

Vývoj hi-tech kompozitních sendvičů pro balistickou ochranu

Bc. Vojtěch Nováček

Vedoucí práce: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou vývoje kompozitních sendvičů pro balistickou ochranu, jehož hlavním řešitelem je společnost LA composite, s.r.o. Je zde uveden trend při nahrazování ocelových pancířů za kompozitní z důvodu snižování hmotnosti materiálů používaných v leteckém průmyslu a současně při zachování požadované třídy balistické odolnosti dle normy STANAG 4569. Práce dále obsahuje podrobnější popis průběhu deformace projektilu, požadavky na balistickou odolnost, příklady používaných nejnovějších materiálů a jejich strukturu, dále komparační zkoušky navržených materiálů a jejich analýza pomocí DSC zkoušky a mikroskopu SEM.

Klíčová slova

Balistická ochrana, kompozitní sendvič, balistický materiál, STANAG 4569

1. Úvod

Balistické materiály jsou takové materiály, které jsou schopné odolávat projektilům různých ráží, tzv. ballistic resistance. Dalším druhem balistickým materiálů jsou materiály odolné proti výbuchu a nástražným minám, tzv. blast resistance. Zde je ale odlišnější konstrukce celého kompozitního sendviče, jelikož proces penetrace od výbuchu je následně doprovázen ještě rázovou vlnou, která se šíří pomaleji než střepiny a rázová vlna pak dopadá na již zdeformovaný povrch. Požadavkem na balistické materiály je extrémní tvrdost a zároveň vysoká houževnatost. Tyto dvě vlastnosti se ale vylučují, proto se v případě monolitních materiálů volí určitý kompromis mezi optimální tvrdostí a houževnatostí. Mnohem větší uplatnění mají materiály složené, tzv. duální pancíře či sendviče.

2. Kovové balistické materiály

Z kovových materiálů se používají buď jednovrstvé systémy homogenních kovových pancířů, nebo vícevrstvé systémy pancířování. Na složitější konstrukce vozidel je kladen požadavek svařitelnosti. Základním požadavkem na pancíře je tvrdost a houževnatost. Tvrdost musí být vyšší, než je tvrdost projektilu k dosažení maximální destabilizace nebo odklonu projektilu pro snížení jeho účinnosti. Z tohoto důvodu se používají ocelové pancíře vyrobené ze svařitelných válcovaných nebo termomechanicky upravených ocelí s tvrdostí mezi 44÷54 HRC (500-600 HB) nebo se volí pancíře složené. Složené pancíře se skládají z vrchní vrstvy vysoce tvrdé a spodní houževnaté vrstvy k pohlcení maxima energie. V současné době se k výrobě konstrukcí svařovaných ocelových koreb moderních obrněných transportérů používají oceli jako je 2P, Armox 400 S, Armox 46 100, Armox 500 S, Armox 560 S, Armox 500T (R_m 1450-1750 MPa), Armox 600T (R_m 2000 MPa), Armox ADVANCE (R_m 2200 MPa) [3], Mars 240, Mars 270, AISI 4340, 300 M, XH 129, RB 500, TMO77 atd. S rostoucí tvrdostí ale klesá houževnatost, čímž dochází ke změně mechanismů penetrace (průniku) a k nebezpečí porušení integrity pancíře. Efektivním způsobem spojení vysoké tvrdosti a dostatečné houževnatosti je použití duálního nebo ternárního ocelového pancíře. Duální pancíř se skládá např. z čelní vrstvy oceli (např. ocel Tenax H) o tvrdosti 58–64 HRC

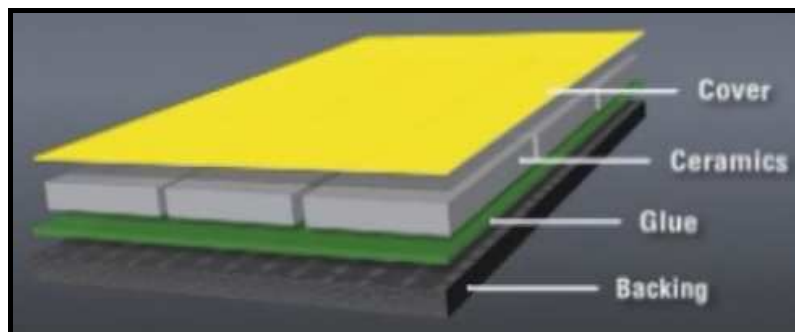
a ze spodní podkladové vrstvy houževnaté ocelí (např. 3PA, THYRODUR 2767, VIDAR SUPERIOR \approx ČSN 19 552) s tvrdostí 48–54 HRC, přičemž tloušťka tvrdé vrstvy bývá 40÷50 % celkové tloušťky. Oceli ARMOX jsou vysoce pevné až ultrapevné pancíře, které vyrábí firma SSAB Švédsko. [1]

ULTRAFORT 6355 je v současné době nejlepší známý zahraniční ocelový pancíř, prezentovaný jako "intelligent shield" a "high-tech steel", vyráběný firmou Edelmetall Witten-Krefeld GmbH (koncern Thyssen) na bázi ocelí maraging (martenziticky vytvrzitelná ocel).

Mezi hliníkové pancíře patří slitina typu 5083 s pevností v tahu 300÷350 MPa. [1] a deformačně (dislokačně) zpevněná pro zlepšení balistických charakteristik. Má vyšší ochrannou odolnost proti střepinám dělostřeleckých granátů, dobrou svařitelnost a dodává vyšší tuhost konstrukci (při stejné plošné hmotnosti) ve srovnání s ocelovými v důsledku trojnásobné tloušťky Al slitiny. Dalším zástupcem je slitina 7039 (MIL-A 46063 AMR), tepelně vytvrzitelná s pevností až 485 MPa a tvrdostí 150 HB. Její relativní účinnost proti průbojným střelám je vyšší než u oceli o tvrdosti 380 HB a oproti slitině 5083, což umožňuje zmenšení tloušťky. Její nevýhodou je citlivost ke korozi pod napětím a obtížná svařitelnost. Nové možnosti skýtají také vícevrstvé pancíře na bázi Al. Tyto pancíře se skládají ze tří vrstev tepelně zpracované Al slitiny spojené do jedné desky válcováním za tepla. Dále duální pancíře typu Al/Al s horní vrstvou slitiny 7039 a podložní vrstvou ze slitiny 5083. Mnohem vyšší účinnosti hliníkových pancířů se dosahuje použitím duálního vrstveného pancíře tvořeného čelní tvrdou ocelovou vrstvou a spodní hliníkovou slitinou 5083. [1]

3 Balistické materiály z kompozitních sendvičů

Jak již bylo zmíněno výše, hlavním požadavkem na balistické materiály je extrémní tvrdost a houževnatost. Tyto vlastnosti se ale u materiálů vylučují, proto se používá více materiálů spojených dohromady do tzv. sendviče, kde každá jednotlivá vrstva plní svou úlohu. V dnešní době se stále více uplatňuje trend snižování hmotnosti jak v automobilovém, tak v leteckém průmyslu z důvodu úspory energie, lepší ovladatelnosti a menších deformačních účinků v případě nehody. Volí se proto sendviče kompozitní. Příklad složení lze vidět na obr. 1.



Obr. 1 Kompozitní sendvičová struktura

Většinou se balistické sendviče skládají z kompozitního potahu (cover) přilepeného na čelní úderovou vrstvu (strike face), která je buď z oceli, nebo keramiky. Tato tvrdá úderová vrstva má za úkol zabránit proniknutí projektilu do materiálu, má za úkol deformovat projektil a je přilepena pomocí lepidla (glue) na zadní stranu struktury (back face, backing), která má za úkol následně pohltit energii projektilu, popřípadě ještě zastavit samotný projektil či jeho úlomky. Energie projektilu je disipována díky vzniku plastické deformace čelní vrstvy a delaminace zadní vrstvy. Lepidlo může být flexibilní pryž nejlépe na bázi polyurethanu, pohlcuje nárazovou vlnu a funguje jako tlumič, aby nárazové vlny neiniciovaly trhliny v okolí dopadu projektilu. Dále zmírňuje přechod mezi tvrdou keramickou částí a poddajnější zadní

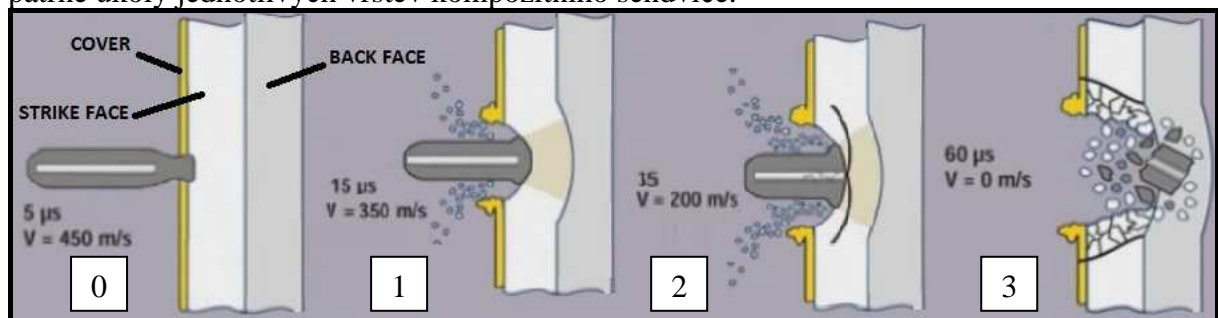
kompozitní částí. Kompozitní potah (cover) slouží jednak k zajištění celistvosti celé struktury, jednak zachycuje roztržštěné úlomky projektilu či keramiky, které se šíří zpět proti pohybu projektilu v místě dopadu. Jako potah (cover) je nejvhodnější použít CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), jak vyplývá z britské studie z Cambridge University [2]. Oproti skelnému potahu GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) dodá větší tuhost celému sendviči, chrání jeho strukturální celistvost po impaktu (nárazu), zvyšuje pevnost v ohybu celého sendviče, zároveň zachytí více energie a nepatrně zvyšuje limitní rychlost v_{50} , což je taková rychlost projektilu, při které dojde k penetraci materiálu u poloviny (50%) počtu vystřelených projektilů, tzn. polovina vystřelených střel materiálem projde a polovina je zachycena.

3.1 Úderová keramická vrstva

Požadavkem pro úderovou vrstvu je vysoká tvrdost. V roce 1962 byl vyvinut první kompozitní pancíř, u kterého byla čelní vrstva vyrobena z keramického materiálu. Prakticky se pancíře na bázi keramiky používají od vietnamské války (60. léta 20. století). V současnosti se používá v ochranných vestách a jako přídatné pancéřování vrtulníků a vozidel. Obecně se uvádí, že penetrace ochranné keramické desky projektilem je třífázový proces:

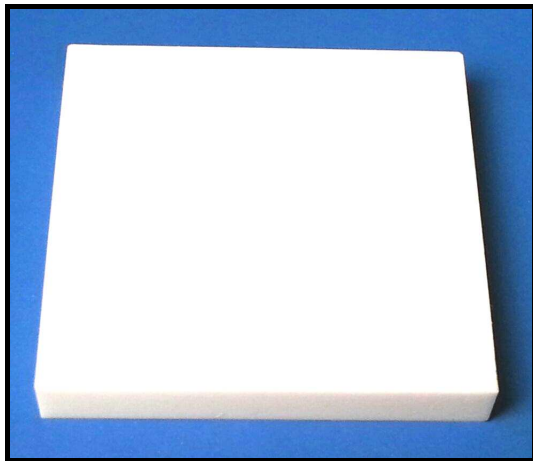
- 1) Vzniká rázová vlna, která iniciuje trhliny v keramice, zároveň dochází k deformaci projektilu.
- 2) Nastává drcení keramiky a její jednotlivé úlomky jsou urychlovány proti pohybu projektilu.
- 3) Dochází k deformaci nebo penetraci podkladové (kovové nebo kompozitové) desky.

Na obr. 2 níže můžeme pozorovat jednotlivé fáze proniknutí projektilu do materiálu. Zde jsou patrné úkoly jednotlivých vrstev kompozitního sendviče.

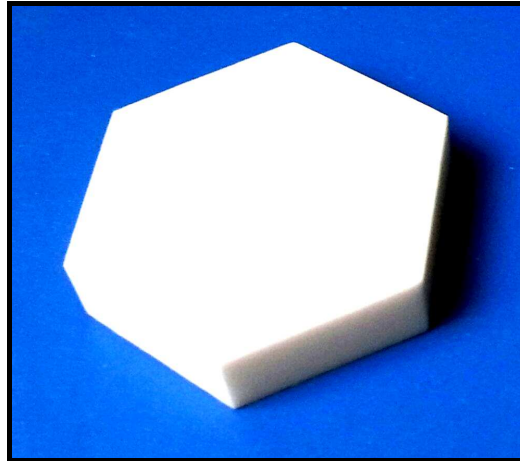


Obr. 2 Fáze proniknutí projektilu do materiálu a úloha vrstev

Nejčastěji se pro pancéřovou ochranu používá keramika na bázi Al_2O_3 , SiC, B_4C a jejich homogenní nebo heterogenní kombinace. Prášky těchto materiálů se lisují do forem jednoosým tlakem a následně se slinují při vhodných teplotách. Lisovací tlaky prášků se pohybují v rozmezí 100 až 300 MPa, což klade vysoké nároky na přesnost forem, které jsou vyrobeny z tvrdokovu. Lisovací tlak ovlivňuje porozitu výsledné keramiky. Velký vliv na mechanické vlastnosti a odolnost vůči šíření trhlin má zrnitost keramiky. Například oxidická keramika ALOCOR 100 od německé společnosti CeramTec má zrnitost pod 100 nm a tuhost 405 GPa, což zvyšuje balistickou odolnost. Nejčastěji se používá slinutý Al_2O_3 hlavně z důvodu příznivé ceny. SiC je přibližně 4krát dražší a B_4C dokonce 10krát dražší než Al_2O_3 . Dražší typy keramik se tedy přednostně uplatňují na vrtulnicích. Nejčastějším tvarem keramických destiček používaným pro skládání sendvičů je čtverec a pravidelný šestiúhelník jak je patrné na obr. 3 a 4. V případě korundové keramiky je jejich cena pro destičky 50x50 mm řádově 10 000 Kč/m² a pro šestiúhelníkové destičky o průměru 30 mm kružnice vepsané 20 000 Kč/m². Dalším tvarem keramiky jsou oválné útvary, kuličky, válečky, čočky v anglickém jazyce označované jako nodes. Předřazují se na čelní stranu pancíře před hladkou keramickou deskou a mají za úkol odklonit dopadající projektil. [3], [4]



Obr. 3. Čtvercový tvar keramické destičky



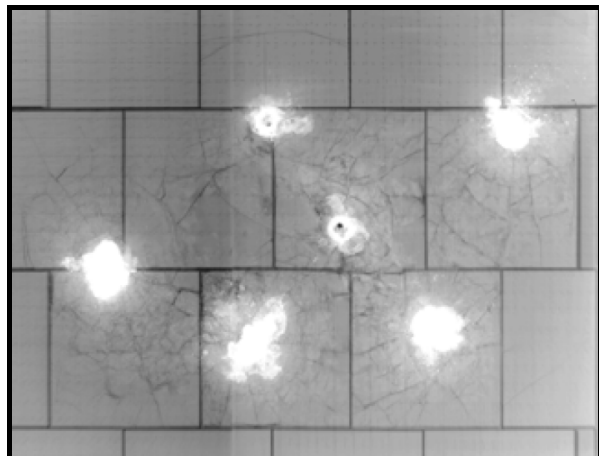
Obr. 4. Šestiúhelníkový tvar keramické destičky

V současné době není známo, jak velikost jednotlivých segmentů ovlivňuje balistickou odolnost. Z úvahy vyplývá, že při použití větších destiček je při dopadu projektilu poškozena větší plocha čelního pancíře, pokud se trhliny šíří od místa dopadu radiálním směrem až k okraji destičky. Další projektil tak může s větší pravděpodobností dopadnout na již prasklou (roztříštěnou) a tím i oslabenou plochu pancíře. Na druhou stranu mozaika poskládaná z malých destiček má více hran a mezer, které mohou být slabým místem méně účinně bránící proniknutí a zpomalení projektilu. [3], [5]

Kompozitní sendvič by měl mít schopnost tzv. vícenásobného úderu (Multi-hit capability). Jedná se o schopnost zabránění proniknutí projektilu při opětovném dopadu do deformačně ovlivněné oblasti od projektilu předchozího. Na obrázku níže (obr. 5) lze vidět kompletní ochrana v reálné situaci pro dva zásahy v oblasti o poloměru 200 mm. Této schopnosti se dosáhne tím, že se co nejvíce eliminujeme deformační oblast od projektilu. Zabrání se šíření trhliny v úderové vrstvě (strike face) tím, že trhlina musí narazit na překážku, aby se nemohla dále šířit. To se docílí tak, že úderová vrstva nebude monolitní, ale bude složena z jednotlivých segmentů (mozaiky). Dle německé společnosti CeramTec, je nejvhodnější pro multi-hit capability mozaika o velikosti 50 x 50 mm pravidelného šestiúhelníkového tvaru. Na dalším obrázku (obr. 6) lze pozorovat zastavení šíření trhliny pomocí hranic jednotlivých dílů mozaiky. Zde je patrné, že v případě čtvercové mozaiky, se trhlina může ještě šířit do rohů čtverce. V případě šestiúhelníků by došlo k zastavení trhliny mnohem dříve! [6]



Obr. 5 Multi-hit capability



Obr. 6 Zabránění šíření trhlin hranicemi mozaiky [6]

3.2 Spodní kompozitní vrstva

Úkolem spodní kompozitní vrstvy je pohltit co nejvíce rázové energie od dopadu projektilu. Požadavkem je zde proto vysoká houževnatost. Mezi nejlépe balisticky odolné materiály, patří například Kevlar (aramidová vlákna). Z široké škály těchto materiálů lze uvést např. Kevlar (vydrží provozní teploty od -40°C do 100°C). Hodí se jak pro neprůstřelné vesty (soft protection), tak pro balistické panely (hard protection). Jsou vyráběny společností DuPont. Společnost Teijin nabízí alternativu zvanou Twaron®, což je materiál na bázi paraaramidu, má vysokou tuhost, rozměrovou stabilitu a vysokou korozivzdornost. [7]

Další možností jsou termoplastová vlákna na bázi UHMWPE – Ultra High Molecular Weight Polyethylene, známá pod obchodním názvem Dyneema. Tento materiál lze snadněji obrábět na různé tvary, odolává vlhkosti, chemikáliím a UV záření. Je plovoucí na vodě, přitom je 15krát pevnější než ocel. Existuje i Dyneema UD (jednosměrně vyztužená). Předností této jednosměrné výztuže je v porovnání s tkanou výztuží větší absorpce energie projektilu, jelikož energie se snadněji šíří po osách vláken, kdežto v tkanině se absorpce energie snižuje kvůli jednotlivým uzlům a nerovnosti vláken. Dyneema je použita například v amerických vozidlech MRAP (Mine Resistant Ambush Protected), jež patří mezi nejkvalitnější vozidla odolná proti nástražným minám. Nejznámějším výrobcem těchto vláken je společnost DSM, která vyrábí UHMWPE vlákna pod obchodním označením Dyneema. Dalším výrobcem těchto vláknům podobným je společnost Honeywell, která je nabízí pod obchodním názvem Spectra®.

Mezi balistické materiály patří dále Zylon® skládající se z tuhého řetězce molekul Phenylene Benzobisoxazole (PBO). Má zvýšenou pevnost v tahu a větší tuhost než E-sklo.

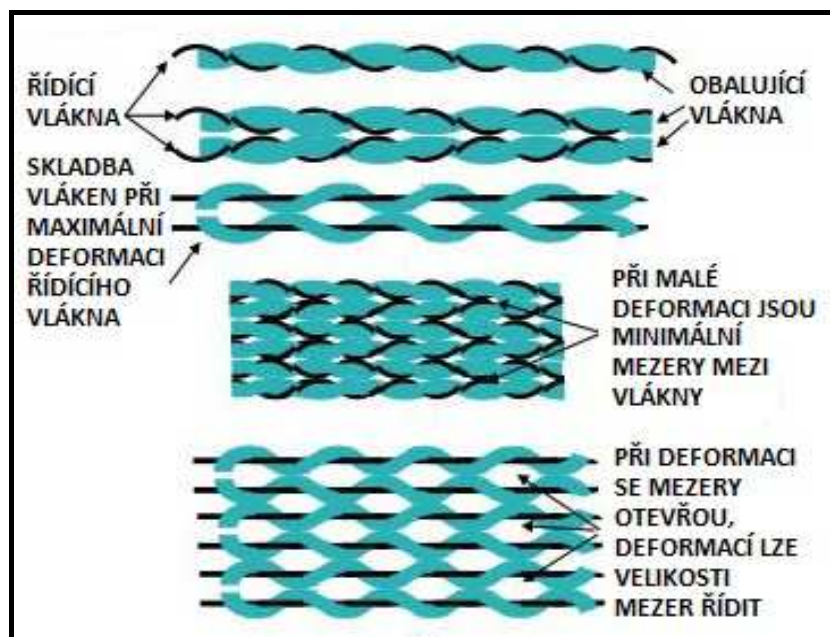
Z oblasti skelných vláken jsou nejvíce používána S-1, S-2 a S-3 vlákna od společnosti AGY. Tato vlákna mají 10krát větší pevnost než ocel a třetinovou hustotu.

Na bázi polypropylenu (PP – Polypropylene) byly nedávno vyvinutá vlákna zvaná Innegra S od společnosti Innegrit LLC. Vlákna jsou zhotovena z vysoce orientovaného polypropylenu. Tyto vlákna s hustotou $0,84 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a aplikací max. do 150°C jsou kompatibilní se skelnými a uhlíkovými vlákny jak v termosetické, tak termoplastové matici. Odolnější vůči projektilu a zároveň levnější alternativa se jeví hybridní tkanina v kombinaci Innegra S/uhlík. Také arizonská společnost TechFiber LLC kombinuje vlákna Innegrit S s vlákny aramidovými v materiálu I-Flex® H nebo T-Flex® H s extrémní odolností vůči vysokým teplotám [9].

Od společnosti Milliken&Co je balistický materiál Tegriss s PP maticí a PP vlákny, tudíž se stoprocentní recyklovatelností. Tento materiál se vyrábí v podobě desek, lisováním PP tkaniny dohromady s PP maticí za vysokých teplot a tlaků technologií termoforming.

Dále britská společnost Auxetix Ltd vyvinula tkaniny utkané z výztuže Zetix®, které mají záporné poissonovo číslo (pod napětím zvětšují svůj průměr). Na níže uvedeném obrázku (obr. 7) je znázorněn princip těchto vláken. Základem je tenké tužší vlákno obalené elastomerovým vláknem do šroubovice s výrazně větším průměrem a elastickými vlastnostmi. Při deformaci se malé vlákno natahuje a zároveň velké vlákno zvlíná tak, že vytváří mezi vlákny mezery. Toho lze potom využít pro lepší absorpci energie, kdy vlákna fungují jako integrální tlumiče. Tyto tkaniny jsou vhodné hlavně pro pohlcování energie z výbuchu (blast resistance). [7], [8]

Velice zajímavou možností jak zvýšit účinnost kompozitní vrstvy je hybridizace vrstev, kdy se kombinují tkaniny z uhlíku a Innegrit S nebo Kevlaru a dále tkaniny mezi Kevlarem a Innegrou S.



Obr. 7 Princip vláken Zetix [8]

3.3 Třída balistické odolnosti

Balistická odolnost materiálů se určuje dle norem, kterých existuje více druhů dle státu. Členské státy NATO se většinou řídí dle normy **STANAG 4569** (level 1 až 5), stanovující ochranu proti balistickým i výbušným hrozbám. Jedná se o normu podepsanou v Bruselu r. 2004 vydanou Severoatlantickou aliancí NATO. *STANAG* (*STANdardization AGreement*) určuje úroveň ochrany pro osádky lehkých obrněných vozidel a má několik částí (Annex A až D). Další normy, které určují třídu balistické odolnosti (TBO) jsou například NIJ 0108.01 Spojených států amerických (I až IV), EN 1063 Evropy (odolnosti B1 až B7), dále DIN 52290 Německa (M1 až M5) a další. Níže uvedená tabulka ukazuje TBO dle NATO.

Tabulka 1. *STANAG 4569 Annex A*

Annex A: Odolnost vůči munici z palných zbraní		
Úroveň	Zbraně, munice a podmínky	Konkrétní typy munice
1	Útočné pušky Standardní plná munice Vzdálenost 30 m, úhel dopadu 0° až 30°	7,62mm×51 NATO ball (833 m.s ⁻¹) 5,56mm×45 NATO SS109 (900 m.s ⁻¹) 5,56mm×45 NATO M193 (937 m.s ⁻¹)
2	Útočné pušky Průbojná munice s ocelovým jádrem Vzdálenost 30 m, úhel dopadu 0° až 30°	7,62mm×39 API BZ (695 m.s ⁻¹)
3	Útočné a odstřelovačské pušky Průbojná munice s jádrem z karbidu wolframu Vzdálenost 30 m, úhel dopadu 0° až 30°	7,62mm×51 AP WC (930 m.s ⁻¹) 7,62mm×54R B32 API (854 m.s ⁻¹)
4	Těžké kulometry Průbojná munice Vzdálenost 200 m, úhel dopadu 0°	14,5mm×114 API/B32 (911 m.s ⁻¹)
5	Automatické kanony Munice APDS Vzdálenost 500 m, úhel dopadu 0°	25mm×137 APDS-T PMB 073 (1258 m.s ⁻¹)

Pozn. V závorkách se uvádějí rychlosti dopadů střel. Tolerance ± 20 m.s⁻¹.

4 Komparační zkoušky kompozitních materiálů.

Následující kapitoly jsou věnovány experimentálním zkouškám. Současných vyráběných balistických materiálů existuje na trhu celá řada. Aby bylo možné rozhodnout, který materiál má největší balistickou odolnost, a který bude nejhodnější použít na nejvíce nebezpečná místa vozidel a letounů, byly provedeny následující komparační zkoušky 4 materiálů:

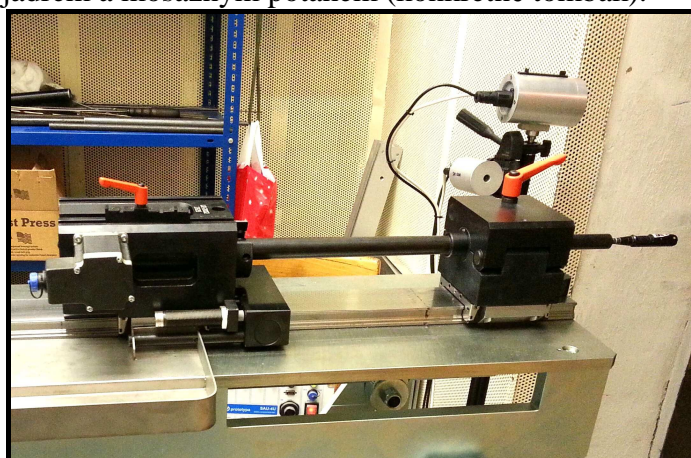
- 1) Dyneema (UHMWPE) – PE vlákna v keprové vazbě s obsahem 20% fenolické pryskyřice
- 2) Kevlar – aramidová vlákna v plátnové vazbě s obsahem 12% fenolické pryskyřice
- 3) Innegra – PP vlákna v plátnové vazbě s obsahem 20% fenolické pryskyřice
- 4) Tegriss – PP vlákna v PP matrici lisované za tepla a tlaku.

Vzorky byly vyrobeny z prepregu a vytvrzeny autoklávovou technologií za tepla a tlaku. Následně byly obrobeny vodním paprskem do požadovaného tvaru čtvercové desky o straně 250 mm a čtyřmi otvory ϕ 11 mm pro uchycení do rámečku registru (obr. 8). Zkoušky byly prováděny ve společnosti Prototypa Brno dle normy STANAG 4569 ve vzdálenosti 15 m dle levelu 1. Jelikož se jednalo pouze o komparační zkoušky, byl zde použit jako strike face plech z martenzitické oceli ARMOX 500T tloušťky 3 mm. Chemické složení oceli uvádí tabulka 2 níže.

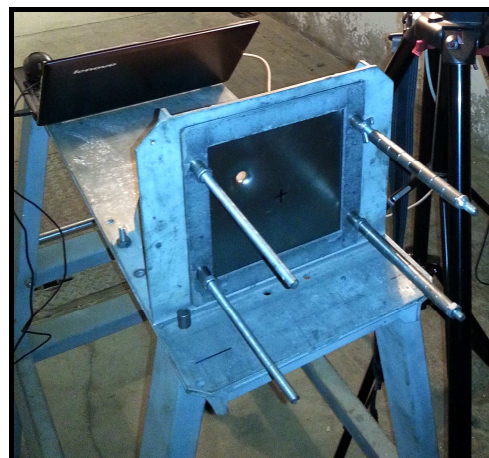
Tabulka 2. Chemické složení oceli ARMOX 500T

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)	P (%)	S (%)
0,32	0,4	1,2	1,0	1,8	0,7	0,005	0,015	0,010

Střelba probíhala z balistické zbraně upnuté v přípravku (obr. 9) a měřila se dopadová a výstupní rychlost projektilu pomocí vysokorychlostní kamery (20 000 snímků za sekundu). Na každý vzorek bylo vystřeleno několik projektilů ráže 5,56×45 NATO SS109 s olověným jádrem a mosazným potahem (konkrétně tombak).



Obr. 8 Balistická zbraň upnutá v přípravku



Obr. 9 Rámeček registru

Následující obrázky ukazují deformaci materiálu projektilem. Prvním vzorkem byla Dyneema, její plasticky ovlivněnou zónu lze vidět na obr. 10. Na obr. 11 je deformovaný vzorek z kevlaru, který první projektil zachytil. Zde je vidět, jak veškerá kinetická energie projektilu byla disipována (se přeměnila) na plastickou deformaci ocelového plechu a delaminaci jednotlivých vrstev kompozitu (na obr. 11 zvlnění poslední celé desky). Na dalším obrázku (obr. 12) byl deformován prvním projektilem tegriss (2 PSF – deska 2 Pound Squared Feet), otvor vpravo. Při druhém projektilu byla přidána ještě navíc deska 1 PSF (celkem tedy 3 PSF), ale deformace se téměř nezměnila, otvor vlevo, jak lze vidět na obrázku. Na dalším obrázku (obr. 13) je plastická deformace čtvrtého vzorku Innegry .



Obr. 10 Dyneema – deformačně ovlivněná oblast Obr. 11 Kevlar – plastická deformace

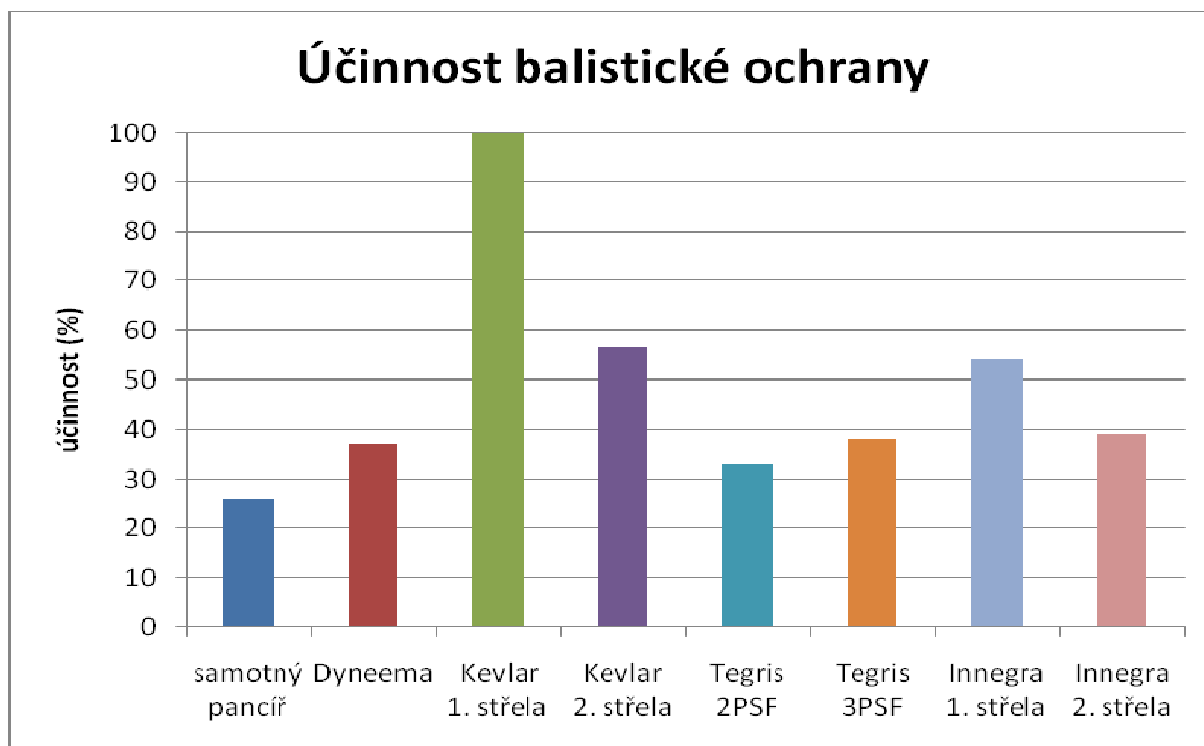


Obr. 12 Tegrís, 2PSF otvor vpravo, 3PSF otvor vlevo Obr. 13 Innegra – plastická deformace

Výsledky komparačních zkoušek, tj. dopadovou a výstupní rychlost, shrnuje následující tabulka 3. Výstupní rychlost a průběh deformace byly zaznamenány pomocí vysokorychlostní kamery a vyhodnoceny z videa, které bude představeno na konferenci v průběhu prezentace.

Tabulka 3. Shrnutí výsledků komparačních balistických zkoušek

p.č.	Vzorek	$V_{\text{dopad.}} [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	$v_{\text{výst.}} [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	$v_{\text{rozd.}} [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Účinnost [%]
1.	samotný pancíř tl. 3mm	1002	742	260	26
2.	pancíř tl.3mm + Dyneema	991	622	369	37
3.	pancíř tl.3mm + Kevlar	1004	0	1004	100
4.	pancíř tl.3mm + Kevlar	999	432	567	57
5.	pancíř tl.3mm + Tegrís 2PSF	1003	673	330	33
6.	pancíř tl.3mm + Tegrís 3PSF	997	618	379	38
7.	pancíř tl.3mm + Innegra	986	451	535	54
8.	pancíř tl.3mm + Innegra	996	606	390	39

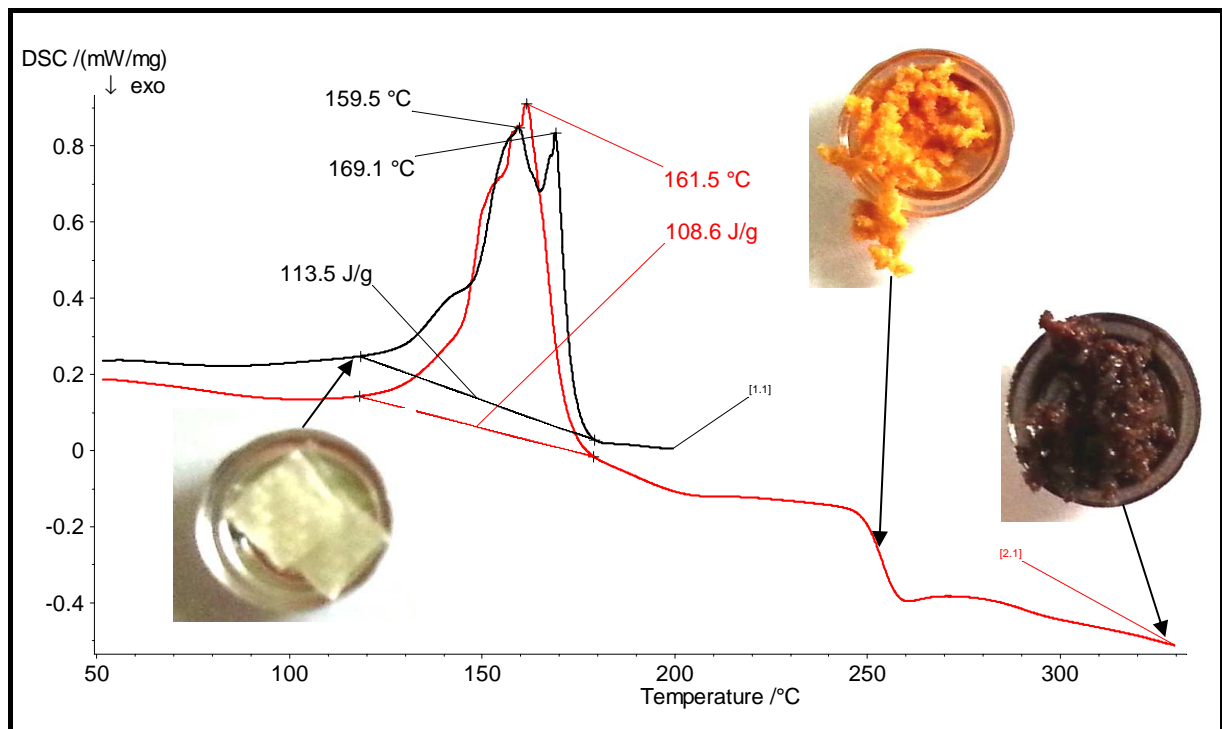


Obr. 14. Graf účinnosti jednotlivých materiálů a vliv na zvýšení balistické odolnosti

Výše uvedená tabulka 3 a graf (obr. 14) nám zcela ukazují vliv na zvýšení balistické odolnosti samotných pancířů. Při použití navíc houževnaté podkladové zadní části sendviče nám např. v případě Kevlaru vzroste balistická ochrana výsledného sendviče až na 100 %. V případně dalších materiálů, lze vidět značný nárůst ochrany.

4.1 DSC zkouška

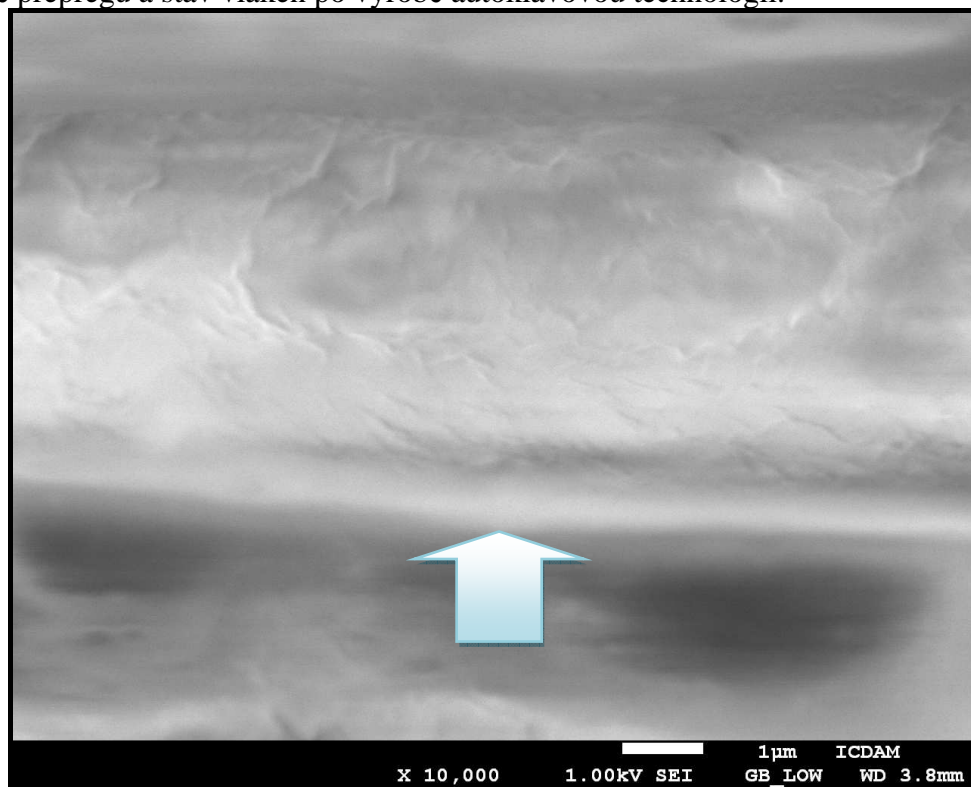
Dle předešlých výsledků lze konstatovat, že materiál Dyneema má nejmenší účinnost i přesto, že literatura a výrobci považují právě tento ultra vysoko molekulární polyethylen za nejodolnější materiál v balistické ochraně. Následně budou zjišťovány příčiny neúspěchu tohoto materiálu v testu balistické odolnosti. Byla proto provedena DSC (Differential scanning Calorimetry) zkouška jak prepregu (červená čára), tak vytvrzeného vzorku (černá čára), zda nedošlo k degradaci materiálu vlivem vysoké teploty při autoklávové technologii, kde bylo dosaženo v průběhu vytvrzování max. 120 °C. Z níže uvedeného obrázku (obr. 15) můžeme vyčíst, že teplota tání prepregu (červeně) činila $T_{m1} = 161,5$ °C, potřebná entalpie na roztavení materiálu byla $H_1 = 108,6$ J/g. Druhý peek mohl být způsoben nějakou příměsí či nečistotou. U zkoušky vytvrzeného vzorku (černě) byla teplota tání $T_{m2} = 159,5$ °C a entalpie $H_2 = 113,5$ J/g. Při ohřevu prepregu až do 330 °C došlo k degradaci a zčernání materiálu, při ohřevu prepregu jen do 250 °C začal počátek degradace a při ohřevu prepregu do 120 °C lze vidět, že k degradaci nedošlo. Právě teplota 120 °C je počátkem vzniku peeku při tavení. Samotný výrobce uvádí počátek tavení až při 135°C. Nedoporučuje ale však dlouhodobé použití nad 80 až 100 °C. Z výše zmíněného můžeme tedy konstatovat, že teplota výroby dyneemy se pohybovala právě na hranici, kdy dochází k počátku natavení materiálu, jak lze vidět z obr. 14.



Obr. 15 DSC zkouška Dyneemy.

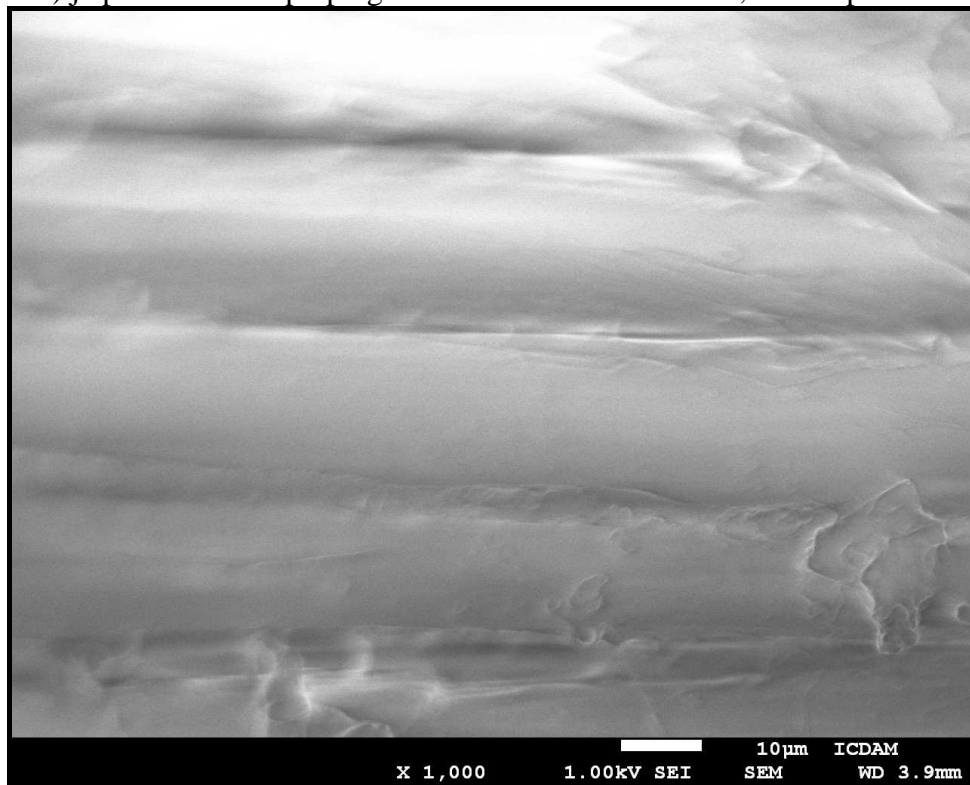
4.2 Analýza vláken pod mikroskopem SEM

V pokračování zjišťování příčin nízké účinnosti materiálu dyneema byla dále provedena analýza vláken pod elektronovým mikroskopem SEM (Scanning Electron Microscope). Na níže uvedených mikrosnímcích je porovnán stav vláken před výrobou v podobě prepregu a stav vláken po výrobě autoklávovou technologií.



Obr. 16 Spodní část vlákna prepregu před vytvrzením

Na obr. 16 lze pozorovat na mikrosnímku spodní část vlákna prepregu (označeno šipkou). Zde vlákno není nikterak porušené, ostatně dle předpokladu. Na dalším mikrosnímku níže (obr. 17) je pozorováno v prepregu několik vláken vedle sebe, také neporušené.

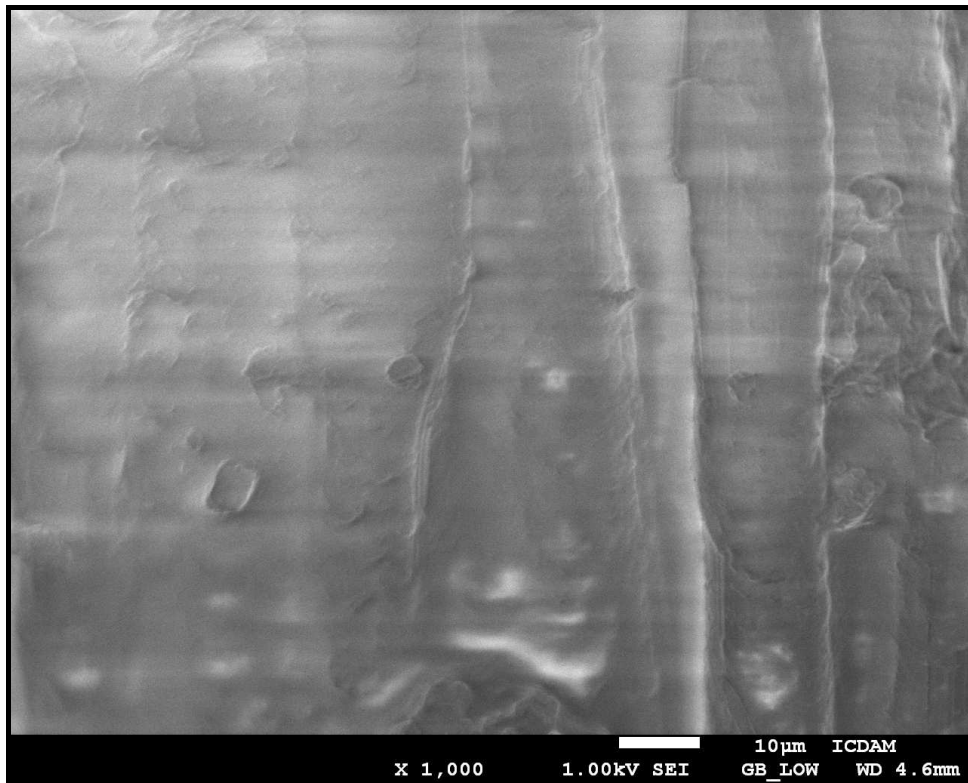


Obr. 17 Soustava vláken prepregu vedle sebe

Na obr. 18 je mikrostruktura už vytvrzeného vzorku. Zde lze porovnat stav vláken po vytvrzení. Zde je pravá část vlákna, které je také neporušené.



Obr. 18 pravá část vlákna vzorku po vytvrzení



Obr. 19 Soustava vláken vytvrzeného vzorku vedle sebe

Na obr. 19 je uspořádání vláken vedle sebe již vytvrzeného vzorku. I zde lze vidět celistvost vláken bez známek porušení. Z uvedených mikrosnímků lze závěrem konstatovat, že stav vláken před vytvrzením a stav vláken po vytvrzení se nezměnil. Autoklávovou technologií nedošlo k degradaci vláken materiálu dyneema.

5. Závěr

Ze studie vyplývá, že v současné době existuje významný trend při nahrazování ocelových pancířů balistickými kompozitními sendviči při zachování požadované třídy balistické odolnosti za účelem výrazného snížení hmotnosti. Využívá se tedy tvrdých keramických materiálů na bázi korundu Al_2O_3 , karbidu křemíku SiC a karbidu boričitého B_4C a houževnatých kompozitních materiálů jako je Kevlar, UHMWPE, Innegra či Tegriss spojené do sendvičové koncepce. Tvar a velikost keramických destiček a tloušťka kompozitní vrstvy je otázkou optimalizačního procesu každé společnosti, jelikož se jedná o vojenskou a armádní sféru, kde bývá přísné utajení. Z těchto důvodů mnoho poznatků v této oblasti není uveřejněno.

Z výsledků komparačních zkoušek jasně vyplývá zvýšení balistické účinnosti přidáním zadní houževnaté vrstvy. Ze zkoušek zde uvedených materiálů má nejvyšší účinnost Kevlar a nejmenší účinnost dyneema. Další experimenty budou obsahovat vliv tuhosti v různých směrech na balistickou odolnost. Bude proto optimalizována orientace vrstev jednotlivých materiálů.

Z DSC zkoušek tohoto materiálu jsme zjistili teplotu tání $T_{m1} = 160,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a počátek začínající fáze tání je nad $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Z této zkoušky můžeme tedy konstatovat, že teplota při výrobě byla na hranici počátku tavení, kdy při této teplotě začíná k postupnému oddělování meziatomových vazeb.

Zkoumáním dyneemy pomocí elektronového mikroskopu SEM nebyl prokázán špatný vliv autoklávové technologie zejména na degradaci vláken. Vlákná pozorovaná před

vytvrzením v podobě prepregu a vlákna vytvrzeného vzorku nevykazovala žádné známky plastické deformace či trhliny. Možnou příčinou neúspěchu toho materiálu je částečné porušení mezi atomových vazeb v molekulách materiálu při dosažení teploty 120 °C při výrobě, kdy dle DSC zkoušky právě začíná počátek tavení. Pro tuto možnost by bylo potřeba dalších podrobnějších zkoušek, například pomocí AFM mikroskopu (Atomic Force Microscope - mikroskop atomárních sil), pomocí kterého lze pozorovat objekty na atomové úrovni i nevodivých vzorků.

Jelikož se používají materiály s nejvyšší existující tvrdostí hned po velice drahém a vzácném diamantu, mnoho materiálů na výběr už nezůstává. V případě dalšího zvyšování balistické odolnosti při zachování hmotnosti se nabízejí různé modifikace povrchu. Nabízí se možnosti modifikace povrchu pomocí nanotechnologií, zejména pak uhlíkovými nanotrubicemi či další modifikací uhlíku a to fullereny s extrémně vysokým modulem pružnosti a tvrdostí.

Seznam symbolů

v_{50}	limitní rychlost projektilu	(m/s)
v_{dopad}	dopadová rychlost projektilu	(m/s)
$v_{výst}$	výstupní rychlost projektilu	(m/s)
v_{rozd}	rozdílová rychlost projektilu	(m/s)
T_m	teplota tání	(°C)
H	entalpie	(J/g)

Seznam použité literatury

- [1] HORÁK, Rudolf a Vlastimil ŠEDIVÝ. Balisticky a NBC odolné mobilní prvky pro krizové řízení. Brno: Brno, 2009
- [2] Structural ballistic armour for transport aircraft. In: HORSFALL, I., S.J. AUSTINA, a W. BISHOP. Materials and Design 21. Cambridge, UK: Elsevier, 1999, s. 19-25.
- [3] Buchar J, Voldřich J.: Terminální balistika, ISBN 80-200-1222-2, Academia, 2003
- [4] Medvedovski E.: Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1, Ceramics International, Vol. 36, 2010, p. 2103 – 211
- [5] Medvedovski E.: Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2, Ceramics International, Vol. 36, 2010, p. 2117 - 2127
- [6] A DEVELOPMENT OF INTEGRAL COMPOSITE STRUCTURE FOR THE RAMP OF INFANTRY FIGHTING VEHICLE [online]. Spain, 2007[cit. 2012-12-20]. Dostupné z: http://www.mater.upm.es/isb2007/Proceedings/PDF/Volume_2/Vol.II%286%29AP07.pdf
- [7] About Ballistic Panels. ArmorCo [online]. 2012 [cit. 2012-12-20]. Dostupné z: <http://www.armorco.com/shop/custom.aspx?recid=4>
- [8] Antiballistics: Composites in the cross hairs. CompositesWorld [online]. 2009, č. 11 [cit. 2012-12-20]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/antiballistics-composites-in-the-cross-hairs>
- [9] Optimized for Soft Armor. In: TechFiber [online]. 2012 [cit. 2012-12-20]. Dostupné z: http://www.techfiber.com/kflex_tflex_datasheet.pdf