadavků.

Podle tohoto standardu je povolena maximální hodnota traumatu ve výši 25 mm a to bez rozlišení, zda se jedná o vestu skrytě nebo neskrytě nošenou. Dalším parametrem je maximální objem vzniklého vtisku a to 8 ml. Tomuto objemu přísluší maximální hloubka traumatu do 2 mm. (12)

Úroveň	Munice	Typ střely	Rychlost [m/s]	Váha střely [g]
1	.22 LR	Pb/O	300 ± 10	2,6
2	9 mm Luger	CP/Pbj/O	410 ± 10	8
2 cz	7,62x25	CP/Pbj/O	470 ± 10	5,5
3	.357 Magnum	CP/Pbj	430 ± 10	10,2
3 cz	9 mm Luger	CP/Fej/O	440 ± 10	6,45
4	.44 Magnum	CP/Pbj	440 ± 10	15,6
4 cz	7.62x25	CP/Fej/O	550 ± 10	5,5
5	.223 Rem.	CP/Pbj	920 ± 10	4
5 cz	7,62x39	CP/Fej	710 ± 10	8
6	7,62x51	CP/Pbj	830 ± 10	9,5
6 cz	.223 Rem.	CP/Fej	950 ± 10	3,98
7	7,62 x 51	CP/Fej	820 ± 10	9,8
7 cz	7,62 x 54 R	CP/Fej	860 ± 10	9,75
CP - celokovový obal, Fej - Kovové jádro, Pbj - Olověné jádro, O-Ogival				

Tabulka č. 5: Třídy balistické odolnosti podle české normy

8 BUDOUCÍ MATERIÁLY BALISTICKÉ OCHRANY

Balistické ochranné materiály jsou vyvíjeny v závislosti na vývoji zbraní. Není pochyb o tom, že zbraně jsou čím dál účinnější a to vyžaduje, aby materiály pro balistickou ochranu osob a objektů byly více účinné v odolávání balistickému nárazu. Je tu samozřejmě další požadavek a to na ochranné balistické materiály o lehké váze pro možnost rychlejšího pohybu osob a vozidel. Nová vlákna s úžasnými mechanickými vlastnostmi budou klíčem pro budoucnost balistických materiálů. Budou muset mít nejen vysokou pevnost a vysoký modul pružnosti, ale také dobrou flexibilitu, pohodlí při nošení a vysokou stabilitu při různých fyzikálních a chemických podmínkách. (1)

8.1 Pavoučí vlákno

Jedním z nových atraktivních materiálů jsou ultra-silná pavoučí vlákna, která jsou jedněmi z nejpevnějších známých přírodních vláken. Pavoučí vlákna jsou velmi lehká, ohebná a mají poměr váha-pevnost větší než vysoce kvalitní ocel. Jejich potenciální aplikace je velmi široká, od chirurgického šicího materiálu, až po balistickou ochranu pro vojsko. Ale výroba velkého množství pavoučího vlákna, aby se tyto výrobky mohly komerčně používat, představuje výzvu. Laboratoř v Michiganu geneticky upravila bource morušového k produkci pavoučího vlákna a vyrobila z něj rukavice, které budou brzy testovány. Pavoučí vlákno se přirozeně prodlužuje a absorbuje energii chycené oběti. Zvláště pro vojsko by pavoučí vlákno mohlo být velmi dobrým novým materiálem pro balistickou ochranu, vedle nynějších neprůstřelných vest. (1)

8.2 Kapalná balistická ochrana

Termín kapalná balistická ochrana může být trochu zavádějící. Někteří lidé si představí pohybující se tekutinu mezi dvěma vrstvami pevného materiálu. Nicméně oba tyto typy tekuté balistické ochrany vykonávají práci bez viditelné tekuté vrstvy. Místo toho je používán Kevlar, který je namočen do jedné ze dvou kapalin. (11, 15)

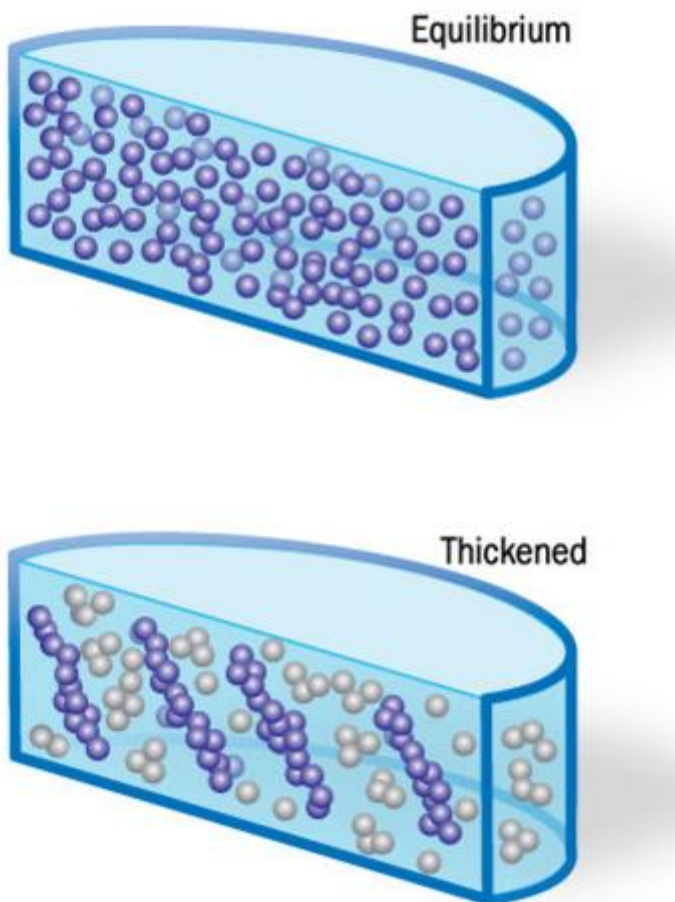
8.2.1 Smykem zhuštěná tekutina (STF)

Smykem zhuštěná tekutina se chová jako pevná látka, když je vystavena mechanickému napětí nebo smyku. Jinými slovy se chová jako kapalina, dokud do ní nenarazí objekt nebo

není intenzivně míchána. Poté ztvrdne během několika milisekund. Toto je opak smykem zředěné kapaliny (např. barva), která se zředí, když je míchána nebo protřepána.

Smykem zhuštěnou kapalinu si můžeme představit jako roztok kukuřičného škrobu a vody (50:50). Pokud jej mícháme pomalu, látka se chová jako kapalina. Pokud do povrchu roztoku silně udeříme, jeho povrch náhle ztuhne. Můžeme tento roztok také tvarovat do kuličky, ale když na něj přestaneme působit silou, kulička se rozpadne.

Roztok je koloidní, vyroben z malých částic suspendovaných v kapalině. Tyto částice se vzájemně mírně odpuzují, takže se snadno pohybují po celém objemu kapaliny bez toho, aby se shlukovaly, nebo usazovaly ke dnu. Energie náhlého nárazu přemůže odpudivé síly mezi částicemi a částice budou držet při sobě, vytvářejí shluky. Když se energie z nárazu rozptýlí, částice se začnou znovu odpuzovat. Tyto shluky se rozpadnou a zdánlivě pevná látka přejde opět do kapalného stavu.



Obrázek č. 16: STF – nahoře roztok v rovnováze, dole zhuštěná kapalina (13)

Kapalina, používaná v neprůstřelných vestách, je vyrobena z částic oxidu křemičitého suspendovaných polyethylenglykolu. Oxid křemičitý je součástí písku a křemene a polyethylenglykol je běžně používané mazivo. Částice oxidu křemičitého mají průměr pouze několik nanometrů, takže se tato kapalina popisuje jako forma nanotechnologie.

Neprůstřelná vesta ošetřená smykově zhuštěnou kapalinou se vyrábí tak, že se nejdříve kapalina zředí v etanolu. Kevlarová vesta se poté nechá nasytit touto kapalinou a na závěr se tato vesta umístí do trouby, aby se etanol odpařil. STF proniká Kevlarem a Kevlarová vlákna drží koloidní roztok na místě. Proces ztvrdnutí při nárazu proběhne během několika milisekund a vesta se zase stane ohebnou.

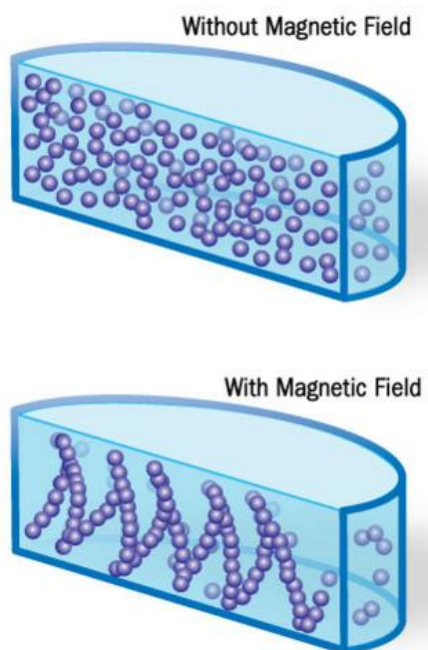
Při laboratorních testech se kevlar ošetřený STF jeví velmi ohebně. Rozdíl je v tom, že je silnější, takže je potřeba méně vrstev, než u normálního Kevlaru. Čtyři vrstvy ošetřeného STF může rozptýlit stejné množství energie, jako 14 vrstev čistého Kevlaru. Kromě toho, Kevlarové vlákna ošetřené STF se neprotahují tak moc, jako obyčejné vlákna, což znamená, že střely neproniknou tak hluboko do ochrany, nebo lidské tkáně. Výzkumní pracovníci se domnívají, že je to proto, že je potřeba více energie pro natažení STF ošetřených vláken. (11,13)

8.2.2 Magnetoreologická kapalina (MR)

Magnetoreologické kapaliny jsou oleje, které obsahují železné částice. Povrchově aktivní látky často obklopují tyto částice na jejich ochranu a pomáhají je udržet suspendované v kapalině. Obvykle je obsah železných částic mezi 20 až 40 % objemu kapaliny. Tyto částice jsou velmi malé, měří 3 – 10 mikrometrů, nicméně mají silný vliv na konzistenci kapaliny. Jsou-li vystaveny magnetickému poli, částice se seřadí a kapalina dramaticky zhoustne. Pojem magnetoreologické pochází z tohoto efektu. Reologie je obor mechaniky, který se zaměřuje na vztah mezi silou a způsobem změny tvaru materiálu. Síla magnetismu může měnit jak tvar, tak viskozitu MR kapalin.

Proces ztvrdnutí trvá okolo 20 tisíciny sekundy. Proces může výrazně záviset na složení kapaliny a na velikosti, směru a síle magnetického pole. Například výzkumníci z MIT začali pracovat s kulovitými částicemi železa, které mohou lehce proklouznout kolem sebe i v přítomnosti magnetického pole. To omezuje, jak tvrdá se může balistická ochrana stát, takže vědci začali zkoumat jiné tvary částic, které mohou být účinnější.

Stejně jako u STF, MR kapaliny se sestavují z běžných materiálů. Železné piliny smíchané s olejem mají dobré vlastnosti. Není-li přítomné magnetické pole, tekutina se snadno pohybuje, ale vlivem magnetického pole může tekutina zhoustnout, nebo se přetvořit do jiného tvaru, než jaká je nádoba. Autoři dokonce použily magnety a MR kapaliny nebo podobné ferokapaliny na vytvoření uměleckých děl.



Obrázek č. 17: MR kapalina – nahoře bez magnetického pole; dole v magnetickém poli (14)

Se správnou kombinací hustoty, tvaru částic a intenzity pole, MR kapalina se může měnit z kapaliny na velmi hustou pevnou látku. Stejně jako v případě STF by tato změna mohla výrazně zvýšit pevnost balistické ochrany. Vzhledem k tomu, že magnet tak velký, aby aktivoval celý oblek, by bylo velmi těžké a nepraktické nosit, výzkumníci navrhli vytvoření malé obvodu po celé výzbroji. Bez proudu, který teče dráty, by balistická ochrana zůstala měkká a flexibilní. Při zapnutí těchto obvodů se začnou pohybovat elektrony přes obvody a budou vytvářet magnetické pole. Toto pole způsobí, že balistická ochrana okamžitě ztverdne a po vypnutí obvodů se zastaví proud a ochrana se stane zase flexibilní.

Kromě toho, silnější, lehčí a pružnější balistická ochrana použitím STF nebo MR kapalin může mít i jiné využití. Takové materiály by mohly vytvořit například ochranné kryty před bombami, které velmi dobře chrání před explozemi a střepinami a navíc je lze velmi snadno složit a přenášet. Mohli by se z nich vyrábět speciální parašutistické boty, které by při dopadu

ztvrdly a chránily tak nohy výsadkáře. Mohly by posloužit jako dobrá ochrana pro vězeňské dozorce vzhledem k tomu, že je největší pravděpodobnost útoku tupými předměty a vyrobenými noži. (11, 14)

ZÁVĚR:

Cílem této bakalářské práce bylo shrnout nynější materiály, použité postupy a konstrukci balistické ochrany a její budoucnost. Používají se vlákna z materiálů jako aramidy (Kevlar), UHMWPE, pro jejich vysokou pevnost v tahu, modul pružnosti, nízkou hustotu a nízkou cenu. V poslední době se začala používat takzvaná kapalná balistická ochrana, kde se pláty z kevlaru nechají nasytit speciálními kapalinami jako je smykem zhuštěná kapalina, nebo magnetoreologická kapalina, které účinkem nárazu nebo magnetického pole během okamžiku ztvrdnou a po zmizení účinku bude brnění zase ohebné. Nově se také vědci snaží syntetizovat pavoučí vlákno nebo také chitin, což je polysacharid, který tvoří exoskelet členovců a má výjimečné mechanické vlastnosti.

Existuje mnoho firem, které se zabývají výrobou balistických ochranných prostředků, ale každá používá jiný počet vláken na cm^2 a jiný počet vrstev. Proto jsou balistické ochranné prostředky rozděleny podle normy do několika tříd. Neprůstřelné vesty můžeme doplňovat ochrannými prostředky a tím zlepšovat jejich odolnost. Doplnky můžou být např. přídatné panely nebo vložky, které zamezují probodnutí. Na světě existuje mnoho povolání, které vyžadují určitou úroveň balistické ochrany a podle této úrovně a podle hrozcích nebezpečí v povolání jsou tvořeny vesty s různými vlastnostmi a odolné proti různým nebezpečím. Existuje mnoho variant vest, jak pro skryté nošení, tak pro nošení zjevné.

Myslím, že o významu balistické ochrany člověka nikdo nepochybuje. Pravdou je, že vesta přidává hmotnosti k nošení a pohyb s ní je poněkud omezený, ale chránit své tělo před čímkoliv, co nás ohrožuje, není nic výjimečného. Proti účinkům střelných zbraní nám reflexy nepomůžou, takže jediná možnost ochrany jsou neprůstřelné vesty a jiné balistické ochrany. Vzhledem k tomu, že se stále objevují nové zbraně, účinnější střelivo a hlavně více lidí, od kterých hrozí nebezpečí. Naprosto dokonalá neprůstřelná vesta, aby odolala všem hrozbám, zatím není a ještě dlouho nebude. Každopádně se nošení balistické ochrany vyplatí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- (1) Bajaj, P. (1997). Ballistic protective clothing : An overview. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 22(December), 274–291.
- (2) Bandaru, A. K., Chavan, V. V, Ahmad, S., Alagirusamy, R., & Bhatnagar, N. (2015). Ballistic impact response of kevlar® reinforced thermoplastic composite armors. *International Journal of Impact Engineering*.
- (3) Fejdyś, M., Łandwijt, M., Habaj, W., Struszczyk, M. H. (2015). Ballistic Helmet Development Using UHMWPE Fibrous Materials. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 23(1109), 89–97.
- (4) Chen, X., Zhu, F., Wells, G. (2013). An analytical model for ballistic impact on textile based body armour. *Composites Part B*, 45, 1508–1514.
- (5) Iremonger, M. J., Went, A. C. (1996). Ballistic Impact of Fibre Composite Armours by Fragment-Simulating Projectiles. *Composites Part A*, 2, 575–581.
- (6) Ong, C. W., Boey, C. W., Hixson, R. S., & Sinibaldi, J. O. (2011). Advanced layered personnel armor. *International Journal of Impact Engineering*, 38, 369–383.
- (7) Cooper, G., Gotts, P. (2005). Ballistic Protection. *Ballistic trauma*, 67–90.
- (8) Roland, C. M., Fragiadakis, D., Gamache, R. M. (2009). Elastomer–steel laminate armor. *Composite Structures*, 92, 1059–1064.
- (9) Sorrentino, L., Bellini, C., Corrado, A., Polini, W., Aricò, R. (2014). ScienceDirect International Symposium on Dynamic Response and Failure of Composite Materials. Ballistic Performance Evaluation of Composite Laminates in Kevlar 29. *Procedia Engineering*, 88, 255–262.
- (10) Wang, Q., Chen, Z., & Chen, Z. (2013). Design and characteristics of hybrid composite armor subjected to projectile impact. *Materials and Design*, 46, 634–639.
- (11) Haris, A., Lee, H. P., Tay, T. E., & Tan, V. B. C. (2015). International Journal of Impact Engineering Shear Thickening Fluid Impregnated Ballistic Fabric Composites for Shock Wave Mitigation. *International Journal of Impact Engineering*, 80, 143–151.
- (12) Ptáček, Michal. Balistická ochrana pracovníka průmyslu komerční bezpečnosti. Zlín, 2007. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- (13) Kapalná balistická ochrana – smykem zhuštěná kapalina – ONLINE <http://science.howstuffworks.com/liquid-body-armor1.htm>
- (14) Kapalná balistická ochrana – magnetoreologická kapalina – ONLINE <http://science.howstuffworks.com/liquid-body-armor2.htm>

- (15) Kapalná balistická ochrana – ONLINE
<http://science.howstuffworks.com/liquid-body-armor.htm>
- (16) Polyetylen s ultra vysokou molekulární hmotností – ONLINE
<http://www.compassarmor.com/uhmwpe-ballistic-fabric.htm>
- (17) Kevlar – ONLINE
<http://www.compassarmor.com/kevlar-ballistic-fabric.htm>
- (18) Forster, A. L., Forster, A. M., Chin, J. W., Peng, J.-S., Lin, C.-C., Petit, S., Al-Sheikhly, M. (2015). Long-Term Stability of UHMWPE Fibers. *Polymer Degradation and Stability*, 114, 45–51.
- (19) Alizadeh, M., Lohrasby, F., Khajavi, R., Kordani, N., & Baharvandi, H. R. (2016). Studying the Mechanical Properties of Composites Made of Kenaf-Nylon 66 Fabric , Silica Nanoparticles , and Epoxy Resin.
- (20) Laha, A., & Majumdar, A. (2016). Interactive effects of p -aramid fabric structure and shear thickening fluid on impact resistance performance of soft armor materials. 89, 286–293
- (21) Historie balistické ochrany – ONLINE
<http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/body-armor2.htm>
- (22) Abbot, T. A., (1982) Protective clothing, Shirley Publication, Manchester, UK, 41
- (23) Yang, H. H., Kevlar aramid fibre, (1993), John Wiley and Sons, Chichester, UK
- (24) Carroll, A. W., Soderstrom, C. A, (1978), New non-penetrating ballistic injury, *Ann Surg.*
- (25) Brandon, D. G., Lanford, J., Gray, W., *Encyclopaedia of Material Science and Engineering*, (1990), Supplement Vol. 2, Pergamon Press, Oxford, UK, 697-708

SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obrázek č. 1: Křivka V_{50} pro ochranný systém.....	16
Obrázek č. 2: Plát oxidu hlinitého podporovaný kompozitem.....	17
Obrázek č. 3: Distribuce energie střely v textilních vláknech.....	18
Obrázek č. 4: Zneškodnění výkonné střely ochranou složenou ze silikátu a kompozitu...	19
Obrázek č. 5: Mechanismus selhání jednoho vlákna.....	19
Obrázek č. 6: Chemická stavba nylonu 66.....	22
Obrázek č. 7: Chemická stavba Kevlaru.....	23
Obrázek č. 8: Chemická stavba UHMWPE.....	23
Obrázek č. 9: Balistické chování lehké a těžké ochrany vzhledem k počtu vrstev.....	29
Obrázek č. 10: Výpočet WMR.....	30
Obrázek č. 11: Bojové helmy.....	32
Obrázek č. 12: Britská bojová neprůstřelná vesta.....	33
Obrázek č. 13: Neprůstřelná vesta policie.....	33
Obrázek č. 14: EOD oblek.....	35
Obrázek č. 15: Ochranný oblek proti nožům.....	36
Obrázek č. 16: STF.....	39
Obrázek č. 17: MR kapalina.....	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1:: Procentuální distribuce zranění podle anatomických ploch.....	14
Tabulka č. 2:: Distribuce způsobení zranění.....	15
Tabulka č. 3:Srovnání vlastností materiálů.....	21
Tabulka č. 4:Srovnání požadavků na policejní a vojenskou neprůstřelnou vestu.....	34
Tabulka č. 5:Třídy balistické odolnosti podle české normy.....	37