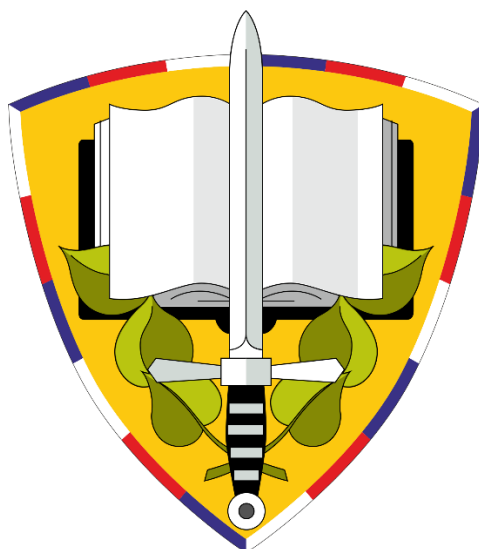


UNIVERZITA OBRANY

Fakulta vojenských technologií

Katedra bojových a speciálních vozidel



**Možnosti zvýšení užitných vlastností
balistických ochran**

Habilitační práce

Obor: Strojírenství a materiály

plk. gšt. Ing. Vlastimil Neumann, Ph.D.

B r n o 2 0 2 3

NEUMANN, V. *Možnosti zvýšení užitných vlastností balistických ochran*. Brno 2023. Habilitační práce. Univerzita obrany.

Poděkování

Velmi rád bych poděkoval vedení Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany za vytvoření podmínek pro podání žádosti o habilitační řízení. Děkuji příslušníkům Katedry bojových a speciálních vozidel, Katedry strojírenství a Katedry zbraní a munice, Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany za odbornou podporu a metodickou pomoc při řešení habilitační práce.

Abstrakt

Balistická ochrana je používána zejména z důvodu potřeby ochrany strategických objektů proti mechanickému působení zbraní nebo zbraňových systémů protivníka. Nejvýznamnější místo na poli balistických ochran zaujímají kovové pancíře. Tyto pancíře jsou široce používány jak pro ochranu vojenské techniky, tak pro zabezpečení ochrany jednotlivců. Kovové pancíře mají v oblastech balistických ochran nenahraditelnou roli. V současné době se však ukazuje, že neustálý vývoj nových zbraňových systémů posouvá hranice možného použití kovových pancířů, a to zejména s ohledem na jejich vysokou hmotnost. S každým novým zaváděným prostředkem stále roste potřeba zvyšování balistické ochrany, což způsobuje navyšování celkové hmotnosti bojových vozidel. Tato skutečnost významně limituje jejich bojové použití, zejména mobilitu vozidel. Vzhledem k této skutečnosti, je jedna z hlavních aktivit zbrojního průmyslu zaměřena na efektivní snižování hmotnosti pancéřové ochrany. Zlepšování užitných vlastností pancířů lze dosahovat pouze vhodným propojováním znalostí materiálů a výrobních technologií. Běžně se dnes setkáváme s kompozitními pancíři, pancíři na bázi keramiky a jejich kombinacemi.

V současnosti je však možné využívat nové přístupy, jako je např. využití aditivních technologií. S využitím aditivních technologií je možné vytvářet zcela nové konstrukční struktury, které mohou významně redukovat hmotnost pancířů při zachování jejich balistické odolnosti. Jednou z cest k dosažení zcela nových pancířů o nižší hmotnosti se stejnými nebo vyššími užitnými vlastnosti je propojení jednotlivých oblastí výzkumu materiálů a výrobních technologií.

Habilitační práce je průřezově zaměřena na oblast materiálů a technologií, které jsou využitelné pro zlepšování užitných vlastností pancířů, což respektuje aktuální a budoucí potřeby nejen resortu Ministerstva obrany ČR, ale také Armády ČR.

Klíčová slova:

balistická ochrana, bojová vozidla, pancíř, kompozitní pancíř, cementace, nitridace, aditivní technologie, 3D tisk, Cold spray, střelecké zkoušky

Abstract

Ballistic protection is used mainly because of the need to protect strategic objects against the mechanical effects of the enemy's weapons or weapon systems. The most important place in the field of ballistic protection is occupied by metal armor. These armors are widely used both to protect military equipment and to ensure the protection of individuals. Metal armor has an irreplaceable role in the areas of ballistic protection. Currently, however, it appears that the constant development of new weapon systems is pushing the limits of the possible use of metal armor, especially considering their high weight. With each new means introduced, the need to increase ballistic protection continues to grow, which causes an increase in the total weight of combat vehicles. This fact significantly limits their combat use, especially the mobility of vehicles. Due to this fact, one of the main activities of the arms industry is aimed at effectively reducing the weight of armor protection. Improving the utility properties of armor can only be achieved by appropriately combining knowledge of materials and production technologies. Composite armor, ceramic-based armor, and combinations thereof are commonly encountered today.

However, it is currently possible to use new approaches, such as the use of additive technologies. With the use of additive technologies, it is possible to create completely new structural structures that can significantly reduce the weight of armor while maintaining their ballistic resistance. One of the ways to achieve completely new armors of lower weight with the same or higher utility properties is the connection of individual areas of materials research and production technologies.

The habilitation work is cross-sectionally focused on the area of materials and technologies that can be used to improve the utility properties of body armor, which respects the current and future needs not only of the Department of the Ministry of Defense of the Czech Republic, but also of the Army of the Czech Republic.

Keywords:

ballistic protection, combat vehicles, armor, composite armor, cementation, nitriding, additive technology, 3D printing, Cold spray, shooting tests

Obsah

Poděkování	2
Abstrakt	3
Abstract.....	4
Seznam zkratek a značek.....	7
Seznam obrázků.....	12
Seznam tabulek.....	16
1. Úvod.....	18
2. Vojenská technika a její aspekty.....	20
2.1 Mobilita	24
2.2 Ochrana	27
3. Cíl práce.....	33
4. Balistické ochrany a možnosti zvýšení jejich odolnosti	34
4.1 Materiály balistických ochran na bázi železa.....	39
4.1.1 Rozdělení kovových pancířů z konstrukčního hlediska.....	41
4.1.2 Rozdělení kovových pancířů z technologického hlediska	43
4.2 Materiály balistických ochran na bázi lehkých kovů	48
4.3 Vybrané materiály balistických ochran na bázi kompozitů	51
4.3.1 Materiály na bázi keramiky	52
4.3.2 Materiály na bázi kompozitu s textílií	54
4.4 Možnosti zvýšení balistické odolnosti kompozitních pancířů	58
4.4.1 Možné způsoby výroby kompozitních materiálů s textílií.....	59
4.4.2 Ověření vlastností kompozitních materiálů s textílií metodou TAT	66
4.4.3 Ověření vlastností kompozitních materiálů s textílií v balistické zkušebně	69
4.5 Možnosti zvýšení balistické odolnosti kovových pancířů.....	75
4.5.1 Difuzní procesy v pevných látkách.....	78
4.5.2 Obecné difuzní mechanismy	79

4.5.3 Fyzikální pojetí teorie difuze	79
4.5.4 Vliv teploty na difuzní pochody	80
4.5.5 První Fickův zákon	80
4.5.6 Druhý Fickův zákon.....	82
4.5.7 Cementace kovových pancířů	83
4.5.8 Vytváření vrstev pod teplotou transformace austenitu	102
4.6 Možnosti využití aditivních technologií v balistických ochránách	108
4.6.1 Možnosti využití 3D tisku.....	109
4.6.2 Možnosti využití technologie COLD SPRAY	126
5. Závěr	142
6. Literatura.....	150
7. Přehled publikační činnosti.....	159

Seznam zkratk a značek

A	[%]	Tažnost
A _{c3} , A _{cm}	[°C]	Kritická teplota austenitizace
AČR		Armáda České republiky
AP		Armour Piercing (Protipancéřová střela)
APA		Aromatické polyamidy
APDS		Armour Piercing Discarding Sabot (Protipancéřová rotačně stabilizovaná podkaliberní střela)
APFSDS		Armour Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot (Protipancéřová šípově stabilizovaná podkaliberní střela)
Al		Hliník
α	[°]	Úhel sklonu pancíře
B		Bor
BCC		Body Cubic Centered (Kubická prostorově středěná mřížka)
BP		Balistický index
BVP		Bojové vozidlo pěchoty
C		Uhlík
CFF		Continuous Filament Fabrication (Výroba nekonečných vláken)
CNC		Computer Numerical Control (Počítačem řízený obráběcí stroj)
Cr		Chrom
CS		Cold Spray (Studená kinetická depozice)
ČOS		Český obranný standard
ČSN		Česká státní norma
d	[mm]	Ráže střely
D		Difuzivita

D_0		Frekvenční faktor
∂	[mm]	Tloušťka desky kovového pancíře
Δ		Tvrдость HBW
ΔG_m		Energetická bariera přeskoku iontu vyjádřená hodnotou volné entalpie
Δp	[Pa]	Tlakový gradient
$\Delta_{stř}$		Střední tvrdost pancíře
ε_m	[%]	Deformace
FCC		Face centered cubic (Kubická plošně středěná mřížka)
FDM		Fused deposition modeling (Modelování tavené depozice)
FFF		Fused Filament Fabrication (Výroba tavených vláken)
Fe		Železo
Fe_α		Ferit
Fe_γ		Austenit
FSI VUT		Fakulta strojní inženýrství, Vysoké učení technické
FVT UO		Fakulta vojenských technologií, Univerzita Obrany
γ_i^j, ρ_i^j		Interakční koeficienty prvního a druhého řádu
H		Vodík
h	[mm]	Efektivní tloušťka pancíře
h_H	[mm]	Výška hlavové části těla střely
h_0	[mm]	Tloušťka pancíře
HB, HBW		Tvrдость podle Brinella
HPCS		High Pressure Cold Spray (Vysokotlaká studená kinetická depozice)
HRC		Tvrдость podle Rockwella
HV		Tvrдость podle Vickerse

σ_m	[MPa]	Napětí v tahu
IED		Improvizované výbušné zařízení
ISO		International Organization for Standardization (Mazinárodní organizace pro standardizaci)
j		Skupina substitučních prvků
K		Permeabilita výztuže
L	[mm]	Délka dráhy
LPCS		Low Pressure Cold Sprey (Nízkotlaká studená kinetická depozice)
KC, KV		Vrubová houževnatost
m_d	[kg]	Hmotnost střely
Mn		Mangan
Mo		Molybden
μ	[mm]	Vzdálenost těžiště plochy vymezené křivkou tvrdosti po průřezu od nástřelné plochy pancíře
N		Dusík
NATO		Severoatlantická aliance
NDT		Non-Destructive Testing (Nedestruktivní testování)
Nb		Niob
Ni		Nikl
O		Kyslík
OT		Obrněný transportér
P		Fosfor
PPTA		Poly-parafenylenentereftalamid
Q	[m ³ ·s ⁻¹]	Objemový průtok
R		Plynová konstanta
RA	[%]	Objemový obsah zbytkového austenitu

R _e	[MPa]	Mez kluzu
R _m	[MPa]	Pevnost v tahu
ROW		Roll Welding (Svařování válcováním při teplotách nad 1100 °C)
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu určená z trvalé deformace pod zatížením
ρ	[kg·m ³]	Měrná hmotnost
SEM		Scanned Electron Microscopy (Skenovací elektronová mikroskopie)
Si		Křemík
SHD		Samohybné dělo
SLM		Selective Laser Sintering (Tisk z polymerních a kompozitních prášků)
STANAG		Standardizační dohoda NATO
T	[°C]	Absolutní teplota, při které probíhá difuze
T _A	[°C]	Teplota austenizace
TAT		Taylorův test
Ti		Titan
TMZ		Tepelně mechanické zpracování
TNT		Trinitrotoluen
TS		Thermal Spray (Termální nástřik)
τ _A	[h]	Doba austenizace
UHMWPE		Ultravysokomolekulární vlákna
V		Vanad
VAROPS		Dlouhodobý záměr rozvoje pracoviště – Vojenské robotické a autonomní systémy
VARTM		Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (Vakuově podporované protlačování pryskyřice)

VBV-KBP	Vojenská bojová vozidla na kolovém podvozku se zbraňovým kompletem
VBV-KSP	Vojenská bojová vozidla na kolovém podvozku se speciální účelovou nástavbou
VBV-PBP	Vojenská bojová vozidla na pásovém podvozku se zbraňovým kompletem
VBV-PSP	Vojenská bojová vozidla na pásovém podvozku se speciální účelovou nástavbou
v_{crit} $[m \cdot s^{-1}]$	Kritická rychlost dopadu částice
v_d $[m \cdot s^{-1}]$	Dopadová rychlost střely
V_{mf} $[\%]$	Hmotnostní poměr vláken ku pryskyřici
VŠB-TUO	Vysoká škola báňská, technická univerzita Ostrava
VZKM	Vzduchem kalitelné pancíře
ν $[Hz]$	Frekvence kmitů iontů kolem rovnovážné polohy
W	Wolfram
z	Množství poloh, vhodných pro přeskok difundujícího iontu
Zn	Zinek
$+\Delta H$	Aktivační entalpie difuze

Seznam obrázků

Obr. 2.1 – Vztah mezi konstrukcí, logistickým zabezpečením a strategickou mobilitou [3].....	26
Obr. 2.2 – Římská bojová formace želva [10]	28
Obr. 2.3 – Britský tank Mark I s parametry pancéřování [13]	29
Obr. 2.4 – Princip zvýšení efektivní tloušťky pancíře [9].....	29
Obr. 2.5 – Zesilování exponovaných míst Panzer II Ausf J [18]	30
Obr. 2.6 – Představný pancíř na vozidle Stug IV [18]	30
Obr. 4.1 – Přídavná balistická ochrana BVP Puma [9]	35
Obr. 4.2 – Představný pancíř vozidla M2A2 Bradley [9]	36
Obr. 4.3 – Modernizovaná verze BVP Bradley M2A3 [9]	36
Obr. 4.4 – Využití ochranných mříží SLAT na tanku LEOPARD 2 [9].....	36
Obr. 4.5 – Použití řetězů na zadní části věže tanku Merkava [9].....	36
Obr. 4.6 – Čelní pancíř korby tanku T-72M4CZ [9].....	43
Obr. 4.7 – Průřez pancíře Chopham [9].....	43
Obr. 4.8 – Řez hliníkovým pancířem udávající tvrdost pro každou vrstvu [35]	50
Obr. 4.9 – Poškození vrstveného hliníkového pancíře [35]	50
Obr. 4.10 – Měření hloubky penetrace DOP [44]	53
Obr. 4.11 – Šíření trhlin - monolitická keramická deska Al_2O_3 s aramidovou podkladovou vrstvou [46]	53
Obr. 4.12 – Šíření trhlin - segmentovaná keramická deska se skelnou kompozitní vrstvou [47]	53
Obr. 4.13 – Dopad střely na vrstvenou keramickou balistickou ochranu [44].....	54
Obr. 4.14 – Keramicko-kompozitní panel STORMBLADE LEVEL IV [49]	54
Obr. 4.15 – Panel UHMWPE [62]	57
Obr. 4.16 – Materiál připravený k vakuové infuzi (VARTM), ve spolupráci s VUT v Brně	60
Obr. 4.17 – Lisování ve vyhřívaných formách lis ZD40 VUT v Brně.....	61
Obr. 4.18 – Aramidová tkanina Twaron 747, UHMPWE materiál Endumax XF23	62
Obr. 4.19 – Vzorek Twaronu 747 po řezání vodním paprskem	62
Obr. 4.20 – Mikrostruktura kompozitu	63
Obr. 4.21 – SEM zobrazení.....	64
Obr. 4.22 – Realizované testy	65
Obr. 4.23 – Typický průběh pevnosti při zkoušce ohybem pro materiál Twaron TW747/ER68 (autokláv)	66
Obr. 4.24 – Typický průběh pevnosti při zkoušce ohybem pro materiál Twaron TW747/LG700 (VARTM).....	66
Obr. 4.25 – Schématické zobrazení TAT [69]	67
Obr. 4.26 – Ukázka vzorků po TAT testu	68
Obr. 4.27 – Prostřelený vzorek Endumax XF23 – 65 vrstev	69
Obr. 4.28 – Schéma balistické zkušebny.....	70

Obr. 4.29 – Balistická hlaveň	70
Obr. 4.30 – Optoelektronické rámy Kistler 2521 A	70
Obr. 4.31 – Záznam projektilu a fragmentů střely pro průchodu desky Twaron CT747/LG700.....	72
Obr. 4.32 – Deska Twaron TW747/TH110, 60 vrstev	72
Obr. 4.33 – Záznam projektilu a fragmentů střely pro průchodu desky Twaron CT747/LG700.....	73
Obr. 4.34 – Hybridní panel Twaron/UMPWPE po balistickém testu	75
Obr. 4.35 – Změna hloubky difuzní vrstvy ČSN 41 5142 + QT v závislosti na době difuze [93].....	77
Obr. 4.36 – Vliv přísadových prvků na povrchovou tvrdost nitridované vrstvy, PN 550 °C/24 h [96]	78
Obr. 4.37 – Vliv přísadových prvků na celkovou hloubku nitridované vrstvy,	78
Obr. 4.38 – Rovnovážný diagram Fe-C (nitridace a karbonitridace prováděna pod teplotou A1) [103]	84
Obr. 4.39 – Rozpustnost dusíku v austenitu v diagramu Fe-N [103][104]	85
Obr. 4.40 – Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace [106].....	86
Obr. 4.41 – Diagram procesu cementace [108].....	87
Obr. 4.42 – Porovnání křivek chladnutí s diagramem anizotermického rozpadu austenitu [118]	93
Obr. 4.43 – Polohy bodů pro které byly modelovány křivky chladnutí [118]	94
Obr. 4.44 – Vliv tepelného zpracování na tvrdost pancíře ARMOX 600T.....	94
Obr. 4.45 – Zkouška balistické odolnosti opakovanými zásahy na vzdálenost 25 mm (tzv. „multihit“) [117].....	95
Obr. 4.46 – Cementovaný pancíř po ostřelovací zkoušce	96
Obr. 4.47 – Mikrostruktura cementovaného pancíře z oceli SECURE 500, tl. 4,8 mm.....	96
Obr. 4.48 – Průběh závislosti obsahu C na vzdálenosti od povrchu	98
Obr. 4.49 – Průběh závislosti obsahu Ms na vzdálenosti od povrchu	99
Obr. 4.50 – Průběh hodnot tvrdosti HV0,5 v závislosti na vzdálenosti od povrchu	100
Obr. 4.51 – Příčný řez nitridovanou vrstvou [128]	103
Obr. 4.52 – Jednostranná nitridace v plynu 50 h.....	106
Obr. 4.53 – Oboustranná nitridace	106
Obr. 4.54 – Struktura pancíře, střední část, zvětšeno 1000x	107
Obr. 4.55 – Struktura HARDOX 450 s dokumentací povrchové vrstvy, zvětšeno 1000x.....	108
Obr. 4.56 – Vzorek vytištěný z Onyxu vyztužený svazkem kompozitních vláken.....	110
Obr. 4.57 – 3D tiskárna Markforged	110
Obr. 4.58 – Příklady prototypů (vzorků) vyztužených svazkem kompozitních vláknem (kevlar)	110
Obr. 4.59 – Praktická ukázka modelů vyztužených různými svazky kompozitního materiálu.....	111
Obr. 4.60 – Cívka materiálu BASF Ultrafuse 316L.....	112
Obr. 4.61 – SEM snímky [142].....	112
Obr. 4.62 – Výrobní fáze vzorku pro tahovou zkoušku z materiálu BASF Ultrafuse 316L (DIN 1.4404)	114
Obr. 4.63 – Příklad použití podpor při tisku	114

Obr. 4.64 – Výroba vzorků pro tahovou zkoušku z filamentu BASF 316L na 3D tiskárně Ultimaker S5	115
Obr. 4.65 – Rozdělení aditivní technologie Powder Bed Fusion [145].....	116
Obr. 4.66 – Pracovní prostor 3D tiskárny Renishaw AM400 (Vizualizace: Pagáč, M., 2020).....	117
Obr. 4.67 – Laboratoř SLM technologií pracoviště VŠB-TUO. Foto: Protolab VŠB-TUO	117
Obr. 4.68 – Pece pro tepelné zpracování laboratoře 3D tisku. Foto:Protolab VŠB-TUO.....	118
Obr. 4.69 – Pískovací a omílací zařízení pro postprocesní úpravy	118
Obr. 4.70 – Snímky z vysokorychlostní kamery	119
Obr. 4.71 – Geometrie AM desek z maragingové oceli použitých při balistických zkouškách.....	120
Obr. 4.72 – Časový průběh balistických nárazů monolitických desek.....	121
Obr. 4.73 – Varianty 3D tištěných titanových struktur vybraných pro analýzy [151]	121
Obr. 4.74 – Konfigurace analyzované balistické vložky [151]	122
Obr. 4.75 – Numerický model analyzovaného jevu nárazu střely [151].....	122
Obr. 4.76 – Strukturální modely trubic. I, II a III [152].....	123
Obr. 4.77 – Balistické výsledky [152].....	123
Obr. 4.78 – Schéma balistické simulace MD [152]	124
Obr. 4.79 – Navržená balistická ochrana ve tvaru plástve, Ti-6Al4V-ELI	124
Obr. 4.80 – Navržená balistická ochrana ve tvaru plástve, Ocel M300	125
Obr. 4.81 – Zařazení CS mezi ostatní metody povlakování nebo chemické úpravy povrchu [140], [142]	128
Obr. 4.82 – Schéma systému dle nízkotlaké koncepce LPCS [141]	128
Obr. 4.83 – Schéma systému dle vysokotlaké koncepce HPCS [141]	129
Obr. 4.84 – Interakce částice při dopadu na substrát [143]	129
Obr. 4.85 – Velikost depozičních oken pro různé materiály [140]	130
Obr. 4.86 – Mikrostruktura CS vrstvy ve stavu po nástřiku [157]	131
Obr. 4.87 – Příklady oprav pomocí CS technologie [158].....	132
Obr. 4.88 – Balistická efektivita CS opravených pancířů pomocí materiálu WIP	133
Obr. 4.89 – Příklady součástí ze slitiny Ti vytvořených pomocí CS [162], [163]	133
Obr. 4.90 – Nanesená vrstva obsahující Cu a Sn [118].....	135
Obr. 4.91 – Mikročástice pro technologii CS.....	136
Obr. 4.92 – Zobrazení vzorku Ti vyrobeného technologií SC, zvětšeno 150x	137
Obr. 4.93 – Zobrazení vzorku Ti 90 %; SiC 10 % vyrobeného technologií CS, zvětšeno 150x.....	138
Obr. 4.94 – Zobrazení vzorku Ti 75 %; SiC 25 % vyrobeného technologií CS, zvětšeno 150x.....	139
Obr. 4.95 – Taylorův test - vzorek 100 % Ti	140
Obr. 4.96 – Taylorův test - vzorek 90 % Ti + 10 % SiC.....	140
Obr. 4.97 – Taylorův test - vzorek 75 % Ti + 25 % SiC.....	141
Obr. 5.1 – Průstřel čelní části pancíře HARDOX 450, tl. 2 mm se zobrazením rubové strany	143
Obr. 5.2 – Průstřel vrstveného pancíře, Hardox 2mm/panel UHMWPE 32 vrstev.....	145

Obr. 5.3 – Zastavení střely, vrstvený pancíř Hardox 2mm/aditivně vytvořená vložka 5mm Ti/panel UHMWPE 32 vrstev	145
Obr. 5.4 – Vyvinutý vrstvený pancíř včetně zachycené střely	146
Obr. 5.5 – Mikrostruktura kompozitních materiálů - optodigitální mikroskopie.....	146
Obr. 5.6 – Mikrostruktura kompozitních materiálů - rastrovací elektronová mikroskopie.....	147
Obr. 5.7 – Zobrazení modulární vložky z Ti.....	148
Obr. 5.8 – Vyvinutý vrstvený pancíř Nitridovaný Hardox 450 (jednostranně, oboustranně)/3D tištěná struktura/ UHMWPE (Endumax Shield XF33)	149

Seznam tabulek

Tab. 4-1 – Úrovně ochrany proti střelám a střepinám s kinetickou energií [9].....	38
Tab. 4-2 – Úrovně ochrany proti granátům a minám [9]	38
Tab. 4-3 – Mechanické vlastnosti ocelí používaných k balistické ochraně [28], [29], [30].....	40
Tab. 4-4 – Rozdělení pancířů podle tvrdosti a tloušťky [31]	41
Tab. 4-5 – Chemické složení ocelí pro pancíře nízké a střední tvrdosti [hm. %] [31]	41
Tab. 4-6 – Průměrné chemické složení jednoduchých pancířů [hm. %] [31]	42
Tab. 4-7 – Chemické složení vrstev materiálů pancíře VZKM [hm. %, max. koncentrace] [31]	45
Tab. 4-8 – Chemické složení vrstev materiálů pancíře TMZ pro čelní a podkladové vrstvy [hm. %, max. koncentrace] [31]	46
Tab. 4-9 – Chemické složení mezivrstvy TMZ [hm. %, max. koncentrace] [31]	46
Tab. 4-10 – Chemické složení vrstev materiálů pancířů MARAGING [hm. %, max. koncentrace] [31]	46
Tab. 4-11 – chemické složení vrstev materiálů pancířů typu Q [hm. %, max. koncentrace] [31]	47
Tab. 4-12 – Chemické složení [hm. %] a mechanické vlastnosti vybraných Al slitin [34]	49
Tab. 4-13 – Režimy tepelného zpracování pro vybrané Ti slitiny a jejich mechanické vlastnosti [34]	50
Tab. 4-14 – Vlastnosti keramických materiálů pro balistickou ochranu [40]	52
Tab. 4-15 – Vlastnosti různých typů aramidových vláken [60]	55
Tab. 4-16 – Materiály a technologie vzorků při výrobě základních vzorků	61
Tab. 4-17 – Výsledky zkoušky tahem.....	65
Tab. 4-18 – Výsledky ohybové zkoušky	66
Tab. 4-19 – Výsledky vzorků po TAT	68
Tab. 4-20 – Střely dle standardu NATO STANAG 4569, AEP-55, level 1.....	70
Tab. 4-21 – Výsledky testovaných panelů	71
Tab. 4-22 – Chemické složení pancéřové oceli ARMOX 600T [111].....	90
Tab. 4-23 – Mechanické vlastnosti pancéřové oceli ARMOX 600T [111]	90
Tab. 4-24 – Chemické složení pancéřové oceli SECURE 600 [112].....	90
Tab. 4-25 – Mechanické vlastnosti pancéřové oceli SECURE 600 [112]	91
Tab. 4-26 – Chemické složení pancéřové oceli ARMOX 500T [110].....	91
Tab. 4-27 – Mechanické vlastnosti pancéřové oceli ARMOX 500T [110]	91
Tab. 4-28 – Hodnoty tvrdosti dodaných vzorků.....	91
Tab. 4-29 – Definiční obor parametrické rovnice	92
Tab. 4-30 – Chemické složení dodaného vzorku 2	92
Tab. 4-31 – Pancéřová ocel s bainitickou strukturou [hm. %] [115]	97
Tab. 4-32 – Změna mikrostruktury a tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od strany nástřelu	99
Tab. 4-33 – Vyhodnocení ostřelovací zkoušky.....	102
Tab. 4-34 – Základní parametry Ti-6AL4V-ELI	125

Tab. 4-35 – Základní parametry M300	125
Tab. 4-36 – Hodnoty povrchové tvrdosti	139
Tab. 5-1 – Porovnání plošné hmotnosti pancířů při zachování balistické odolnosti.....	142
Tab. 5-2 – Chemické složení a vybrané mechanické vlastnosti ARMOX 600T [83]	144

1. Úvod

Schopnost chránit bojové jednotky proti zbraním a působení protivníka, spolu s palebnou silou a pohyblivostí, jednoznačně ovlivňuje průběh vojenských operací. S vývojem nových účinnější zbraní se rovněž rozvíjí schopnosti obrany za účelem snížení ztrát na životech a zvýšení bojeschopnosti vojenských jednotek. Počátky pancéřování bychom našli až ve starověku, nicméně první pancéřová ochrana byla využita u železničních vozů v 2. polovině 19. století. Největším historickým milníkem však byla 1. světová válka, která odstartovala masivní využívání bojových prostředků s využitím pancéřové ochrany. V roce 1916 byl poprvé v boji použit nový bojový prostředek – tank. První nasazení tanku otevřelo nový směr vývoje a použití bojových prostředků a s tím související pancéřové ochrany. V období 1. světové války nebyl jasný účel a využití těchto prostředků a s tím souvisí různá a netradiční konstrukční řešení. Základními požadavky na tato vozidla se staly palebná síla, ochrana a mobilita. V období 2. světové války byly tanky děleny do 3 hmotnostních kategorií – lehké do 20 t, střední (20–40) t a těžké nad 40 t. V důsledku zvyšování takticko-technických parametrů tanků v době po 2. světové válce (zejména ráže kanónu a stupeň ochrany) se zvyšovala i jejich hmotnost, až překročila hranici 40 t, čímž se dostaly do kategorie těžkých tanků. Vzhledem k této skutečnosti se ustoupilo od původní kategorizace podle hmotnosti a tanky střední a těžké byly nahrazeny kategorií „Hlavní bojový tank (Main Battle Tank)“. Vysoká hmotnost soudobých tanků (okolo 70 t) představuje značné komplikace při zabezpečení pohyblivosti a přepravitelnosti těchto vozidel. Obdobně je tomu i u bojových vozidel pěchoty, kdy se zvyšováním ochrany narostla jejich celková hmotnost na hodnotu (nad 20 t), kdy tato vozidla ztratila schopnost překonávání vodních toků plavbou.

Pancéřová ochrana má stále nezastupitelné místo a je základem ochrany každého bojového prostředku. V dnešní době moderních technologií roste význam zvyšování užitných vlastností pancířů, a to jak proti samotnému mechanickému působení, tak proti účinku dynamického rázu spojeného s postupem rázové vlny po výbuchu. Základní homogenní pancíř, i když má stále své nezastupitelné místo, však nesplňuje soudobé požadavky na zabezpečení balistické ochrany. Současný trendem je využívání vrstvených pancířů, které umožňují vytvořit pancíř s tvrdou čelní dopadovou plochou, houževnatou podkladovou vrstvou složenou z různých typů materiálů pro dosažení snížení přenosu kinetické energie střely a rozptýlení kumulativního paprsku (u kumulativních střel). Jelikož celkovou hmotnost vozidla významně ovlivňuje samotná balistická ochrana, je dalším významným parametrem rovněž plošná hmotnost pancíře.

Jelikož jsou současné zavedené pancíře v prostředcích Armády ČR založeny zejména na bázi kovu (můžeme se setkat i s variantami na bázi kompozitů – keramiky) je část práce zaměřena na zvyšování užitných vlastností právě těchto pancířů.

V rámci dalšího vývoje pancířů lze předpokládat, že jejich užité vlastnosti, jako jsou balistická odolnost, hmotnost a tloušťka, mohou být dále zlepšovány vývojem nových materiálů, kombinacemi materiálů a využitím výrobních technologií, stejně jako technologií objemových a povrchových úprav. Z hlediska současného zlepšování užitných vlastností pancířů je možné efektivně využít kombinací materiálů na bázi kovů nebo kompozitů. Propojením se soudobými moderními technologiemi výroby a s využitím moderních postupů modifikace vnitřních struktur lze očekávat dosažení specifických užitných vlastností balistické ochrany.

Současné nejvíce využívané kovové pancíře lze účinně modifikovat s využitím technologií úprav povrchové vrstvy – procesy nitridace nebo karbonizace (tvrdá čelní dopadová vrstva a houževnatá podkladová vrstva). Těmito metodami lze efektivně dosáhnout snížení tloušťky pancíře při zachování požadovaného stupně ochrany.

Kompozitní pancíře využívají pro dosažení požadovaného stupně ochrany kombinaci vlastností různorodých materiálů. Za účelem snižování hmotnosti jsou využívány keramické materiály, které se vyznačují vysokou tvrdostí, pevností v tlaku a nízkou měrnou hmotností. Jako další perspektivní technologii v oblasti kompozitních materiálů se ukazuje kombinace s textilií - nejčastěji využívanou technologií pro výrobu těchto pancířů je technologie VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding).

Zcela odlišné možnosti a přístup k výrobě pancířů přináší technologie aditivní výroby. Tyto technologie umožňují efektivně ovlivňovat, kromě použitého materiálu, rovněž vnitřní konstrukční strukturu pancíře (tzv. voštiny). Využití aditivních technologií v oblasti vývoje balistické ochrany se jeví jako velmi perspektivní.

Soudobé požadavky na pozemní bojovou techniku velmi významně akcentují zvyšování stupně balistické odolnosti, která však velmi významně ovlivňuje další hlavní požadavky a zejména pak mobilitu. Zvyšování balistické ochrany je zpravidla doprovázeno zvyšováním hmotnosti vozidla což se na jeho mobilitu projevuje negativně. Z tohoto důvodu je velmi významný vývoj pancířů se zvýšenými užitnými vlastnostmi, které jsou významné pro zvýšení ochrany vojáků, vojenské techniky a objektů, kritické infrastruktury a pro rozvoj schopností Armády ČR a Asociace obranného průmyslu.

2. Vojenská technika a její aspekty

V současné době je v rámci vojenských operací nezpochybnitelný význam použití vojenských techniky. Zejména použití pokročilých technologií a vojenské bojových vozidel umožňuje vojenským jednotkám plnit efektivně stanovené úkoly, poskytuje jim větší ochranu a bezpečnost a tím zlepšuje celkové schopnosti ozbrojených sil.

Definici, rozdělení a druhy vozidel specifikuje ČSN 30 0024 „Druhy silničních vozidel“, která zpřesňuje zákon č. 361/2000 Sb. „O provozu na pozemních komunikacích“ a vyhlášku Ministerstva dopravy ČR č. 153/2023 Sb. „Vyhláška o schvalování technické způsobilosti vozidel a technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích“. Dle těchto norem lze rozdělit vozidla na dvě základní kategorie [1]:

- **vozidla silniční** - určena k provozu na pozemních komunikacích, nevázaná na koleje, určena především pro dopravu osob nebo nákladů, pro zvláštní účely a služby. Tato vozidla se dále dělí na automobily, přípojná vozidla, tříkolky a čtyřkolky, motocykly, traktory a ostatní vozidla,
- **vozidla jiná než silniční** – do této kategorie patří pracovní stroje (samojízdné, přípojně, traktorové, nesené), dále nemotorová vozidla nebo nemotorové pracovní stroje tažené nebo tlačené pěší osobou, vozíky pro invalidy a **vojenská vozidla**.

Kategorie vojenských vozidel dále stanovuje vyhláška Ministerstva obrany č. 100/2018 Sb. „Vyhláška o technické způsobilosti a pravidelných technických prohlídkách vojenských vozidel“, která vojenská vozidla dále člení podle druhu na [2]:

- **vojenská bojová vozidla** - vyrobena a určena k výcviku a plnění bojových úkolů ozbrojených sil,
- **vojenská zabezpečovací vozidla** - vyrobena a určena k výcviku a dopravnímu zabezpečení úkolů v ozbrojených silách,
- **vojenská zvláštní vozidla** - vyrobena a určena k výcviku a k plnění záchranářských, diagnostických, ženijních nebo speciálních úkolů ozbrojených sil,
- **vojenské pracovní stroje** - určena pro provádění určených specifikovaných prací nebo jiných činností, které není určeno pro přepravní a dopravní činnost.

Vzhledem k zaměření habilitační práce, bude další pozornost zaměřena na vojenská bojová vozidla. Tato vozidla je možné rozdělit podle mnoha kritérií. § 5 vyhlášky Ministerstva obrany č. 100/2018 Sb. upravuje následující základní dělení bojových vozidel na [2]:

- **vojenská bojová vozidla na pásovém podvozku se zbraňovým kompletem**, která slouží k vedení bojové činnosti (kategorie **VBV-PBP**),
- **vojenská bojová vozidla na pásovém podvozku se speciální účelovou nástavbou**, která neslouží k přímému vedení bojové činnosti (kategorie **VBV-PSP**),
- **vojenská bojová vozidla na kolovém podvozku se zbraňovým kompletem**, která slouží k vedení bojové činnosti (kategorie **VBV-KBP**),
- **vojenská bojová vozidla na kolovém podvozku se speciální účelovou nástavbou**, která neslouží k přímému vedení bojové činnosti (kategorie **VBV-KSP**).

V současné době se také můžeme setkat s následujícím rozdělením, které vychází z účelu použití bojových vozidel. Toto rozdělení reflektuje jednotlivé specifické konstrukční vlastnosti bojových vozidel [3]:

Tank - bojové pásové vozidlo určené pro ničení tanků a dalších bojových vozidel, silně opevněných postavení a živé síly protivníka. Vyznačuje se mohutnou palebnou silou, vysokým stupněm ochrany osádky a vybavení a vysokou mobilitou v běžných i složitých terénních a klimatických podmínkách. Hlavní zbraní tanku je lafetovaný kanón v plně otočné věži. Tanky jsou určeny pro vedení bojové činnosti v bezprostředním kontaktu s protivníkem.

Bojové vozidlo pěchoty (BVP)- bojové vozidlo na kolovém nebo pásovém podvozku, určené pro přepravu mechanizované jednotky do místa operace a k vedení aktivní bojové činnosti v bojové sestavě. Výzbroj zpravidla tvoří lafetovaný kanón malé ráže a protitankové, popř. protiletadlové řízené střely, která je určena zejména k ničení obrněných transportérů, bojových vozidel pěchoty a jiných lehce pancéřovaných cílů a živé síly. V omezené míře jsou BVP schopna ničit tanky případně letecké cíle. Svojí konstrukcí musí zabezpečit ochranu přepravované jednotky před palbou protivníka z pěchotních zbraní, střepin dělostřelecké munice a proti zbraním hromadného ničení. BVP se vyznačují vysokou průchodivostí v terénu.

Obrněný transportér (OT) - bojové vozidlo na kolovém nebo pásovém podvozku, určené především pro přepravu mechanizované jednotky do místa bojové činnosti. Výzbroj zpravidla tvoří velkorážní lafetovaný kulomet, sloužící především pro zabezpečení ochrany

vlastního vozidla. Svojí konstrukcí musí zabezpečit ochranu přepravované jednotky před palbou protivníka z pěchotních zbraní, střepin dělostřelecké munice a proti zbraním hromadného ničení. OT se vyznačují vysokou průchodivostí v terénu zpravidla včetně schopnosti překonávání vodních překážek plavbou.

Samohybné dělo (SHD) - bojové vozidlo na kolovém, nebo pásovém podvozku, určené zejména pro palebnou podporu bojových jednotek. Je určeno pro ničení obrněných cílů, pevnůstek a živé síly v úkrytech. Vyznačuje se mohutnou palebnou silou, dostatečným stupněm ochrany a odpovídající mobilitou. SHD nejsou zpravidla určena pro vedení bojové činnosti v bezprostředním kontaktu s protivníkem. Podle druhu hlavní zbraně se SHD dělí na kanónová a houfnicová.

Bojová vozidla s protiletadlovou výzbrojí - bojová vozidla na kolovém nebo pásovém podvozku, určená pro boj se vzdušnými bojovými prostředky, jako jsou bitevní vrtulníky a nízkoletící letadla. Podle výzbroje se dělí na kulometná, kanónová a raketová.

Stíhač tanků - bojové vozidlo určené především pro ničení tanků protivníka na kolovém nebo pásovém podvozku. Vozidla s vysokou pohyblivostí a nižším stupněm ochrany. V minulosti vozidla s mohutnou výzbrojí zpravidla s protitankovým kanónem. V současné době vozidla výhradně s protitankovými řízenými střelami nebo raketovou výzbrojí.

Speciální vozidla - vozidla určená pro zabezpečení bojové činnosti. Do této kategorie patří vozidla vyprošťovací, ženijní, mostní, dílenská, jeřábová a odminovací. Zpravidla tato vozidla vychází z konstrukce podvozku již zavedených bojových vozidel, avšak může se jednat i o speciální konstrukce, např. bezosádkových nebo průzkumných vozidel.

Jak je patrné z uvedených dělení bojových vozidel, jsou na tato vozidla kladeny specifické požadavky, kterými se liší od vozidel silničních. I přes tyto specifické rozdíly, musí bojová vozidla, stejně jako vozidla silniční, splňovat základní požadavek, kterým je jakost. Jakostí se rozumí souhrn vlastností výrobku, charakterizující jeho způsobilost uspokojovat určité potřeby uživatele v souladu s jeho užitím. Z pohledu hodnocení jakosti vozidel rozlišujeme 4 základní skupiny požadavků [3]:

- **Funkční**, které jsou charakterizovány schopností vozidla plnit požadavky podle jeho určení. Funkční požadavky ovlivňují zejména technické parametry vozidla.
- **Požadavky na spolehlivost**, které ovlivňují zejména ukazatele bezporuchovosti, udržitelnosti, živostnosti, opravitelnosti, skladovatelnosti, pohotovosti k použití a bezpečnosti.

- **Požadavky na hospodárnost**, které vymezují požadavky na zabezpečení celého životního cyklu od vývoje, přes výrobu, používání až po likvidaci.
- **Ostatní** jako např. design, ergonomie a ekologie.

Tyto obecně platné požadavky na jakost jsou platné pro všechna vozidla, nicméně podle použití a účelu vozidla může být u různých typů vozidel kladena jiná váha na naplnění uvedených skupin požadavků.

Vzhledem k hlavnímu určení vojenských bojových vozidel, kterým je vedení bojové činnosti, musí tato vozidla kromě základních požadavků na jakost, navíc splňovat další specifické požadavky v souladu s jejich primárním účelem. Jak je patrné z uvedeného rozdělení základních typů bojových vozidel, je nutné jednotlivým specifickým požadavkům přiřadit různou váhu v závislosti na účelu použití jednotlivých typů bojových vozidel ve vojenských operacích. Mezi specifické požadavky na vojenská bojová vozidla patří [3]:

Specifické funkční požadavky, které zejména ovlivňují zabezpečení požadované pohotovosti k použití a plnění stanovených úkolů. Nejvýznamnějšími požadavky jsou schopnost provozu v pásmu mírného klimatu; maximální unifikace s možností vzájemné výměny konstrukčních skupin, součástí a dílů; odrušení elektrických spotřebičů; možnost dlouhodobého uložení vozidla a jeho provozuschopnost po vyjmutí z uložení; výbava a příslušenství vozidla; schopnost vozidla vyproštěním vlastními prostředky, vyproštění vyprošťovacími prostředky a možnost odsunu.

Požadavky na mobilitu, které jsou jedny ze základních specifických požadavků kladených na bojová vozidla. Mobilita vyjadřuje schopnost vozidla plnit stanovené úkoly v požadovaném místě a čase.

Požadavky na ochranu, jsou signifikantním požadavkem na bojová vozidla. Ochrana je schopnost vozidla odvrátit, popř. snížit účinek bojové činnosti protivníka. Stupeň ochrany vozidel se liší v závislosti na typu vozidla a jeho předpokládaném zapojení do přímé bojové činnosti.

Požadavky na palebnou sílu, které přímo souvisí s primárním účelem bojové techniky. U techniky zabezpečovací nebo speciální plní zejména ochranou funkci. Palebná síla je schopnost bojového vozidla s dostatečnou přesností a rychlostí ničit prostředky protivníka za různých podmínek vedení bojové činnosti a za různých klimatických podmínek. Palebnou sílu ovlivňují zejména samotný zbraňový systém, typ a množství munice (palebný průměr), pozorovací a zaměřovací přístroje a systém řízení palby.

Požadavky na kompatibilitu, které vyjadřují schopnost vozidla začlenit se a vykonávat činnost v integrovaném systému celé bojové jednotky v návaznosti na další prvky bojové sestavy a prvky velení a řízení, včetně prvků logistické podpory.

Požadavky na možnost modernizace, jelikož doba vývoje je dlouhá a náklady jak na samotný vývoj, tak na výrobu a zavedení bojové techniky jsou vysoké. Vzhledem k těmto skutečnostem, se doba používání bojové techniky zpravidla pohybuje v rozsahu 30 až 40 let. Zajištění požadovaných takticko-technických parametrů vozidla v celé délce jeho používání se provádí cestou modernizace většinou zaměřené na dílčí konstrukční prvky vozidla, např. zbraňový systém, ochranu vozidla, konstrukci poháněcí soustavy apod. Požadavek na schopnost modernizace je zpravidla specifikuje na začátku vývoje vozidla při specifikování zadávacích podmínek.

Bojové vozidlo musí zabezpečit především účinné ničení protivníka při současném dostatečném zabezpečení ochrany osádky a vnitřního vybavení vozidla před jeho bojovou činností. Vzhledem k dynamickému charakteru bojové činnosti musí být rovněž zabezpečena dostatečná pohyblivost vozidla. Splnění těchto tří základních požadavků bylo v historickém vývoji specifikováno do tzv. základních vlastností bojových vozidel definovaných jako **palebná síla, ochrana a mobilita**. Konstrukce bojových vozidel musí zajišťovat vzájemné vyvážení jednotlivých základních požadavků, jelikož jejich jsou z konstrukčního hlediska velmi silně na sobě vzájemně závislé, např. zvýšení ochrany cestou zvýšení tloušťky pancíře vede ke zvýšení celkové hmotnosti vozidla a tím ke snížení jeho mobility [3].

Vzhledem k hlavnímu zaměření práce, budou v dalších podkapitolách rozebrány požadavky na mobilitu a ochranu vozidla a jejich vzájemnou vazbu z pohledu teorie pohybu a konstrukce vojenských vozidel.

2.1 Mobilita

Zabezpečení požadavků na zajištění mobility vozidla vychází z předpokládaného použití a nasazení jednotek v operacích. Česká republika jako členský stát Severoatlantické aliance, musí být schopna nasazení jednotek jak na evropském kontinentu, tak i mimo něj. S tím souvisí různorodé požadavky na vojenskou techniku. V tomto kontextu, musí být bojová vozidla schopna provozu a plnit stanovené úkoly jak v arktických oblastech, tak v tropech a pouštích.

Z konstrukčního hlediska mobilitu vozidla ovlivňuje především jeho celkové konstrukční řešení (zejména rozměry a hmotnost), konstrukce poháněcí soustavy a podvozku. Ve vztahu

k samotné definici mobility – schopnost vozidla plnit stanovené úkoly v požadovaném místě a čase, rozdělujeme mobilitu na 3 základní úrovně [3]:

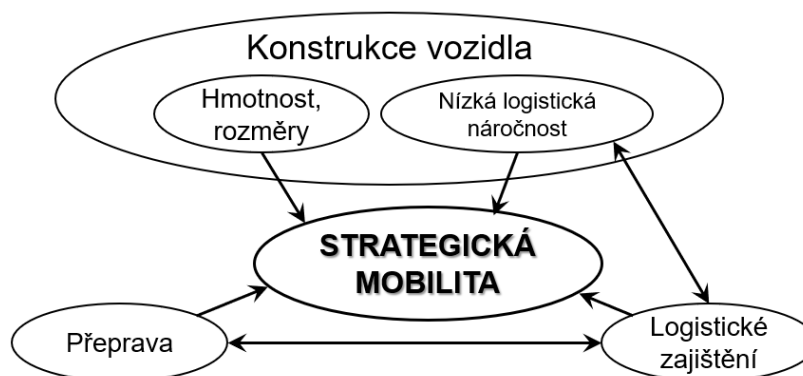
Mobilita taktická, která vyjadřuje schopnost vozidla pohybovat se v konkrétním terénu s použitím vlastní síly. Mezi nejdůležitější požadavky patří schopnost dynamické jízdy, manévrovatelnost, průchodivost a schopnost jízdy i při částečném poškození vozidla (zejména podvozku). Za základní kvalitativní parametry taktické mobility je možno považovat hmotnost vozidla; výkon motoru; měrný výkon motoru; maximální rychlost pro jízdu vpřed i vzad, popř. rychlost plavby; střední rychlost na komunikacích i v terénu; zrychlení vozidla; minimální poloměr zatáčení a rychlost zatáčení; schopnost překonávání překážek (výška kolmé stěny, šířka příkopu, hloubka brodu); maximální úhel stoupání a bočního náklonu; střední měrný tlak na půdu a vnější rozměry vozidla (výška, šířka, délka, světlá výška).

Mobilita operační, která vyjadřuje schopnost vozidla přesunout se vlastní silou ve stanovené době v rozsahu prostoru operace. Hlavními požadavky na operační mobilitu jsou maximální rychlost; střední rychlost a dostatečný jízdní dosah.

Část vědecké práce zameraná do oblasti taktické a operační mobility byla zaměřena zejména na analýzu a matematické modelování pohybu vozidel (kolových i pásových) a jeho vlivu na zatížení prvků podvozku a poháněcí soustavy [4], [5], [6], [7], [8].

Mobilita strategická, která vyjadřuje schopnost přepravy vozidla ve stanovené době na požadované místo strategického nasazení. Zahrnuje následující hlavní všeobecné požadavky: malou pohotovostní hmotnost vozidla; schopnost přepravy na podvalníku; způsobilost k železniční, námořní a letecké přepravě. Při posuzování požadavků na strategickou mobilitu je třeba vzít v úvahu specifické požadavky na bojová vozidla. Pro vedení bojové činnosti je nutné, mimo jiné, zabezpečit dostatečné množství munice, která je jednoznačně daná typem výzbroje. Na rozdíl od některých jiných komodit, jako je třeba palivo, popř. další provozní hmoty a materiály, munici zpravidla není možno zajistit jinak než z vlastních zdrojů, pokud není daná výzbroj unifikovaná v rámci aliance. Realizace požadavku na zabezpečení plnění bojového úkolu je tedy jednoznačně závislá také na samotném logistickém zabezpečení. Z tohoto důvodu je možno na strategickou mobilitu pohlížet jednak z pohledu vlastní konstrukce vozidla, tedy strategickou mobilitu v užším slova smyslu, ale i s přihlédnutím k nezbytnému logistickému zabezpečení operace, což je možno považovat za strategickou mobilitu v širším slova smyslu.

Z pohledu komplexního posouzení strategické mobility jednoznačně vyplývá požadavek na konstrukci vozidel s nižšími požadavky na logistické zabezpečení. Do této oblasti je možno zahrnout konstrukci jednotlivých částí vozidla s nižšími požadavky na provozní hmoty a materiály (nižší spotřeba paliva, použití olejů a dalších provozních materiálů umožňující delší intervaly jejich výměny), dále pak požadavky na prodloužení mezi údržbových cyklů, snížení jejich rozsahu apod. [3]. Vztah mezi konstrukcí vozidla, logistickým zabezpečením a strategickou mobilitou je znázorněn na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 – Vztah mezi konstrukcí, logistickým zabezpečením a strategickou mobilitou [3]

Za jeden z rozhodujících parametrů, ovlivňujících mobilitu vozidla ve všech jejích složkách (taktická, operační, strategická), je nutno považovat **hmotnost vozidla**. Její hodnota je jednoznačně ovlivněna konstrukčním řešením všech konstrukčních prvků vozidla, a to nejen ve vztahu k jejich hmotnosti, ale i ve vztahu k jejich rozměrům. Z tohoto hlediska je nutno mít na zřeteli, že i relativně lehká součástka, pokud je rozměrná, zabírá větší zastavěný prostor a tím vyvolává požadavek na větší vnější rozměry vozidla, což má negativní vliv na celkovou hmotnost vozidla. Ze stejného pohledu je možno hodnotit rovněž volný (nezastavěný) prostor. Hmotnost jednotlivých součástí vozidla, jakož i celkovou hmotnost vozidla významně ovlivňuje samotná konstrukce, ale také zejména použité **materiály**. Velikost zatížení skupin podvozku a poháněcí soustavy přímo souvisí s celkovou hmotností vozidla a způsobem jeho pohybu (zejména dynamické zatížení při pohybu v terénu) [5], [7], [8].

Jak již bylo výše uvedeno hmotnost vozidla je také významně závislá na konstrukci a způsobu samotné ochrany vozidla. V tomto kontextu je významným parametrem tloušťka a materiál pancéřové ochrany.

2.2 Ochrana

Ochrana vozidla, rovněž jako mobilita, zahrnuje soubor komplexních konstrukčních řešení. Z tohoto pohledu je možné ochranu vozidla rozdělit na následující složky [9]:

- proti pozorovacím a zaměřovacím prostředkům,
- před účinkem konvenčních zbraní založených jak na principu využití kinetické energie, tak zbraní využívajících efektu kumulativního paprsku,
- před účinkem min,
- před účinkem nástražných výbušných systémů,
- před účinkem zbraní hromadného ničení,
- před účinkem zápalných látek a možností vzniku požáru.

Pro posouzení ochrany vozidla jako uceleného funkčního systému je nutno také brát v úvahu skutečnost, zda je vozidlo vybaveno některým ze systémů aktivní ochrany. Aktivní systémy ochrany působí přímo na přibližující se střelu, popř. její naváděcí systém, ještě před případným dopadem střely na vozidlo. Jedná se o automaticky pracující systémy, jejichž činnost je možno rozdělit do několika kroků: a) sledování okolí vozidla v co největším rozsahu úhlů v horizontální i vertikální rovině; b) vyhodnocení typu blížící se střely a dráhy jejího letu; c) aktivní působení proti střele. Činnost těchto zařízení vychází zpravidla z identifikací činnosti pozorovacích a zaměřovacích přístrojů protivníka, popř. i identifikaci letící střely. Na základě zjištěných informací potom tyto systémy přijímají protiopatření, jako např. vytočení čelní části věže s nejsilnějším pancířem do směru dráhy střely, odchýlení směru střely naváděných na tepelný zdroj vystřelováním klamných cílů nebo ničení střely použitím např. protistřel, směrové energie a pod. [9].

Za základní složku z hlediska ochrany vozidla je považována vlastní **pancéřová ochrana**, která má významný podíl na zabezpečení ochrany proti střelám využívajícím kinetickou energii, proti účinku min a významným způsobem přispívá i ke snížení účinku kumulativních střel a účinku zbraní hromadného ničení a zápalných látek. Kvalita pancéřové ochrany z hlediska účinku střel využívajících kinetickou energii je zpravidla udávána vzdáleností, ze které musí být vedena palba z konkrétního zbraňového systému, aby došlo k proražení pancíře [9].

Vzhledem k zaměření habilitační práce bude v další části této podkapitoly dále rozebrána pancéřová ochrana vozidla.

Historie využívání pancéřování sahá až do starověku, kdy bylo hojně využíváno celé řady materiálů, které měly chránit vojáky před účinky zbraní nepřátel. Typickými materiály byly dřevo, kůže, ale také zejména ocel, která byla používána jako součást zbroje jednotlivců a také součást ochrany celých jednotek a bojových vozů. Jako příklad ochrany jednotky lze uvést původně římskou bojovou formaci želva, kdy vojáci používají semknuté štíty k ochraně celého pěšího útvaru (viz Obr. 2.2) [10].

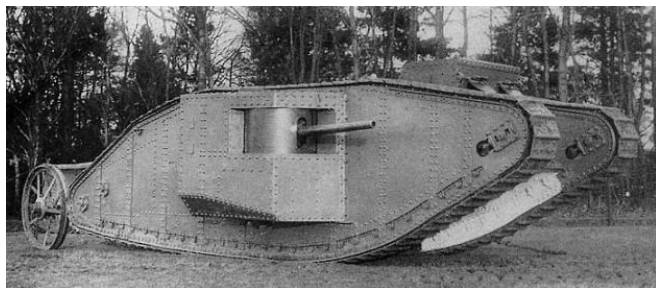


Obr. 2.2 – Římská bojová formace želva [10]

O historii pancéřování bojových prostředků, jako takového, můžeme hovořit od 2. poloviny 19. století, kdy byla v Občanské válce ve Spojených státech použita obrněná železniční souprava, mj. železniční vagon osazený 32 liberním dělem. V Búrské Válce v letech 1899–1902 bylo britskou armádou použito 13 pancéřovaných vlaků. V roce 1906 německá firma Erhardt zkoušela prototyp obrněného automobilu vyzbrojeného kanónem pro sestřelování balónů [11].

Největší rozmach pancéřování bojových prostředků se datuje do období 1. světové války a použitím nového bojového prostředku - tanku. Tank jako bojový prostředek byl poprvé použit 15. září 1916 v bitvě u řeky Somma. Na straně anglo-francouzských spojenců byly nasazeny anglické tanky Mk-I. Ze 49 nasazených tanků se bezprostředního boje zúčastnilo pouze 18 vozidel (zbývající zapadly nebo měly poruchu). Nasazení tohoto nového bojového prostředku bylo významným strategickým úspěchem. Angličané postoupili na úseku širokém 5 km do hloubky 5 km se ztráty na životech 20x menšími než obvykle. Na bojovém úspěchu se do značné míry podílel také psychologický efekt. Němečtí vojáci před pohybujícími se třicetitunovými a 8 m dlouhými kolosy, se kterými se doposud nesetkali, v panice utíkali. Označení tank (z původního anglického water carrier = tank – nádrž) bylo poprvé použito britskými jednotkami v roce 1915. Jednalo se o krycí název projektu. Vzhledem k obrovskému úspěchu s nasazením tohoto vozidla v bitvě, se stalo slovo tank oficiálním označením bojového

pásového prostředku [12]. Na Obr. 2.3 je zobrazen britský tank Mark I spolu s tabulkou, která uvádí parametry pancéřování.

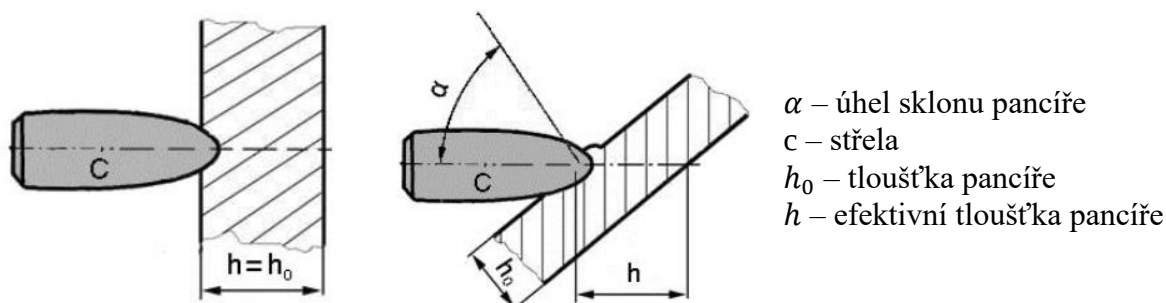


	Tloušťka [mm]
Čelo korby	12
Bok korby	10
Strop korby	6

Obr. 2.3 – Britský tank Mark I s parametry pancéřování [13]

Se zvětšujícími se nároky na ochranu tanků rostla také tloušťka pancéřování, a to zejména na exponovaných místech, kterými byly čelo a boky korby. Jednotlivé válcované nebo kované pancéřové pláty ze středně legovaných ocelí s nižším obsahem uhlíku byly na vozidlech nýtovány [13].

V 1. polovině 20. století docházelo k postupnému zesilování homogenního ocelového pancíře s cílem zvýšení odolnosti vůči protitankovým dělům a tankovým kanónům. Dalším konstrukčním řešením bylo zvýšení účinnosti pancéřování vhodným sklonem a tvarem korby a věže. Zejména využitím sklonu pancíře došlo ke zvýšení efektivní tloušťky pancíře při současném snížení hmotnosti vozidla [14], viz Obr. 2.4.



Obr. 2.4 – Princip zvýšení efektivní tloušťky pancíře [9]

Dalším milníkem ve vývoji pancéřování byla 2. světová válka. Například u amerického tanku Sherman byl použit vrstvený pancíř složený z oxidu křemičitého mezi dvěma ocelovými deskami, jako ochrana před střelami využívající kumulativního paprsku. Tato konstrukce, označována jako „sendvičový pancíř“, zvýšila parametry pancéřové ochrany proti homogennímu pancíři. Oxid křemičitý, který je velmi tvrdý a křehký, se na rozdíl od oceli plasticky nedeformuje. Po zásahu střely s kumulativním účinkem projde kumulativní paprsek vnějším ocelovým pancířem a dostane se do křemenné vrstvy, která kumulativní paprsek rozptýlí [15].

Zvyšování účinnosti pancéřování dalším zesilováním tloušťky homogenního pancíře, bylo dalším vývojovou etapou v konstrukci pancířů v období 2. světové války. Zvyšování tloušťky pancéřové ochrany vedlo k enormnímu nárůstu hmotnosti tanků (např. německý Panzerkampfwagen VI Tiger měl při tloušťce pancéřování 100 mm hmotnost 56,9 t [16]). Jednou z možností, jak omezit výrazný nárůst hmotnosti bylo zesilování pouze exponovaných částí s využitím přídatného pancéřování. Zpočátku byly používány např. články pásů, pojezdová kola a pytle s pískem (Obr. 2.5), účinnější ochranu následně zabezpečil představný pancíř (Obr. 2.6) [17].



Obr. 2.5 – Zesilování exponovaných míst Panzer II Ausf J [18]



Obr. 2.6 – Představný pancíř na vozidle Stug IV [18]

Chemické složení pancířů bylo v období 2. světové války silně ovlivněno dostupností legujících prvků. Především u německých tanků bylo ke konci války hojně využíváno nízkolegovaných ocelí s malým obsahem C a odpovídající houževnatostí. Pancíře se vyráběly odléváním do forem a válcováním. Požadované balistické odolnosti se u odlévaných pancířů dosahovalo především legováním Ni a Cr. Válcované pancíře byly dále tepelně zpracovávány zpravidla kaleny. Jejich výroba byla, ve srovnání s litými pancíři, nákladnější a časově náročnější [19].

Ve 2. polovině 20. století se začalo upouštět od používání vrstveného pancíře a pozornost se zaměřila zpět k používání ocelového homogenního pancíře. Jeho limity z hlediska pancéřové ochrany ovšem vedly k tomu, že již v 60. letech započal vývoj kompozitního pancíře Chobham, což byl pancíř složený z vnitřní a vnější ocelové vrstvy a mezi nimi vloženou hliníkovou schránkou vyplněnou keramickými destičkami zalitými do polymeru. Tento pancíř byl poprvé použit v tancích Abrams M1 a Leopard 2 [20]. Sovětská konstrukční škola se v 60. letech vrátila k vrstvenému pancíři s oxidem křemičitým u tanku T-64A [21].

Se zkvalitňováním metalurgických pochodů při výrobě oceli a změnami v konstrukci bojových vozidel docházelo k postupnému nahrazování litých pancířů pancíři válcovanými

[22]. V 80. letech došlo k dalšímu vývoji pancíře Chobham pod názvem Dorchester-Chobham. Jednalo se o pancíř Chobham zesílený uhlíkovými a skelnými vlákny. Tento inovovaný pancíř byl použit u tanku Challenger 2. V dalším období došlo k trendu nahrazení keramiky deskami z ochuzeného uranu [23].

V roce 1982 Izrael v rámci libanonské války poprvé použil a vyzkoušel reaktivní dynamický pancíř na amerických tancích M60. Nicméně největší pozornost vývoji reaktivní dynamické ochrany věnovalo SSSR a v roce 1985 byl tento systém pod názvem Kontakt 5 použit na tanku T-80U [23].

V 90. letech byl vývoj směřován do oblasti vrstveného pancéřování (tloušťka 200 mm – 300 mm), což vedlo ke zvýšení celkové hmotnosti. Vzhledem k této skutečnosti, byla současně zaměřena pozornost na vývoj systémů aktivní ochrany. V první vývojové etapě byly zavedeny systémy „soft-kill“, jejímž účelem je snížení průchodnosti laserového naváděcího paprsku a odklonění dráhy letu střely využitím klamného cíle proti samonaváděcím střelám. Následně byly vyvinuty systémy „hard-kill“, jejímž účelem je eliminace účinku střely před dopadem na vozidlo (destrukcí střely, eliminací spouštěcího mechanismu, předčasnou iniciací bojové hlavičky, vychýlením polohy střely nebo vychýlením dráhy letu střely) [15].

Vzhledem ke stále rostoucí hmotnosti současných bojových vozidel (u tanků dosahuje hmotnost 72 t) je vývoj pancéřové ochrany zaměřen na snížení hmotnosti pancířů při zachování balistické odolnosti, např. využitím plastové výplně mezi deskami z titanu (Ti) nebo plně kompozitních pancířů bez kovu (např. desky z lisovaných aramidových vláken, které jsou vyplněny polymerem na bázi Si a C). Přes své jednoznačné přednosti mají vrstvené pancíře i několik nevýhod, přičemž ta hlavní spočívá v jejich značné tloušťce.

Využití systémů aktivní ochrany je zcela jistě současným trendem v ochraně bojových vozidel, jak východní konstrukční školy (Štóra 1 na ruských tancích T-55M, ukrajinském tanku T-84; Štóra 2 na indickém tanku T-90S; Arena na ruských tancích T-80, T-90; Afghani na ruském tanku T-14 Armata), tak západní konstrukční školy (izraelský systém Trophy u tanků Merkava IV a BVP Namer a amerických tanků Abrams M1A2) [9].

Obecně lze konstatovat, že konstrukce moderních bojových vozidel v současné době využívá výhod vrstvených pancířů, které ve srovnání s homogenním ocelovým pancířem, disponují vyšší balistickou odolností proti moderním protipancéřovým střelám (kumulativním i podkaliberním kinetickým). Nicméně základní homogenní pancéřování má stále v moderních konstrukcích své nezastupitelné místo. Dalším vývojem pancéřové ochrany se zaměřuje na využití

vylepšených pancéřových ocelí IRHA (Improved Rolled Homogeneous Armor) a slitin na bázi Ti a Al [24].

Vzhledem k současným trendům v oblasti pancéřové ochrany vozidel, je rovněž jednou z oblastí výzkumu na Fakultě vojenských technologií pancéřová ochrana. V tomto ohledu je také zaměřena samotná habilitační práce. Stěžejní část práce je věnována oblasti materiálů a jejich úprav vedoucích k rozvoji balistické odolnosti sendvičových struktur. Práce svým zaměřením rozvíjí povědomí o balistických ochránách a uvádí i různé technologické přístupy k jejich vytváření. Výsledkem práce jsou složené kompozitní pancíře, které mají lepší užité vlastnosti, než pancíře v současné době běžně používané pro lehké pancéřování.

Aktivita spojené s hlavními cíli habilitační práce byly řešeny ve spolupráci s Katedrou strojírenství, kde je dlouhodobě rozvíjena oblast balistických ochran a nových materiálů, které jsou pro zvýšení balistické odolnosti využitelné. Právě v úkolech týkajících se balistických (pancéřových) ochran se zabývám v rámci fakultního dlouhodobého záměru rozvoje organizace „VAROPS“, kde právě balistické ochrany jsou jednou z nosných témat oblasti rozvoje autonomních a robotických prostředků.

3. Cíl práce

Habilitační práce je soustředěna do dvou základních částí a propojuje schopnosti a zkušenosti pracovišť Katedry bojových a speciálních vozidel a Katedry strojírenství Fakulty vojenských technologií.

První část práce zahrnuje oblast kovových materiálů, stěžejní pozornost je věnována možnostem technologických úprav kovových pancířů technologiemi vytváření vrstev s ohledem na zlepšení jejich užitných vlastností, zejména pak povrchové tvrdosti. Zaměření první části do oblasti kovových pancířů respektuje potřebu využít redukovaný kovový pancíř v rámci systému vrstveného pancíře s cílem efektivního snížení dopadové rychlosti střely při průniku do dalších vrstev pancíře. Jedná se tedy o vývoj destabilizační dopadové části pancíře s využitím difuzních technologií.

Cílem první etapy je navrhnout čelní dopadovou stranu pancíře tak, aby byla zajištěna destabilizace střely po nárazu na překážku a efektivně zvýšit povrchovou tvrdost jako předpoklad dosažení vyššího zastavujícího účinku střely. Očekávaným přínosem této části práce je významná redukce čelního kovového pancíře a s tím související redukce hmotnosti, která je kritickým parametrem každého vojenského vozidla. Právě hmotnost balistické ochrany významně snižuje bojové použití prostředků a velmi významně ovlivňuje zejména mobilitu vozidel. Vzhledem k této skutečnosti musí koncepce vrstveného pancíře přispívat ke snížení hmotnosti aktuálně používaných kovových pancířů.

V druhé části práce jsou sdružovány poznatky z oblasti kompozitních materiálů a specifických výrobních aditivních technologií kovových struktur. Cílem této části práce je navrhnout a ověřit konstrukci vnitřní struktury pancíře kombinací kompozitních materiálů a aditivně vytvářených struktur s ohledem na snížení hmotnosti pancíře a dosažení balistické odolnosti reprezentující kovový pancíř ARMOX600T o tloušťce 5 mm.

Společným milníkem obou vědeckých aktivit (částí) je definovat soudobé technologické možnosti vedoucí ke zvýšení představných balistických ochran.

Očekávaným výsledkem práce je pak vyvinutý vrstvený pancíř kvalitativně srovnatelný s kovovým pancířem ARMOX 600T.

Nedílnou součástí interdisciplinární práce je také rozvoj vnitřní spolupráce v rámci fakulty, což je předpokladem pro úspěšný vývoj nových vrstvených pancířů.

4. Balistické ochrany a možnosti zvýšení jejich odolnosti

Balistickou ochranou se rozumí vědomě vytvořená překážka, která svým charakterem snižuje či zcela eliminuje průbojný účinek primárních střel, případně sekundárně vzniklých subprojektilů (střepin). Stěžejní vlastností balistické ochrany je ochrana osádky (obsluhy) a výbavy ozbrojeného prostředku před účinky munice, nástražných výbušných systémů a také dalšími vlivy vzniklými v důsledku výbuchu munice v bezprostřední blízkosti prostředku [25].

Z konstrukčního hlediska lze balistické ochrany rozdělit na dvě skupiny: základní a přídavné. Základní balistickou ochranou jsou primární pancíře vojenské techniky, které jsou součástí a nosným prvkem konstrukce daného vozidla. Převážně se jedná o materiály na bázi železa či jiných prvků, např. titanu, manganu, hliníku nebo jejich kombinacemi. Některé kritické části základních balistických ochran jsou konstruovány jako vícevrstvé pancíře využívající potenciálu vícevrstevných sendvičových konstrukcí s přítomností kompozitních materiálů, např. keramiky apod.

Přídavné balistické ochrany nacházejí uplatnění zejména tam, kde je stávající základní balistická ochrana nedostatečná, např. zvýšení balistické ochrany v průběhu modernizace vozidla. Současně je přídavná balistická ochrana využívána pro zachování přepravitelnosti vozidel – zabezpečení strategické mobility. Využitím přídavné balistické ochrany můžeme docílit snížení hmotnosti a rozměrů vozidla např. při zabezpečení letecké přepravy. Zároveň využitím případné balistické ochrany můžeme dosáhnout několika stupňů ochrany vozidla, kterou můžeme modulárně měnit v závislosti na plnění bojového úkolu. Typickým příkladem je německé BVP Puma, které v základní verzi váží 29,4 t (odolává střelám ráže 30 mm z čela vozidla a střelám ráže 14,5 mm na ostatních částech vozidla) a využitím modulárního pancéřování se zvyšuje stupeň ochrany, kdy vozidlo s nejvyšším stupněm ochrany váží 43 t (stupeň ochrany na úrovni tanků - odolává střelám ráže (120–125) mm z čela vozidla a výbuchu miny o síle 10 kg TNT). Modulární pancéřování BVP PUMA je uveden na Obr. 4.1.

Přídavná balistická ochrana musí umožňovat modulární využití a její konstrukce musí umožňovat jejich snadnou montáž a demontáž v polních podmínkách. Hlavním účelem přídavné balistické ochrany je destabilizovat, výrazně snížit nebo zcela eliminovat průbojný účinek střely včetně pohlcení tlakových tlakové vlny od výbuchu trhavých složí.



Obr. 4.1 – Přídavná balistická ochrana BVP Puma [9]

Případná balistická ochrana není jen doménou bojových vozidel, ale může být také efektivně využita např. pro ochranu infrastruktury (parky vojenské techniky, základny v operacích, kontrolní místa, místa velení) v týlovém prostoru. V těchto případech je využití efektivního způsobu využití mobilní přídavné balistické ochrany možností, která významně zvyšuje ochranu a snižuje riziko ztrát kritického personálu v bojových podmínkách. Názorným příkladem může být využití lehkých mobilních přídavných balistických ochran standardizovaných ISO 1C kontejnerů, které jsou v podmínkách AČR standardně využívány. Současně další oblastí, ve které jsou tyto mobilní balistické ochrany využitelné, jsou prvky kritické infrastruktury.

Při řešení balistické ochrany vozidel je dalším konstrukčním řešením využití představných pancířů. Tyto pancíře jsou umístěny v určité vzdálenosti před základním pancířem a využívají se zejména jako ochrana před kumulativními střelami. Po dopadu kumulativní střely na tento představný pancíř dojde k iniciaci roznětky a tím ke vzniku kumulativního paprsku v dostatečné vzdálenosti od základního pancíře. Na vlastní pancíř tedy kumulativní paprsek dopadá s určitým zpožděním, čímž dochází k jeho částečnému rozptýlení. Na pancíř tedy kumulativní paprsek působí kratší dobu s nižší intenzitou. Představné pancíře tvoří doplňkovou ochranu, která je u některých vozidel již součástí základní pancéřové ochrany, např. u amerického BVP Bradley M2A2 (Obr. 4.2). Jejich využití hraje rovněž významnou roli při modernizaci vozidel, např. u amerického vozidla Bradley M2A3 (Obr. 4.3). Z konstrukčního hlediska se nemusí vždy jednat o klasické pancíře z oceli nebo slitin lehkých kovů. Poměrně široké uplatnění našly např. „pancíře“ z pryže zpravidla vyztužené ocelovou sítí apod. [9].



Obr. 4.2 – Představný pancíř vozidla M2A2 Bradley [9]



Obr. 4.3 – Modernizovaná verze BVP Bradley M2A3 [9]

Dalším, v poslední době velmi rozšířeným prostředkem ochrany proti kumulativním střelám, je využívání ochranných mříží SLAT (z anglického *slat* = lišta). Jejich účelem je, stejně jako při použití představných pancířů, aktivovat kumulativní střelu v určité vzdálenosti od základního pancíře. Jeho významnou předností je relativně jednoduchá montáž a menší hmotnost. Tento pancíř se zpravidla využívá na méně pancéřovaných místech korby nebo např. na zvýšení ochrany v místě vyústění výfukového potrubí apod. Specifickým řešením ochrany proti kumulativním střelám je použití řetězů na zadní části věže izraelského tanku Merkava [9].



Obr. 4.4 – Využití ochranných mříží SLAT na tanku LEOPARD 2 [9]



Obr. 4.5 – Použití řetězů na zadní části věže tanku Merkava [9]

Způsob namáhání pancíře závisí na použitém protipancéřovém prostředku. Základní druhy účinků střely na pancíř jsou následující [25]:

- vysoké měrné tlaky od nárazu střely,
- vysoká deformační energie daná kinetickou energií střely,
- vysoká teplota.

Ze způsobu namáhání pancířů následně vychází požadavky na materiálové vlastnosti, kterými jsou [25]:

- vysoká tvrdost (zvláště povrchové vrstvy),

- vysoká houževnatost, tedy schopnost absorbovat energii střely formou plastické deformace,
- zachování vlastností i při vysokých teplotách,
- vysoká teplota tavení.

Materiál pancíře by měl být rovněž schopen oslabit účinek zbraní využívající radiaci bez doprovodných účinků vlastní radiace izotopů, vzniklými ozářením materiálu pancíře.

Základní požadavky, které jsou kladeny na pancíře z hlediska konstrukce, lze shrnout do následujících bodů [25]:

- odolnost proti střelám využívající kinetickou energii, proti kinetickým střelám, minám, improvizovaným výbušným zařízením a střepinám,
- nízký poměr hmotnosti k ploše, kterou chrání – nízká hmotnost,
- dostupnost,
- možnost výroby konvenčními výrobními postupy (slévateľnost, tvařitelnost, svařitelnost, obrobiteľnost apod.),
- přiměřená cena,
- dlouhodobost využívání, která souvisí s predikcí budoucího vývoje zbraní.

Zkušenosti ze skutečných bojových konfliktů ukazují, že většina balistických nebezpečí je od střepin střel, granátů a min. Druhé největší nebezpečí představují střely o vysoké rychlosti. Střely o malé rychlosti, které se využívají u ručních zbraní mají daleko menší význam. Nebezpečí z ostatních zdrojů, jako je např. výbuch v blízkosti bojového prostředku, je menší ve srovnání se střelami o vysoké rychlosti. Z tohoto důvodu je primárním požadavkem na pancéřování ochrana osádky a materiálu proti střepinám a střelám o vysoké rychlosti [26].

V praxi je možno se setkat s několika způsoby hodnocení ochrany. Jedním z využívaných způsobů v rámci NATO je stanovení odolnosti vozidla rozdělených podle účinku jednotlivých typů zbraní. Takto stanovená odolnost je rozdělena do jednotlivých úrovní. V prostředí České republiky jsou tyto úrovně obsahem ČOS 250005 „Úrovně ochrany osádek obrněných vozidel“, který vychází z normy NATO STANAG 4569, AEP-55 „Protection levels for occupants of armoured vehicles“. V těchto normách jsou účinky zbraní rozděleny do 3 základních skupin [9]:

- Úrovně ochrany proti střelám a střepinám využívající kinetickou energii,
- Úrovně ochrany proti granátům a minám,

- Úrovně ochrany proti IED (z anglického Improvised Explosive Device – Improvizované výbušné zařízení).

První dvě uvedené skupiny jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 4-1, Tab. 4-2), úrovně ochrany proti IED jsou utajované na stupni TAJNÉ.

Tab. 4-1 – Úrovně ochrany proti střelám a střepinám s kinetickou energií [9]

Úroveň ochrany	Střely s kinetickou energií	Dělostřelecký prostředek (střepinový simulátor)
6	Zbraň: Automatický kanón ráže 30 mm Munice: APFSDS a AP Vzdálenost 500 m	Dělostřelectvo ráže 155 mm Odhadovaná vzdálenost od výbuchu: 10 m
5	Zbraň: Automatický kanón ráže 25 mm Munice: APDS a APFSDS Vzdálenost 500 m	Dělostřelectvo ráže 155 mm Odhadovaná vzdálenost od výbuchu: 25 m
4	Zbraň: Těžký kulomet ráže 14,5 mm Munice: AP Vzdálenost 200 m	Dělostřelectvo ráže 155 mm Odhadovaná vzdálenost od výbuchu: 25 m
3	Zbraň: Kulomet a odstřelovací puška ráže 7,62 mm Munice: AP s jádrem z karbidu wolframu a AP s ocelovým kaleným jádrem Vzdálenost 30 m	Dělostřelectvo ráže 155 mm Odhadovaná vzdálenost od výbuchu: 60 m
2	Zbraň: Útočná puška ráže 7,62 mm Munice: AP s ocelovým kaleným jádrem Vzdálenost 30 m	Dělostřelectvo ráže 155 mm Odhadovaná vzdálenost od výbuchu: 80 m
1	Zbraň: Útočná puška ráže 7,62 mm a 5,56 mm Munice: Celoplášťová munice (ball) Vzdálenost 30 m	Dělostřelectvo ráže 155 mm Odhadovaná vzdálenost od výbuchu: 100 m

Tab. 4-2 – Úrovně ochrany proti granátům a minám [9]

Úroveň ochrany	Granáty a miny		
4	4b	Exploze miny pod vozidlem	Tlaková protitanková mina 10 kg trhaviny
	4a	Exploze miny aktivované tlakem kteréhokoliv kola nebo pásem	
3	3b	Exploze miny pod vozidlem	Tlaková protitanková mina 8 kg trhaviny
	3a	Exploze miny aktivované tlakem kteréhokoliv kola nebo pásem	
2	2b	Exploze miny pod vozidlem	Tlaková protitanková mina 6 kg trhaviny
	2a	Exploze miny aktivované tlakem kteréhokoliv kola nebo pásem	
1	Ruční granáty, nevybuchlá tříštivá dělostřelecká submunice a ostatní malé střepinové prostředky určené proti živé síle explodující pod vozidlem.		

V konstrukci bojových vozidel se používají pancíře mnoha typů lišící se použitým materiálem, strukturou a způsoby dodatečné úpravy (modifikací). Z hlediska použitého

materiálu rozlišujeme pancíře na ocelové, pancíře na bázi lehkých kovů a pancíře na bázi kompozitních materiálů, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

4.1 Materiály balistických ochran na bázi železa

K nejrozšířenějším materiálům pro balistickou ochranu vojenských vozidel se stále řadí **kovové pancíře**. Jejich významnou předností jsou zejména mechanické vlastnosti základních materiálů, jejichž rozšíření lze efektivně realizovat s využitím technologií povrchových úprav (tepelné, chemicko-tepelné zpracování). Právě vhodné nastavení mechanických vlastností kovových pancířů zvyšuje jejich účinnost, která je závislá zejména na pevnosti, tvrdosti a houževnatosti. Uvedené vlastnosti jsou úzce spojeny s chemickým složením materiálu, jeho strukturou či obsahem legujících prvků. Výroba kovových pancířů je realizována nejčastěji z materiálů na bázi Ni-Cr-Mo nebo Mn-Mo-B [27] a to zejména s ohledem na jejich cenu.

Kovové pancíře jsou nejčastěji vyráběny technologiemi tváření i odlévání. Nejčastější technologií jejich spojování je technologie svařování¹. Nejčastěji používanými kovovými materiály jsou oceli typu 0,3 % C-Ni-Cr se strukturou jemnozrnného martenzitu. Metalurgické faktory jako jsou obsah legujících prvků, typ martenzitu (nebo přítomnost bainitu) a obsah zbytkového austenitu má stěžejní vliv na balistické vlastnosti kovových pancířů.

Popis odolnosti martenzitických ocelí lze definovat na základě stanoveného parametru BP, který představuje tzv. balistický index, který je možno vyjádřit vztahem [27]:

$$BP = \frac{RA}{exp^{\partial}} \quad (4-1)$$

kde: RA – objemový obsah zbytkového austenitu,
 ∂ – tloušťka desky kovového pancíře.

Balistický index BP by měl být v intervalu (0,006; 0,06) [27].

Vývoj balisticky odolných kovových pancířů ukazuje potřebu neustálého zvyšování pevnostních vlastností ocelí, které reprezentuje Tab. 4-3. Převážná většina ocelí je založena na významné koncentraci prvků Ni-Cr-Mo. Hlavní legující prvky uvedené v systému Ni-Cr-Mo významně ovlivňují mechanické vlastnosti ocelí, zejména pak mez pevnosti a plasticitu. Vysoce pevné oceli, jako jsou např. M300 a oceli uvedené v Tab. 4-3 jsou vhodné pro konstrukci

¹ Nejčastěji užívaným zástupcem kovových pancířů je válcovaný homogenní pancíř, který je označován jako pancíř RHA (Rolled Homogeneous Armor). Je vyráběn z válcovaných legovaných tepelně zpracovaných ocelí s garantovanou tvrdostí, pevností a houževnatostí. Je standardizován podle amerického standardu MIL-DTL-12560K [9].

přídavných pancířů. Velmi rozšířenou pancéřovou ocelí je ocel Mars od lucemburské společnosti ArcelorMittal. Tento výrobce dodává pancéřové oceli např. Mars 380, Mars 440, Mars 500, Mars 600, perforovaný Mars 650 [27].

Tab. 4-3 – Mechanické vlastnosti ocelí používaných k balistické ochraně [28], [29], [30]

Typ oceli	HBW [-]	R _{p0,2} [min MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [min %]	KV -40 °C [J]	CEV [-]
Armox 440T	420–480	1100	1250–1550	10	45	0,67–0,73
Armox 500T	480–540	1250	1450–1750	8	32	0,67–0,73
Armox 600T	570–640	1500	2000	7	12	0,83–0,86
Hardox 400	370–430	1000	1250	10	45	0,41–0,52
Hardox 450	425–475	1200	1400	10	40	0,48–0,60
Hardox 500	470–530	1350	1600	10	27	0,49–0,66
Mars 440	420–470	1150	1450	13	48	0,70
Mars 500	480–530	1250	1700	12	28	0,80
Mars 600	577–655	1450	2150	10	23	0,77

Stěžejní výhodou uvedených ocelí je možnost optimalizace struktury s ohledem na efektivní změny základních balistických vlastností úpravou jejich vnitřní struktury a to např. povrchovým kalení nebo obecně povrchovými technologiemi. Dalšími možnými modifikačními technologiemi lze snížit koncentraci H, O a N, což významně napomáhá následným technologiím spojování (např. svařování). Pro pancéřování se často používají i oceli AISI 4340 a M300.

Obecně platí, že s rostoucí tvrdostí se u materiálů na bázi Fe snižuje jejich houževnatost. Efektivním způsobem, jak zajistit vhodný kompromis mezi tvrdostí, pevností a houževnatostí je volba vhodného tepelného zpracování a kvantitativní i kvalitativní výběr oceli s vhodným chemickým sloužením pro dané aplikace [31]².

Kovové pancíře je možné rozdělit podle různých hledisek. Z pohledu praktického využití ve vojenských aplikacích jsou využívána dvě základní hlediska pro rozdělení kovových pancířů: konstrukční a technologické.

² Dle tepelného zpracování lze kovové pancíře na bázi Fe dále dělit na kalené, povrchově kalené a termomechanicky zpracované pancíře. Kalené pancíře se dle teploty tepelného zpracování rozdělují na martenzitické a sorbitické pancíře. Při nízkoteplotním popuštění zpravidla do teploty 250 °C se vytváří martenzitická struktura a vznikají martenzitické pancíře s tvrdostí 500 HB, která je nejžádanější pro balistické účely u pancéřových ocelí. Vyšší teplota popuštění (680 °C) se používá k vytvoření sorbitického pancíře. Ve srovnání s martenzitickým se vyznačuje nižší tvrdostí (300 HB), ale vyšší houževnatostí. Ke zvýšení povrchové tvrdosti mohou být tyto pancíře povrchově zakaleny, čímž se na vnější straně vytvoří tvrdší vrstva s martenzitickou strukturou, zatímco vnitřní strana je houževnatější se sorbitickou strukturou. Termomechanicky zpracovaný pancíř je vyroben pomocí kombinace tepelného zpracování a mechanického tváření s cílem dosáhnout jemnozrnné struktury. Tento proces kombinuje řízené deformační a tepelné zpracování k získání synergických efektů mechanických vlastností. U pancíře umožňuje dosáhnout vyšší pevnosti a tvrdosti bez ztráty houževnatosti [31].

4.1.1 Rozdělení kovových pancířů z konstrukčního hlediska

Základními parametry tohoto rozdělení jsou tvrdost, tloušťka pancíře a počet vrstev. Pancíře o slabé tloušťce jsou charakterizovány vysokou tvrdostí a křehkostí. Jsou určeny především pro ochranu proti střelám z ručních zbraní a střepinám. Pancíře o velké tloušťce jsou naopak houževnaté a z důvodu narušení struktury dopadající střely je tvrdá vrstva vytvářena pouze na povrchu pancíře. Základní rozdělení pancířů podle tvrdosti a tloušťky je uvedeno v Tab. 4-4.

Tab. 4-4 – Rozdělení pancířů podle tvrdosti a tloušťky [31]

Druh pancíře	Typ pancíře	Tloušťka [mm]	Pevnost [MPa]	Tvrdost [HB/HV/HRC]
o vysoké tvrdosti	slabý	5–15	1500	do 500/550/50
o střední tvrdosti	střední	do 80	1000	do 350/370/38
o nízké tvrdosti	silný	přes 200	900	do 250/270/25

Pancíře o nízké a střední tvrdosti jsou z pohledu struktury materiálu sorbitického typu. Vyrábí se jako tvářené nebo jako lité polotovary v tloušťkách od 25 mm do (200–250) mm. Chemické složení jednotlivých druhů ocelí pro pancíře nízké a střední tvrdosti se volí s ohledem na požadované vlastnosti, způsob výroby a tloušťku pancíře. Obsah legujících prvků bývá často ovlivněn i požadavkem kalitelnosti. Směrné chemické složení pancéřových ocelí tohoto typu se pohybuje v mezích uvedených v Tab. 4-5 [31].

Tab. 4-5 – Chemické složení ocelí pro pancíře nízké a střední tvrdosti [hm. %] [31]

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
0,25–0,45	0,20–0,60	0,50–1,00	0,50–3,00	1,0–2,50	~ 0,50

S ohledem na různé požadavky se upravuje struktura pancířů tepelným zpracováním, které spočívá v kalení a popouštění pancéřových polotovarů na vysokou teplotu. Výsledná sorbitická struktura zabezpečuje následující hodnoty mechanických vlastností [31]:

- pevnost v tahu $R_m = (800–1100)$ MPa,
- tažnost $A = (10–20)$ %.

Vrubová houževnatost (při 20 °C) $KC = (50–150)$ J/cm², se prakticky nemění až do 30 °C, zkřehnutí nastává až při teplotách kolem -70 °C [31].

Požadavky na vysokou kvalitu pancéřových ocelí se odráží hlavně ve vysokých nárocích na technologii, zejména při metalurgickém zpracování oceli (nízký obsah P, S, určité požadavky na přítomnost vměstků a obsah legujících prvků) a při odlévání nebo tvářením (teplota odlévání, stupeň deformace apod.) [31].

Pancíře vysoké tvrdosti mají struktury martenzitického typu. Pancéřové oceli této skupiny se používají převážně jako pancéřová ochrana OT a příslušné polotovary se vyrábějí tvářením v tloušťkách (4–20) mm. Jejich strukturu tvoří nízkopopuštěný martenzit, přičemž popouštěcí teplota je limitována hlavně neodstranitelnou (nízkoteplotní) popouštěcí křehkostí. Obvyklým legujícími prvky oceli pro martenzitické pancíře, kromě Cr a Ni, bývá Mn a Si, který posouvá teplotu vývinu neodstranitelné popouštěcí křehkosti asi o (30–60) °C k vyšším teplotám [31].

Orientační pevnostní parametry těchto pancířů jsou [31]:

- pevnost v tahu $R_m \sim 1550$ MPa,
- mez kluzu $R_e \sim (1450–1550)$ MPa,
- vrubová houževnatost $KC \sim 50$ J/cm².

Rozhodujícím kritériem pro použitelnost těchto ocelí jako pancéřování bojových vozidel je svařitelnost v zakaleném a nízkopopuštěném stavu. Pro splnění tohoto náročného požadavku jsou kladeny značné nároky na přísné dodržování podmínek při metalurgickém zpracování oceli, zejména přesné dodržení chemického složení, čistoty oceli apod. Vysoké nároky jsou rovněž kladeny na další zpracování oceli (odlévání ingotů a jejich zpracování, tvářením atd.) [31].

Podle počtu vrstev rozdělujeme pancíře na jednoduché (složené z jedné vrstvy) a vrstvené obsahující více vrstev).

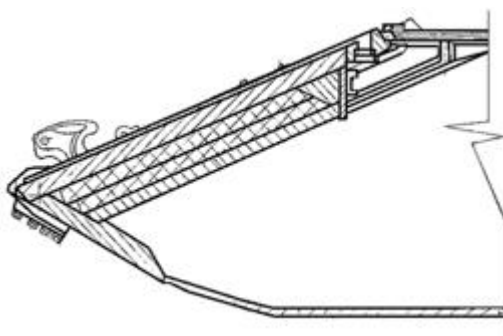
Jednoduché pancíře jsou tvořeny jednou, zpravidla kovovou vrstvou. Nejpoužívanějším materiálem jsou speciální pancéřové oceli, legované Cr, Ni a Mo. Jejich průměrné chemické složení je uvedeno v Tab. 4-6 [31].

Tab. 4-6 – Průměrné chemické složení jednoduchých pancířů [hm. %] [31]

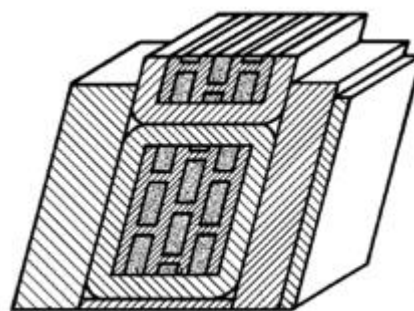
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
0,30–0,40	do 0,40	0,30–0,80	0,50–3,00	0,60–1,85	0,15–0,60

Optimálních vlastností získává ocel procesem tepelného zpracování (kalení a popouštění). Teplota popouštění se volí podle požadované struktury. U pancířů martenzitického typu je teplota popouštění (200–250) °C, tvrdost pancíře bývá až 64 HRC. Martenzitická struktura je výhodná při vyšších rychlostech střely. Pancíře sorbitického typu se popouštějí na teploty (550–620) °C. Sorbitické struktury mají vysokou houževnatost při relativně dobré pevnosti. V některých případech je u jednoduchých pancířů záměrně vytvořena heterogenní struktura (např. povrchovým kalením nebo cementováním) s odlišnými vlastnostmi na povrchu (tvrdost) a v jádře pancíře (houževnatost) [31].

Vrstvené pancíře mají vhodnou kombinaci materiálů o vysoké tvrdosti s materiály o vysoké houževnatosti (spolu s vrstvami odolnými vysokým teplotám) zabezpečit vysokou odolnost proti průniku střely. Vrstvené pancíře obsahují i vrstvy, které zabezpečují potřebnou ochranu osádky před pronikavou radiací a neutronovým zářením. Tento účinek mají zejména plasty na bázi polyethylenu s přídavkem bóru, případně další ze skupiny fluorplastů (např. polytetrafluorethylen – teflon), které jsou odolné i proti působení vyšších teplot. Koncentrace C, stejně jako dalších legujících prvků má stěžejní vliv na možnost uplatnění následných technologií povrchových úprav [31]. Použité materiály mohou být použity v jednotlivých oddělených vrstvách (Obr. 4.6) nebo mohou navzájem pronikat (Obr. 4.7) [9].



Obr. 4.6 – Čelní pancíř korby tanku T-72M4CZ [9]



Obr. 4.7 – Průřez pancíře pancíře Chopham [9]

4.1.2 Rozdělení kovových pancířů z technologického hlediska

Z technologického hlediska můžeme pancíře rozdělit ze dvou základních hledisek:

- podle chemického složení v průřezu pancířem:
 - homogenní,
 - heterogenní,
 - dynamicky aktivní pancíře,
- podle technologie výroby:
 - lité,
 - tvářené.

Homogenní pancíř je pancíř zhotovený z jednoho materiálu se stejnou metalografickou strukturou v celé hloubce. Historicky se jedná o jeden z nejstarších způsobů pancéřování, jehož největší rozmach začal v období 1. světové války. Homogenní pancíře se dále dělí podle jejich tepelného zpracování na [31]:

- **Kalené** (martenzitické, sorbitické) – martenzitické struktury s vyšší tvrdostí (kolem 500 HB) a sorbitické struktury s nižší tvrdostí (kolem 300 HB) se dosahuje vhodným tepelným zpracováním.
- **Povrchově kalené** – pancíř se sorbitickou strukturou se povrchově zakalí, což vede k vytvoření martenzitické struktury v povrchové vrstvě, která vykazuje vyšší tvrdost a křehkost v porovnání s houževnatějším sorbitickým jádrem. Povrchově kalený pancíř vhodně kombinuje vlastnosti sorbitické a martenzitické struktury, ale z důvodu vysokých nákladů a náročnosti technologického procesu je využíván pouze omezeně.
- **Termomechanicky zpracované** – při procesu kalení dochází k mechanickému tváření. Je zde využito vlivu deformace austenitu na průběh přeměny, díky kterému dochází k podstatnému zvýšení mechanických vlastností, zejména meze kluzu. Pro tento typ pancířů jsou přednostně využívány především konstrukční oceli se středním obsahem C (kolem 0,4 %). Perspektivními materiály se ovšem jeví také skupiny ocelí s obsahem C (1–2) %. Technologie výroby pancířů z těchto ocelí využívá efektu superplasticity. Tato metoda, označovaná zkratkou TMZ (termomechanické zpracování), umožňuje dosahovat velmi výhodné kombinace pevnosti a houževnatosti.

Heterogenní pancíř se skládá z více vrstev materiálu, které mají různé chemické složení a odlišné vlastnosti. Tento typ pancíře je také označován jako sendvičový nebo kompozitní pancíř. Heterogenní struktura je v mnoha aplikacích složena z přední vrstvy, která je tvořena kalenou, vysokopevnostní ocelí, jejímž účelem je otupit hrot střely a klást co největší odpor proti jejímu proniknutí do dalších vrstev. Vrstvy prostředního pancíře mají za úkol omezit přenos vibrací, rázové vlny a deformace z přední vrstvy na zadní vrstvu pancíře. Dalším účelem této vrstvy je narušení rovnováhy napětí ve střele (zejména v případě použití šípové podkaliberní střely). Zejména změna pevnosti prostředí vede k roztržení střely na stěpiny. Pro vrstvy prostředního pancíře se často využívá kombinace měkkých materiálů na bázi plastů, pryskyřice, tvrzené gumy apod. s dalšími materiály jako např. keramikou, cermety, uhlíkovými vlákny, sytkými materiály, vzduchovými mezerami, lehkými kovy apod. Vrstva zadního pancíře je vyrobena z oceli, která je ovšem měkkší a houževnatější než vrstva přední. Účelem zadní vrstvy je zamezení vytržení části pancíře do vnitřního prostoru bojového vozidla. V současné době se používá širokého spektra heterogenních pancířů, které jsou vyvíjeny především k ochraně proti konkrétním typům zbraní [31].

Kovové vrstvené pancíře jsou složeny nejčastěji ze dvou nebo tří kovových vrstev, které jsou metalurgicky spojeny do jednoho celku. Tento typ pancířů je vyráběn litotvářecí a ROW (Roll Welding) technologií. Při výrobě třívrstevných pancířů se prostřední vrstva vyznačuje vysokou plasticitou. Podle způsobu tepelného zpracování lze kovové vrstvené pancíře dělit na [31]:

- **Kalené vzduchem** – vhodným materiálem jsou středně legované oceli s obsahem legujících prvků v rozmezí (8–10) %. Válcují se na požadovanou tloušťku plechu v rozmezí teplot (1220–950) °C (doválcovací teplota). Po operaci válcování dochází k zakalení plechu proudem vzduchu s následným popouštěním při teplotách (540–580) °C. Popouštění je provedeno vícekrát po sobě (vícenásobné popouštění). Výsledná tvrdost vnější vrstvy se pohybuje v rozmezí (660–690) HBW, vnitřní vrstva má tvrdost v rozmezí (600–620) HBW. Výsledná tvrdost je závislá na teplotě popouštění. Tyto pancíře jsou často označovány zkratkou VZKM (vzduchem kalitelné). Příklady chemického složení vrstev ocelí VZKM pancířů jsou uvedeny v Tab. 4-7.
- **Termomechanicky zpracované** – na bázi nízkolegovaných ocelí s obsahem legujících prvků v rozmezí (3–7) %. Konečné vlastnosti vrstveného pancíře se získávají termomechanickým válcováním (tzn. kombinovaným tepelným a mechanickým zpracováním pro získání synergických efektů, jako např. zvýšení pevnosti bez snížení houževnatosti). Tváření probíhá v rozmezí teplot (1220–850) °C, po rozválcování na požadovanou tloušťku plechu následuje bezprostřední ochlazení vodou v kalícím lisu a případně i vymrazení. Popouštění na požadovanou tvrdost následuje bezprostředně po kalení. Pro vnější čelní vrstvu se používá nástrojová ocel, pro podkladovou ocel nástrojová nebo pancéřová. Tvrdost vnější vrstvy se pohybuje v rozmezí (630–680) HBW, tvrdost podkladové vrstvy v rozmezí (500–580) HBW. Příklad chemické složení vrstev materiálů pancíře TMZ je uvedeno v Tab. 4-8 a Tab. 4-9.

Tab. 4-7 – Chemické složení vrstev materiálů pancíře VZKM [hm. %, max. koncentrace] [31]

Označení oceli	Vrstva	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
VZKM1	čelní	0,75	0,55	0,25	0,010	0,005	5,50	2,80	0,65
VZKM2	podkladová	0,55	0,85	0,75	0,010	0,005	5,30	2,40	0,55

Tab. 4-8 – Chemické složení vrstev materiálů pancíře TMZ pro čelní a podkladové vrstvy [hm. %, max. koncentrace] [31]

Označení oceli	Vrstva	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	W	Ni
MF1	čelní	0,69	0,40	0,50	0,012	0,012	1,20	-	0,30	2,40	-
MF2	čelní	0,55	0,80	1,00	0,020	0,005	1,50	0,50	-	B ~ 0,005	3,50
MF3	čelní	0,50	1,00	0,70	0,010	0,005	1,50	0,70	-	B ~ 0,005	3,50
MB1	podklad.	0,32	1,30	1,30	0,012	0,010	0,60	0,30	-	Ti ~ 0,020	1,30
MB2	podklad.	0,30	1,20	1,00	0,020	0,005	0,80	0,50	-	B ~ 0,004	0,60
MB3	podklad.	0,40	0,50	0,40	0,020	0,010	1,20	0,35	-	-	3,80

Tab. 4-9 – Chemické složení mezivrstvy TMZ [hm. %, max. koncentrace] [31]

Označení oceli	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Ti
MM – 1	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	19,00	12,00	0,60
MM – 2	1,40	13,00	1,00	0,100	0,040	-	-	-
MM – 3	1,30	13,00	0,90	0,025	0,007	-	-	-

- **Martenziticky vytvrditelné** – vhodným materiálem jsou vysokolegované oceli s obsahem legujících prvků (30–40) %, obvykle dvouvrstvé (bez mezivrstvy – duální). Tyto oceli jsou dodávány ve stavu po rozpouštěcím žíhání při teplotě (820–880) °C. Jsou dobře tvaritelné, svařitelné a mají dobrou houževnatost. Požadované tvrdosti (495–620) HBW se dosahuje vytvrzováním při teplotách (470–520) °C. Pro tyto oceli je typické označení MARAGING. Příklady chemického složení vrstev materiálů pancířů MARAGING jsou uvedeny v Tab. 4-10.
- **Zušlechťované** – na bázi nízkolegovaných ocelí s obsahem legujících prvků v rozmezí (4–8) %. Konečných vlastností dosahují kalením a popuštěním, popřípadě i bezprostředním následným vymražením. Tyto oceli jsou často označovány velkým písmenem Q. Příklady chemického složení vrstev materiálů pancířů typu Q jsou uvedeny v Tab. 4-11.

Tab. 4-10 – Chemické složení vrstev materiálů pancířů MARAGING [hm. %, max. koncentrace] [31]

Označení oceli	Vrstva	C	Mn	Si	P	S	Al	Ni	Co	Mo	Ti
MGF1	čelní	0,01	0,20	0,10	0,005	0,005	0,15	18,50	15,50	5,20	1,95
MGB1	podklad.	0,01	0,10	0,10	0,005	0,005	0,15	18,50	9,00	5,20	0,70
MGF2	čelní	0,02	0,30	0,10	0,010	0,005	0,15	18,50	9,50	5,20	0,70
MGB2	podklad.	0,02	0,20	0,10	0,010	0,005	0,15	18,50	8,50	5,20	0,60

Tab. 4-11 – chemické složení vrstev materiálů pancířů typu Q
[hm. %, max. koncentrace] [31]

Označení oceli	Vrstva	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	B
QF1	čelní	0,61	0,52	0,31	0,012	0,004	0,17	0,40	3,35	-
QF2	čelní	0,45	0,80	1,00	0,020	0,003	1,50	0,50	3,50	0,004
QF3	čelní	0,56	1,00	1,00	0,015	0,002	1,50	0,50	3,50	0,004
QFB3	čelní i zadní	0,40	1,50	0,80	0,025	0,010	1,50	0,50	1,50	0,005
QB1	podklad.	0,28	0,47	0,25	0,014	0,003	0,37	0,39	3,34	-
QB2	podklad.	0,30	1,20	1,00	0,020	0,003	0,80	0,50	0,60	0,004
QB3	podklad.	0,30	1,20	1,10	0,020	0,003	0,80	0,50	1,00	0,004
QM3	střední	0,32	1,00	0,40	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	-

V současné době se používají jak pancíře lité (v menší míře a zejména pro tanky), tak pancíře tvářené. Vzhledem k výhodám i nevýhodám obou technologií a přednostem i nedostatkům obou druhů pancířů, nelze jednoznačně doporučit, která technologie je vhodnější.

Litý pancíř, který se používá např. pro výrobu věží, čelních pancířů, příp. v minulosti celých koreb, představuje z hlediska slévárenské technologie těžký ocelový odlitek. Výroba tohoto odlitku je nákladná, vyžaduje mohutné slévárenské zařízení a mnoho zkušeností. Litý pancíř byl s úspěchem použit v mnoha osvědčených typech tanků a s jeho využití je typické zejména pro tanky sovětské výroby. Problémy výroby těžkých ocelových odlitků (odlitků o váze větší než 2000 kg) spočívají ve složitosti těchto odlitků a odlišnosti od běžné konvenční výroby, protože zde vystupují další parametry, které celkový proces výroby značně ovlivňují. Nejvýrazněji zde působí parametry rozměru, tloušťky a hmotnosti. Z těchto důvodů je nutné u těžkých ocelových odlitků posuzovat slévárenský výrobní postup mnohem komplexněji [31].

Lité pancíře mají podobné chemické složení jako pancíře tvářené (válcované), bývá u nich však upraven obsah Ni, aby bylo dosaženo vyšší tažnosti.

Tvářený ocelový pancíř je v současné době nejpoužívanějším polotovarem pro výrobu balistické ochrany bojových vozidel. Z výrobního hlediska se jedná o plech požadované tloušťky zhotovený válcováním ze speciální pancéřové oceli. Zejména v případě korby bojových vozidel je výhodnější použít svařovanou konstrukci z rovných válcovaných pancéřových desek. Právě korba vozidla je ze slévárenského hlediska velmi složitý odlitek s mnoha teplotními uzly, což přináší velké nebezpečí vzniku slévárenských vad. V konstrukci korby jsou rovněž využívány rovinné desky o různé tloušťce, pro jejichž výrobu je výhodná právě technologie válcování [31].

Je možné konstatovat, že při stejném sklonu pancíře a požadavku na stejný stupeň balistické odolnosti musí být tloušťka litého pancíře o 10 % větší než je možné dosáhnout u pancíře tvářeného. Nižší odolnost litého pancíře má původ hlavně v metalurgických pochodech, které probíhají při krystalizaci a tunutí tlustostěnného odlitku. V současné době je technologie odlévání využívána převážně v aplikacích, kde může poskytnout určité výhody ve srovnání s technologií tváření. Jedná se zejména o tvarově členité části pancéřové ochrany (jako jsou např. kryty, nebo i celky jako věž vozidla) [31].

4.2 Materiály balistických ochran na bázi lehkých kovů

K výrobě homogenních pancířů jsou kromě ocelí využívány také slitiny lehkých kovů, které jsou tvořeny Al, Mg, Si, Ti, Zn, Mn a jejich kombinacemi. Tyto slitiny jsou dobře obrobitelné, tvárné, slévateľné, svařitelné a mají dobré korozní vlastnosti. Jsou velmi rozšířeny v letecké technice, u lehkých bojových vozidel a námořních lodí. Ve srovnání s ocelovými pancíři se vyznačují zejména nižší hmotností. Jejich hodnoty pevnosti a tvrdosti však dosahují nižších hodnot. Pro balistickou ochranu vojenských vozidel jsou výhradně používány hliníkové slitiny řady 5xxx a 7xxx. Jejich pevnost R_m se pohybuje v rozmezí (310–450) MPa. Pancíře na bázi lehkých slitin jsou použity např. u 155 mm samohybné houfnice M109 Paladin (hliníková slitina 5083 s pevností 310 MPa) nebo u BVP M2 Bradley (hliníková slitina 7039 s pevností až 490 MPa) [9], [27], [32], [33].

Základním důvodem využívání materiálů na bázi lehkých kovů je snaha o snížení celkové hmotnosti vozidla, kterou volba pancéřování významně ovlivňuje. Současným trendem je pozornost zaměřena na využívání Al a Ti. Nejčastější aplikací je využití těchto slitin ve vrstvených a kompozitních pancířích. Dalším hojně využívaným materiálem jsou keramické hmoty, které jsou opět nejčastěji používány jako součást kompozitních materiálů ve spojení s matricí na bázi kovů (ocel, Al, Ti – označovány jako kovokeramické pancíře) nebo plastů, případně jako součást vrstveného pancíře.

Hliníkové pancíře se začaly uplatňovat u lehkých obrněných vozidel v 60. letech minulého století. I když tyto pancíře mají oproti ocelovým pancířům nižší tvrdost, je jejich výhodou lepší účinnost proti působení střepin [26]. Používané slitiny pro bojová vozidla je možné rozdělit na dvě základní skupiny Al-Zn a Al-Mg. V konstrukci balistické ochrany bojových vozidel jsou využívány zejména slitiny s vysokou pevností Al-Zn-Mg a Al-Zn-Si-Mg. Obsah Zn se pohybuje v rozmezí (3–8) %, obsah Mg je v rozmezí (1–3) %. Struktura těchto slitin je zjemňována přísadou Ti a Cr, případně Nb. Nejvyšší hodnoty pevnosti dosahují slitiny

lité do kokil, např. u slitiny typu Al-Zn-Mg byla po vystárnutí naměřena pevnost v tahu $R_m = 410 \text{ MPa}$ [34].

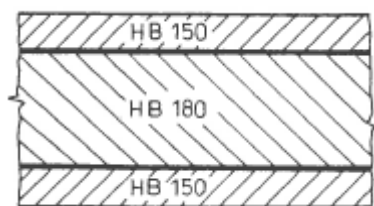
Jako základní slitina se při výrobě hliníkových pancířů používá slitina 5083 se 4,5 % Mg a 0,75 % Mn s pevností 350 MPa a tvrdostí 75 HB. Tato slitina má podstatně nižší odolnost proti průbojným střelám v porovnání s vysokopevnostními oceli při stejné plošné hmotnosti pancíře. Proti standardním střelám a střepinám je však její balistická odolnost porovnatelná s ocelovými pancíři [34]. Výhodou proti ocelovým pancířům je vysoká tuhost hliníkových konstrukcí umožňující u lehkých vozidel absenci konstrukčních výztuží, případně ráků. Významnou výhodou je rovněž i jejich snadnější obrobiteľnost ve srovnání s ocelovými pancíři.

Další generací Al slitin pro pancéřování jsou slitiny Al se Zn (5 %) a Mg (2,5 %), reprezentované např. vytvrditelnou slitinou 7039 s pevností až 500 MPa a tvrdostí 150 HB. Její odolnost proti průbojným střelám je vyšší než u slitiny 5083 a přibližuje se k vysokopevnostním ocelím (při srovnatelné plošné hmotnosti). Komplikací je však schopnost jejich svařování, které nese riziko vzniku koroze pod napětím v tepelně ovlivněné oblasti svaru. Z tohoto důvodu jsou na svařované konstrukce bojových vozidel (korba, věž) v převážné míře používány slitiny typu 5083 [34]. Chemické složení a mechanické vlastnosti vybraných slitin Al-Zn-Mg-Cu po stárnutí jsou uvedeny v Tab. 4-12.

Jeden z progresivních typů hliníkových pancířů byl vyvinut firmou ALUMINA. Tento pancíř je složen ze tří vrstev tepelně zpracované hliníkové slitiny spojené do jedné desky válcováním za tepla Obr. 4.6. Takto vyrobený pancíř vykazuje lepší balistickou ochranu než jakákoliv Al slitina vyrobená jako monolitní deska. Kombinace tvrdosti a houževnatosti umožňuje odolávat balistickému nárazu a také účinku delaminace (odlupování) na zadní straně pancíře Obr. 4.7. Střední vrstva je ze slitiny Al-Zn-Mg-Cu, přední a zadní vrstva pak ze slitiny Al-Zn-Mg. Mezi stykové plochy jsou vkládány tenké vrstvy Al o čistotě 99,5 %. Tím je dosaženo lepší adheze mezi deskami a zvyšuje se i balistická odolnost [35].

Tab. 4-12 – Chemické složení [hm. %] a mechanické vlastnosti vybraných Al slitin [34]

Slitina	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe	Si	R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A_{10} [%]	Tvrdost HB
Al-Zn6-Mg-Cu	5,0–7,0	1,8–2,8	1,4–2,0	0,2–0,6	0,1–0,25	0,5	0,5	540	410	5	130–150
Al-Zn-Mg-Cu	7,0–8,0	1,2–2,0	0,3–0,8	0,3–0,8	-	0,6	0,4	550	500	10	140
Al-Zn1-Mg4	4,4	1,3	0,09	0,4	0,1	0,22	0,08	385	340	13	-



Obr. 4.8 – Řez hliníkovým pancířem udávající tvrdost pro každou vrstvu [35]



Obr. 4.9 – Poškození vrstveného hliníkového pancíře [35]

Titanové pancíře se jeví jako perspektivní z hlediska požadované balistické odolnosti. Nejedná se čistý titan, ale o jeho slitiny s heterogenní strukturou, např. Ti-6Al-4V, s hustotou $4360 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a pevností 950 MPa [36], [37]. K heterogenním slitinám dále patří Ti3Al-2,5V, Ti-7Al-4Mo, Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-6Mo-4Zr-2Sn, Ti-8Mn, Ti-10V-3Fe-3Al. Tyto slitiny je možné tepelně zpracovat na zvýšení pevnosti, a to rozpouštěcím žiháním se stárnutím, čímž se dosáhne precipitačního zpevnění [34]. Základní parametry tepelného zpracování Ti slitin, spolu s jejich dosaženými mechanickými vlastnostmi jsou uvedeny v Tab. 4-13.

Titan a jeho slitiny se vyznačují poměrně vysokou pevností, která dosahuje až 970 MPa a vynikajícími korozními vlastnostmi. Jeho nevýhodou je však vyšší cena. K další nevýhodě patří vysoká reaktivita se vzduchem projevující se při teplotě vyšší než 400°C . Svařování titanu a jeho slitin probíhá nejčastěji v ochranné atmosféře argonu. Mezi nejrozšířenější slitinu titanu patří slitina Ti-6Al-4V a její modifikace. Tato slitina byla původně vyvinuta především pro letecké a kosmické aplikace z důvodu její nízké hmotnosti a vysoké pevnosti. Na základě těchto předností je využívána také pro vojenské účely, ale také v medicíně (jako implantátů) [9], [27], [32].

Tab. 4-13 – Režimy tepelného zpracování pro vybrané Ti slitiny a jejich mechanické vlastnosti [34]

Slitina	Žihací teplota $[\text{C}^\circ]$	Čas [h]	Teplota relax. žihání $[\text{C}^\circ]$	Teplota rozp. žihání $[\text{C}^\circ]$	Čas [h]	Teplota stárnutí $[\text{C}^\circ]$	Čas [h]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	KV [J]
Ti3Al2,5V	650–760	do 2	540–600	880–940	0,3	490–520	2–8	590	720	22	14–28
Ti6Al4Mo	710–800	1–4	540–600	910–1000	do 1	490–520	2–12	890	930	15	-
Ti6Al6V2Sn	710–800	1–8	490–710	920–1000	do 2	510–650	4–24	950	1020	10	-
Ti6Al6Mo4Zr2Sn	710–740	2	600–710	850–940	do 1	570–630	2–8	1030	1140	14	-
Ti8Mn	650–670	do 1	490–600	-	-	-	-	860	970	15	-

Slitina	Žíhací teplota [°C]	Čas [h]	Teplota relax. žíhání [°C]	Teplota rozp. žíhání [°C]	Čas [h]	Teplota stárnutí [°C]	Čas [h]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	KV [J]
Ti10V2Fe3Al	800–820	0,5	680–710	790–820	do 1	500–530	8	1190	1280	8	30

Za účelem zvyšování balistické ochrany a snižování její hmotnosti se současný vývoj zaměřuje na vhodné materiálové kombinace s cílem vytvořit nové kompozitní balistické ochrany. Tato kompozitní ochrana je tvořena nejméně dvěma druhy materiálu s rozdílným chemickým složením, které jsou mezi sebou vzájemně strukturálně promíseny. Výsledkem je vytvoření nového unikátního výrobku, který se vyznačuje lepšími vlastnostmi než původní materiál. Jsou navrženy k ochraně proti širokému spektru balistických hrozeb od střel z ručních zbraní až po dělostřeleckou munici [9], [27], [39]. Odolnost titanových pancířů při srovnatelné plošné hmotnosti dosahuje vyšších hodnot než u ocelových pancířů (dosahují hodnot tvrdosti 40 HRC), avšak z důvodu vysoké ceny a komplikovanějšímu zpracování jsou u bojových vozidel velmi málo využívány. Tyto pancíře našly využití převážně v letecké technice [38].

4.3 Vybrané materiály balistických ochrany na bázi kompozitů

Využití kompozitů pro balistické účely má dlouhou tradici sahající až do existence starověkého Říma [27]. Od té doby prošly tyto materiály, jak z pohledu samotného materiálu, tak z pohledu konstrukce. V současnosti jsou balistické kompozity zaměřeny na dvě hlavní oblasti:

- ochrana osob, což zahrnuje vložky do balistických vest a helmy. Jedná se zejména o tvrdé panely. Rovněž se v „měkké“ balistice využívají vlákna a tkaniny [9], [39], [40],
- ochrana techniky, což zahrnuje tvorbu odolných panelů a dalších struktur pro vojenská vozidla [41].

Dalším kritériem pro dělení kompozitních materiálů je rychlost dopadu střely a velikost její energie [50]. Nízko rychlostní dopad s rychlostí $(1\text{--}10) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je obvykle spojen se střelou o větší hmotnosti nebo jejich náhodnou geometrií, jako jsou střepiny. Charakter tohoto dopadu nemusí způsobit proražení materiálu, ale může poškodit jednotlivé konstrukční prvky, což výrazně snižuje tuhost a pevnost materiálu jako celku [51].

U vysokorychlostních a vysokoenergetických střel je doba interakce mezi střelou a materiálem mnohem kratší (50–200) μs . V důsledku průniku střely a následné perforace

střepin střely s vysokou kinetickou energií může balistický náraz způsobit fatální poškození chráněného prvku [52].

V následujících podkapitolách jsou popsány specifika a popis materiálů na bázi keramiky a materiálů na bázi kompozitů s textílií.

4.3.1 Materiály na bázi keramiky

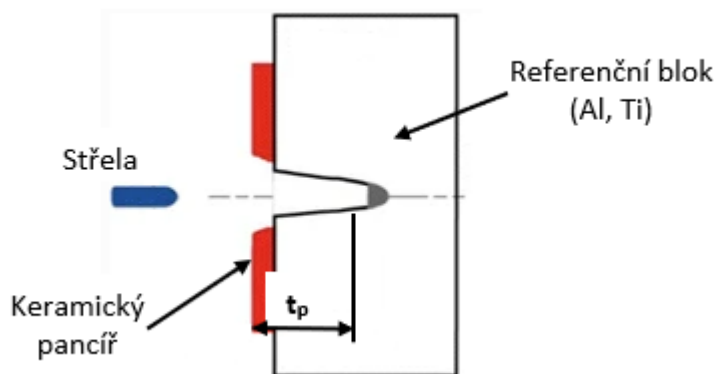
Keramické materiály lze vyrábět mnoha technologiemi. Pro aplikace v balistických ochránách jsou vyráběny tlakovými procesy jako je lisování za tepla nebo izostatické lisování za tepla. Pro dosažení požadované soudržnosti a maximální hustoty se před spékáním keramický prášek a pojivo lisuje pod vysokým tlakem. Před vypalováním se provádí reakční spojování v rámci kterého se aplikuje přísada s vysokou afinitou reagující se spékáním materiálem a vytváří požadovanou soudržnost. Následuje vypalování, které probíhá při vysoké teplotě (1200–1600) °C nebo lisování za tepla, kde spékání a vypalování probíhá současně ve speciálních lisech [40], [42].

V současné době se využívají vrstvené balistické ochrany, které jsou tvořeny keramickými a kompozitními materiály. K nejvhodnějším keramickým materiálům pro balistickou ochranu se řadí oxid hliníku Al_2O_3 , karbid křemíku SiC a karbid boru B_4C , popř. diborid titanu TiB_2 . V Tab. 4-14 jsou uvedeny materiály, které se používají výhradně pro výrobu keramické balistické ochrany.

Tab. 4-14 – Vlastnosti keramických materiálů pro balistickou ochranu [40]

Balistické keramiky	Obchodní označení	ρ [g/cm ³]	Tvrdost	E [GPa]	R_m [MPa]
Oxid hlinitý (Al_2O_3)	Coorstek CAP-3	3,9	1450 (Vickers)	370	379
Karbid křemíku (SiC)	Hexoloy	3,13	2800 (Knoop)	410	380
Karbid boru (B_4C)	RBBC-751	2,56	1550 (Knoop)	450	280
Diborid titanu (TiB_2)	Ceralloy 225	4,50	2100 (Vickers)	540	265

K hodnocení balistické odolnosti keramických balistických ochrany pro konkrétní typ střely se využívá měření hloubky penetrace DOP, jak je znázorněno na Obr. 4.10 [43], [44]. U této metody je keramická deska umístěna na referenční hliníkový nebo titanový blok. Střela při dopadu penetruje danou balistickou ochranu a zastaví se v referenčním bloku. Měření hloubky penetrace DOP je založeno na porovnání hloubky penetrace referenčního bloku a hloubky penetrace s testovanou ochranou. Tato odolnost je závislá na typu a tloušťce testované balistické ochrany a dopadové rychlosti střely [43], [44].



Obr. 4.10 – Měření hloubky penetrace DOP [44]

K zajištění ochrany dle standardu NATO STANAG 4569, AEP-55 je nutno, aby keramická balistická ochrana splňovala i balistickou odolnost proti vícenásobnému zásahu. Této odolnosti lze dosáhnout tak, že keramická vrstva nebude monolitem, ale bude složena z jednotlivých segmentů do mozaiky. Na trhu jsou dostupné segmenty různých tvarů: čtvercové, obdélníkové či šestiúhelníkové [45], [46]. Na Obr. 4.11a Obr. 4.12 je znázorněno šíření trhlin monolitické a vrstvené balistické ochrany.

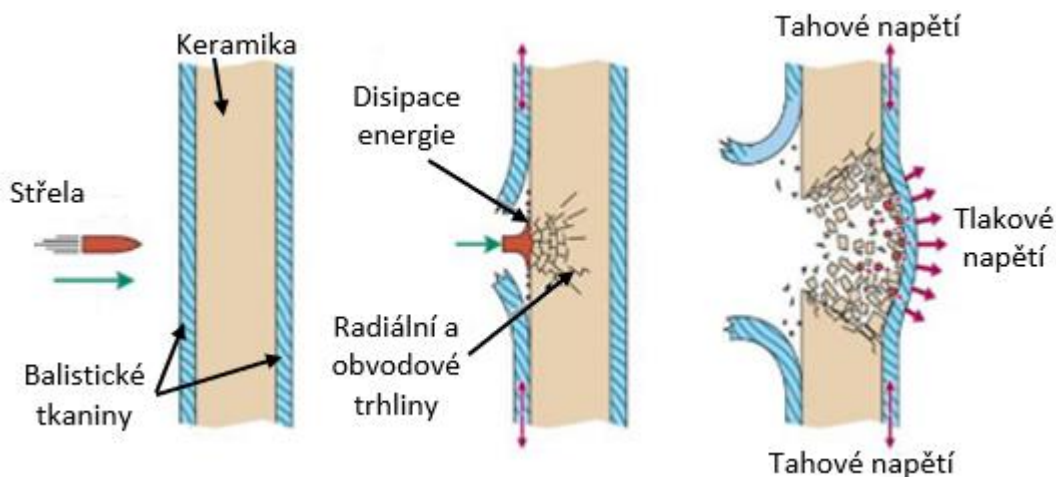


Obr. 4.11 – Šíření trhlin - monolitická keramická deska Al_2O_3 s aramidovou podkladovou vrstvou [46]



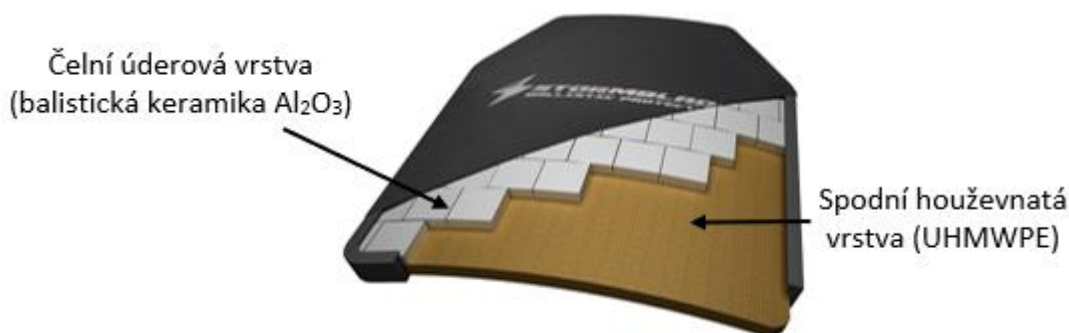
Obr. 4.12 – Šíření trhlin - segmentovaná keramická deska se skelnou kompozitní vrstvou [47]

S vysokou tvrdostí keramických materiálů se pojí vysoká křehkost, nízká houževnatost, malá pevnost v tahu, obtížná obrobiteľnosť a náchylnost na vnitřní defekty. Při dopadu střely na čelní keramickou vrstvu dochází k iniciaci a šíření trhlin. Pro řešení této skutečnosti je keramika nanášena na tvárnou desku, která představuje druhou nejdůležitější součást vrstvené balistické ochrany. Tato deska je vyrobena z balisticky odolných polymerních vláken, vyznačuje se vysokou houževnatostí a je určena k absorpci zbytkové kinetické energie fragmentů střely nebo roztržité čelní úderové vrstvy [40], [48]. Dopad střely na vrstvenou keramickou balistickou ochranu je zobrazen na Obr. 4.13.



Obr. 4.13 – Dopad střely na vrstvenou keramickou balistickou ochranu [44]

Pro podkladovou vrstvu se z hlediska materiálového řešení používají kompozitní materiály. Jsou tvořeny aramidovými (Kevlar®, Twaron®), polyethylenovými (UHMWPE), skleněnými (E-glass, S-glass) a uhlíkovými vlákny (CFRP) nebo jejich kombinacemi [40], [48]. Uspořádání keramicko-kompozitního panelu STORMBLADE LEVEL IV je znázorněno na Obr. 4.14.



Obr. 4.14 – Keramicko-kompozitní panel STORMBLADE LEVEL IV [49]

4.3.2 Materiály na bázi kompozitu s textílií

Z materiálového hlediska jsou v současnosti nejvíce využívanými vlákny pro balistické účely Aramidová (obchodní název Kevlar, Twaron) a UHMWPE vlákna (obchodní název Dyneema). Tyto materiály mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti celého kompozitu, a to zejména pokud jde o jejich pevnost, chemickou odolnost, teplotní stabilitu a hlavně rázovou odolnost. Oba tyto druhy vláken nacházejí uplatnění jak v tvrdých panelech, tak v „měkké“ balistice. Níže je uveden popis jejich hlavních vlastností. Kromě těchto dvou materiálů jsou také využívána skelná, uhlíková, keramická, vysokomodulární polypropylenová vlákna a přírodní vlákna [53], [54].

V oblasti „měkké“ balistické ochrany se rovněž objevují tzv. hybridní systémy, které kombinují nejlepší vlastnosti z různých materiálů. U těchto hybridních systémů je klíčovým

faktorem správné uspořádání vrstev a jejich využití k zachycení střely nebo střepin a k omezení trauma efektu pro uživatele ochrany [55], [56], [57].

Jedním z nejvýznamnějších kritérií, pro která jsou balistické kompozity s textílií vyhledávány, je hmotnost celého systému. V tomto ohledu mohou tyto balistické ochrany nabízet významnou výhodu, neboť jejich hmotnost může být až násobně nižší než u ocelového pancéřování.

Aramidová vlákna, známá také jako Aromatické polyamidy (APA), patří do skupiny polymerních vláken. Nejznámějším zástupcem aramidových vláken je Kevlar, který byl patentován společností DuPont v roce 1965. Kevlar (poly-para-fenylentereftalamid) je dražší než skleněná vlákna, ale má několik hlavních výhod:

- nízkou hustotu,
- vysokou odolnost proti abrazi,
- schopnost plasticky se deformovat při působení síly kolmo na osu vlákna,
- v rámci polymerů má vysokou odolnost vůči teplotě měknutí a ohni (odolává teplotám až 520 °C).

Tyto vlastnosti činí aramidová vlákna ideálním materiálem pro různé aplikace, včetně balistické ochrany a výroby ochranných oděvů. Výrobní proces aramidových vláken probíhá následovně: PPTA (poly-parafenyleneentereftalamid) je rozpuštěna v kyselině sírové. Při průtoku roztoku kapilárou dochází k paralelnímu uspořádání tyčinkových makromolekul ve směru osy vlákna. Roztok je následně vytlačován do ledové vodní tříště, kde je vyplavena kyselina sírová. Poté následuje dloužení vlákna za tepla, což přispívá ke zvýšení jeho pevnosti a tuhosti [54], [58]. Jednou z nevýhod aramidových vláken a tkanin je jejich poměrně rychlá degradace a zhoršení mechanických vlastností ve vlhkém prostředí, zejména při absorpci vlhkosti [59].

Levnější, méně tuhá a méně pevná vlákna, získaná jako poly-meta-fenylizofalamid (meta-aramid), jsou obchodně označována jako Nomex (DuPont). Tyto vlákna bývají využívána jako ochranná vrstva, nebo se využívají pro výrobu voštin [58]. Kromě Kevlaru a Nomexu existují také další obdobné produkty a značky para-aramidových vláken, jako je Twaron a Technora. Základní vlastnosti aramidových vláken jsou uvedeny v Tab. 4-15.

Tab. 4-15 – Vlastnosti různých typů aramidových vláken [60]

	Pevnost v tahu [MPa]	Modul E [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g·cm ⁻³]
Kevlar 29	2920	71	4,0	1,44

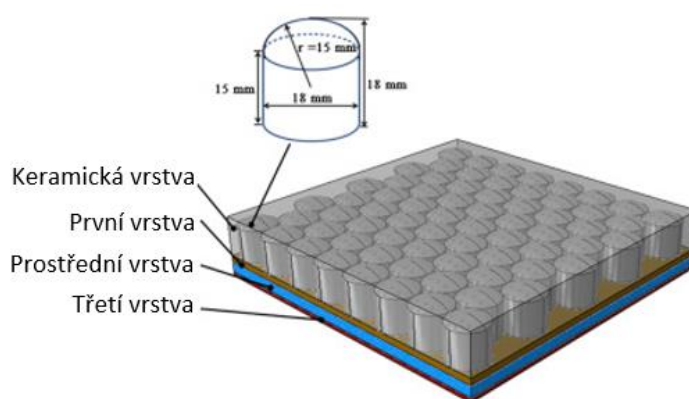
	Pevnost v tahu [MPa]	Modul E [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g·cm ⁻³]
Kevlar 49	3000	112	2,5	1,44
Kevlar 149	3450	170	-	1,47
Twaron 900	2800	65	4,3	1,44
Twaron 930	3000	125	2	1,45
Nomex	700	17,3	22,6	1,40
PA66	900	5	13,5	1,14

Ultravysokomolekulární vlákna (UHMWPE) vyrobená z polyethylenu s velmi dlouhými molekulami pomocí zvláknování gelu vykazují unikátní vlastnosti. Ohebné makromolekuly lineárního polyethylenu mají kovalentní vazby mezi uhlíky uloženy v rovině. Pro dosažení vysoké pevnosti i tuhosti vlákna je nutné rozpustit UHMWPE v některé příbuzné látce, jako je parafinový olej, dekalín nebo zahřátý parafinový vosk. Vzniká porézní vlákno, které se dále za tepla prodlužuje. Vlákno se dodává pouze ve formě multifilamentu (nejsou známy monofilamenty ani stříž z Dyneemy) v jemnostech cca (5,5–264) tex ve svazcích s (20–750) kapilárami a s jemností 2,2 dtex (rozměry průřezu kolísají mezi 9 a 30 μm) [61].

Kromě malé hustoty ($\rho = 970 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, PE plave na vodě) je velkou výhodou UHMWPE též velká korozní odolnost. Nepolárnost polymeru a čistě uhlovodíkový skelet makromolekuly zaručují při normální teplotě odolnost vůči většině chemikálií, s výjimkou silně oxidačně působících roztoků (např. koncentrované kyseliny dusičné a hydroxidu sodného), které vlákno slabě narušují. Na rozdíl od aramidů UHMWPE vlákno nepřijímá vlhkost a je více odolné proti světelnému UV záření. Houževnatost a odolnost UHMWPE proti otěru je podobná jako u aramidových vláken [58].

Hlavní nevýhodou UHMWPE vláken je jejich malá tepelná odolnost. Teplota tání krystalů PE se orientací makromolekul příliš nezvýší (je okolo 135 °C). Chemická netečnost vláken zvyšuje nároky na jejich povrchovou úpravu pro zajištění dobré soudržnosti s polymerními matricemi. Bez povrchové úpravy je smyková pevnost rozhraní vlákna a např. epoxidové matrice na minimální úrovni (cca 0,8 MPa). Zatímco aramidová vlákna je možno také leptat, u PE je perspektivní pouze úprava vysokofrekvenčním plazmatem s použitím argonu a přidáváním nízkomolekulárních sloučenin (např. allylaminy) [58], [60].

UHMWPE se využívá v proti-prořezových oděvech, vysoce únosných lanech a chirurgických nitích. Využití UHMWPE vláken v balistických aplikacích přináší výrazné výhody. Balistické ochrany mají lepší zastavující účinek než balistické ochrany z Kevlaru, při stejném zastavujícím účinku mohou být tenčí a mohou dosahovat nižších měrných hmotností. Znázornění panelu UHMWPE je uvedeno na Obr. 4.15.



Obr. 4.15 – Panel UHMWPE [62]

Skelná vlákna patří mezi jedny z nejstarších materiálů používaných v kompozitech. Jejich největší výhodou je relativně nízká cena v porovnání s ostatními materiály. Skelná vlákna se dělí na dva hlavní typy: S-glass a E-glass. S-Glass má vyšší pevnost, zatímco E-glass se vyznačuje lepší chemickou odolností a menší elektrickou vodivostí. V balistických aplikacích se využívají pouze vlákna S-Glass kvůli jejich vyšší pevnosti, tepelné odolnosti, průtažnosti a stále dobré chemické odolnosti, což vede k dobré absorpci energie nárazu. Jejich hlavní nevýhodou je relativně nízký Youngův modul, nízká únavová odolnost a vyšší hustota oproti jiným vláknům [40], [63].

Uhlíková vlákna vynikají zejména vysokou pevností a nízkou hmotností, což je činí nejběžnějším materiálem pro strukturální aplikace. Kromě vysoké pevnosti mají také vynikající tuhost, teplotní a chemickou odolnost, a patří mezi materiály s jednou z nejlepších teplotních stabilit mezi kompozity. Pro balistickou ochranu však nejsou vhodná, zejména kvůli své velké křehkosti při nízkých dopadových rychlostech. Prakticky jsou využívána pouze ve formě hybridních struktur pro části, které vyžadují balistickou ochranu a pevnost [38], [42].

V literatuře se můžeme setkat také s **přírodními vlákny**, které mají ligno-celulózový základ. Poměr ligninu a celulózy se mění v závislosti na typu rostliny, což ovlivňuje vlastnosti různých druhů vláken. Vlastnosti jsou také ovlivněny růstem rostlin, což vede ke zvýšenému rozptylu mechanických a dalších vlastností u těchto materiálů (až (10–15) % nominálních hodnot). To znamená vyšší nároky na přípravu dílů z těchto materiálů. Výhodou je, že tato vlákna mají obnovitelný charakter růstu, jsou biologicky rozložitelná, mají nízkou hmotnost, jsou cenově dostupné, jelikož jsou zpravidla získávána jako druhotná surovina při zemědělské výrobě. Nejčastěji se můžeme setkat s lněnými, jutovými, sisalovými, kenafovými a bambusovými vlákny [64], [65].

Vliv matrice na balistické kompozity je nižší než u samotných vláken, která svou pevností zajišťují hlavní zastavující účinek. Hlavní rolí matrice je přenášet zatížení mezi jednotlivými vlákny a také chránit kompozit před vnějšími vlivy, jako je vlhkost a UV záření [66]. V oblasti strukturálních aplikací má pryskyřice větší význam, a proto se zde používá nižší množství pryskyřice, obvykle až 5 % objemu [67]. Lze se setkat i se speciálními pryskyřicemi, jako jsou polyuretany, nebo s termoplastickými matricemi, které přispívají k vyšší odolnosti celého systému ochrany, než je tomu u běžné pryskyřice (polyesterové a epoxidové) [68].

4.4 Možnosti zvýšení balistické odolnosti kompozitních pancířů

Pro dosažení požadovaného stupně ochrany lze efektivně kombinovat vlastnosti různorodých materiálů (ocel, lehké kovy, kompozitní materiály, polymery). Konstrukce takové balistické ochrany je následně tvořena tvrdou čelní dopadovou částí a houževnatou podkladovou vrstvou. Pro dosažení snížení přenosu energie do chráněného objektu jsou také v balistických ochranách využívány také materiály na bázi kompenzátorů energie.

Mezi vrstvené balistické ochrany můžeme také zařadit i duální pancíře. Tyto pancíře se skládají z čelní dopadové vrstvy o vyšší tvrdosti a spodní houževnatější vrstvy. Tyto dvě vrstvy jsou následně metalurgicky spojeny [9], [39].

Pro čelní dopadovou vrstvu se používají vysokopevnostní oceli (Armox®, Hardox®, DFNDR Armor® či MARS®) a balistické keramiky (Al_2O_3 , SiC, B_4C , popř. jejich kombinace). Tato vrstva musí být dostatečně tvrdá, aby zajistila nejen zpomalení a destabilizaci střely, ale také narušení či fragmentaci její struktury [32], [39].

Za účelem snižování hmotnosti vstupují do popředí keramické materiály. Hlavními přednostmi keramických materiálů jsou jejich vysoká tvrdost, pevnost v tlaku a nízká měrná hmotnost. K dalším přednostem patří odolnost proti žáru, otěru, chemicky agresivním látkám a nízká elektrická vodivost. Pro dosažení požadovaných vlastností musí být dosaženo nízké pórovitosti [42].

Kromě uvedených přístupů je další možností využití povrchových technologií, které mohou efektivně zlepšit mechanické a s tím spojené balistické vlastnosti zejména kovových materiálů. Další technologií je využití kompozitních materiálů, které mohou dosahovat významně lepších užitných vlastností, než je tomu v případě pancířů homogenních. Jako perspektivní se jeví použití kompozitních materiálů s textilií. Možnosti využití této technologie jsou popsány v následujících podkapitolách.

4.4.1 Možné způsoby výroby kompozitních materiálů s textílií

Nejčastěji využívanou technologií pro výrobu těchto pancířů je technologie **VARTM** (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) - lisování ve vyhřívaných formách a zpracování **prepregů** (předimpregnovaná/předsycená tkanina nebo rohož) v autoklávu. Využité metody se liší použitými vstupními materiály, požadovaným procesním tlakem a teplotou a zejména možnostmi zavedení sériové výroby (ekonomičnost výroby daného balistického prvku) [40]. U této technologie se, stejně jako při kladení, používá suchá tkanina. Pryskyřice je v tekutém stavu, díky rozdílu tlaků, nasávána do dvoudílné nebo jednodílné formy překryté vakuovací fólií. Proces nasávání pryskyřice závisí na řadě faktorů, mezi které patří rozdíl tlaků před tekutinou a v tekutině, prostupnost tkaniny a viskozita pryskyřice.

Pozornost je nutné věnovat na mikroskopické i makroskopické úrovni. Na mikroskopické úrovni je zkoumáno smáčení jednotlivých vláken a působení tekutiny v oblasti mikrokapilár. Na makroskopické úrovni je hodnocen proces proudění matrice v konkrétním dílu s komplexní geometrií, přičemž se vychází z níže uvedených modelů.

Pro obecné stanovení objemového průtoku můžeme, na makro úrovni, využít Darcyho zákona. Ačkoli byl tento zákon původně stanoven pro proudění kapalin v sytkém podloží v geologii, je možné jej úspěšně aplikovat i v kontextu tkanin a kompozitů [40], [70].

$$\frac{Q}{A} = \frac{K}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (4-2)$$

kde: Q – objemový průtok,
 K – permeabilita výztuže,
 η – viskozita matrice,
 Δp – tlakový gradient,
 A – plocha průřezu,
 L – délka dráhy.

Ve vzorci figuruje konstanta K , kterou je nutné stanovit experimentálně pro danou tkaninu a pryskyřici. Tato konstanta je závislá nejen na geometrii tkaniny, ale i na vlastnostech dané pryskyřice, jako je smáčení a změna viskozity závislá na teplotě a tlaku. Proces lze také matematicky modelovat ve specializovaných softwarech jako je PAM-RTM (Esi Group), Autodesk Moldflow, MyRTM a mnoho dalších. Příklad materiálu připraveného k vakuové infuzi VARTM je uveden na Obr. 4.16.



Obr. 4.16 – Materiál připravený k vakuové infuzi (VARTM), ve spolupráci s VUT v Brně

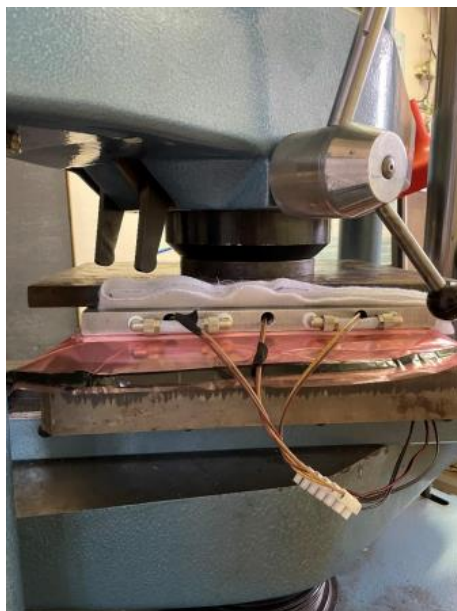
Další část kapitoly je zaměřena na výrobu a ověření prepregů v rámci experimentů ve spolupráci s FSI VUT v Brně.

1. Kladení prepregů - nejčastěji jsou využívány prepregy s termosetickou pryskyřicí (Epoxid, fenol, Cyanoester) nebo termoplastickou matricí. Při výrobě prepregu je tkanina strojově prosycena, avšak vytvrzovací reakce je zastavena změnou teplot, pryskyřice se nachází v B-Stage stavu. Nejčastější forma využití prepregů je v autoklávu. V autoklávu dochází k vytvrzení prepregu při dané teplotě a tlaku. Typické teploty se pohybují od 60 °C u systémů určených pro výrobu forem, přes 120 °C u standardních průmyslových prepregů až ke 180 °C pro letecké a vysokoteplotní aplikace. Lze se však setkat i s vyššími teplotami vytvrzování. Tlak při lisování se pohybuje od 1 do 8 Bar. Doba vytvrzení se je dána samotným typem prepregu. Standardní hodnota se pohybuje v rozmezí (1–2) h při dané teplotě. Omezením autoklávu jsou rychlosti náběhu na teplotu a také proces chlazení, které celý proces prodlužují [71].

2. Lisování prepregů - jedna z nejběžnějších metod výroby prepregů termoplastických kompozitů s dlouhými vlákny. Tato technologie je využitelná i pro speciální termosetové prepregy, které se rychle vytvrzují při vyšších teplotách. Termoplastické prepregy jsou strojně vytvářeny tak, že se roztavený materiál ve formě granulí aplikuje na výztuž. Díky horkým válcům a podávacím zařízením dochází k prosycení materiálu pod tlakem. Tímto způsobem je materiál nasycen správným množstvím matrice a je připraven pro další použití. Tato metoda má výhodu téměř neomezené skladovatelnosti materiálu a částečné odolnosti proti vlhkosti. Alternativním postupem je lisování materiálu ve formě fólie na výztuž. Samotný proces lisování

vyžaduje kvalitní strojní vybavení a určitou míru automatizace pro efektivní výrobu [72], [73], [40]. Experimentální lisování mezi horkými deskami je uvedené na Obr. 4.17.

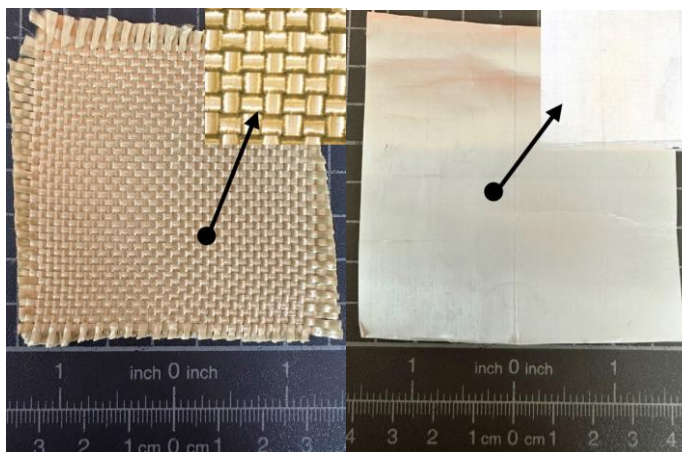
Ověření a výroba základních vzorků pomocí základních metod bylo provedeno v rámci spolupráce s FSI VUT v Brně, kdy byly využity tři základní technologie VARTM, lisování a autokláv. Materiály a technologie jsou uvedeny v Tab. 4-1. Aramidový materiál byl zvolen Twaron CT 747 o gramáži 410 g/m², modul pevnosti v tahu 115 GPa, plátňová vazba určená pro balistickou ochranu. Materiál byl použit ve stavu suchém nebo impregnovaném, jak termoplastickou matricí TP, tak termosetovou TS. UHMWPE materiál byl použit Endumax Shield XF23 firmy Teijin o gramáži 146 g·m⁻², modul pevnosti v tahu 170 GPa, biaxiální složení vrstev 0,90°. Uvedený materiál se již dodává jako prepreg výrobcem bez specifikace pojiva - jedná se o termoplastický základ ve formě skládaného filmu o tloušťce (50–60) µm. Tkaniny jsou uvedeny na Obr. 4.18.



Obr. 4.17 – Lisování ve vyhřívaných formách lis ZD40 VUT v Brně

Tab. 4-16 – Materiály a technologie vzorků při výrobě základních vzorků

Technologie	Vlákna	Výztuž	Počet vrstev
Lisování	Aramid Tw747	TP – polyolefin TH 110	10–30
Lisování	UHMWPE	Endumax XF23	30–120
Autokláv	Aramid Tw747	Prepreg/ER68	10–30
VARTM	Aramid Tw747	TS - LG 700	10–60



Obr. 4.18 – Aramidová tkanina Twaron 747, UHMPWE materiál Endumax XF23

Velikost vyrobených vzorků byla (300x300) mm, finální tvar vzorku byl vyřezán vodním paprskem, který je pro tyto tkaniny vhodný z důvodu pevnosti jednotlivých vláken [74]. Vzorek Twaronu 747 po řezání vodním paprskem je uveden na Obr. 4.19. Všechny vzorky byly vyrobeny s balancovanou symetrickou skladbou lišící se pouze počtem vrstev, vzorky pro mechanické zkoušky se skladbou $[90/\pm 45/0]$.



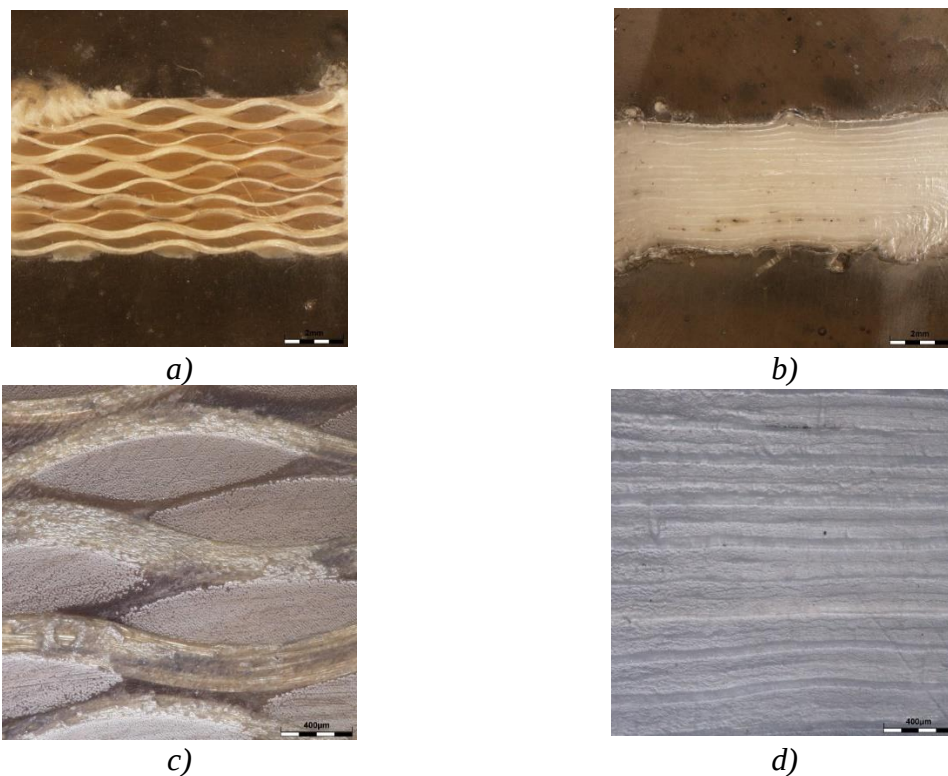
Obr. 4.19 – Vzorek Twaronu 747 po řezání vodním paprskem

3. Mikrostruktura a mechanické vlastnosti balistických kompozitů - pro vyhodnocení struktury, pórovitosti a rozložení vláken je možné využít řadu testů. Metody nedestruktivního testování (NDT) jsou založeny na mnoha fyzikálních principech od optického pozorování, ultrazvuku, termografické a radiografické zkoušky a mnoho dalších. Jejich účelem je posouzení vad, podle zavedených norem pro zkoušení a norem pro materiály (ASTM E2533, 2017), aniž by došlo ke změně základních vlastností materiálu nebo k poškození zkoušeného materiálu. Při výběru NDT metody je třeba se řídit i ekonomickými nároky jednotlivých metod [75].

K nejpoužívanějším destruktivním metodám patří sledování mikrostruktury pomocí světelní nebo SEM mikroskopie. Vzorek kompozitu je zalit do kontrastní pryskyřice a je proveden výbrus. U kompozitů, které jsou hydrofobické, je třeba věnovat pozornost broušení za mokra [76].

Vzorky materiálů připravených pro testování na Katedře bojových a speciálních vozidel a Katedře strojírenství jsou uvedené na Obr. 4.20. Jedná se o dva materiály Twaron TW747 a UHMWPE film spektra Shield XF23. Ze snímků je dobře patrná rozdílná struktura, kdy u tkaniny Twaronu je viditelná plátňová vazba a při větším přiblížení (139x) i jednotlivá vlákna, kompozit je homogenní bez větší pórovitosti. Na rozhraní jednotlivých přízí je vyplnění prostoru pryskyřicí. Oproti tomu u materiálů typu Endumax jsou patrné pouze vrstvy a rozhraní mezi jednotlivými vrstvami. Tento materiál je produkován za vyšších tlaků, takže dochází k lepší konsolidaci.

V případě pozorování vzorků s využitím skenovací elektronové mikroskopie (scanned electron microscopy - SEM), lze pozorovat jednotlivé kontrasty mezi vlákny, kdy měkká pryskyřice je na vzorku výrazněji vybroušena. U většiny kompozitních vzorků (včetně uhlíkových) je nutné pokovení z důvodu vodivosti materiálů a detekce odražených elektronů.

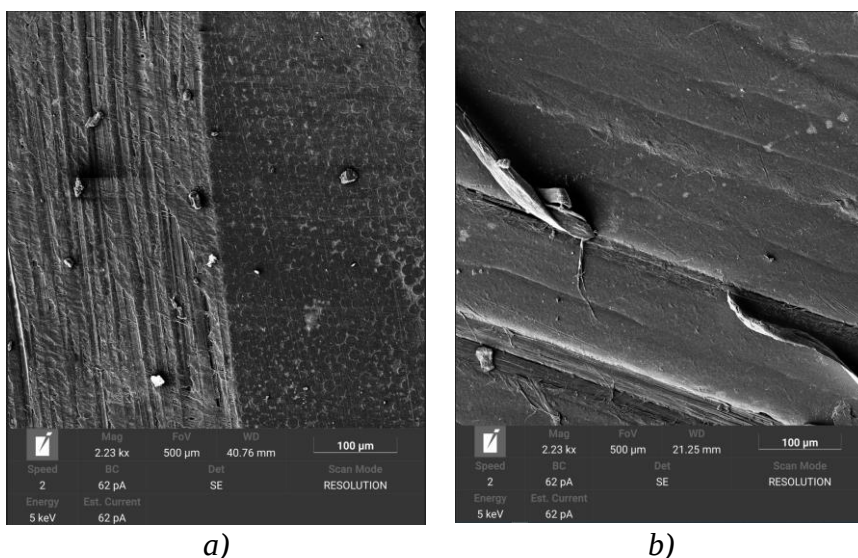


Obr. 4.20 – Mikrostruktura kompozitu

a) VARTM Twaron + LG700, zvětšeno 24x; b) UHMWPE lisováno, zvětšeno 24x;
c) VARTM Twaron + LG700, zvětšeno 139x; d) UHMWPE lisováno, zvětšeno 139x

Na Obr. 4.21 je zobrazen vzorek Twaron Tw 747 a Endumax materiálu. Při stejném zvětšení je patrná struktura filmu u materiálu Endumax avšak nelze pozorovat jednotlivá vlákna tak jako u Twaronu Tw 747.

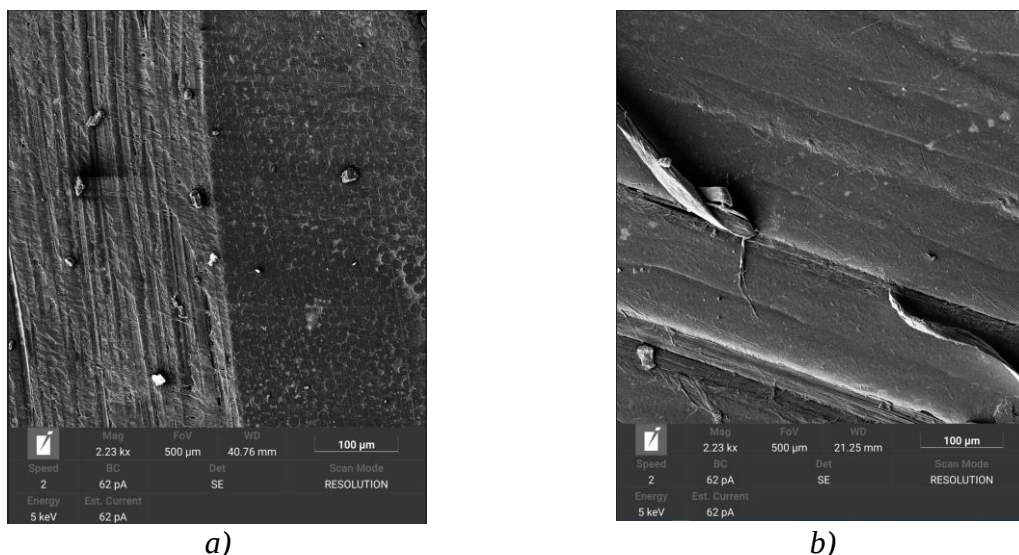
Pro hodnocení mechanických vlastností lze zvolit celou paletu testovacích metod, které nejčastěji řeší normy ISO EN, nebo ASTM. Normy uvádějí případ umístění kompozitu zejména pro oblasti dopravy, letectví a obecného testování. Pro každou oblast můžeme nalézt jiný soubor testů a požadovaných vlastností na kompozity. Testy obsažené v jednotlivých normách jsou podobné a zohledňují pouze specifika dané oblasti (mnohdy jsou shodné). V odborné literatuře se lze setkat jak s testy ISO EN, tak s metodami ASTM, které vychází z požadavků pro letectví a jsou více užívané a rozšířené než normy ISO EN. V rámci ASTM se kompozity zabývá komise D30 [77]. Normy ISO EN obsahují cca 400 dílčích dokumentů zabývajících se výrobou, použitím a testováním kompozitních materiálů. Mechanické vlastnosti výsledných prvků jsou podstatné, nejen z hlediska balistické ochrany, ale také zejména při návrhu konstrukce v případě, že se jedná o nosný prvek (zejména pak pevnostní charakteristiky).



a) b)
Obr. 4.21 – SEM zobrazení
a) Twaron Tw747; b) UHMPWE

Vzorky vyrobené dle uvedené metodiky byly hodnoceny na základně dvou testů (Obr. 4.22):

- zkoušky tahem dle ASTM D3039 (ekvivalent ISO EN 527-4),
- zkoušky ohybem EN ISO 14125:1999.



Obr. 4.22 – Realizované testy
a) zkouška tahem ISO EN 527-4; b) zkouška 3-bodým ohybem balistických materiálů dle EN ISO 14125:1999

Testovány byly tři materiály pro tři různé technologie výroby. Výsledky testů zkoušek tahem jsou uvedeny Tab. 4-17. Z výsledků je patrné že nejvyšších hodnot dosahuje laminát s termosetovou pryskyřicí LG 700 (VARTM) oproti laminátu zpracovaném v autoklávu s pryskyřicí ER68. Rozdíl je dán hmotnostním poměrem vláken ku pryskyřici V_{mf} , jehož maximální hodnota nesmí překročit hranici 80 %. Po překročení této hodnoty již matrice neplní své funkce v kompozitu (zejména přenášení zatížení mezi vlákny). Hodnoty materiálu Endumax jsou nízké kvůli delaminaci a prokluzu čelistí při zkoušce. Zde by bylo nutné využít svěrné čelisti s čepem, které již však neodpovídají dané testovací normě. Hodnoty odpovídají měřením v pracích: [78], [79], [80], [81].

Tab. 4-17 – Výsledky zkoušky tahem

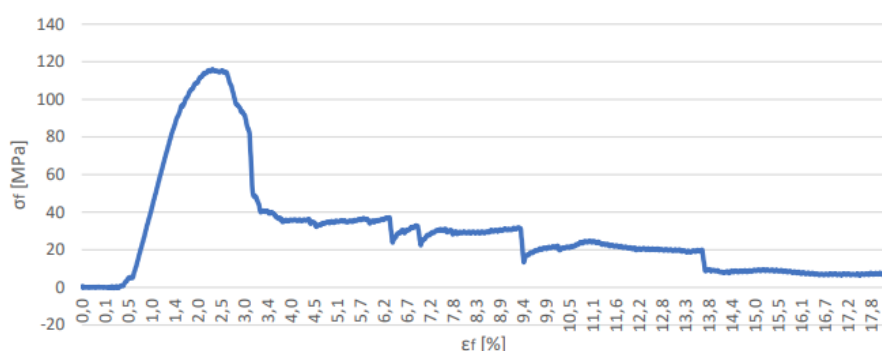
Materiál	Technologie	σ_m [MPa]	ε_m [%]	V_{mf} [%]
Aramid TW747/ER68	Autokláv	$465,5 \pm 16,53$	$2,67 \pm 1,85$	≈ 82
Aramid Tw747/LG700	VARTM	$508,9 \pm 18,1$	$0,66 \pm 0,08$	≈ 65
UHMWPE/Spectra XF23	Lisování	$143,19 \pm 12,3$	$6,97 \pm 1,63$	-

V případě zkoušky ohybem jsou výsledky uvedeny v Tab. 4-18. Nejlepších parametrů dosahuje materiál zpracovávaný v autoklávu, cca dvojnásobné hodnoty oproti ostatním materiálům. V tomto případě ohybu již nejsou všechna vlákna namáhána stejně, ale na vzorku jsou místa s výrazným tahovým, tlakovým a smykovým působením zatěžujících sil. Vzorky s vyšším obsahem pryskyřice mají průběh grafu odlišný od vzorků s nižším obsahem pryskyřice. V případě materiálu s vyšším obsahem pryskyřice je průběh hodnot pevnosti téměř

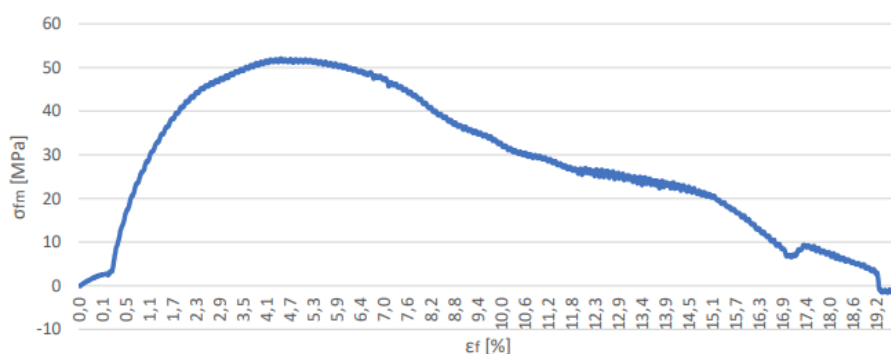
spojitý a hladký. Vzorky s nižším obsahem pryskyřice (ER 68, Endumax) po dosažení nejvyšší hodnoty rychle klesají na téměř poloviční hodnoty pevnosti. Průběh hodnot pevnosti termosetové pryskyřice ER68 a LG 700 je uveden na Obr. 4.23 a Obr. 4.24. Nejnižších hodnot dosahoval materiál s termoplastickou lisovanou matricí, což je způsobeno nízkými hodnotami modulu ohybu samotné matrice [82], [40].

Tab. 4-18 – Výsledky ohybové zkoušky

Materiál	Technologie	σ_{fC} [MPa]	ε_{fm} [%]	V_{mf} [%]
Aramid Tw747/ER68	Autokláv	$117,1 \pm 3,5$	$2,4 \pm 0,5$	≈ 82
Aramid Tw747/LG700	VARTM	$52,1 \pm 3,9$	$7,3 \pm 2,2$	≈ 65
Aramid Tw747/TH110	Lisování	$6,9 \pm 1,2$	$7,3 \pm 1,1$	≈ 78
UHMWPE/Spectra XF23	Lisování	$48,6 \pm 1,3$	$1,8 \pm 0,1$	-



Obr. 4.23 – Typický průběh pevnosti při zkoušce ohybem pro materiál Twaron TW747/ER68 (autokláv)



Obr. 4.24 – Typický průběh pevnosti při zkoušce ohybem pro materiál Twaron TW747/LG700 (VARTM)

4.4.2 Ověření vlastností kompozitních materiálů s textílií metodou TAT

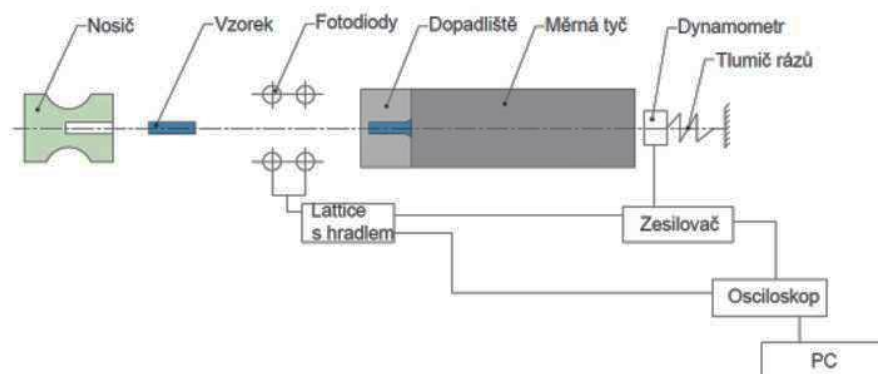
Testování kompozitní balistické ochrany využívá stejné normy jako standardní balistické testy. Nejčastěji se využívají normy NATO STANAG 4569, AEP-55 level 1. V některých

případech se lze také setkat s americkou normou NIJ Standard 0108.01. I-IV. Materiály využité pro testy v rámci výroby FVT UO a FSI VUT v Brně byly podrobeny dvěma typům testů:

- pro nízké rychlosti do $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- pro standardní testování v balistické zkušebně.

Pro nízké rychlosti byl zvolen test na vzduchovém kanónu určeném pro Taylorův test, kde byly provedeny úpravy dopadliště a nosiče k využití standardních projektilů.

Taylorův test (TAT) je metoda zkoušení materiálů pro hodnocení jejich chování při vysokých rychlostech deformace. Jedná se o typ dynamické kompresní rázové zkoušky. Základní princip spočívá ve vystřelení válcového impaktoru proti tuhému tělesu. Vystřelování se provádí v pneumatickém děle, ve kterém je impaktor umístěn do držáku (obvykle vyrobeného z polystyrenu nebo metodou 3D tisku). Impaktor je urychlen stlačeným vzduchem směrem k cíli rychlostí až $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Během urychlování se impaktor oddělí od držáku a následně narazí do měřicí tyče, která je sledována pomocí tenzometrů. Měřicí tyč vyrobená z vysokopevnostní oceli (ČSN 413240 Ocel 13 240 Mn-Si) musí během nárazu zachovat elastické chování bez plastické deformace. Kolize vyvolá v tyči tlakovou elastickou vlnu, která je zaznamenána tenzometry tyče. Výstupní signál je zaznamenán osciloskopem prostřednictvím zesilovače a data jsou dále analyzována počítačem. Dopadová rychlost impaktoru je rovněž měřena fotodiodami. Typické schéma Taylorova dopadového testu je zobrazeno na Obr. 4.25 [69].



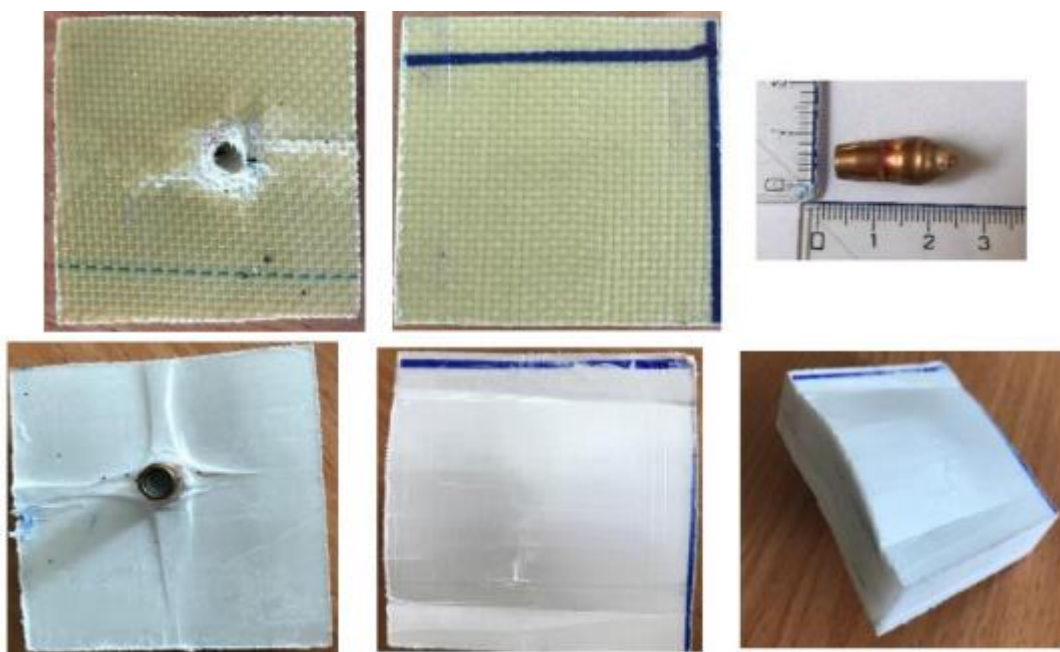
Obr. 4.25 – Schématické zobrazení TAT [69]

TAT testem byly hodnoceny materiály Twaron tw747 s epoxidovou maticí procesovanou v autoklávu a pomocí VARTM a UHMWPE materiál Endumax XF23. Vzorky byly pro potřeby testu upraveny na velikost 60 mm x 60 mm. Projektil byl použit 7,62 mm x 51 mm NATO FMJ M80. Ukázka vzorků po TAT testu je uvedena na Obr. 4.26 a samotné výsledky testu jsou uvedeny v Tab. 4-19. Je zřejmé, že lepších výsledků

při rychlostech impaktoru $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dosahuje materiál vyrobený pomocí VARTM s pryskyřicí LG 700. Je zde patrný i vliv tloušťky a počtu vrstev na chování materiálu. Materiál Endumax XF23 při stejné tloušťce jako aramidové materiály vykazuje jiný typ poškození. Jedná se o vyšší deformace, delaminaci a vytržení materiálu z podpůrného rámu. Endumax XF23 složený z 65 vrstev tloušťky 10,3 mm byl prostřelen (Obr. 4.27). Vzorek s 95 vrstvami již prostřelen nebyl.

Tab. 4-19 – Výsledky vzorků po TAT

Materiál	N. vrstev	Tloušťka [mm]	Rychlost dopadu [m/s]	Trauma efekt [mm]	Perforace
Aramid TW747/LG700	33	14,7	149,5	0,0	NE
Aramid TW747/LG700	21	9,9	149,8	12,7	NE
Aramid TW747/ER68	38	15,2	150,2	8,1	NE
Aramid TW747/ER68	25	10,4	150,6	15,8	NE
Endumax XF23	95	15,1	149,9	9,4	NE
Endumax XF23	65	10,3	151,7	22,6	ANO



Obr. 4.26 – Ukázka vzorků po TAT testu

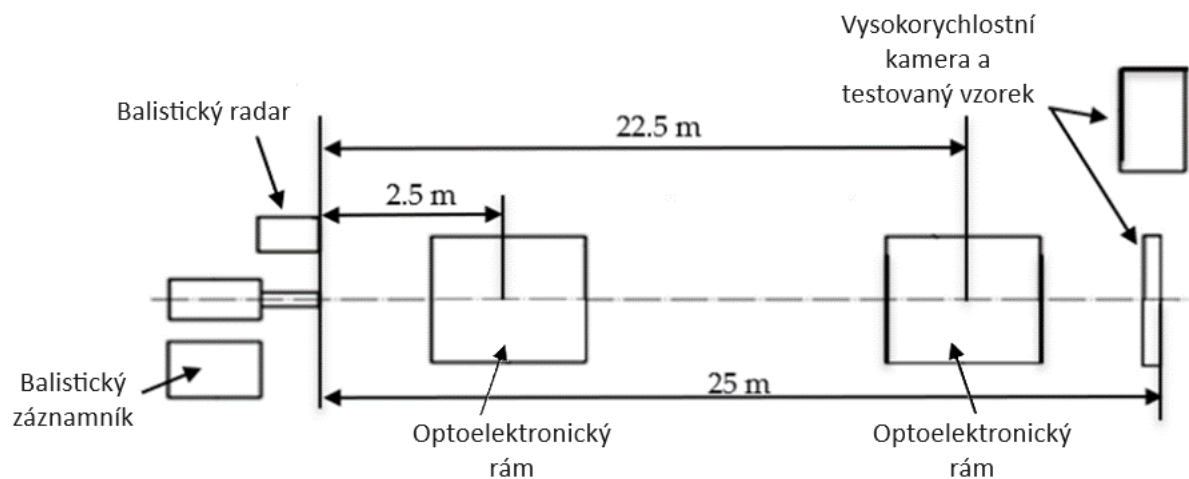


Obr. 4.27 – Prostřelený vzorek Endumax XF23 – 65 vrstev

4.4.3 Ověření vlastností kompozitních materiálů s textílií v balistické zkušebně

Reálné testování vyrobených panelů probíhalo na Katedře zbraní a munice, Fakulty vojenských technologií, Univerzity obrany. Pracoviště je vybaveno balistickou zkušebnou, která slouží k měření a testování zbraní a munice. Vnitřní střelnice je vybavena měřicí stolicí pro střelbu z ručních zbraní a experimentálních balistických zbraní s ráží do 12,7 mm, optickými hradly, elektronickým terčem a doplerovským radiolokátorem. Primární zpracování dat zajišťuje balistický analyzátor spolu s příslušným softwarovým vybavením. Na tomto pracovišti je také k dispozici pneumatická a elektromagnetická experimentální zbraň. Cílem testování bylo ověřit odolnost kompozitních panelů podle standardu NATO STANAG 4569, AEP-55, level 1. Těmto zkouškám se mnoho prací nevěnuje, většinou se lze setkat s dopadovými rychlostmi do $500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

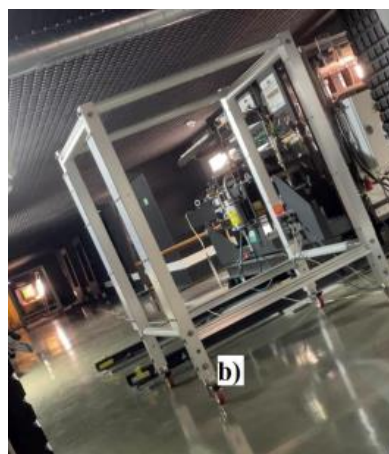
Testovací zařízení se skládá z mobilní střelecké stoličky STZA 12M1 (Obr. 4.28), na které je připevněna balistická hlaveň s univerzálním závěrem typu UZ-2002. Balistický radar umístěný na úrovni hlavně měří ústovou rychlost projektilu pomocí systému DRS 01, založeném na principu Dopplerova jevu. Společností Prototypa-ZM navržená balistická hlaveň (Obr. 4.29) je modulární a umožňuje střelbu s různými rážemi munice. Optoelektronické rámy Kistler 2521 A (Obr. 4.30) jsou umístěny ve vzdálenosti 2,5 m před hlavní a 2,5 m před panelem a slouží k laserovému měření rychlosti střely. Vzdálenost mezi ústím hlavně a testovanými kompozitními panely byla 25 m. Během nárazu byly panely zachyceny vysokorychlostní kamerou Photron SA-Z, aby byl možný detailní záznam jejich interakce s projektilem [83].



Obr. 4.28 – Schéma balistické zkušebny

Experimentální část probíhala ve dvou fázích, v první byly sledovány jednotlivé panely a ve druhé byl testován složený panel z různých kompozitních materiálů.

V první fázi byly kompozitní panely vyrobeny z Twaronu vytvrzeného epoxidovou pryskyřicí LG 700, Twaronu s prepregem termoplastu TH 110 a Twaronu CT 747 ER 68 impregnovaného termosetem a UHMPWE Endumax Shiled SF23. Panely o rozměru (300x300) mm byly upevněny v kovovém rámu. Jako testovací munice byly zvoleny tři různé typy střel dle Tab. 4-20. Výsledky testovaných panelů jsou uvedeny v Tab. 4-21.



Obr. 4.29 – Balistická hlaveň Obr. 4.30 – Optoelektronické rámy Kistler 2521 A

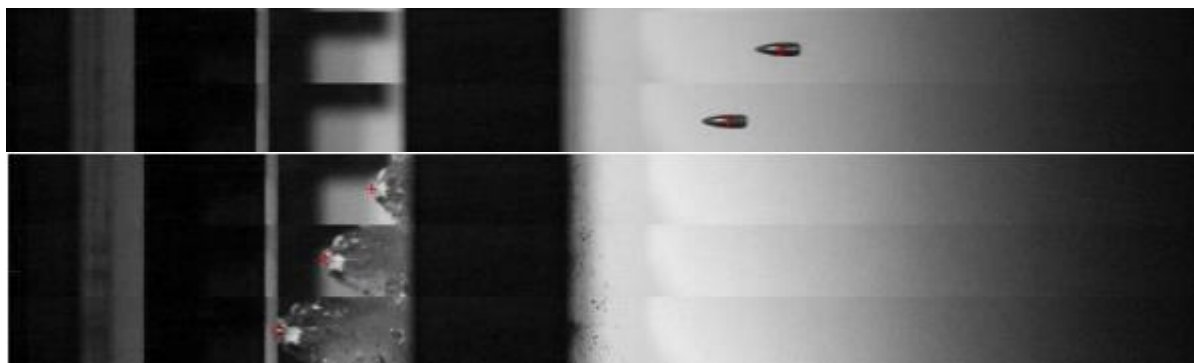
Tab. 4-20 – Střely dle standardu NATO STANAG 4569, AEP-55, level 1

Ráže	Střela	Hmotnost [g]	výrobce	Rychlost dopadu [m/s]
5,56 mm x 45 mm NATO	FMJ M193	3,55	FNH	937.00
5,56 mm x 45 mm NATO	FMJ SS109	4,00	S&B	900.00
7.62 mm x 51 mm NATO	FMJ M80	9,55	S&B	833.00

Tab. 4-21 – Výsledky testovaných panelů

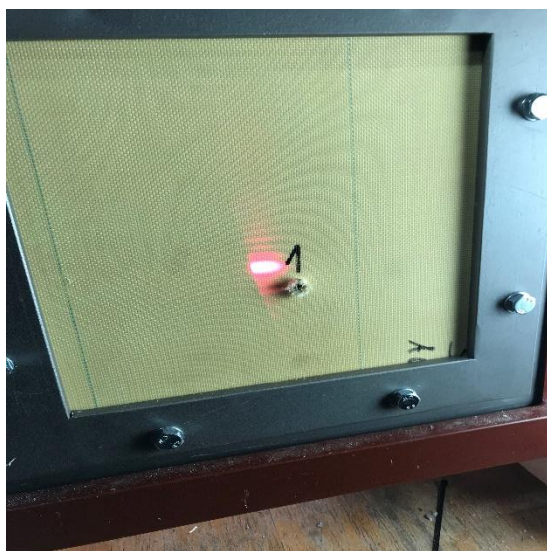
Č.v.	Materiál panelu	Počet Vrstev	Typ střely	Hmotnost střely	Rychlost střely v_{25} [m/s]	Kinetická energie střely E_{k25} [J]	Rychlost střely v_{out} [m/s]	K. energie po dopadu E_{kout} [J]
1	TW 747/LG700	30	7,62 mm M80	9,55	829,7	3287,12	760,34	2760,54
2	TW 747/LG 700	140	5,56 mm M193	3,55	946,4	1589,8	0	0
3	TW 747/LG 700	140	5,56 mm SS109	4,00	915,5	1676,2	0	0
4	TW 747/LG 700	140	7,62 mm M80	9,55	825,1	3250,8	0	0
5	TW 747/LG 700	90	7,62 mm M80	9,55	829,8	3287,9	0	0
6	TW 747/LG 700	90	7,62 mm M80	9,55	839,1	3362,0	0	0
7	Twaron CT 747 TH 110	90	7,62 mm M80	9,55	834,0	3321,3	0	0
8	Twaron CT 747 TH 110	60	7,62 mm M80	9,55	832,7	3310,9	680,9	2213,8
9	Twaron CT 747 ER 68	90	7,62 mm M80	9,55	830,5	3293,5	233,4	260,1
10	Endumax XF23	100	7,62 mm M80	9,55	827	3266,0	0	0

U prvních panelů tvořených Twaronem 747 vyrobených VARTM pryskyřicí LG 700 se pro tloušťky 90 a 140 mm nepodařilo panel prostřelit a panel splnil podmínky testu včetně trauma efektu zadní strany. Zde byly viditelné stopy deformace, ale v řádu několika mm. Tyto panely byly navrženy na základě testu panelu 30 vrstev kdy proběhla penetrace u všech tří druhů střeliva a změna rychlosti i kinetické energie po průchodu panelem byla do 20 % [83]. U všech testů došlo ke fragmentaci střely viz Obr. 4.31.

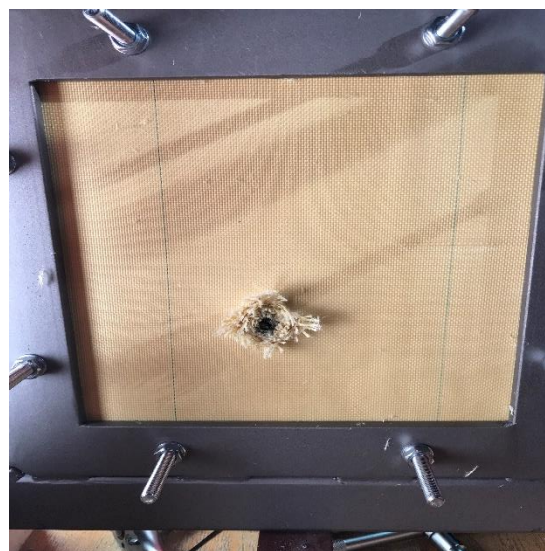


Obr. 4.31 – Záznam projektilu a fragmentů střely pro průchodu desky Twaron CT747/LG700

U vzorků č. 8 a 9 došlo k úplnému průrazu panelu střelou ráže 7,62 mm typem střely M80, přičemž v případě vzorku 5 došlo k poklesu rychlosti o 18,2 % (pokles kinetické energie o 33,1 %), v případě vzorku 6 došlo k poklesu rychlosti o 23,7 % (pokles kinetické energie střely o 41,8 %), čelní a zadní plocha je uvedena na Obr. 4.32. Vzorek č. 9 Panel Twaron CT 747 ER 68 o počtu 90 vrstev byl proražen střelou 7,62 mm M80 a tento panel absorboval 92,1 % kinetické energie střely podle výsledků vysokorychlostní kamery. Pokud jde o vizuální hodnocení mechanismu poškození, došlo k delaminaci, lámání a vytahování vláken v důsledku absorpce kinetické energie. V obou případech došlo k fragmentaci střely. Limitní tloušťka materiálu Twaron s epoxidovou matricí LG 700 byla stanovena na 90 vrstev.



a)



b)

Obr. 4.32 – Deska Twaron TW747/TH110, 60 vrstev
a) čelní strana panelu; b) zadní strana panelu

U vzorku č. 10 materiál Endumax nedošlo k průrazu testovaného panelu, ale došlo k výraznému vyboulení zadní strany, delaminaci a vytržení části panelu z rámu (viz Obr. 4.33), obdobně jako v [84].



Obr. 4.33 – Záznam projektilu a fragmentů střely pro průchodu desky Twaron CT747/LG700

Střela je fragmentována již po průchodu 30 vrstvami Twaronu s jakoukoli matricí. Nejvyšší odolnost vykazuje termosetová matrice LG700 s metodou VARTM, je to zřejmě způsobeno vyšším obsahem pryskyřice v kompozitu - jeho zvýšenou tvrdostí oproti systémům z autoklávového zpracování (díky zvýšené procesní teplotě je vyšší křehkost pryskyřice).

U vzorků s termoplastickou matricí (Obr. 4.32) dochází k vyšší deformaci zadní stěny. Dochází ke zvýšenému trauma efektu oproti termosetovým systémům, převládá také princip delaminace oproti termosetovým systémům, kde jsou vlákna poškozena lomem a přetržením. Je to dáno menší adhezí pryskyřice k vláknům což je dáno výrobní metodou.

UHMWPE (Obr. 4.33) materiál Endumax má jedny z nejlepších zastavovacích účinků vzhledem k poměrné váze a tloušťce panelu. Jeho hlavní nevýhodou je vyšší hodnota deformace zadní strany panelu oproti Twaronovým materiálům. Díky vysoké pevnosti materiálu v tahu nejsou při průchodu a fragmentaci střely vrstvy porušeny, ale vrstvy jsou rozděleny na pásy a ty vytahovány z celé plochy panelu, což vede k vyšším deformacím po celé ploše.

Výsledky jsou v porovnání s dalšími experimenty obtížně srovnatelné vzhledem k rozdílu zkušeben a využitých materiálů. UHMWPE materiály pro nižší rychlosti deformace jsou porovnávány např. v [80] a [85], kdy nižší rychlosti dopadu odpovídají i menšímu počtu vrstev laminátu. [86] a [87] potvrzuje závěry kdy plastičtější matrice lépe odolává nárazu u materiálu UHMWPE.

U balisticky odolných materiálů, i těch, které jsou veřejností vnímány jako základní a tzv. staré, např. vlákna kevlaru či dynnemy, je nezbytné dbát na způsoby výroby. Z literatury i z vlastních experimentálních řešení, která byla realizována za poslední 3 roky a které byly

realizovány pod mojí částečnou supervizí bylo jednoznačně prokázáno, že i dílčí změny v běžné technologii výroby balistické desky z balistických materiálů na bázi kevlaru může dojít k významnému zvýšení, ale i snížení schopnosti odolat impaktu projektilu ráže 7,62 mm x 51 mm. I přesto, že se dnes běžně objevují pokročilejší materiály obsahující matrici v suchém stavu jako součást balistické textilie, nejsou z pohledu balistické odolnosti výhodnější, což prokazují i uvedené závěry z experimentů. Z tohoto důvodu je vhodné využívat potenciálu vrstvení různých balistických materiálů rozdílných balistických vlastností. Proto i další vývoj práce zahrnuje výzkum a vývoj možných technologií, které mohou dílčím způsobem, při vhodné konstrukci vícevrstvého pancíře, významně ovlivnit jeho užitné vlastnosti. Proto i druhá fáze experimentů zahrnovala vrstvení rozdílných struktur, se kterými se lze setkat i ve světové literatuře [88], [89], [90], [91], [92].

Vhodnou konstrukcí vícevrstvého pancíře lze významně eliminovat jeho hmotnost, je však třeba si uvědomit, že konstrukce kompozitního pancíře pouze na bázi balistických vláken nedosahuje požadované ochrany proti puškovým střelám 7,62 mm x 51 mm a to z důvodu jejich značného výkonu. Lze však částečně kompenzovat tloušťku a s tím spojenou hmotnost výsledného tzv. hybridního řešení. Částečným řešením kompenzujícím tloušťku základního materiálu na bázi Twaronu je kombinace dopadové čelní vrstvy Twaron TW747 s podporou UHMWPE Endumax XF 33³ (Obr. 4.34).

³ Střelecký experiment probíhal se střelou ráže 7,62 mm, typ střely M80, na pracovišti UNOB popsaném výše. Vrstvená kompozitní pancéřová ochrana z Twaronu/UHMWPE nebyla proražena. V důsledku absorpce a disipace kinetické energie projektilů došlo k významné plastické deformaci v zadní části pancíře. Projektily se zastavily v kompozitním panelu Twaron CT 747 ER 68 přibližně ve 29 vrstvách. Obr. 4.34 ukazuje místa dopadu a výslednou plastickou deformaci v zadní části pancíře.



Obr. 4.34 – Hybridní panel Twaron/UMPWPE po balistickém testu

Hybridní balistický pancíř Twaron/UHMPWE díky kombinaci materiálů dosahuje lepší balistické odolnosti při nižší plošné hmotnosti a tloušťce materiálu.

Další směr vývoje vícevrstvého pancíře se musí vyvíjet v kontextu nastavení čelní vysoce odolné čelní části, která musí významně snížit průbojný účinek střely při dopadu na první vrstvu pancíře.

4.5 Možnosti zvýšení balistické odolnosti kovových pancířů

Základní variantou pancířů používaných pro balistickou ochranu vozidel proti výkonným střelám je materiál na bázi Fe známý pod označením ARMOX. Mechanické vlastnosti kovů jsou pevně spojeny s jejich vnitřní mikrostrukturou. Změnu užitných vlastností lze realizovat různými povrchovými technologiemi založenými na principu mechanického zpevňování povrchu nebo fyzikálně-chemickými pochody. Možnými technologiemi povrchových úprav založených na fyzikálně-chemických pochodech pro úpravy kovových pancířů jsou zejména technologie povrchového kalení, cementace, nitridace, nitrocementace nebo karbonitridace. Další možnou technologií je rovněž boridování.

Hlavním důvodem využití uvedených technologií je zajištění dílčí heterogenity pancířů, zejména jejich čelní (dopadové) části. Aplikací technologií je možné dosáhnout zvýšení tvrdosti dílčí části hloubky materiálu a tím účinně měnit mechanické vlastnosti celé soustavy.

V průběhu chemicko-tepelného zpracování dochází k difuzi intersticiálních prvků v rámci hranic zrn a krystalové mřížky kovu. V zásadě je pohyb iontů v krystalové mřížce zajištěn změnou energetického stavu během procesu chemicko-tepelného zpracování. Mechanismus

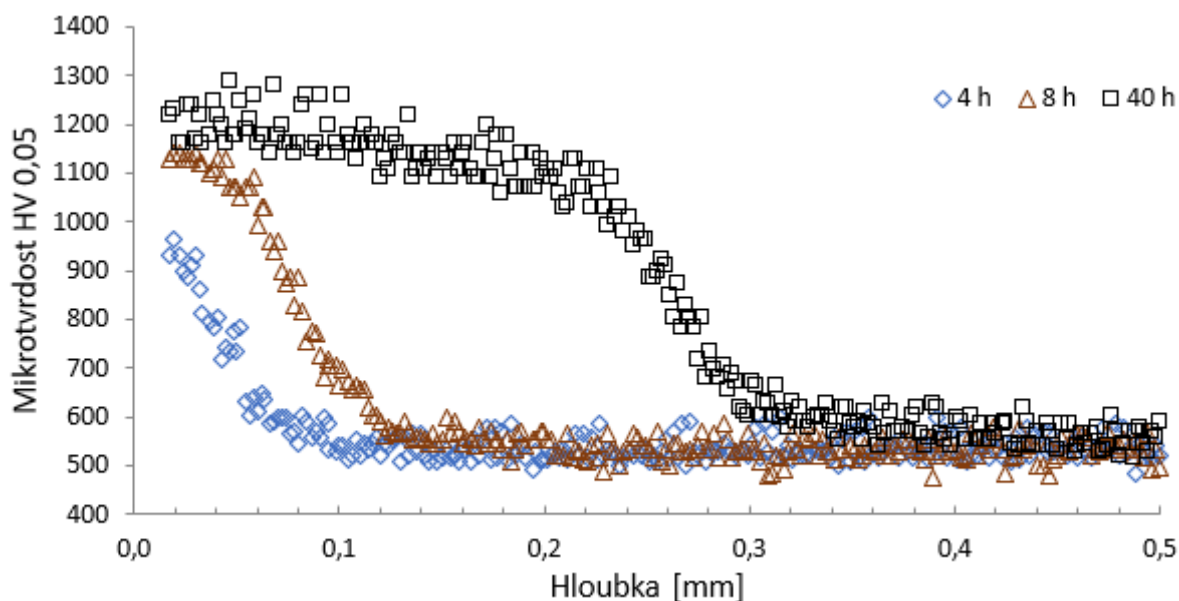
difuze závisí na velikosti aktivační energie iontů difundujících krystalovou mřížkou [44]. Vlivem zvýšení teploty a s tím spojeným zvýšením energie soustavy dochází ke zvýšení amplitudy kmitání (vibrací atomů) jednotlivých atomů substitučních prvků od jejich základních poloh, což zvyšuje pravděpodobnost pohybu intersticiálních i substitučních prvků. V závislosti na velikosti aktivačních energií pak může docházet jak k difuzi vakantní, tak intersticiální [44], [45], [46], [47], [48].

Vytvořená difuzní vrstva je ohraničená oblast, která má specifické mechanické vlastnosti odlišující se od charakteristických vlastností základního materiálu. Jedná se o záměrně technologicky vytvořenou oblast v základním materiálu zajišťující:

- zvýšení povrchové tvrdosti,
- zvýšení lomové houževnatosti,
- zvýšení meze únavy v důsledku vnesených tlakových napětí,
- zvýšení korozní odolnosti v normální atmosféře, tlakové i mořské vodě nebo přehřáté páře,
- zvýšení stability povrchové vrstvy v důsledku vyšších teplot.

Difuzní technologie jsou specifické metody, kterými je v základním materiálu vytvářena vhodná vrstva mající požadované vlastnosti [94].

Difuzní vrstvy jsou zpravidla složeny z několika oblastí, které přecházejí od sloučeninové vrstvy do základního materiálu vždy s určitým gradientem intersticiálního prvku. Po chemicko-tepelném zpracování dochází v materiálu vlivem zvýšeného obsahu intersticiálních prvků k distorzi krystalové mřížky. Tato distorze způsobuje vznik napětí v povrchové vrstvě [94], [95]. Během procesu difuze dochází k přesycení vrstvy intersticiálními prvky (v závislosti na technologii, N nebo C případně B), které následně na povrchu vytvářejí tzv. adsorbční pásmo, odkud probíhá difuze do základního materiálu. Hloubka difuzní vrstvy závisí na mikrostruktuře, chemickém složení a podmínkách procesu. V důsledku afinity intersticiálního a substitučního prvku jsou vytvářeny karbidy, nitridy či karbonitridy. Změna mikrotvrdosti difuzní vrstvy od povrchu do základního materiálu (jádra) je závislá zejména na chemickém složení materiálu a na koncentraci intersticiálních prvků vytvářejících karbidy nebo nitridy. Změna mikrotvrdosti difuzní vrstvy v závislosti na době difuze je uvedena na Obr. 4.35.



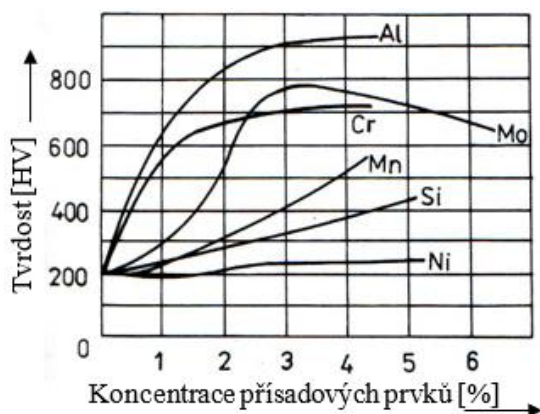
Obr. 4.35 – Změna hloubky difuzní vrstvy ČSN 41 5142 + QT v závislosti na době difuze [93]

V průběhu cementace nebo nitridace vznikají v nitridované vrstvě karbidy (nitridy) železa, které způsobují poměrně nízký nárůst tvrdosti. Hlavními prvky, které způsobují zvýšení mikrotvrdosti nitridované difuzní vrstvy, jsou zejména Mo, V, Al nebo Cr.

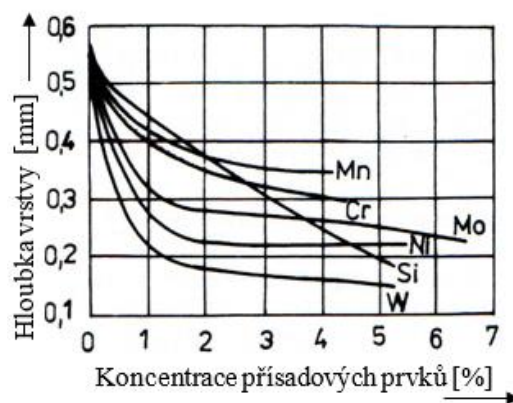
Zvýšená koncentrace C a N způsobuje primárně tvorbu karbonitridů železa, dále jsou vytvářeny karbonitridy chromu, molybdenu a dalších legujících prvků, jež mají afinitu k N a C. Zvýšení povrchové tvrdosti vede ke zvýšení odolnosti proti opotřebení a meze únavy v důsledku vzniku významných tlakových napětí v povrchové vrstvě [94], [95].

Na základě koncentrace jednotlivých legujících prvků nelze jednoznačně predikovat hloubku a vlastnosti vytvořené difuzní vrstvy. Na Obr. 4.36 a Obr. 4.37 je uvedena experimentálně ověřená závislosti legujících prvků, zejména vliv jejich koncentrace na hloubku nitridace a dále vyjádření hypotetické mikrotvrdosti v závislosti na koncentraci daného prvku v objemu materiálu [96].

Jedním z nejvýznamnějších parametrů, po analýze chemického složení materiálu, je analýza mikrostruktury oceli, která úzce souvisí s difuzními pochody.



Obr. 4.36 – Vliv přísadových prvků na povrchovou tvrdost nitridované vrstvy, PN 550 °C/24 h [96]



Obr. 4.37 – Vliv přísadových prvků na celkovou hloubku nitridované vrstvy, PN 550 °C/24 h [96]

Z hlediska mechanismu difuze je mikrostruktura jedním z nejvýznamnějších faktorů, který má vliv nejen na výslednou povrchovou tvrdost vrstvy, ale i na další kvalitativní parametry, jako je hloubka difuzní a přechodové vrstvy, tedy rozhraní mezi základním materiálem a difuzní vrstvou [93].

Hlavním důvodem využití uvedených technologií je optimalizace pevnostních charakteristik materiálů. Mechanismus difuze závisí na velikosti aktivační energie iontů, difundujících krystalovou mřížkou [44]. Vlivem zvýšení teploty a s tím spojeným zvýšením energie soustavy dochází ke zvýšení amplitudy kmitání (vibrací atomů) jednotlivých atomů substitučních prvků od jejich základních poloh, což zvyšuje pravděpodobnost pohybu intersticiálních i substitučních prvků.

4.5.1 Difuzní procesy v pevných látkách

Difuzi popisujeme jako jeden ze základních mechanismů přenosu hmoty, při kterém probíhá pohyb částic (molekul, atomů nebo iontů) a také vakancí ve vztahu k sousedním částicím. Hnací síla difuze vychází z poklesu hodnoty volné entalpie celé soustavy. Difuze je založena na tepelně aktivovaném pohybu částic, proto jsou difuzní pochody výrazně závislé na teplotě a na čase. V pevných látkách je difuze jediným mechanismem přenosu hmoty [97], [98], [99], [100].

Difuzní pochody je možné popisovat fenomenologicky s použitím obecných zákonů definujících přenosové jevy. Tento přístup vychází z popisu jejich kinetiky, ale neřeší jejich mechanismy. Pro podrobnější rozbor difuzních pochodů je vhodné zvolit fyzikální přístup zahrnující představy o pohybu iontů krystalovou mřížkou a zohledňující vliv jejich poruch. Fyzikální přístup umožňuje popis vztahů mezi náhodným (neuspořádaným) pohybem iontů

a jejich makroskopickým tokem. Umožňuje tak v souladu s představami o přenosových jevech popsat změny koncentrace, ke kterým dochází při nestacionárních dějích [93].

4.5.2 Obecné difuzní mechanismy

Difuzi je možno definovat jako tepelně aktivovaný, samovolný a nevratný proces založený na frekvenci přeskoků iontů krystalovou mřížkou, který je možné popsat určitou modifikací Arrheniovy rovnice.

Způsob a rychlost difuze konkrétního iontu jsou v daných podmínkách určeny hodnotou (velikostí) energetické bariery. Jedním z důležitých faktorů ovlivňujících hodnotu energetické bariery je poměr velikosti difundujícího iontu a iontů matrice v daném typu krystalové mřížky (Häggův poměr). Pokud jsou parametry difundujících iontů této hodnotě blízké může difuze probíhat intersticiálním mechanismem (např. difuze iontů C a N nebo B, případně H nebo O) [101], [99], [100].

Pro vyjádření frekvence přeskoků iontů můžeme v tomto případě použít vztah ve tvaru:

$$f = z \cdot v \cdot \exp\left(\frac{-\Delta G_m}{RT}\right) \quad (4-3)$$

kde: z – množství poloh, vhodných pro přeskok difundujícího iontu,
 v – frekvence kmitů iontů kolem rovnovážné polohy,
 ΔG_m – energetická bariéra přeskoku iontu vyjádřená hodnotou volné entalpie,
 R – plynová konstanta,
 T – absolutní teplota, při které difuze probíhá.

Pokud jsou poměry velikostí difundujícího iontu a iontů matrice významně odlišné od hodnoty 0,59 (určené Häggem), nemůže difundující iont zaujmout v krystalové mřížce intersticiální polohu a pokud je to energeticky možné substituuje iont matrice [101], [98], [99]. Difuze potom probíhá zpravidla vakantním mechanismem. Pro vyjádření frekvence přeskoků iontů můžeme v tomto případě použít vztah ve tvaru [101]:

$$f = z \cdot v \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G_m + \Delta G_v}{RT}\right) \quad (4-4)$$

Vztah 4-4 definuje zvýšení energetické bariery proti intersticiálnímu mechanismu o hodnotu ΔG_v nutnou pro přeskoky vakancí. Difuze vakantním mechanismem tedy může probíhat pouze za předpokladu dodání vyšší aktivační energie než pro difuzi intersticiální.

4.5.3 Fyzikální pojetí teorie difuze

Přeskoky iontů v krystalové mřížce jsou uvažovány jako nespojité. Před a po změně polohy zůstává iont v určitém místě krystalové mřížky a k přeskoku dojde v okamžiku vzniku vhodných podmínek. Např. difuze s využitím vakantního mechanismu je podmíněna

přiblížením se vakance do sousedního uzlového bodu krystalové mřížky. Toto přiblížení je náhodné a může nastat z libovolného směru. Fyzikální pojetí tedy definuje vztahy mezi náhodnými přeskoky iontů v krystalové mřížce (submikrostruktuře) a jejich přemístění z makroskopického hlediska. V případě intersticiálních iontů jsou tyto úvahy o mechanismu difuze podobné.

Frekvence a směr přeskoků iontů tedy určují schopnost a rychlost difuze z makroskopického hlediska.

4.5.4 Vliv teploty na difuzní pochody

Vliv teploty na proces difuze vztažený na difuzi iontů jednoho prvku v určitém difuzním prostředí je možné vyjádřit tzv. Arrheniovou rovnicí [101], [98]:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-\Delta H_d}{RT}\right) \quad (4-5)$$

kde: D_0 – frekvenční faktor (frekvenci tepelných kmitů iontů kolem rovnovážné polohy a také pravděpodobnost kontaktu iontu s vakancí),
+ ΔH – aktivační entalpie difuze,
 R – plynová konstanta,
 T – absolutní teplota, při které difuze probíhá.

Hodnota D (difuzivita) odpovídá vztahu pro vyjádření difuzního koeficientu definovanému ve fenomenologickém pojetí difuze.

Fenomenologické pojetí neuvažuje samostatné vlivy, jako typ krystalové mřížky, náhodné přeskoky iontů a korelační jevy. Vyjadřuje jen celkový makroskopický výsledek daný změnou chemického složení. Toto pojetí difuze bylo definováno Fickem v roce 1858, který je shrnul do dvou zákonů. Hybnou silou je při tomto pojetí difuze, na rozdíl od fyzikálního pojetí, uvažován gradient koncentrace. Fickovo pojetí je tedy možno použít pouze za určitých zjednodušujících předpokladů.

4.5.5 První Fickův zákon

Jak již bylo uvedeno, je při použití I. Fickova zákona uvažován jen výsledný přesun iontů v definovaném směru, např. jednorozměrný difuzní tok ve směru gradientu koncentrace.

Můžeme předpokládat přeskoky iontů z krystalové roviny do rovin sousedních. Potom je možné určit počet iontů, které přejdou za jednotku času rozhraní v jednom kontrolovaném směru [101]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -f \cdot \left(\frac{n_1}{2} - \frac{n_2}{2}\right) \quad (4-6)$$

při frekvenci přeskoků iontů f přes mezirovinné rozhraní. Pokud ve vztahu nahradíme počty iontů koncentrací, dostaneme vztah [101]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -f \cdot d \cdot L^2 (c_1 - c_2) \quad (4-7)$$

ve kterém hodnota d udává mezirovinnou vzdálenost a L^2 vyjadřuje jednotkovou plochu, ve které dochází k přeskokům iontů. Pokud nahradíme rozdíl koncentrací gradientem, přejde vztah do tvaru:

$$I = \frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{f}{2} \cdot d^2 \cdot L^2 \cdot \frac{dc}{dx} \quad (4-8)$$

Vztah potom přechází na vyjádření I. Fickova zákona, ve kterém je difuzní koeficient určen jako součin poloviční frekvence přeskoků iontů a kvadrátu mezirovinné vzdálenosti [101]:

$$D = \frac{f}{2} \cdot d^2 \quad (4-9)$$

Po dosazení do vztahu pro I. Fickův zákon dostáváme:

$$I = \frac{\partial n}{\partial t} = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4-10)$$

Pochody probíhající v difuzní vrstvě (mimo plazmovou nitridaci) jsou závislé na vzájemné interakci intersticiálních (C, N) a substitučních iontů (Fe a legujících prvků).

Je známo, že ionty železa a substitučních legujících prvků ovlivňují termodynamiku difuzních pochodů N a C. Tento předpoklad platí, pokud Fe a substituční legující prvky nedifundují na velké vzdálenosti a přitom zůstává zachován poměr koncentrací. Vliv intersticiálních prvků na difuzi prvků substitučních je možné zanedbat.

Difuzní tok intersticiálních prvků v difuzní vrstvě (C, N) je možné při nahrazení koncentrace aktivitou prvku vyjádřit z upraveného vztahu pro I. Fickův zákon. Potom dostáváme vztah [101]:

$$I_i = -D_i^a \cdot \frac{\partial a_i}{\partial x} \quad (4-11)$$

Aktivitu intersticiálního prvku je možné definovat jako součin aktivního koeficientu a koncentrace.

Protože platí $\gamma_i = \frac{a_i}{N_i}$ je zřejmé, že na změny charakteristik difuze intersticiálních iontů v tuhém roztoku lze usuzovat ze změny hodnoty aktivity prvku a_i vyvolané působením

legujících prvků. Tyto vztahy popisující představu ovlivnění difuze intersticiální složky a mohou být bez zásadního omezení použity pro popis difuze uhlíku a dusíku v tuhém roztoku.

Na základě uvedených vztahů lze psát vztah pro difuzní koeficient použitý ve vyjádření Fickova zákona ve tvaru [97], [101], [98]:

$$D_i = D_i^a \cdot \gamma_i \cdot (1 + \varepsilon_i^l \cdot N_i) \quad (4-12)$$

kde ε_i^l je interakční koeficient prvku i definovaný vztahem:

$$\varepsilon_j^l = \left. \frac{\partial \ln \gamma_i}{\partial \ln N_j} \right|_{Fe} \rightarrow 1 \quad (4-13)$$

Vyjádříme-li vliv substitučního prvku j na difuzi intersticiálního prvku i difundujícího v tuhém roztoku dostáváme vztah:

$$\log a_i^j = \log a_i^0 + \log \gamma_i^j \quad (4-14)$$

kde: $\log \gamma_i^j = \log \gamma_i^0 + \sum_{j=2}^n \varepsilon_i^j \cdot N_j + \sum_{j=2}^n \rho_i^j \cdot N_i + \dots$

V tomto vztahu jsou γ_i^j a ρ_i^j jsou interakční koeficienty prvního a druhého řádu, obecně závislé na koncentraci prvků. Obdobně můžeme také vyjádřit vzájemnou interakci intersticiálních prvků C a N.

4.5.6 Druhý Fickův zákon

Druhý Fickův zákon, bere v úvahu, na rozdíl od prvního Fickova zákona, také objemovou koncentraci c difundující látky a její změny v závislosti na čase a poloze. Druhý Fickův zákon je odvozen pomocí I. Fickova zákona s ohledem na zákon zachování hmoty.

Difuzivita substitučních i intersticiálních iontů je dána typem prvku a jeho polohou v krystalové mřížce příslušné fáze. Difuzní pochody tedy odpovídají difuzi v systému Fe-C-N- j (kde j představuje substituční legující prvek). Difuze substitučních prvků je ovlivněna jejich koncentrací v čase. Jejich difuzivita je ovlivňována vzájemnou interakcí. Vliv koncentrace intersticiálních prvků je v této souvislosti možno zanedbat. Difuze intersticiálních prvků je ovlivněna koncentrací substitučních prvků. Při zásadním rozdílu v difuzivitě je intersticiální prvek s vyšší difuzivitou ovlivňován koncentrací a rozložením prvku s menší difuzivitou [97], [101], [98], [99].

Při hodnocení vzájemného vlivu intersticiálních iontů N a C je rozdíl v difuzivitě malý a ovlivnění difuze těchto prvků je vzájemné. Pokud u N a C předpokládáme kvazistacionární model difuze těchto prvků, je možné předpokládat difuzi na základě termodynamické aktivity

jako hnací síly procesu. Za tohoto předpokladu můžeme pro popis difuze dusíku použít modifikovaný II. Fickův zákon ve tvaru [97], [101], [98]:

$$\frac{\partial a_N}{\partial t} = D_N^a \cdot \gamma_N \cdot \left(\frac{\partial^2 a_N}{\partial x^2} \right) \quad (4-15)$$

a pro popis difuze C ve tvaru:

$$\frac{\partial a_C}{\partial t} = D_C^a \cdot \gamma_C \cdot \left(\frac{\partial^2 a_C}{\partial x^2} \right) \quad (4-16)$$

Interakce intersticiálních prvků je vyjádřena vzájemnými hodnotami aktivitních koeficientů. V těchto vztazích jsou brány v úvahu parametry fyzikálního pojetí difuze.

4.5.7 Cementace kovových pancířů

S využitím znalostí difuze a možností ovlivnění mechanických vlastností dílčí hloubky pancíře byla pro potřeby zvýšení balistické odolnosti dopadové čelní části pancíře aplikována technologie cementace v plynu. Z porovnání soustav Fe-C a Fe-N je zřejmé, že se jedná o velmi podobné soustavy, které spolu v určitých dílčích částech souvisí. C i N rozšiřují oblast kubické, plošně středěné fáze železa γ (austenitu).

C s N dále zvyšují teplotu překrystalizace kubické, prostorově středěné fáze δ -Fe a snižují teplotu překrystalizace kubické, prostorově středěné fáze α -Fe. Relativní intenzita vlivu N na snížení překrystalizační teploty α -Fe je menší než u C [102].

Účinek obou prvků (C a N) na rozšíření oblasti austenitu souvisí s jejich volnou entalpií a aktivitou v tuhém roztoku. V austenitu, při odpovídající koncentraci, je podstatně menší než ve feritu. S jejich rozpustností je to přesně obráceně, tedy v austenitu je rozpustnost vyšší než v tuhém roztoku feritu.

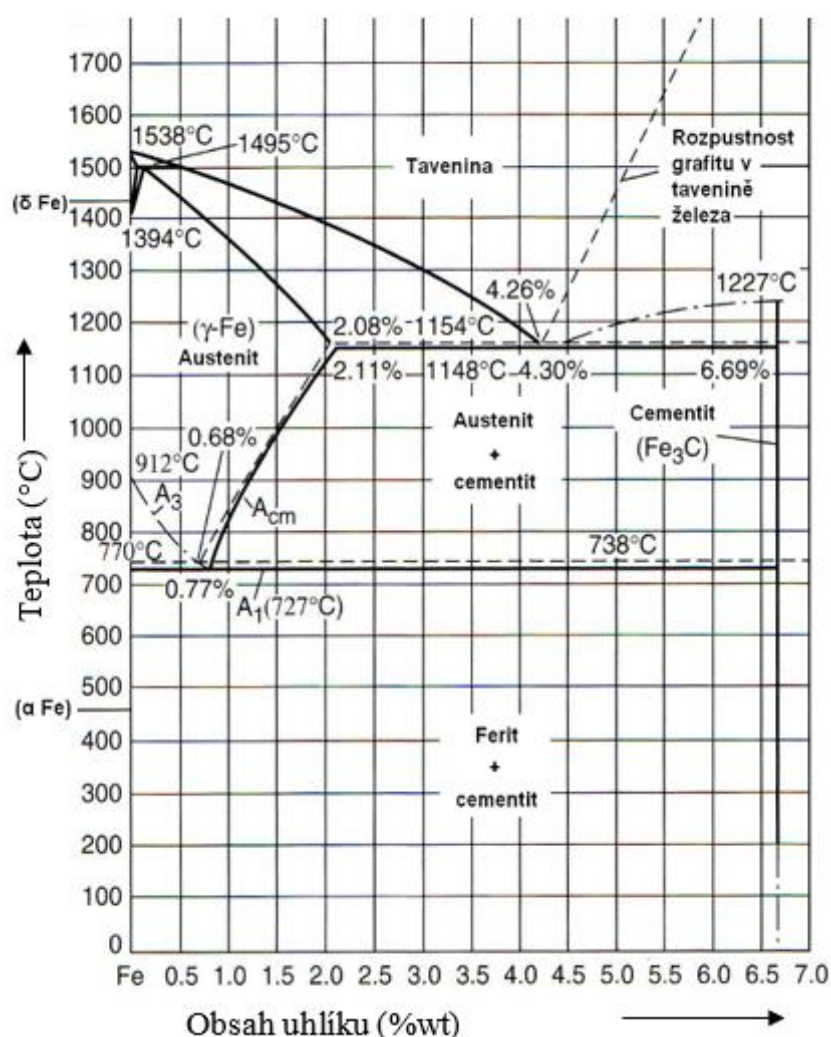
Rovnovážný diagram Fe-C je uveden na Obr. 4.38. Rozpustnost C ve feritu dosahuje při teplotě A_1 soustavy Fe-C 0,022 % při 723 °C. V austenitu se při teplotě A_1 rozpustí 0,77 % C. Rozpustnost N ve feritu i v austenitu je větší, což dokládá Obr. 4.39. Při teplotě A_1 soustavy Fe-N (590 °C) se ve feritu rozpouští 0,1 % N v austenitu pak 2,35 % N [102].

V obou soustavách dochází k eutektoidní reakci za vzniku lamelárního eutektoidu. Ten je v soustavě Fe-N tvořen feritem a nitridem Fe_4N , který se nazývá braunit.

Mřížkový parametr austenitu roste s rostoucím obsahem dusíku pomaleji než u C [102], [105]. Značná odlišnost v obou soustavách spočívá v množství vytvářených sloučenin, kdy:

- v soustavě Fe-Fe₃C vytváří Fe s C pouze jednu sloučeninu – cementit. Atomy Fe jsou v cementitu uspořádány v ortorombickou mřížku o parametrech:

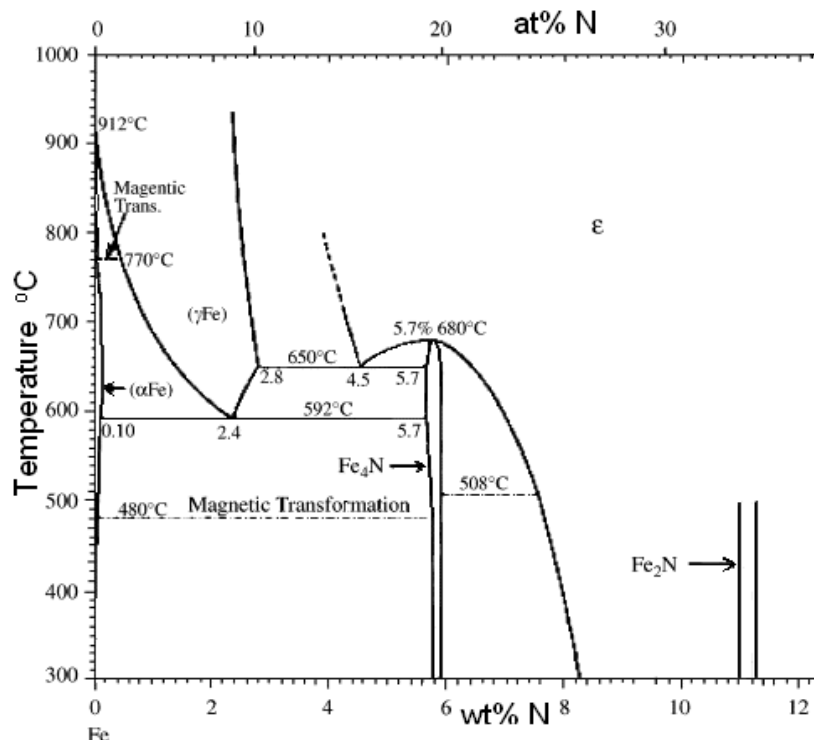
- $a = 507,87$ pm, $b = 672,97$ pm, $c = 451,44$ pm [102]. Atomy C jsou uloženy intersticiálně v největších mezerách mřížky Fe. Vytvořená sloučenina cementit je stálá do teploty tavení, u nadeutektoidních slitin krystalizuje primárně z taveniny a v celém rozsahu teplot solidu určuje tvar diagramu soustavy Fe-C,
- v soustavě Fe-N, se vytváří několik sloučenin N – nitridů. Ve srovnání s cementitem se nitridy Fe vyznačují mnohem vyšší metastabilitou. Nejnižší obsah dusíku má γ' nitrid označovaný jako Fe_4N . Atomy Fe v nitridu γ' tvoří kubickou plošně centrickou mřížku. Atomy dusíku zaujímají v této mřížce přibližně $\frac{1}{4}$ oktaedrických intersticiálních poloh [102].



Obr. 4.38 – Rovnovážný diagram Fe-C (nitridace a karbonitridace prováděna pod teplotou A_1) [103]

Nitrid γ' existuje v okolí teploty A_1 v rozmezí (5,3–5,75) % N. Jeho mřížkový parametr roste s rostoucím obsahem N. Literatura [102] udává při 5,29 % N; $a = 378,3$ pm a při 5,71 % N; $a = 379,3$ pm. Nitrid γ' je stabilní pouze do teploty 670 °C, nad tuto teplotu se přeměňuje

na ϵ . Zmíněný nitrid je stabilní i za teplot nižších než 670 °C, avšak při vyšším obsahu N. Atomy Fe v něm obsazují uzlové body hexagonální mřížky, zatímco dusík zaujímá proměnlivou část intersticiálních poloh [102].

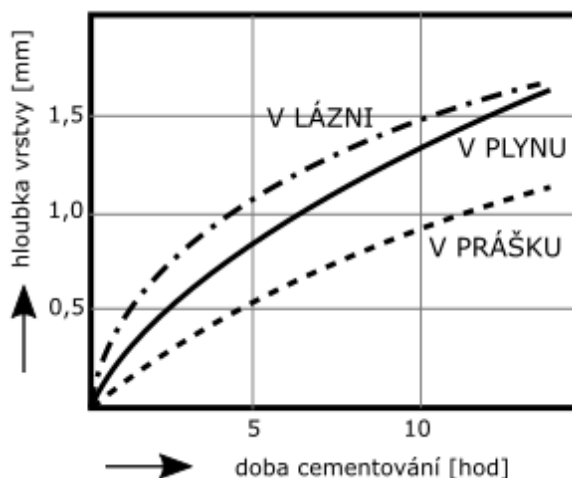


Obr. 4.39 – Rozpustnost dusíku v austenitu v diagramu Fe – N [103][104]

Ve srovnání s ostatními nitridy se nitrid ϵ vyznačuje velmi rozdílným složením v závislosti na teplotě. Dle diagramu Fe-N je při 670 °C rozmezí nitridu ϵ (4,35–11,0) % N. S rostoucí koncentrací N roste i mřížkový parametr nitridu.

Veškeré difuzní technologie uvedené v předchozí části umožňují zvyšovat povrchovou tvrdost zpracovávaných materiálů a tím zvyšovat odolnost proti opotřebení. **Cementace** a **nitrocementace** využívá v procesu zpracování teploty vyšší než A_{c3} , A_{cm} v rovnovážném diagramu **Fe-Fe₃C**, tzn. při růstu teploty nad A_{c1} dochází k transformaci kubické prostorově středěné mřížky BCC (body cubic centered) přítomné v oblasti existence feriticko-perlitické struktury Fe_α na mřížku kubickou plošně středěnou FCC (face centered cubic), přítomnou v oblasti existence austenitu Fe_γ (z oblasti původního feritu do oblasti austenitu) [102]. Teplota chemicko-tepelného zpracování nemá do teploty A_1 zásadní vliv na materiálové charakteristiky. Při překročení teploty austenitizace (A_{c3} , A_{cm}), v diagramu Fe-Fe₃C, dochází ke změně stavu struktury základního materiálu, tzn. výše teploty má pak zásadní vliv na mechanické charakteristiky a předchozí tepelné zpracování [105] a na rozpustnost primárního intersticiálního prvku – **uhlíku**.

Změnu rozpustnosti C nad teplotou austenitizace v rámci intersticiálního tuhého roztoku Fe znázorňuje Obr. 4.40. S rozpustností C v tuhém roztoku Fe_γ logicky roste i rozpustnost N, což je primární intersticiální prvek využívaný technologií nitridace [102].



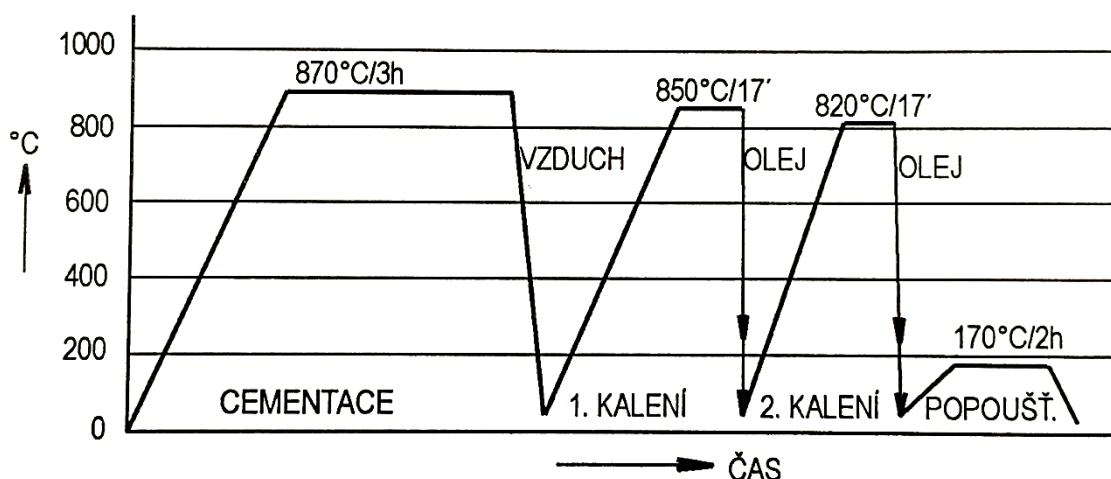
Obr. 4.40 – Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace [106]

V případě cementace pak hodnota teploty závisí na množství difundovaného C, přičemž hloubka cementace je ovlivňována parametrem času i teplotou procesu [107].

Cementační metody zahrnují cementaci v plynu, ve vakuu, v plazmě, solích nebo prášcích. Volba technologie závisí na konkrétním zadání a potřebách. Nejvíce rozšířenou technologií je cementace v plynu, která využívá jako zdroje uhlíku uhlovodíky, nejčastěji pak methan (CH_4), propan (C_3H_8) nebo butan (C_4H_{10}). Všeobecnou výhodou plazmové technologie je aplikace bez přístupu vzduchu za velmi nízkého tlaku, řádově (40–70) Pa. Cementace probíhá ve čtyřech základních fázích:

- předehřev na teplotu od (840–1040) °C z důvodu austenitizace v celém objemu materiálu s důrazem na deoxidaci povrchu materiálu snížením tlaku na (13–40) Pa (oceli obsahující Cr a Si nebo jiné prvky mající vysokou afinitu k O musí být během prvního kroku více evakuovány),
- nauhličování vlivem zvýšení tlaku v komoře z důvodu načerpání aktivního plynu,
- difúze probíhající při tlaku od (67–135) kPa,
- popuštění do oleje.

Diagram procesu cementace je uveden na Obr. 4.41.



Obr. 4.41 – Diagram procesu cementace [108]

Další možností je využít bezprostředně po cementaci technologii popouštění v plynu za vysokého tlaku. Ochlazení se realizuje ve směsi N a H při tlaku 2000 Pa, přičemž minimalizuje vznik napětí a distorzi povrchu.

Stejně tak je výhodnější použít popouštění v plynu z důvodu rovnoměrnosti ochlazení (nedochází pak k pasivaci povrchu). Práškové metody pak umožňují aplikaci vrstev v malých vsázkách [109]. Nejvhodnější oceli užívané pro proces cementace jsou takové, které obsahují méně než 0,2 % C [109]. Oceli musí být zakaleny a následně popouštěny. Cementované vrstvy disponují vysokou tvrdostí při značné houževnatosti základního materiálu. Aplikace technologie je prováděna v zásadě na materiály s martenzitickou či sorbitickou strukturou z důvodu zajištění vstupní tvrdosti při současném zachování požadované houževnatosti.

Tvrdost martenzitické vrstvy závisí primárně na koncentraci uhlíku. Maximální tvrdosti základního materiálu je dosaženo přibližně při eutektoidní koncentraci (Obr. 4.38). Při překročení eutektoidní koncentrace uhlíku dochází ke snížení tvrdosti vlivem vyššího podílu zbytkového austenitu [108]. K dílčímu snížení tvrdosti základního materiálu dochází stejně tak vlivem koncentrace legujících prvků.

Zejména pak v případě legování Ni nebo Cr je pokles tvrdosti větší. Základní materiál, někdy označován jako jádro (který má v případě zakalené součásti strukturu nízkouhlíkového martenzitu nebo jeho strukturní součásti), má nízkou tvrdost a vysokou houževnatost. Volba oceli pro cementaci primárně závisí na houževnatosti, pevnosti a tvrdosti základního materiálu po tepelném zpracování.

Pro aplikace cementace lze očekávat zvýšení podílu koncentrace C v povrchové vrstvě v intervalu (0,8–1) %. Z důvodu optimalizace vytvářených vrstev jsou využívány i technologie kombinující vliv N i C na povrchovou vrstvu součástí. Současné technologie poskytují možnost adaptability vrstvy dle požadavků na mechanické vlastnosti. Pro experimentální ověření byla navržena technologie cementace s následujícími parametry:

- cementace oceli ARMOX 500T
 - po dobu cca 16 h + izotermické zušlechťování 250 °C po dobu 8 h,
 - po dobu cca 16 h + izotermické zušlechťování 190 °C po dobu 1 h,
 - po dobu cca 16 h + izotermické zušlechťování 190 °C po dobu 1 h + kalení v kalícím lisu.

Ověření technologie zpracování a výroby jednotlivých variant vrstveného pancíře bylo provedeno v rozsahu:

- cementace oceli ARMOX 500T (celková doba cca 16 h) + izotermické zušlechťování 190 °C po dobu 1 h + kalení v kalícím lisu + popouštění 200 °C po dobu 2 h,
- cementace oceli SECURE 500 (celková doba cca 16 h) + kalení v kalícím lisu + popouštění 200 °C po dobu 2 h,
- cementace oceli SECURE 500 (celková doba cca 6,5 h) + kalení v kalícím lisu + popouštění 200 °C po dobu 2 h,
- cementace oceli SECURE 500 (celková doba cca 4,5 h) + kalení v kalícím lisu + popouštění 200 °C po dobu 2 h.

Návrh parametrů kovového pancíře ARMOX 600T

Při návrhu parametrů kovového pancíře je nutno vycházet z obecných požadavků na vlastnosti ocelových pancířů, tj. dosažení maximální tvrdosti a maximální možné houževnatosti, u které nedojde k destrukci pancíře křehkým lomem. Optimální konstrukční uspořádání této části kompozitního pancíře mohou být desky z pancéřové oceli osazené za sebou ve vzdálenosti 15 mm. Tato vzdálenost byla ověřena při návrhu pancéřování nástaveb vozidel. Pro vložení této sestavy do kompozitního pancíře, případně při jiném typu základní (zadní) desky je nutno tuto vzdálenost optimalizovat. V dalším budeme při návrhu přídatné (přední) desky vycházet z výše uvedeného uspořádání, kde je základní deska vyrobena z oceli ARMOX 500T [110] o tloušťce 6,0 mm. Konstrukční řešení spojení přední a zadní pancéřové desky není v této práci řešeno.

Volba materiálu a tepelného zpracování dílčích částí kompozitního pancíře (ocelových pancéřových desek) musí splňovat požadavky na požadovanou balistickou odolnost. Není tedy vhodné vycházet z nabídky běžných komerčních materiálů, u kterých není v některých případech zaručena úzká reprodukovatelnost vlastností, která není pro běžné použití nutná. Je nezbytné použít materiály doporučené pro balistickou ochranu, a to i v případech, kdy se předpokládá jejich další tepelné zpracování.

S ohledem na předpokládanou balistickou odolnost, při použití munice podle NATO STANAG 4569, AEP-55, příloha A, úroveň 1 až 3 je možné pro narušení jádra projektilu, použít přední desku z pancéřové oceli o vysoké tvrdosti (nad hodnotou 540 HBW). Tomuto požadavku odpovídají oceli ARMOX 600T [111] a SECURE 600 [112], SECURE 500 [113] u kterých je výrobci zaručena tvrdost po průřezu (570–640) HBW, případně oceli dalších výrobců [113] různých tloušťek. Pancéřové plechy z uvedených ocelí jsou zpracovány termomechanicky a popuštěny.

Do skupiny pancéřových ocelí o vysoké tvrdosti jsou řazeny také oceli pro tzv. duální pancíře, u kterých je na straně nástřelu požadována hodnota tvrdosti vrstvy nad 610 HBW. Pancéřové plechy z duálních ocelí jsou zpracovány chemicko-tepelným zpracováním, kalením a popuštěním. Do této skupiny jsou také řazeny pancéřové oceli s bainitickou strukturou, které jsou zpracovány izotermickým zušlechťováním.

Na základě výsledků dlouhodobě prováděných ostřelovacích zkoušek je možno konstatovat, že k narušení jádra střely dochází při kontaktu s pancířem o tvrdosti vyšší než 540 HBW (v přepočtu 575 HV). Tyto hodnoty tvrdosti se v rámci rozptylu měření pohybují na hranici dosažitelných tvrdostí termomechanicky zpracovaných a popuštěných ocelí. Tato hodnota tvrdosti je současně limitní maximální hodnota pro dosažení houževnatosti pancéřové oceli, při které nedochází k šíření trhlin vyvolaných interakcí s jádrem střely na velké vzdálenosti a tím vylamování pancíře. Mimo uvedený vliv tvrdosti je nutno brát v úvahu tloušťku pancíře a homogenitu povrchové vrstvy.

Pro zvýšení balistické odolnosti je možné mimo pancířů na bázi oceli použít kompozitní pancíře na bázi skelného laminátu a keramiky. Zpravidla jsou tyto typy pancířů ekonomicky nejvýhodnější a jejich použití záleží především na typu chráněného systému. Z těchto důvodů nejsou tyto typy pancířů v další části uvažovány.

Možností zvýšení balistické odolnosti (při současném snížení hmotnosti) termomechanicky zpracovaných pancířů je tedy aplikace chemicko-tepelného zpracování,

při kterém dochází ke zvýšení tvrdosti cementací a zušlechťením tepelným zpracováním s využitím bainitické přeměny v oblasti spodního bainitu technologií navrženou týmem profesora Bhadeshii [115]. Tato bainitická struktura je označována jako „superbainit“.

Zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy je také možno dosáhnout aplikací různých typů termických nástřiků, případně různých typů návarů, např. návaru obsahující zrna karbidu wolframu v martenzitické matici. Při výrobě desky a nanášení nástřiku nebo návaru se předpokládá, že maximální lokální teplota desky nepřekročí 1000 °C. Vzhledem ke skutečnosti, že také lokální dosažení výše uvedených teplot vede k nehomogenitám vlastností pancéřové desky, bude doplnění vrstvy nástřiku nebo návaru ke kompozitnímu pancíři řešeno jiným konstrukčním řešením než přímým nanášením na pancéřovou desku.

S ohledem na pevnostní a deformační požadavky na materiál pancéřové desky a dostupnost materiálů byly pro další zpracování vybrány oceli ARMOX 600T [111] švédské firmy SSAB Oxelösund, pancéřová ocel SECURE 600 [112] německé firmy ThyssenKrupp a pancéřová ocel se strukturou spodního bainitu o tvrdost (563–655) HBW označovaná jako „superbainit“ [115].

Chemické složení a základní mechanické vlastnosti oceli jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 4-22 – Chemické složení pancéřové oceli ARMOX 600T [111]

Cr [hm. %]	Si [hm. %]	Mn [hm. %]	Mo [hm. %]	Cr [hm. %]	Ni [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]
max. 0,47	0,10–0,70	max. 1,00	max. 0,70	max. 1,50	max. 3,00	max. 0,010	max. 0,005

Tab. 4-23 – Mechanické vlastnosti pancéřové oceli ARMOX 600T [111]

R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]	Tvrdost HBW
2000	1500	7	570–640

Rozměrová tolerance tloušťky dodávaných plechů do 13 mm se standardně pohybuje v rozsahu + 0,6 mm. Pracovní teplota pro zachování mechanických vlastností nesmí překročit 180 °C [111].

Tab. 4-24 – Chemické složení pancéřové oceli SECURE 600 [112]

C [hm. %]	Si [hm. %]	Mn [hm. %]	Mo [hm. %]	Cr [hm. %]	Ni [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]
max. 0,40	max. 0,80	max. 1,50	max. 0,50	max. 1,50	max. 1,50	max. 0,025	max. 0,010

Tab. 4-25 – Mechanické vlastnosti pancéřové oceli SECURE 600 [112]

R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]	Tvrdost HBW
2000	1500	8	570–640

Tolerance tloušťky plechů do 15 mm se standardně pohybuje v rozsahu + 0,8 mm. Provozní teplota plechu, nesmí pro zachování mechanických vlastností včetně tvrdosti, překročit teplotu 200 °C [116].

Tab. 4-26 – Chemické složení pancéřové oceli ARMOX 500T [110]

C [hm. %]	Si [hm. %]	Mn [hm. %]	Mo [hm. %]	Cr [hm. %]	Ni [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]
max. 0,32	max. 0,40	max. 1,20	max. 0,70	max. 1,00	max. 1,80	max. 0,010	max. 0,030

Tab. 4-27 – Mechanické vlastnosti pancéřové oceli ARMOX 500T [110]

R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]	Tvrdost HBW
1450–1750	1250	8	480–540

Tolerance tloušťky plechů do 12,9 mm se standardně pohybuje v rozsahu + 0,6 mm. Provozní teplota plechu, nesmí pro zachování mechanických vlastností včetně tvrdosti, překročit teplotu 200 °C [110].

Jak bylo výše uvedeno, balistická odolnost je závislá mimo jiné na mechanických vlastnostech materiálu po průřezu desky. U pancéřovaných ocelí jsou tyto vlastnosti vyjadřovány průběhem tvrdosti (HBW) po průřezu od strany nástřelu. Hodnota tvrdosti také udává odolnost desky určité tloušťky proti křehkému porušení.

Výše uvedené pancéřové plechy ARMOX 600T a SECURE 600 jsou termomechanicky zpracované materiály a z toho důvodu je možno předpokládat určitou nehomogenitu mechanických vlastností vyvolanou podílem zbytkového austenitu a řádkovitostí. Vliv těchto možných nehomogenit na balistickou odolnost se zpravidla zvyšuje se zmenšováním tloušťky plechu. V řešeném případě u plechů tloušťek (3,0–6,0) mm je pro zvýšení balistické odolnosti vhodné ve specifických případech plechy tepelně přepracovat.

V další části bude proveden příklad návrhu tepelného zpracování pancéřové oceli ARMOX 600T. Z dostupných výsledků naměřených na vzorcích oceli ARMOX 600 byly zjištěny odchylky v hodnotách tvrdosti výrobcem dodaných plechů. Tyto odchylky jsou uvedené Tab. 4-28.

Tab. 4-28 – Hodnoty tvrdosti dodaných vzorků

dodaný materiál 1	dodaný materiál 2	materiálový list
HBW 600 ± 23	HBW 563 ± 16	HBW 570–640

Dodané pancéřové plechy je nutné před tepelným zpracováním upravit na požadované rozměry a broušením (0,1–0,2) mm odstranit oduhličenou vrstvu.

Pro posouzení nehomogenit vlastností po termomechanickém zpracování byl dodaný **vzorek 1** popouštěn na teplotě 200 °C po dobu 2 h a ochlazen ponořením do vody. Parametry popouštění byly zvoleny na základě stávajících obecných podmínek používaných pro popouštění pancéřových plechů. Popouštěním vzorku došlo ke zvýšení hodnoty tvrdosti z HBW 600 ± 23 na hodnotu HBW 620 ± 50. Jak je ale patrné, ke snížení hodnoty rozptylu tvrdosti nedošlo.

Z toho důvodu byl dodaný **vzorek 2** zakalen a popuštěn. Parametry tepelného zpracování výrobce neudává, a proto musely být tyto parametry určeny na základě obecných postupů. Pro určení kritické teploty A_{c3} byla použita obecná parametrická rovnice ve tvaru:

$$A_{c3} [^{\circ}\text{C}] = 854 - 179 [\% \text{C}] - 14,179 [\% \text{Mn}] + 44,5 [\% \text{Si}] - 17,8 [\% \text{Ni}] - 1,5 [\% \text{Cr}] \quad (4-17)$$

platná v rozsahu chemického ložení uvedeném v Tab. 4-29:

Tab. 4-29 – Definiční obor parametrické rovnice

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	P	S
0,13–0,43	0,08–0,51	0,38–1,30	0,09–1,91	0,02–0,85	0,03–2,78	0,01–0,33	-	-

Tab. 4-30 – Chemické složení dodaného vzorku 2

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	P	S
0,43	0,26	0,75	0,49	0,34	2,08	-	0,004	-

Po dosazení skutečných hodnot chemického složení do parametrické rovnice dostáváme kritickou teplotu $A_{c3} = 733 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a s využitím obecného vztahu pro určení teploty austenitizace $T_A = (50-70) + A_{c3}$ dostáváme po zaokrouhlení na desítky $^{\circ}\text{C}$ teplotu $T_A = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Při dřívějších experimentech s tepelným zpracováním pancéřových ocelí s chemickým složením blízkým horní hranici definičního oboru bylo zjištěno, že pro dosažení maximální tvrdosti pancíře při jeho maximální houževnatosti je vhodné teploty austenitizace určené z parametrických rovnic pouze na základě chemického složení o cca 15 % zvýšit. Pro kalení dodaného vzorku 2 tedy byla zvolena teplota austenitizace $T_A = 930 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pro určení doby austenitizace byl použit obecný vztah $\tau_A = 1.5$ [vztažný rozměr]. Doba austenitizace je měřena od vyrovnání teplot v peci po vložení vzorku.

Pro model podmínek ochlazování byl zvolen vzorek pancéřového plechu o tloušťce 6,0 mm a rozměrech 250 mm x 250 mm. Tloušťka plechu 6,0 mm byla zvolena jako limitní

hodnota, kterou je možno použít v kompozitním pancíři a u které bude zaručena po kalení martenzitická struktura s minimálním podílem zbytkového austenitu. V případě změny rozměru pod tuto mez nehrozí při kalení vznik nemartenzitických strukturních složek.

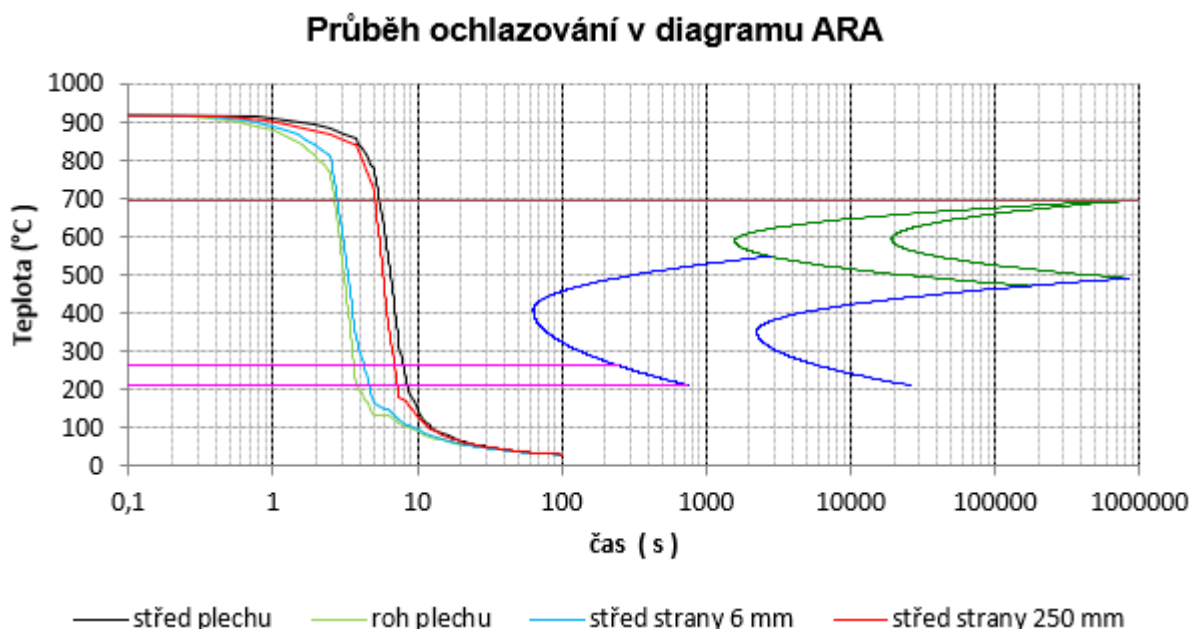
Z hodnot skutečného chemického složení uvedených v Tab. 4-30 byl s využitím softwaru TT Styl 2.1 namodelován diagram anizotermického rozpadu austenitu uvedený na Obr. 4.42.

Křivky chladnutí byly modelovány pro body 1–4 uvedené na Obr. 4.43 (bod 1: střed povrchu strany; tloušťka: 6,0 mm; bod 2: střed povrchu strany 250 mm; bod 3: střed průřezu plechu a bod 4: roh vzorku plechu) pro teploty austenitizace 930 °C.

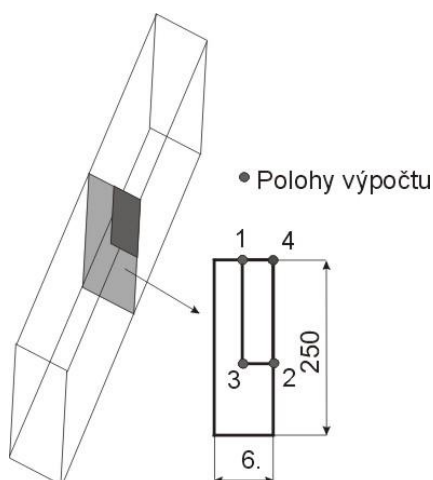
Křivky chladnutí pro ochlazování do vodní lázně o teplotě 30 °C z teploty austenitizace $T_A = 930$ °C a jsou uvedeny na Obr. 4.42.

Z porovnání křivek chladnutí a křivek rozpadu přechlazeného austenitu uvedeného na Obr. 4.42 plyne, že kalením uvedeného vzorku 2 bude celý průřez vzorku tvořen martenzitickou strukturou s minimálním podílem zbytkového austenitu.

Zakalené vzorky vykazují vysoké hodnoty tvrdosti, ale také vysokou náchylnost ke křehkému porušení. Výsledné hodnoty tvrdosti vzorků včetně rozptylu jsou uvedeny na Obr. 4.44.



Obr. 4.42 – Porovnání křivek chladnutí s diagramem anizotermického rozpadu austenitu [118]

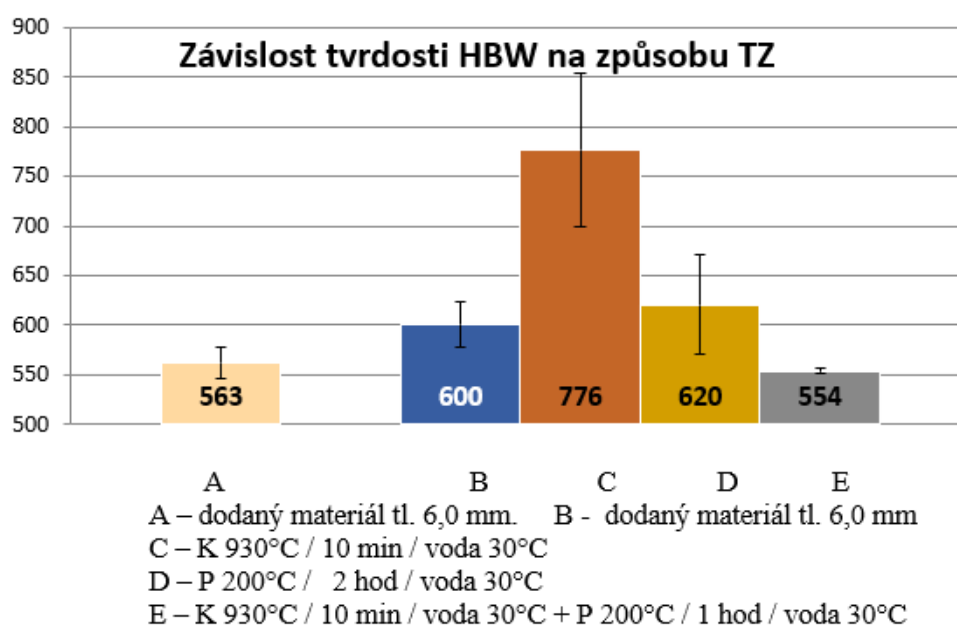


Obr. 4.43 – Polohy bodů pro které byly modelovány křivky chladnutí [118]

Jak je patrné z Obr. 4.44, zvýšení hodnoty tvrdosti tepelným zpracováním je možné pouze za předpokladu snížení houževnatosti vedoucí při kontaktu jádra střely s pancířem ke křehkému porušení.

Návrh tepelného zpracování pancíře SECURE 600

Ocel SECURE 600 patří do skupiny termomechanicky zpracovaných ocelí. Podobně jako u oceli ARMOX 600T o tloušťce plechu 6,0 mm platí také pro pancéřovou ocel SECURE 600, že při ostřelování výše uvedenou municí jsou výsledky testů nevyhovující. Klasickým kalením a následným popuštěním této oceli nedojde k významnému zvýšení hodnoty tvrdosti a při snížení teploty popouštění pod 200 °C dochází k významnému poklesu houževnatosti.



Obr. 4.44 – Vliv tepelného zpracování na tvrdost pancíře ARMOX 600T

Pro zajištění požadované balistické odolnosti při dostatečné houževnatosti a minimální hmotnosti je tedy nutné zvolit sycení pancíře uhlíkem a následné kalení a popouštění nebo provést izotermické kalení pancíře.

Pro splnění požadavků na balistickou odolnost, při dodržení dostatečné houževnatosti a snížení hmotnosti na možné minimum, byly přídatné pancéřové desky (přední) chemicko-tepelně zpracovány cementováním a následným tepelným zpracováním [117]. Pro chemicko-tepelné zpracování byla zvolena ocel SECURE 500 s relativně nízkou výchozí koncentrací C 0,32 %. Pro zvýšení balistické odolnosti byla zvolena oboustranná cementace s kalením v kalícím lisu a následným popouštěním na teplotě 200 °C po dobu 2 h.

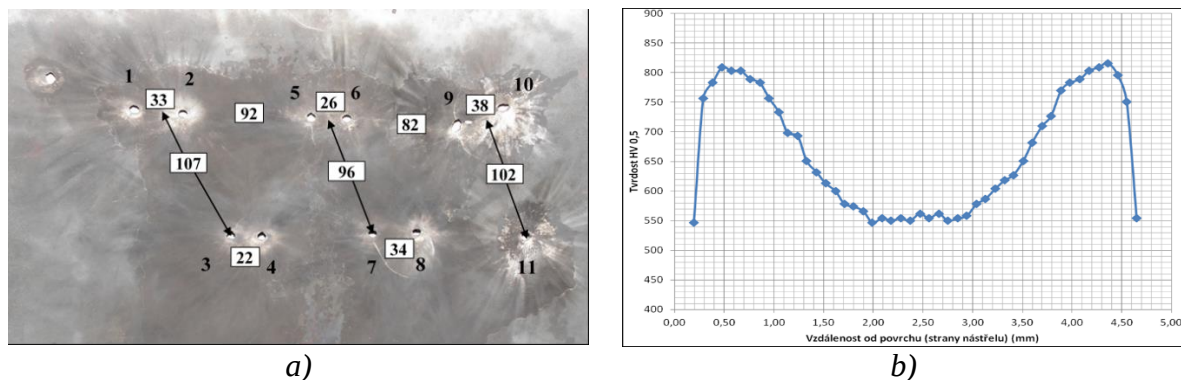
Po tepelném zpracování byla po průřezu desky provedena kontrola tvrdosti HV 0,5 od strany nástřelu, metalografický rozbor a ostřelovací zkoušky výše uvedené sestavy. Na základě ostřelovacích zkoušek byla vyhodnocena odolnost pancéřové desky proti křehkému porušení.

Cementace byla provedena s odstupňovaným uhlíkovým potenciálem, po proměnnou dobu. Po cementaci bylo provedeno kalení v kalícím lisu a následné popouštění při teplotě 200 °C po dobu 2 h. V průběhu experimentů se také ukázal vliv tloušťky plechu na odolnost čelní desky proti křehkému porušení. Příklad nevyhovujícího výsledku je uveden na Obr. 4.45 čelní desky z cementované, kalené a popouštěné oceli SECURE 500 tl. 4,6 mm po ostřelovací zkoušce, u které se projevila zvýšená náchylnost ke křehkému porušení.



Obr. 4.45 – Zkouška balistické odolnosti opakovanými zásahy na vzdálenost 25 mm (tzv. „multihit“) [117]

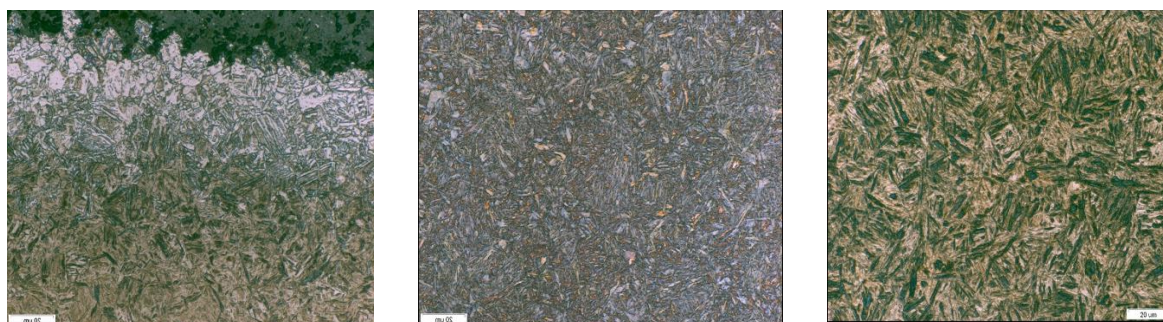
Příklad vyhovujícího chemicko-tepelného zpracování čelní desky o tloušťce 4,8 mm z oceli SECURE 500 je uveden na Obr. 4.46. Zkouška byla hodnocena jako vyhovující. Průměrná hodnota dopadové rychlosti byla $(864,1 \pm 10,3) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a maximální hodnota dopadové rychlosti dosáhla hodnoty $892,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pancéřová deska vykazovala po nástřelech minimální náchylnost ke křehkému porušení. Vyhovující balistická odolnost sestavy je podmíněna použitím vzduchové mezery mezi přídatným a základním pancířem (bez zařazení vzduchové mezery je zkouška nevyhovující).



Obr. 4.46 – Cementovaný pancíř po ostřelovací zkoušce

a) Oboustranně cementováno, kaleno a popuštěno. Čelní deska z oceli SECURE 500, tl. 4,8 mm po ostřelovací zkoušce, minimální náchylnost ke křehkému porušení [117]; b) Průběh tvrdosti HV 0,5. Minimální hodnota tvrdosti HV0,5 = 547

Příklady mikrostruktury jsou uvedeny na Obr. 4.47. Do hloubky (50–60) μm je patrná oduhličená vrstva s proměnným obsahem C, tvořená směsí popuštěného martenzitu a útvarů feritu. Pod oduhličenou vrstvou přechází struktura v základní strukturu tvořenou martenzitem popuštěným na teplotu 200 °C odpovídající obsahu C na povrchu cementační vrstvy. Tvrdost struktury u povrchu klesá v důsledku oduhličení na hodnotu cca $\text{HV } 0,5 = 547$.



Obr. 4.47 – Mikrostruktura cementovaného pancíře z oceli SECURE 500, tl. 4,8 mm
a) mikrostruktura povrchu; b) mikrostruktura v hloubce 0,5 mm pod povrchem; c) mikrostruktura v hloubce 2 mm pod povrchem

Mikrostruktura v hloubce 2 mm pod povrchem na straně nástřelu je tvořena martenzitem popuštěným na teplotu 200 °C a vyšší hustotou částic bainitu. Tvrdost struktury je

HV 0,5 = 547–554. Hodnota mikrotvrdosti odpovídá obsahu C základního materiálu, tj. martenzitu popuštěného na teplotu 200 °C. Tvrdost struktury je HV 0,5 = 803 [83].

Jak je patrné z výsledků ostřelovacích zkoušek, je nutné, při volbě podmínek tepelného zpracování a konfigurace sestavy pancířů, vždy pro každou změnu potvrdit odolnost proti průniku novou ostřelovací zkouškou. Tato podmínka platí i v případě, že bude sestava součástí kompozitního pancíře.

Zvýšení balistické odolnosti sestavy s přídavným pancířem je možné také zvýšením tvrdosti přídavného pancíře **izotermickým zušlechtěním oceli** s obsahem 0,98 % C. Izotermicky vytvořená struktura spodního bainitu dosahuje tvrdosti v rozsahu HBW = 563–655. Uvedená technologie byla publikována v práci [115], kde byla pro izotermické zušlechtění použita ocel o chemickém složení uvedeném v Tab. 4-31.

Tab. 4-31 – *Pancéřová ocel s bainitickou strukturou [hm. %] [115]*

C	Si	Mn	Mo	Cr	V
0,98	1,46	1,89	0,26	1,26	0,09

Ocel byla ohřata na austenitizační teplotu, ochlazená na teplotu 200 °C a izotermicky zušlechtována po dobu 5 dnů. Teplotní interval pro izotermickou přeměnu byl zvolen v rozsahu Ms až 250 °C [115].

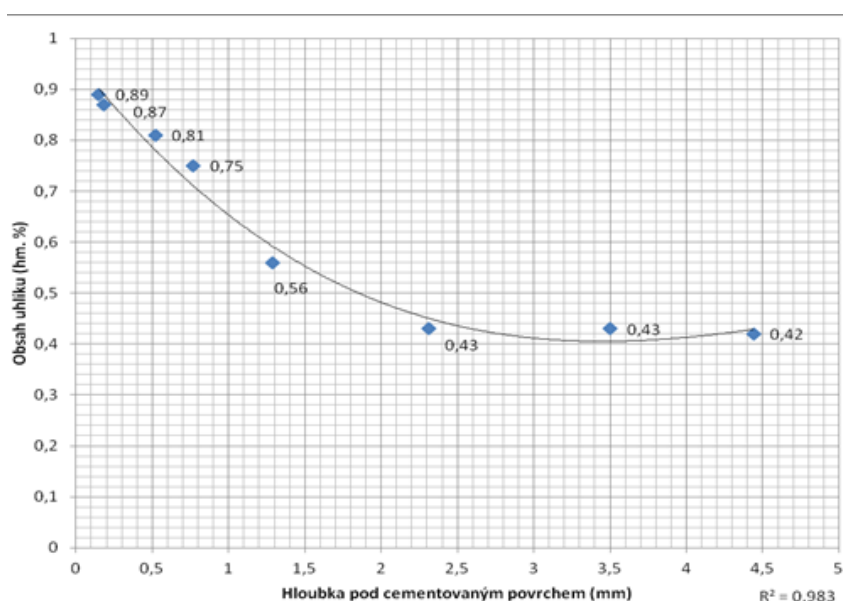
Vzhledem ke skutečnosti, že ocel uvedeného složení není komerčně vyráběna (pro experimenty v práci [115] byla připravena speciální tavba) a doba trvání izotermického rozpadu austenitu je ekonomicky náročná, byla tato technologie v práci [118] modifikována. Jako polotovár byl zvolen termomechanicky zpracovaný pancéřový plech z oceli ARMOX 500T o tloušťce 4,0 mm. Volba oceli byla podmíněna relativně nízkým obsahem C max. 0,32 hm. % a stupněm legování zaručující v průběhu ochlazení na teplotu solné lázně stabilitu přechlazeného austenitu. Tloušťka přídavného pancíře vycházela z požadované maximální hmotnosti sestavy.

S využitím programu TT STEEL 2.1 byly zkonstruovány diagramy izotermického rozpadu austenitu oceli použité pro tvorbu „superbainitu“ a izotermického rozpadu austenitu u oceli ARMOX 500T včetně modelování křivek chladnutí při ochlazování plechu z teploty cementace na teplotu solné lázně. Na základě rozboru diagramů IRA a s využitím vztahu pro výpočet teploty Ms z chemického složení oceli [hm. %] ve tvaru 4-17 [119], byla jako limitní hranice obsahu uhlíku pro dosažení požadované struktury spodního bainitu zvolena koncentrace C 0,52 hm. %.

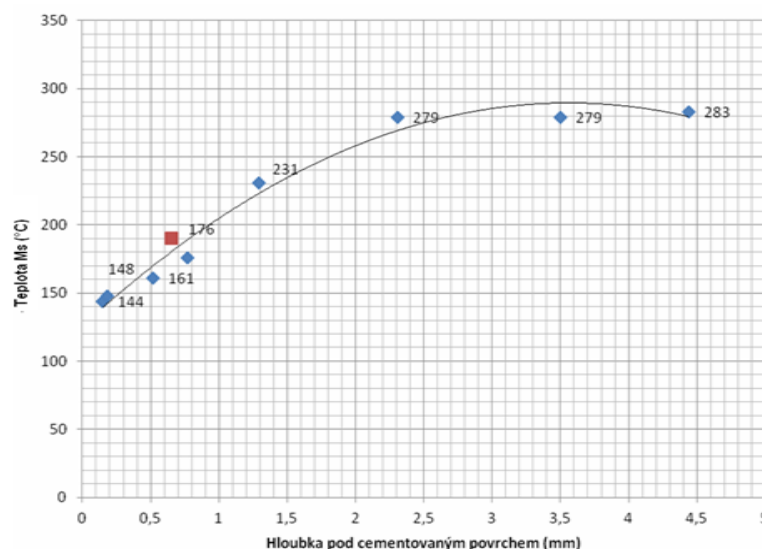
$$M_s = 512 - (493 \text{ C}) - (16,9 \text{ Ni}) - (15 \text{ Cr}) - (9,5 \text{ Mo}) + (217 \text{ C}^2) - (71,5 \text{ C.Mn}) - (67,6 \text{ C.Cr}) \quad (4-18)$$

Parametry cementace byly na základě této hodnoty zvoleny tak, aby obsah C v povrchové vrstvě nástřelné hrany dosáhl (0,70–0,80) hm. % a požadovaná tloušťka cementační vrstvy byla 2,0 mm. V komerční kalírně byla na lince CODERE SA provedena cementace v rozsahu teplot (800–920) °C po dobu cca 13 h. Po ukončení cementace byly plechy přichlazeny na teplotu 190 °C a po dobu 1 h temperovány v solné lázni AS 140. Po vyjmutí z lázně byly vzorky dochlazeny na vzduchu. Po provedené cementaci a izotermickém zušlechťení byla provedena kontrola obsahu C a modelována změna teploty M_s jako funkce koncentrace C. Průběh závislosti obsahu C a teploty M_s na vzdálenosti od povrchu je uveden na Obr. 4.48 a Obr. 4.49.

Pro vznik požadované struktury spodního bainitu se teplota rozpadu austenitu musí pohybovat nad teplotou M_s a nepřekročit teplotu 250 °C. Tato podmínka je splněna do hloubky cca 0,7 mm. Se snižujícím se obsahem C a vzrůstající vzdáleností od povrchu se zvyšuje teplota M_s a struktura je tvořena směsí martenzitu popuštěného na teplotu solné lázně a spodního bainitu.



Obr. 4.48 – Průběh závislosti obsahu C na vzdálenosti od povrchu

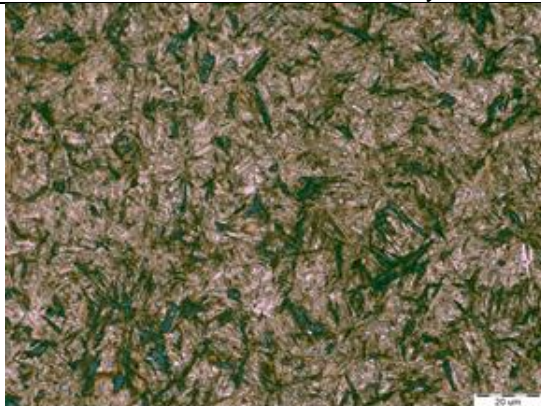


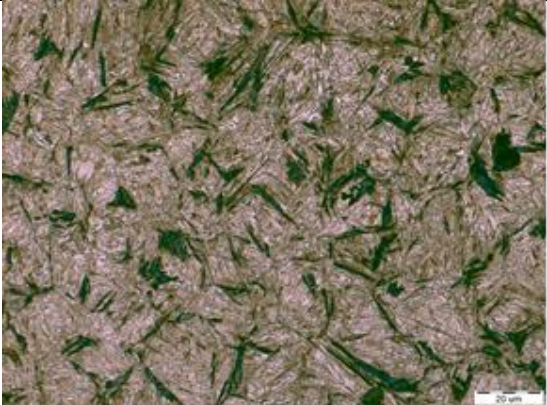
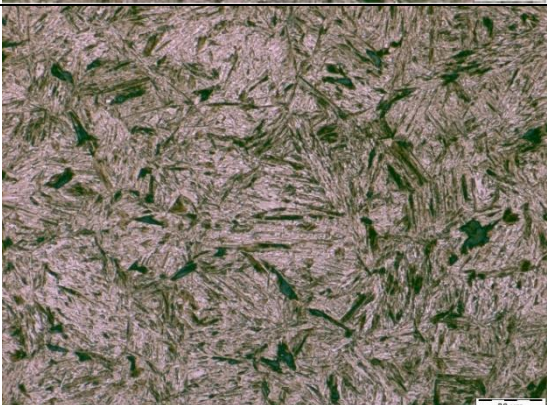
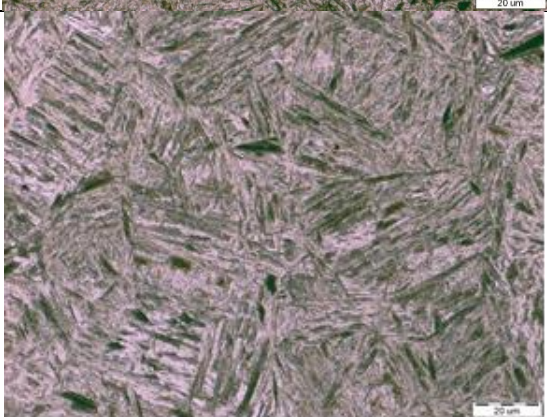
Obr. 4.49 – Průběh závislosti obsahu Ms na vzdálenosti od povrchu

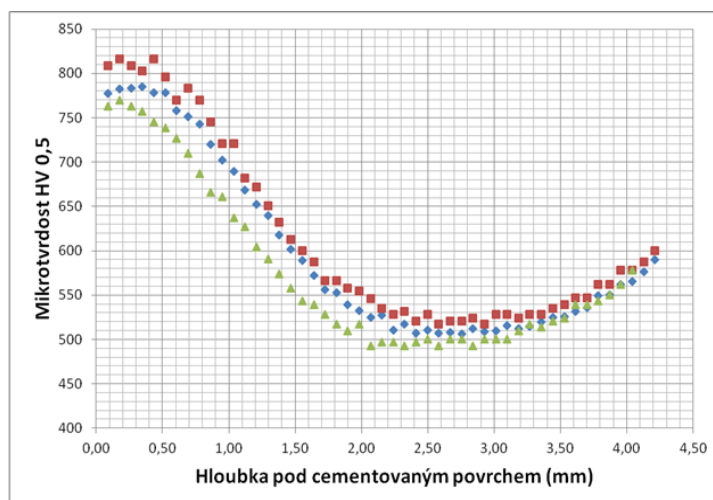
Po provedení tepelného zpracování byly odebrány a připraveny vzorky pro kontrolu koncentrace C, měření průběhu tvrdosti, metalografický rozbor, kontrolu houževnatosti a ostřelovací zkoušky výše uvedené sestavy.

V Tab. 4-32 jsou uvedeny změny mikrostruktury (podílu spodního bainitu a popuštěného martenzitu a změny hodnot tvrdosti HV_{0,5} v závislosti na vzdálenosti od strany nástřelu čelní desky). Průběh minimálních, maximálních a středních hodnot tvrdosti HV_{0,5} je uveden na Obr. 4.50. Z průběhu je patrné, že do hloubky 2,0 mm od strany nástřelu je tvrdost mikrostruktury z hlediska požadavku na tvrdost pancéřových plechů vyhovující. Nárůst hodnoty tvrdosti na zadní straně desky je pravděpodobně spojen s průnikem cementační atmosféry pod plech kryjící při cementaci necementovanou stranu pancíře.

Tab. 4-32 – Změna mikrostruktury a tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od strany nástřelu

	Mikrostruktura v houbce 0,2 mm od strany nástřelu. Konc. C dosahuje průměrné hodnoty 0,86 hm. %. Mikrostruktura je tvořena převládajícím podílem spodního bainitu, jemnými karbidickými precipitáty a minimálním podílem zbytkového austenitu. Tvrdost mikrostruktury dosahuje hodnoty (763–770) jednotek HV_{0,5}.
---	--

	Mikrostruktura v hloubce 0,6 mm od strany nástřelu. Mikrostruktura je tvořena převládajícím podílem spodního bainitu, jemnými karbidickými precipitáty a minimálním podílem zbytkového austenitu. Tvrdost mikrostruktury dosahuje hodnoty cca 745 jednotek HV0,5.
	Mikrostruktura v hloubce 1,0 mm od strany nástřelu. Mikrostruktura je tvořena spodním bainitu a zvyšující se podílem popuštěného martenzitu (190 °C / 1 h). Tvrdost mikrostruktury dosahuje hodnoty cca 666 jednotek HV0,5.
	Mikrostruktura v hloubce 2,0 mm od strany nástřelu. Mikrostruktura je tvořena popuštěným martenzitem s relativně nízkým podílem spodního bainitu. Tvrdost mikrostruktury dosahuje hodnoty 510 HV0,5.



Obr. 4.50 – Průběh hodnot tvrdosti HV0,5 v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Vyhodnocení vlivu cementace na balistické vlastnosti

Obecně je možno průbojný účinek střely vyjádřit na základě následujících skupin faktorů vycházejících se vzájemné interakce střely a pancíře (překážky):

- Balistické charakteristiky:
 - ráže, tvar a hmotnost střely,
 - dopadová rychlost,
 - množství energie akumulované střelou na úkor energie využitě při průniku pancířem. V tomto případě je velmi důležitým faktorem schopnosti střely proniknout pancířem poměr tvrdosti střely a povrchové vrstvy pancíře.
- Vlastnosti pancíře – geometrie, tloušťka, fyzikální vlastnosti dané typem materiálu, strukturou, homogenitou, pevnostními a deformačními charakteristikami v rozsahu dopadové rychlosti. Jedním z hlavních faktorů je průběh tvrdosti od dopadové plochy přes celý průřez pancíře.
- Geometrie prvotní interakce střely a pancíře.

Za základní parametr, ze které je možno vycházet při hodnocení interakce střely a pancíře je možné považovat dopadovou kinetickou energii střely danou obecným vztahem:

$$E_{k,d} = \frac{1}{2} m_d \cdot v_d^2 \quad (4-19)$$

kde: m_d – hmotnost střely,
 v_d – dopadová rychlost střely.

Kinetická energie střely vyjádřenou obecnou rovnicí je pro určení reálné měrné kinetické energie nutné dále upravit podle parametrů pancíře a geometrie kontaktu střely a pancíře. Průbojný účinek střely je možno stanovit na základě různých analyticky odvozených vztahů, u kterých jsou přijata různá omezení (např. nedochází k deformaci střely při průchodu pancířem, neuvažuje se energie spotřebovaná na porušení povrchové vrstvy pancíře, případně nejsou uvažovány změny teploty při průniku střely pancířem apod.) nebo je průbojný účinek střely stanoven na základě experimentálně určených dat, např. podle vztahů stanovených De-Marrem [120]. Vztah zohledňující kvalitu pancíře určením limitní rychlosti střely provedeným na základě hodnoty HBW, tloušťky a hmotnosti pancíře a výšky hlavové části střely odvodil Gebaude [121]:

$$v_{lim} = 125 \cdot \sqrt{A} \cdot \sqrt{\frac{d^2 \cdot h_0^2}{m_q \cdot (h_0 + h_H) - 3 \cdot d^2 \cdot h_0^2}} \quad (4-20)$$

kde: d – ráže střely,
 m_q – hmotnost střely,
 h_H – výška hlavové části těla střely,
 h_0 – tloušťka pancíře,
 Δ – tvrdost HBW.

Uvedený vztah, který je platný pro homogenní ocelový pancíř, byl Pobořilem a Primusem rozšířen pro heterogenní povrchově kalené pancíře [121]:

$$v_{lim} = 125 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta_{stř} \cdot \left(1 - \frac{\mu}{h_0}\right)} \cdot \sqrt{\frac{d^2 \cdot h_0^2}{m_q \cdot (h_0 + h_H) - 3 \cdot d^2 \cdot h_0^2}} \quad (4-21)$$

kde: $\Delta_{stř}$ – střední tvrdost pancíře,
 μ – vzdálenost těžiště plochy vymezené křivkou tvrdosti po průřezu od nástřelné plochy pancíře.

Uvedené vztahy jsou platné pro rychlosti dopadu střely menší než $2000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, u kterých není pro popis děje využívána hydrodynamická teorie penetrace. Sestava základního pancíře a přídatné pancéřové desky upravené různými způsoby tepelného a chemicko-tepelného zpracování vychází z požadavku zvýšení balistické odolnosti při minimalizaci hmotnosti sestavy a minimální finanční náročnosti [117]. Ostřelovací zkouška sestavy s přídatným pancířem podle stupně 3 NATO STANAG 4569, AEP-55 byla provedena nábojem 7,62 mm x 54R se střelou AP-I B32 s dopadovou rychlostí $(854 \pm 20) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a dopadovým úhlem $\Theta = 0^\circ$. Sestava se skládala se základního pancíře z oceli ARMOX 500T tloušťky 6,3 mm, o rozměrech (500x500) mm a přídatného pancíře z izotermicky zpracované oceli ARMOX 500T tloušťky 4,3 mm a rozměrech (500x500) mm. Vyhodnocení ostřelovací zkoušky je uvedeno v Tab. 4-33.

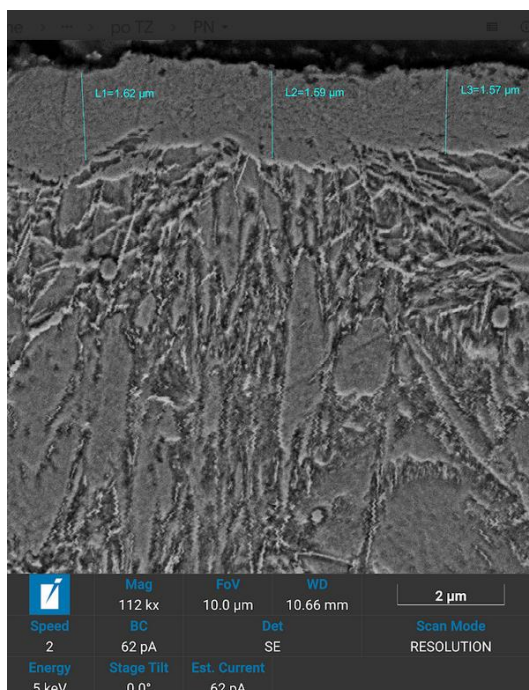
Tab. 4-33 – Vyhodnocení ostřelovací zkoušky

Číslo sestavy	Počet nástřelů v sestavě	Hodnocení nástřelů	Vyhodnocení požadavku hladiny 3 STANAG 4569, AEP-55 na odolnost proti průrazu
1	10	10 x vyhovující	SPLŇUJE

4.5.8 Vytváření vrstev pod teplotou tranformace austenitu

Nitridací se obecně rozumí proces chemicko-tepelného zpracování, při němž dochází k difuzi N z nitridačního prostředí do povrchové vrstvy zvoleného kovového materiálu [107]. Nitridace může být aplikována v různých mediích, jako je plyn nebo plazma [122]. Význam technologie nitridace spočívá ve vytváření dispersních částic, nitridů, v krystalové mřížce kovu, což s sebou nese patřičné zlepšení mechanických vlastností vlivem vytvořené povrchové vrstvy [123], [124], [125].

Proces nitridace nebo karbonizace probíhá při teplotách nižších, než je teplota austenitizace A_{c1} v diagramu Fe-Fe₃C [126]. Uvažujeme tedy proces difuze v tuhém intersticiálním roztoku Fe a C v oblasti výskytu feriticko-perlitické struktury. V případě zvýšení teploty procesu nad uvedenou teplotu A_{c3} , A_{cm} dochází ke změně krystalové mřížky kovu z FCC na BCC a změně struktury z feritické na austenitickou. Nespornou výhodou je vyšší rozpustnost N nebo C v Fe_α, avšak pak dochází k značné distorzi mřížky a povrchu [127]. Příčný řez nitridovanou vrstvou je zobrazen na Obr. 4.51.



Obr. 4.51 – Příčný řez nitridovanou vrstvou

V případě ocelí podeutektoidních probíhá proces difuze pod čarou A_{c1} , která reprezentuje maximální teplotu, při které ještě nedochází k transformaci feriticko-perlitické struktury na strukturu austenitu, popř. A_{c3} v závislosti na chemickém složení materiálu (obsahu C), u nadeutektoidních ocelí pak difuze probíhá pod čarou A_{c1} , popř. A_{cm} . Při difuzi dochází ke změně parametru mřížky vlivem nárůstu intersticiálních prvků uvnitř matrice [129]. Výsledkem procesu nitridace je vytvořená nitridovaná vrstva, jejíž parametry závisí na:

- chemickém složení nitridovaného materiálu,
- složení nitridační atmosféry,
- parametrech procesu chemicko-tepelného zpracování (teplota, tlak, čas).

V rámci nitridované vrstvy se nejčastěji vytváří dvě vrstvy [107], [130], [129], [124], [131]:

- sloučeninová vrstva⁴ je z velké části tvořena nitridy železa ($\gamma'-\text{Fe}_4\text{N}_{1-x}$; $\epsilon-\text{Fe}_3\text{N}_{1\pm x}$) a její tloušťka závisí na parametrech nitridace a chemickém složení oceli,
- difuzní vrstva je vytvořená pod sloučeninovou vrstvou - v případě oceli bez obsahu legujících prvků jsou v rámci vrstvy vytvořeny pouze nitridy železa; v ostatních případech i nitridy legujících prvků v závislosti na afinitě prvků k N (Al, Cr, Mo, V, atd.).

Základním přínosem nitridace je vytvoření rezistentní vrstvy, která má vyšší odolnost proti opotřebení, korozi a tím zvyšuje životnosti součástí. Ve vytvořené difuzní vrstvě dochází ke změně uspořádání v rámci krystalické mřížky, vzniku vnitřního napětí a zvýšení tvrdosti [129], [132], [123], [128], [133], [134], [136].

Všeobecně platí, že každá z vytvořených vrstev má specifické vlastnosti, přičemž sloučeninová vrstva je vhodná pro zlepšení zabíhavosti součástí a u většiny ocelí (kromě austenitických) zvyšuje odolnost proti korozi [107], [128], [136]. V závislosti na chemickém složení nebo parametrech procesu může být vznik sloučeninové vrstvy potlačen nebo může být sloučeninová vrstva vlivem zařazení následné operace žíhání tzv. oddifundována.

Nitridace v solích není v dnešní době perspektivní technologií, vzhledem k velmi nebezpečnému médiu používanému pro proces nitridace, tzv. kyanidových solí. Hlavním důvodem je komplikace při nakládání s odpady.

Ani v současné době není oblast difúze N a C známa. V mnohých pracích jak tuzemských, tak i zahraničních byl zkoumán vliv uhlíku v rámci procesů spojených s difúzí vždy odděleně [137], [97], [138]. V současné době nejsou známy výsledky prací, které by přesně shrnovali závěry z oblasti difúze intersticiálních prvků C a N a jejich vzájemné vazby [131], [136]. Stejně tak problematika hloubky difuzní vrstvy v ocelích není přesně popsána ani z hlediska obsahu C nitridované oceli, ani z hlediska obsahu množství legujících prvků či jejich koncentrací.

⁴ Sloučeninová vrstva je někdy označována jako lem nitridů či bílá vrstva. V anglických odborných textech se můžeme setkat s označením „compound layer“ nebo „white layer“. Zpravidla je tvořena směsí nitridů železa o tloušťce do 10 μm .

Nezbytným prostředkem pro aplikaci nitridace či karbonitridace je speciální zařízení, tj. vhodný, hermeticky uzavřený prostor (pec), v němž na součásti při určité teplotě (zpravidla (490–580) °C) působí prostředí obsahující N. V rámci průmyslové aplikace chemicko-tepelného zpracování jsou pro vytváření nitridovaných vrstev využívána různá média.

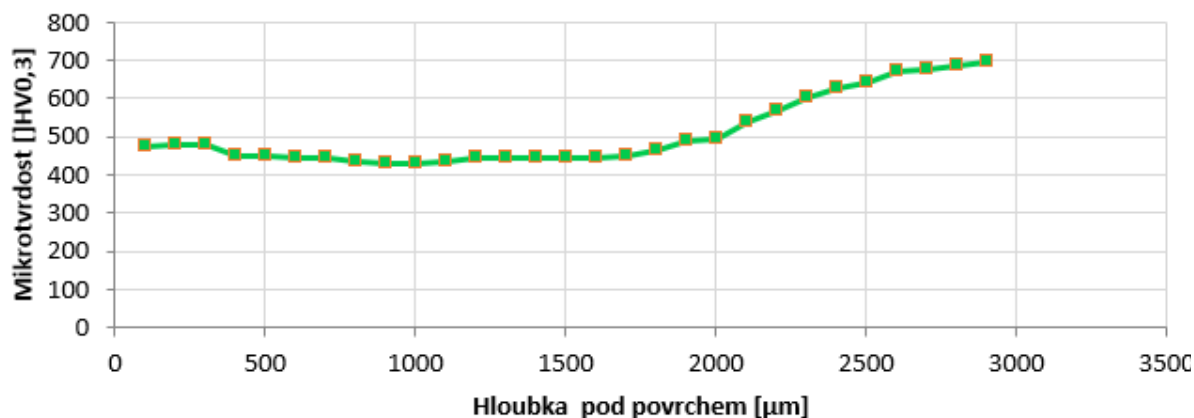
K nejrozšířenějším druhům nitridace patří nitridace v plynu. V povrchové části je v prostředí čpavku vytvářena nitridovaná vrstva, obsahující nitridy Fe (v případě karbonitridace karbonitridy) a legujících prvků. Standardně je nitridovaná vrstva složena ze sloučeninové a difuzní vrstvy. Hloubka sloučeninové vrstvy, má-li být vytvořena, závisí na chemickém složení materiálu, na teplotě a době procesu. Hloubka sloučeninové vrstvy je zpravidla (5–10) μm . Jedná se o křehkou, velmi tvrdou vrstvu obsahující nitridy Fe a legujících prvků. V případě technologie karbonitridace je povrchová vrstva složena z karbonitridů [135].

Nitridovaná či karbonitridovaná vrstva zajišťuje:

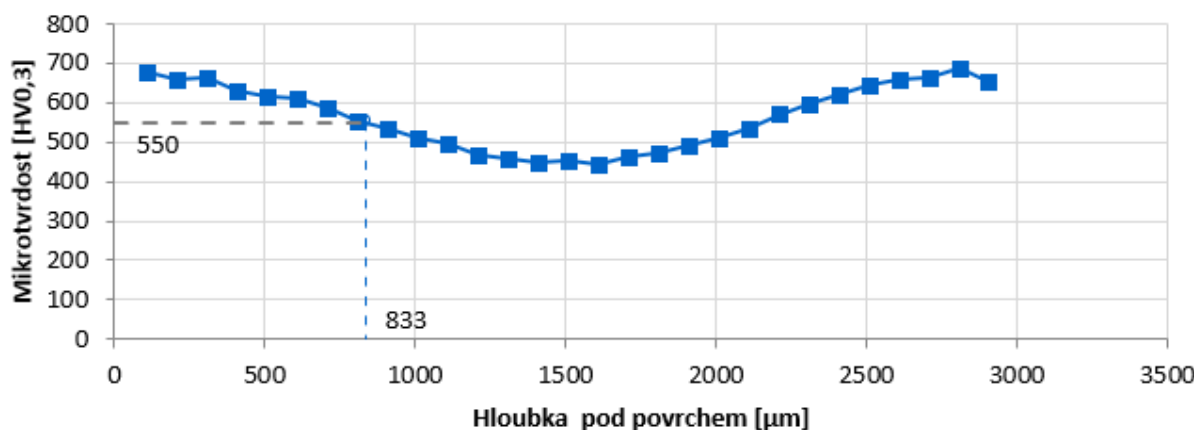
- vyšší odolnost povrchu součástí proti korozi,
- snížení ořezu povrchu vlivem snížení koeficientu tření,
- zvýšení odolnosti proti opotřebení.

Proces nitridace i karbonitridace může být zvolen jednostupňový nebo dvoustupňový. Nejčastěji využívanou atmosférou pro proces nitridace v plynu je amoniak nebo amoniak a dusík (v případě karbonitridace pak uhlovodík, propan nebo methan, endogas nebo oxid uhličitý nebo uhelnatý). Nitridaci nebo karbonitridaci v plynu lze aplikovat na standardní středně legované uhlíkové oceli. Jejich aplikace na korozivzdorné oceli není efektivní vzhledem k pasivaci povrchu oceli oxidem chromu [133], [137].

Pro dosažení zvýšení efektivity procesu vytváření vrstvy se rovněž využívají technologie plynné atmosféry (dochází k řízené cirkulaci atmosféry). Z hlediska vývoje technologie vznikají nová zařízení umožňující optimalizaci procesu vhodným systémem vyhodnocování disociace plynu (dosud je disociace řízena pouze optimalizací průtoků jednotlivých složek atmosféry, čímž nelze efektivně řídit disociaci plynu a tím optimalizovat difuzní potenciál). V rámci procesu je možné operativně kontrolovat řízenou disociaci ověřováním parciálního tlaku C nebo N v zařízení. Tímto způsobem lze přesně definovat nauhlčovací nebo nitridační potenciál, který má významný vliv na utváření difuzní vrstvy. Technologie nitridace v plynu byla aplikována na kovový pancíř HARDOX 450, který byl nitridován jednostranně i oboustranně, viz Obr. 4.52 a Obr. 4.53.



Obr. 4.52 – Jednostranná nitridace v plynu 50 h



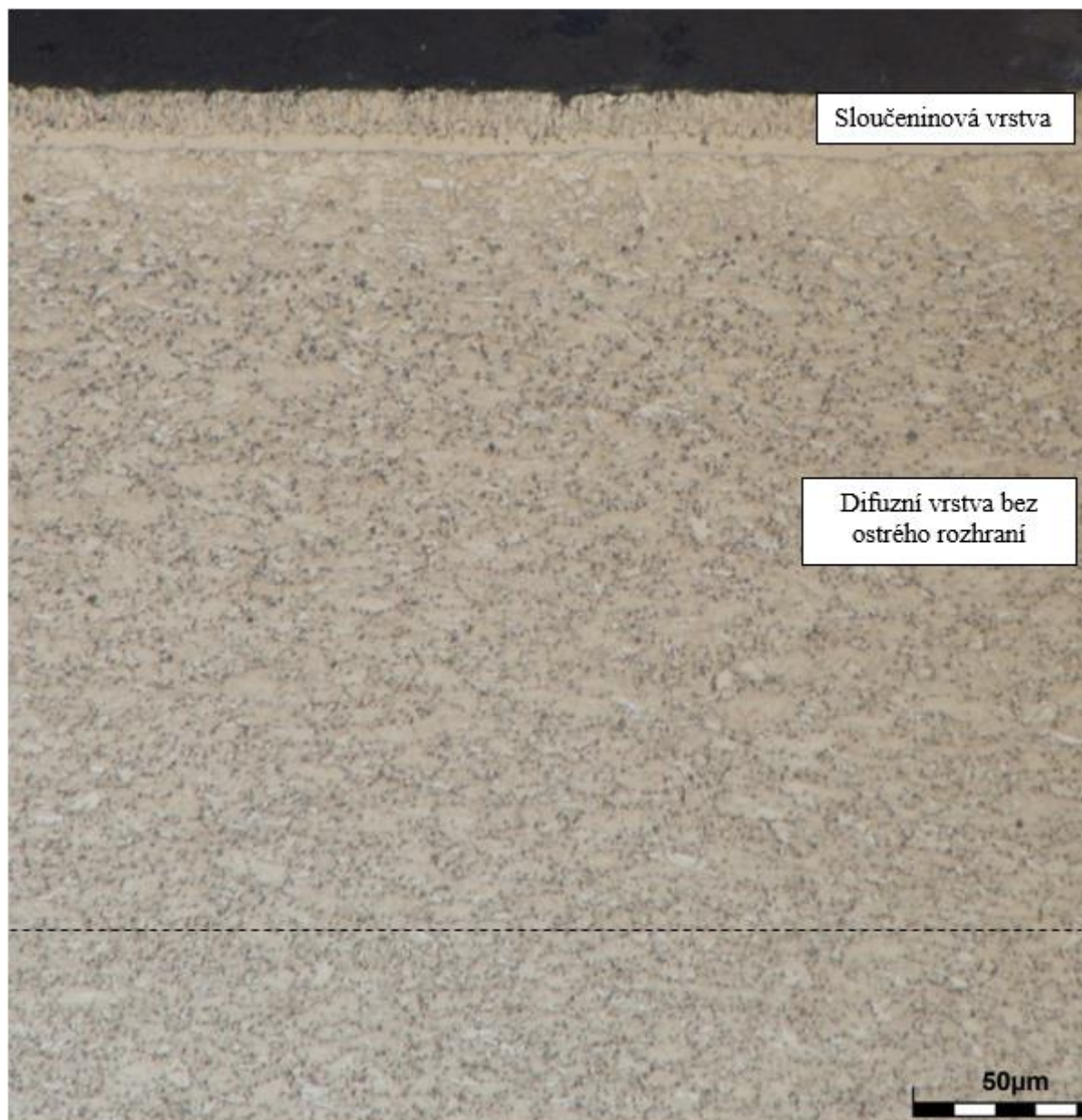
Obr. 4.53 – Oboustranná nitridace

V důsledku aplikace nitridace došlo k výraznému zvýšení povrchové tvrdosti plechů HARDOX 450. Mikrostruktura plechů je zobrazena na Obr. 4.54 a Obr. 4.55.

Očekávaným přínosem technologie je zvýšení balistické odolnosti čelní nárazové desky, jelikož došlo k významnému zvýšení povrchové tvrdosti. Vzhledem k rozdílným parametrům technologií aplikovaných na HARDOX 450 (jednostranná a oboustranná nitridace) lze očekávat, že se balistická odolnost obou připravených vzorků bude lišit. Lze předpokládat, že plech s jednostrannou nitridací bude v rámci systému disponovat vyšší balistickou odolností, jelikož byla zachována houževnatost podkladové vrstvy [135].



Obr. 4.54 – Struktura pancíře, střední část, zvětšeno 1000x



Obr. 4.55 – Struktura HARDOX 450 s dokumentací povrchové vrstvy, zvětšeno 1000x

4.6 Možnosti využití aditivních technologií v balistických ochranách

Aditivní technologie jsou klasifikovány normou ISO/ASTM 52900:2015 „Additive Manufacturing – General Principles – Terminology“. Jedná se o výrobní procesy, při kterých vznikají trojrozměrné modely přidáváním materiálu (aditivní výroba). Zdrojovým souborem pro 3D tisk jsou digitální data vytvořená pomocí počítačové podpory CAD (Computer Aided Design) [139]. Norma ISO/ASTM 52900:2015 rozděluje aditivní technologie do sedmi kategorií, které se liší způsobem vrstvení, vytvrzování a skupenstvím výchozího materiálu. V následujících podkapitolách budou dále rozebrány možnosti využití technologií 3D tisku a Studené kinetické depozice (tvz. technologie Cold Spray).

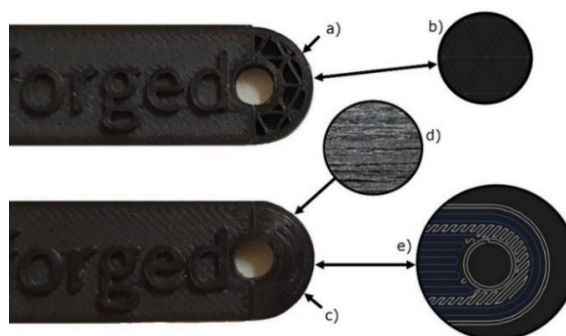
4.6.1 Možnosti využití 3D tisku

Pro účely výzkumu, vývoje a výrobu funkčních vzorků nebo prototypů určených pro balistickou ochranu lze výhradně použít technologie Material Extrusion a Powder Bed Fusion. S odstupem času pro sériovou výrobu bude možné využít i technologii Binder Jetting. V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé metody 3D tisku.

4.6.1.1 3D tisk kompozitů

Tisk vychází z jednoduchého principu vytlačování materiálu přes trysku nebo distribučním otvorem. Tato metoda technologie aditivní výroby se používá převážně pro tisk termoplastů a materiálů na podobné bázi. Původní myšlenkou využití technologie bylo poměrně levné prototypování, výroba nejrůznějších modelů a to zejména v tzv. hobby průmyslu. Rozvoj technologie a její implementace však ukázal, že se jedná o technologii využitelnou i v různých průmyslových odvětvích. Dnes se můžeme setkat s tiskárnami ve strojírenském, automobilní nebo průmyslu. S ohledem na praktické využití 3D tisku kompozitních materiálů bude část kapitoly věnována technologii Continuous Filament Fabrication (CFF).

Technologie CFF umožňuje 3D tisk kompozitních polymerů vyztužených spojitým kompozitním vláknem (v praxi se lze setkat i s názvem Continuous Fiber Reinforced Plastics - CFRP). Konstrukční řešení 3D tiskárny se skládá ze dvou trysek, přičemž hlavní tryska slouží pro vytlačování nylonu. Nylon je sám o sobě vhodný pro tuhé, pevné a přesné modely, je 1,4× pevnější a tužší než ABS a má velmi dobrou geometrickou přesnost, chemickou odolnost a odolnost vůči teple. Druhou tryskou je nanášeno natavené vlákno s obsahem C (karbon), kevlaru nebo skla. Spojení těchto materiálů výrazně zvyšuje mechanické vlastnosti a modely lze použít jako funkční prototypy pro výrobu montážních, svařovacích a upínacích přípravků. Vzorek vytištěný z Onyxu vyztužený svazkem kompozitních vláken je uvedený na Obr. 4.56. Onyx je obchodní označení nylonu PA6, obsahuje mikrouhlíková vlákna, proto je odolnější a pevnější než běžné plasty. K 3D tisku kompozitu je možné využít 3D tiskárnu Markforged Mark X7, viz Obr. 4.57 [140]. Další příklady vzorků vyztužených svazkem kompozitních materiálů jsou uvedeny Obr. 4.58.



Obr. 4.56 – Vzorek vytištěný z Onyxu vyztužený svazkem kompozitních vláken
a) Vnitřní výplň může tvořit honeycomb nebo podobná odlehčující struktura; b) Vzorek se svazkem vláken z obsahem C; c) lze řízené programovat v SW Eiger; e) Struktura vláken je v detailu d) [140]



Obr. 4.57 – 3D tiskárna Markforged
FDM + CFF pro tisk z nylonu vyztuženého svazkem kompozitních vláken [140]



Obr. 4.58 – Příklady prototypů (vzorků) vyztužených svazkem kompozitních vláknem (kevlar)

Kombinacemi různých druhů materiálů (karbon, kevlar, skelné vlákno apod.) lze dosahovat požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností výrobku, což může být velmi výhodné pro aplikace v různých oblastech. V současné době se ukazuje, že tento typ 3D tisku je vhodný například k tisku kompenzátorů nárazu a dalších strukturovaných součástí, je tedy

využitelný i pro vývojová stadia vícevrstvých pancířů. Běžně lze pro zvýšení užitných vlastností součástí využívat v rámci metody CFF následující vlákna:

- **Karbon** přináší nejlepší poměr pevnosti k hmotnosti ze všech spojitých vláken. Karbonové (uhlíkové) vlákno je 6× pevnější než Onyx a používá se k vyztužení 3D tištěných dílů nahrazujících obráběné součásti z Al.
- **Kevlar** je díky vysoké trvanlivosti optimální výztuží pro díly s dynamickým a opakovaným zatížením. Kevlar je tuhý jako skelné vlákno, avšak mnohem tvárnější, takže je často využíván pro koncové nástroje robotických pracovišť.
- **Skelné vlákno** je 2,5× pevnější než Onyx, vyztužují se jím pevné, robustní nástroje.
- **HSHT** skelné vlákno (vysokopevnostní a vysokoteplotní) je asi 5× pevnější než základní skelné vlákno. I proto se využívá na díly zatěžované při vyšších provozních teplotách překračujících 105 °C.

Na Obr. 4.59 jsou zobrazeny modely vyrobené z těchto kompozitních materiálů dosahují pevnosti hliníkových slitin.



Obr. 4.59 – Praktická ukázka modelů vyztužených různými svazky kompozitního materiálu s možností vložení kovových vložek se závitem

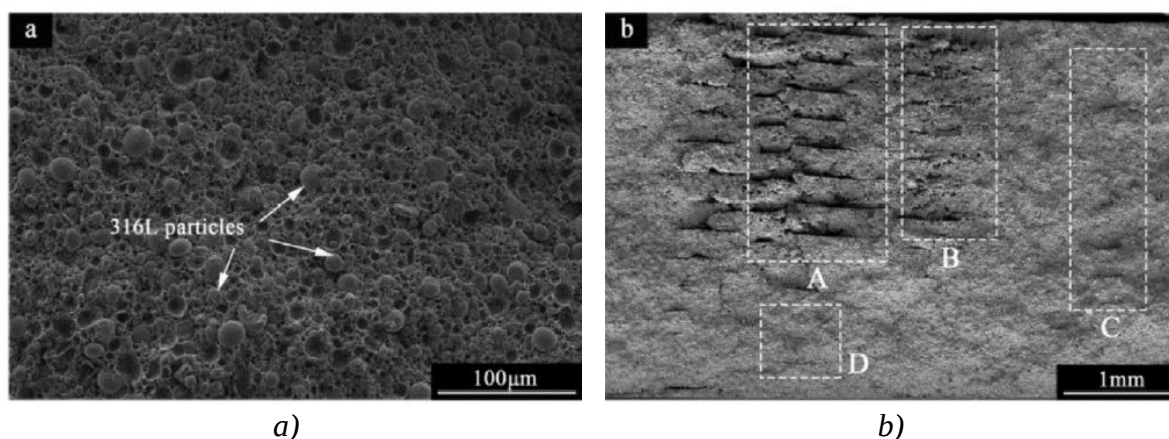
4.6.1.2 3D tisk kovů metodou FFF

3D tisk kovových materiálů metodou FFF (Fused Filament Fabrication) je alternativní (cenově dostupnou) možností tisku kovových modelů z prášků na 3D tiskárnách s technologií Material Extrusion z filamentu obsahující Ultrafuse 316L ve formě cívky Obr. 4.60.



Obr. 4.60 – Cívka materiálu BASF Ultrafuse 316L

Jedná se o materiál Ultrafuse 316L (DIN 1.4404), který formuluje termoplastické pojivo s 90 % hmotností vysoce rafinovaných kovových částic. V důsledku imobilizace částic prášku v pojivové matici vlákna, dramaticky klesá potenciální bezpečnostní riziko, které se vyskytuje při zacházení s velmi jemnými kovovými prášky. Na Obr. 4.61 je znázorněna mikrostruktura řezu kompozitního vlákna materiálu Ultrafuse 316L pořízený rastrovacím elektronovým mikroskopem. Pojivo ve filamentu formuje kontinuální fázi a různě velké částice oceli 316L jsou rovnoměrně rozptýlené [141], [142].



a)

b)

Obr. 4.61 – SEM snímky [142]
a) řezů filamentu; b) green partu

Princip výroby kovových slitin z filamentu technologií FFF je stejný jako v případě 3D tisku polymerů. Prototypy (vzorky) lze vyrobit na běžné stolní 3D tiskárně. Technologický postup výroby se skládá ze čtyř fází, viz Obr. 4.62, Obr. 4.63 a Obr. 4.64:

- 3D tisk (green part),
- odstranění pojiva (brown part),
- slinování/sintrování (white part),
- postprocessing (tepelné zpracování, obrábění, broušení, leštění, svařování atd.).

První fáze

Vlákno obsahující kov-polymerní kompozit prochází přes extrudor a pomocí trysky se nanáší na základní desku vrstvou po vrstvě o výšce 0,15 mm. Doporučená výplň modelů je min. 60 % a jako vhodná struktura výplně se doporučuje včelí plástev [143].

Překryv jednotlivých trajektorií je (20–35) %, doporučená tisková teplota je (230–250) °C a teplota podložky (90–120) °C. Pro soudržnost materiálu k základní desce se doporučuje použít sklo a lepidlo nebo lepicí pásku. Výrobce materiálu doporučuje použít pro tisk materiálu trysku o průměru 0,4 mm a zvolit rychlost tisku (15–50) mm·s⁻¹ (výchozí rychlost je 35 mm·s⁻¹). Průměr struny je dostupný v rozměrech (1,75 ± 0,05) mm (250 m v cívce) a (2,85 ± 0,075) mm (100 m v cívce). Materiál se během procesu řízení nechladí (chlazení probíhá na vzduchu). Výhodou této technologie je, že polotovary vyrobené tímto způsobem (green part) lze tisknout na běžných stolních 3D tiskárnách v kancelářském prostředí [143].

Druhá fáze

Z green partu je nutné vyplavit polymerní pojivo. To se provádí katalyckým termochemickým procesem napařováním v roztoku kyseliny dusičné (HNO₃) v atmosféře dusíku. Doba napařování se odvíjí od velikosti součásti a orientační doba je (1–2) mm·h⁻¹. Kromě množství času pro odstranění polymerního pojiva je nutný proplachovací cyklus k odstranění zbytkové kyseliny dusičné. Cílem je odstranit polymerní pojivo v nejkratším čase s nejmenším dopadem na konečnou součást, kterou po druhé fázi nazýváme brown part [142], [143].

Třetí fáze

Vyroběný polotovar je poměrně porézní a vyžaduje proces slinování, kdy dojde ke spojení kovových částic v pevný houževnatý materiál bez toho, aniž by se během procesu roztavil (zachovává si svou geometrii). Slinování (spékání) probíhá v atmosféře s čistým vodíkem a přesný technologický postup (doba a teploty) je udržován pod know-how firmy. Během procesu slinování dochází ke značnému smrštění v osách podélného i příčného směru na rovinu tisku. Po třetí fázi se získá součást, kterou nazýváme white part. S ohledem na náročný technologický postprocessing (vyplavování a sintrování) je možné využít firmu log3D, která tyto technologické procesy zajišťuje jako externí službu [142], [143].



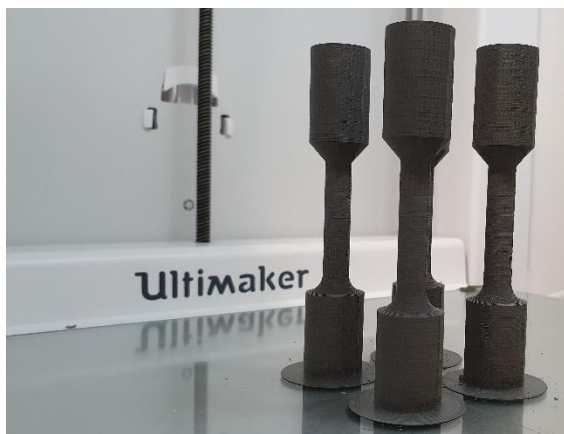
Obr. 4.62 – Výrobní fáze vzorku pro tahovou zkoušku z materiálu BASF Ultrafuse 316L (DIN 1.4404)

Vlevo je vzorek po 3D tisku (green part – zvětšený o 20 %) vytištěný na 3D tiskárně Ultimaker S5, sintrování (white part) a soustružení

Volba orientace součástí při 3D tisku je velmi důležitá, jelikož ovlivňuje smršťování součástí. V osách XY je orientační smrštění 16 % a v ose Z 20 %. Výrobce materiálu uvádí hustotu po 3D tisku $7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Po slinování jsou součásti stále porézní, ale mohou projít dalšími technologickými procesy, jako jsou obrábění (řezání závitů), svařování, broušení, leštění, povlakování a tepelné zpracování. S určitou rezervou mohou být použity jako funkční prototypy s ohledem na poréznost a mechanické vlastnosti.



Obr. 4.63 – Příklad použití podpor při tisku
Mezi podpory a tištěný model se nanáší keramický separátor (bílá část) pro snazší odstranění podpůrného materiálu. Foto: Protolab VŠB-TUO



Obr. 4.64 – Výroba vzorků pro tahovou zkoušku z filamentu BASF 316L na 3D tiskárně Ultimaker S5

V současné době jsou pro tuto metodu tisku využitelné tyto kovové slitiny:

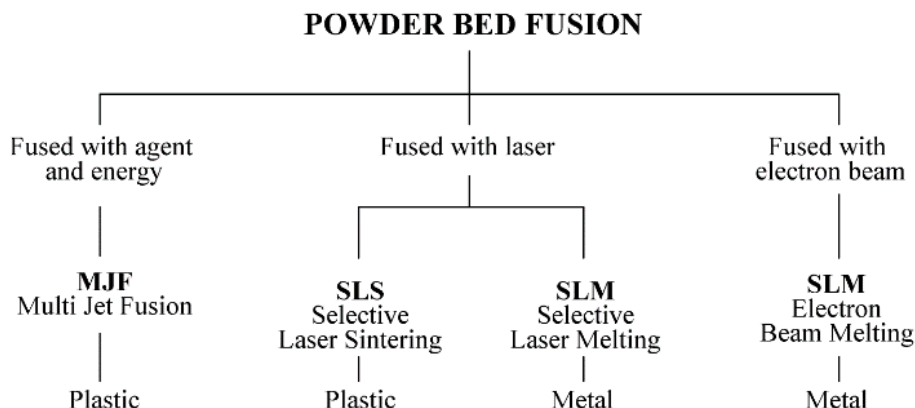
- **Korozivzdorná ocel 316L** (1.4404, DIN X2CrNiMo 17-12-2),
- **Korozivzdorná ocel 17-4 PH** (1.4542, DIN X5CrNiCuNb 16-4, ČSN 17 248),
- **Nemagnetická nástrojová ocel H13** (1.2344, DIN X40CrMoV5-1, ČSN 19 554),
- **Niklová super slitina** (s obchodním názvem Inconel 625),
- Titanová slitina **Ti6Al4V**.

Největší nevýhodou uvedené technologie je proces sintrování v důsledku vysoké koncentrace polymeru, který je využíván jako pojivo. Při samotném tisku musí být polymer „vyplaven“ z matrice a k tomu dochází při vysokých teplotách až 1200 °C v závislosti na použité slitině. Důsledkem je pak významné smrštění materiálu až o 20 % objemu.

Uvedené metody 3D tisku nejsou vhodné pro tisk vysoce odolných materiálů, které by byly schopny odolat nárazu střely na vytvořenou strukturu. Důvodem jsou malé mikrostrukturní vazby vznikající během 3D tisku. Výhodnější metodou jsou pak metody Power Bed Fusion.

4.6.1.3 Aдитivní technologie Powder Bed Fusion

Princip technologie spočívá ve vytváření prototypů z práškových materiálů, které jsou spékány pomocí paprsku vysocefrekvenčního zdroje, většinou laseru nebo elektronového děla. Základní rozdělení technologie Powder Bed Fusion je zobrazeno na Obr. 4.65.



Obr. 4.65 – Rozdělení aditivní technologie Powder Bed Fusion [145]

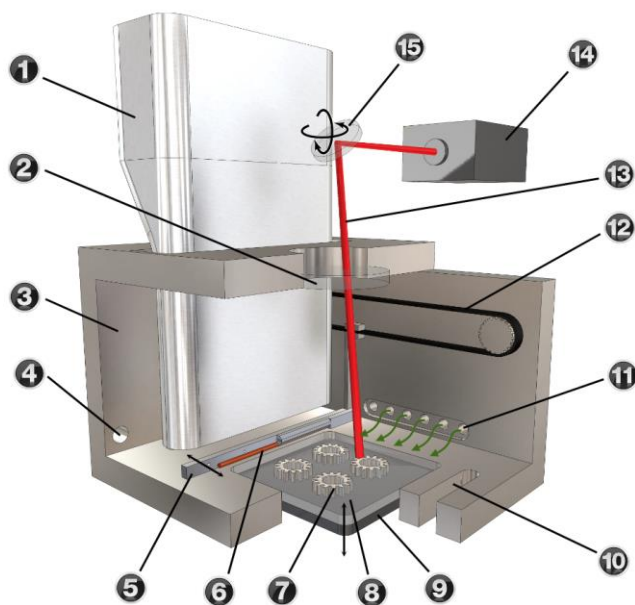
Výroba prototypů probíhá z polotovarů prášků o velikosti částic od 20 do 45 μm . Tisk z práškových kovových slitin se nazývá Selective Laser Melting (SLM). Tisk z polymerních a kompozitních prášků se nazývá Selective Laser Sintering (SLS). Princip 3D tisku je u obou technologií totožný [144], [145].

Princip technologie SLM spočívá v nanesení souvislé vrstvy kovového prášku na kovovou podložku (substrát) pomocí stírací lišty. Následuje selektivní tavení ploch laserem vybranou skenovací strategií a celý proces, nanášení vrstvy prášku a selektivní tavení ploch, se opakuje až do dokončení 3D tisku součásti. Laser vytváří koherentní monochromatické záření s velmi nízkou divergencí, což znamená, že může přenášet velké množství energie na jeden specifický bod [146], [147]. Tloušťka nanesené vrstvy se pohybuje od 10 do 60 μm . Tloušťka nanesené a následně spékané vrstvy má zásadní vliv na mechanické vlastnosti materiálu součásti, zejména její pevnost.

Pracovní komora (Obr. 4.66) je před spuštěním tisku odčerpána do vysokého stupně vakua (cca (90–95) %) a poté je komora vyplněna inertním plynem. V praxi se nejčastěji používají dusík nebo argon. S ohledem na vyšší protonové číslo se doporučuje používat argon s čistotou 5.0 (purity 99.998 %). Vytvořením inertní atmosféry dochází k vytlačení zbytkového obsahu kyslíku s koncentrací pod 0,1 %. Při tisku hliníkových, titanových slitin a jiných vysoce-reaktivních slitin je vyžadována koncentrace kyslíku nižší – pod 0,01 %. Inertní plyn během výrobního procesu cirkuluje v uzavřeném oběhu přes filtrační jednotku, která zachycuje emisní nečistoty.

V současné době existují vědecké studie, kdy se používají i jiné inertní plyny – např. hélium [148]. Tento inertní plyn způsobuje u korozi-vzdorné oceli 316L speciální mikrostrukturu obsahující buněčná sub-zrna a nano-oxidové inkluze.

Po dokončení tiskové úlohy se z komory vytáhne substrát s vytištěnými modely. Následuje postprocesní fáze: odřezání modelů ze stavební podložky (pásová pila nebo drátové elektroerozivní obrábění), obrábění na CNC obráběcích strojích, svařování, tepelné zpracování, povrchové úpravy a výstupní kontrola a měření geometrické přesnosti (CMM, 3D skenování, optické měření parametrů drsnosti povrchu apod.). 3D tiskárna a vybavení laboratoře pro technologii SLM jsou uvedeny na Obr. 4.67 až Obr. 4.69.



Obr. 4.66 – Pracovní prostor 3D tiskárny Renishaw AM400 (Vizualizace: Pagáč, M., 2020)

1 – Systém distribuce práškového materiálu, 2 – Laser, 3 – Pracovní komora, 4 – Senzor kyslíku, 5 – Wiper – stírací lišta, 6 – Silikonová zarovnávací lišta, 7 – modely, 8 – práškový kovový materiál, 9 – Stavební platforma (Substrát), 10 – Přepad, 11 – Vstup inertního plynu, 12 – Řemen, 13 – Laser, 14 – Zdroj laseru, 15 – Optická soustava



Obr. 4.67 – Laboratoř SLM technologií pracoviště VŠB-TUO. Foto: Protolab VŠB-TUO

Technologie SLM v současné době umožňuje 3D tisk z různých kovových slitin (koroziivzdorné oceli, vysokopevnostní oceli, žáruvzdorné, žárupevné), titanových slitin,

hliníkových slitin, mědi a exotických materiálů nebo materiálů určených pro speciální aplikace (zlato, stříbro, platina atd.).

Uvedené technologie byly v rámci vědecké práce na vývoji vícevrstvé balistické ochrany aplikovány pro vytvoření balistické vložky z hliníkové slitiny, slitiny titanu a slitiny hořčíku.



Obr. 4.68 – Pece pro tepelné zpracování laboratoře 3D tisku. Foto:Protolab VŠB-TUO



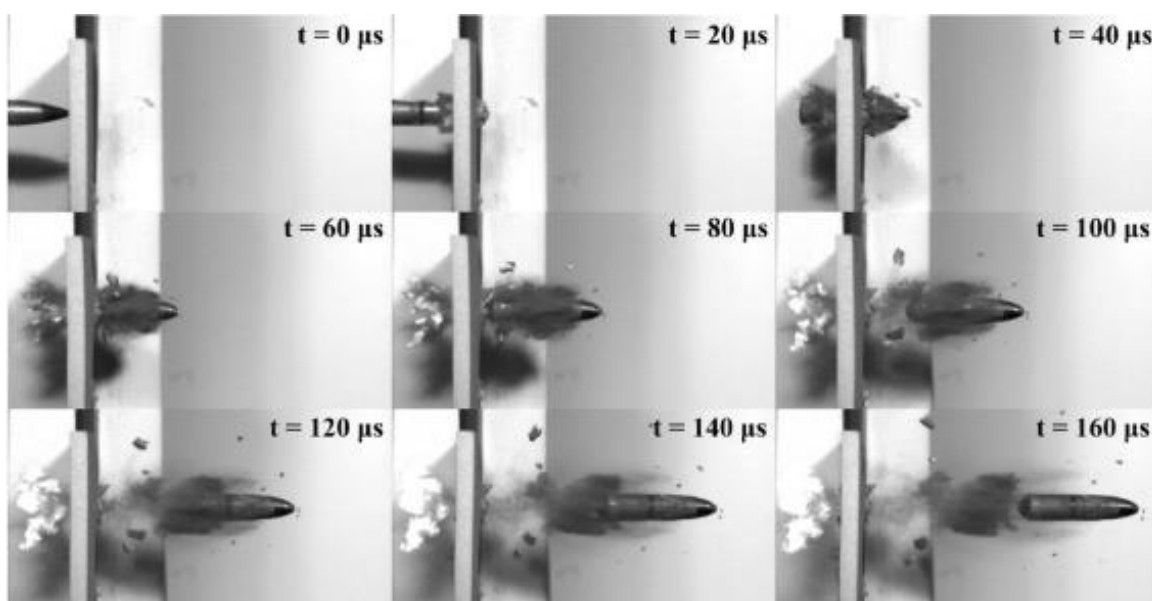
Obr. 4.69 – Pískovací a omílací zařízení pro postprocesní úpravy plastových a kovových modelů. Foto:Protolab VŠB-TUO

4.6.1.4 Možnosti implementace 3D tisku do výroby pancířů

Aditivní technologie umožňují vytváření různých vnitřních struktur materiálů. Přitom je známo, že rozdílné struktury disponují různými mechanickými vlastnostmi. Právě z tohoto důvodu je aditivně využitelným materiálům a způsobu vytváření různých vnitřních struktur věnována velká pozornost. Nespornou a stěžejní devizou technologie aditivní výroby je vytváření komplexních struktur o velmi složité geometrii. Stále více se upevňuje pozice

aditivních technologií zejména v oblastech, kde jsou využívány velmi složité konstrukce, které jsou není možné vyrobit jinými technologiemi. V rámci vývoje balistických ochran bylo využito potenciálu 3D tisku a technologie studené kinetické depozice⁵.

Díky specifickým možnostem 3D tisku umožňují nově navrhované konstrukce zcela nový přístup ke konstrukci vysoce namáhaných dílů. Běžně se již setkáváme s prototypy řezných nástrojů, funkčních částí automobilů, a to zejména těch velmi významně tepelně namáhaných např. turbodmychadel. Obdobný přístup je patrný i v oblastech vývoje balisticky odolných materiálů, kdy lze aditivní technologie využívat i pro tisk specifických struktur využitelných jako např. kompenzátory a heterogenní struktury⁶.



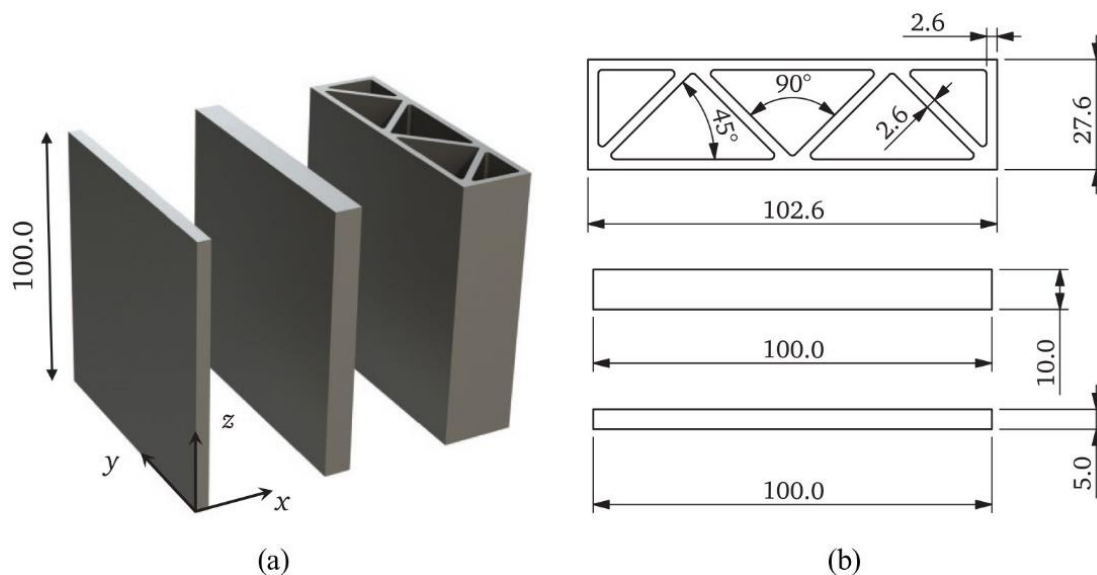
Obr. 4.70 – Snímky z vysokorychlostní kamery
v závislosti na čase zobrazující střelu AP prorážející 5 mm silnou desku AM AlSi10Mg
($v_i = 606,2 \text{ m/s}$, $v_r = 564,8 \text{ m/s}$) [149]

Kromě uvedených materiálů na bázi Al jsou velmi často využívány vysokopevnostní oceli Ni-Co (tzv. maraging steels) - nízkouhlíkové oceli s velmi vysokou pevností. S využitím

⁵ Technologie studené kinetické depozice není ve svém detailu součástí práce z důvodu přípravy celého systému jako funkčního vzoru.

⁶ Kolektiv kolem Kristoffersena řešil studii desek vyrobených z hliníkové slitiny AlSi10Mg o rozměrech $100 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ [149]. Z vytištěných desek byly odebrány vzorky materiálu, které byly namáhány na lom v jednoosém tahu, aby se odhalila mechanická odezva materiálu. Byly rovněž provedeny metalurgické průzkumy za účelem studia mikrostruktury tištěné slitiny před testováním i po něm. Během testování byly desky zasaženy střelami APM2 ráže 7,62 mm různými rychlostmi, viz Obr. 4.70. V další sérii testů bylo na desky vystřeleno pouze tvrdé jádro téže střely vložené do sabotu. Na základě snímků z vysokorychlostní kamery byly změřeny počáteční a zbytkové rychlosti různých střel a byly stanoveny mezní balistické křivky a rychlosti.

topologické optimalizace lze efektivně metodami 3D tisku významně snížit hmotnost, tvar a měnit struktury v závislosti na podmínkách (parametrech) tisku⁷.

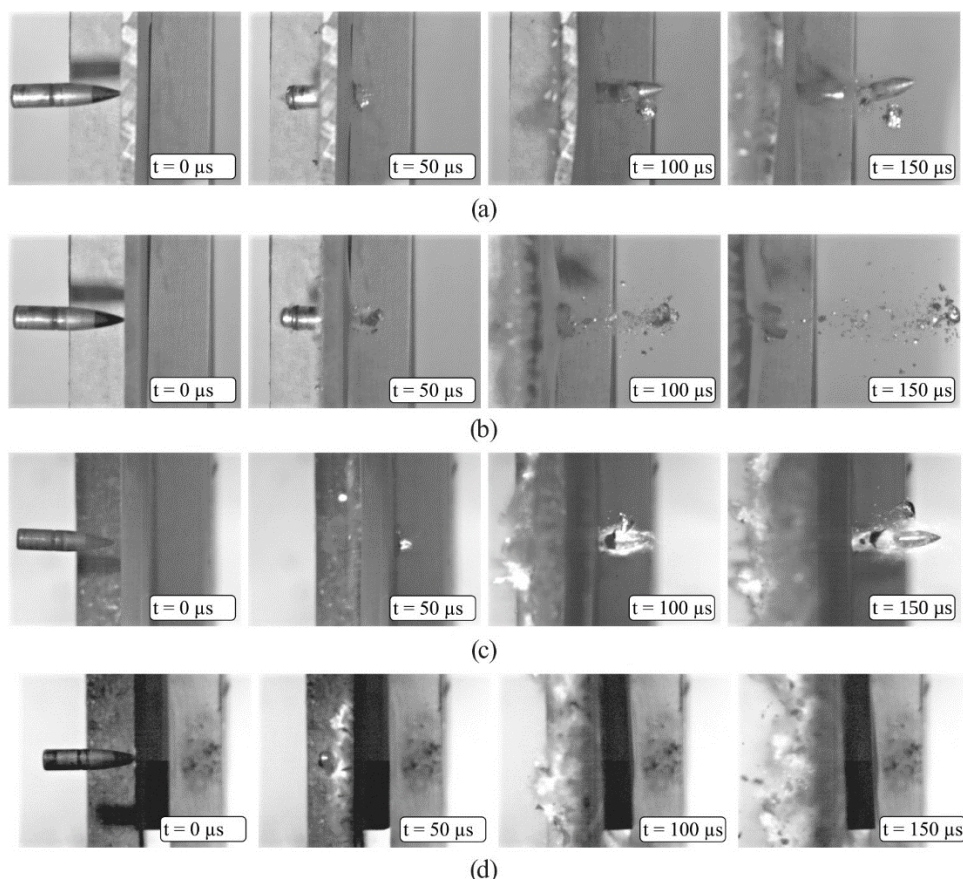


Obr. 4.71 – Geometrie AM desek z maragingové oceli použitých při balistických zkouškách
a) 3D render se souřadnicovým systémem; b) geometrie průřezu desek (všechny lineární rozměry v mm) [150]

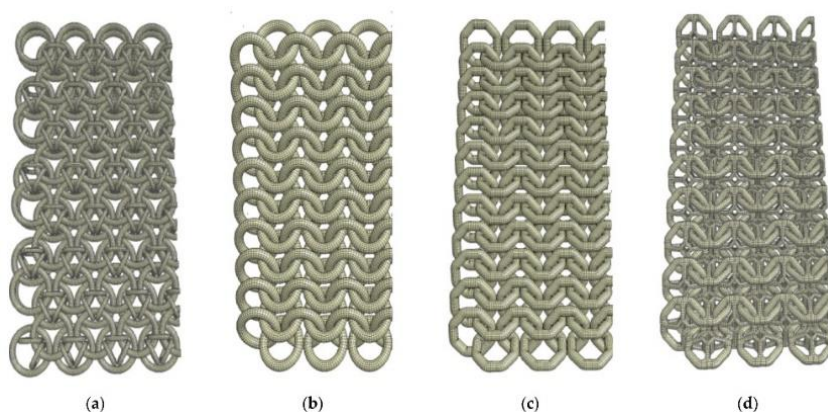
Nejvíce používané jsou materiály na bázi lehkých kovů. V rámci vlastních experimentů byly tištěny např. materiály na bázi Al, Ti, korozivzdorné oceli a vysokopevnostní oceli M300, které jsou součástí vytvořené vícevrstvé balistické ochrany. Nezbytnou součástí rozvoje aditivních technologií je podpora moderními metodami konstruování⁸.

⁷ Studie pod vedením Costase zkoumala balistické vlastnosti monolitických desek a profilových panelů (Obr. 4.71) z maragingové oceli vyrobených metodou AM pomocí tavení v práškovém loži [150]. Mechanické vlastnosti maragingové oceli, jak ve stavu po výrobě, tak po tepelném zpracování, byly zjištěny kvazistatickými a dynamickými zkouškami ve třech různých směrech vzhledem ke směru výroby. Byly rovněž provedeny metalurgické studie za účelem zkoumání mikrostruktury materiálu před zkouškami i po nich. Balistická odolnost vzorků z maragingové oceli proti perforaci byla odhalena v balistické střelnici střelbou 7,62 mm APM2 proti různým konfiguracím terčů, viz Obr. 4.72.

⁸ Kolektiv kolem Zochowskiho prezentoval v odborném příspěvku modelování balistického nárazu vložek obsahujících titanové struktury metodou konečných prvků [151]. Byly analyzovány vložky obsahující další vrstvu vyrobenou aditivní výrobní technologií. Vrstva byla vytvořena z opakujících se prvků vyrobených bez spojů (sousední buňky byly neoddělitelné), viz Obr. 4.73.



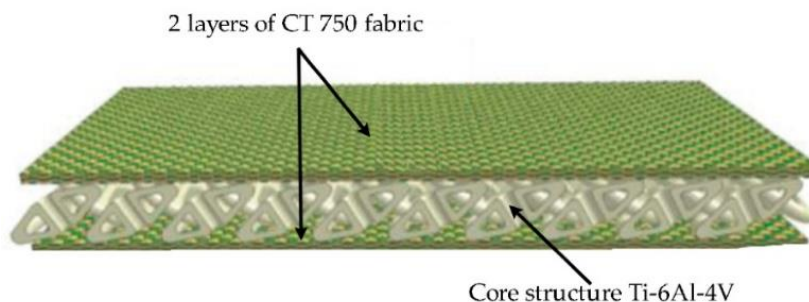
Obr. 4.72 – Časový průběh balistických nárazů monolitických desek o tloušťce 5 a 10 mm ve stavu, v jakém byly postaveny, a tepelně upravených desek. [150]. Ve všech případech je střelou APM2 střela: a) 5 mm, deska v původním stavu, $v_i = 526,7$ m/s; $v_r = 234,8$ m/s; b) 5 mm, tepelně upravená deska, $v_i = 536$ m/s; $v_r = 62,1$ m/s; c) 10 mm, deska v základním stavu, $v_i = 705,3$ m/s; $v_r = 281$ m/s; d) 10 mm, tepelně upravená deska, $v_i = 626,9$ m/s; $v_r = 0$



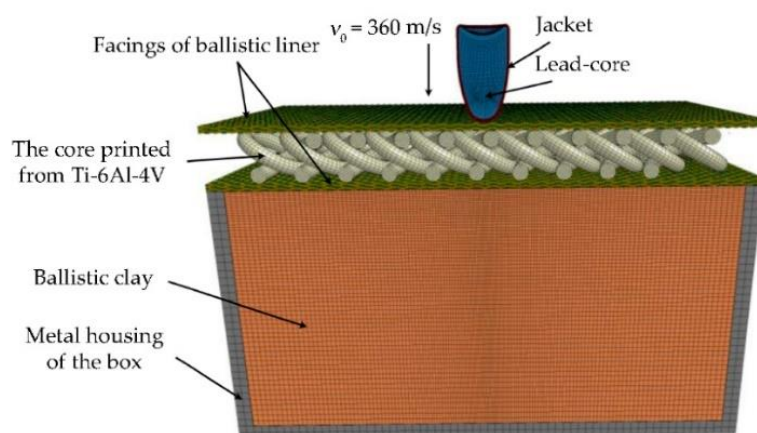
Obr. 4.73 – Varianty 3D tištěných titanových struktur vybraných pro analýzy [151]
a) struktura typu S1; b) struktura typu S2; c) struktura typu S3; d) struktura typu S4

Synergie těchto uspořádání vytváří předpoklady pro vznik nových variant komplexních struktur o různých kombinacích materiálů tisknutelných v rámci jediné výrobní operace. Jedním z uváděných přístupů, jak zvýšit balistickou odolnost je vytvoření titanové struktury

umístěné v aramidové tkanině Twaron CT 750. Tímto způsobem lze vytvořit balistické vložky, viz Obr. 4.74⁹.



Obr. 4.74 – Konfigurace analyzované balistické vložky [151]

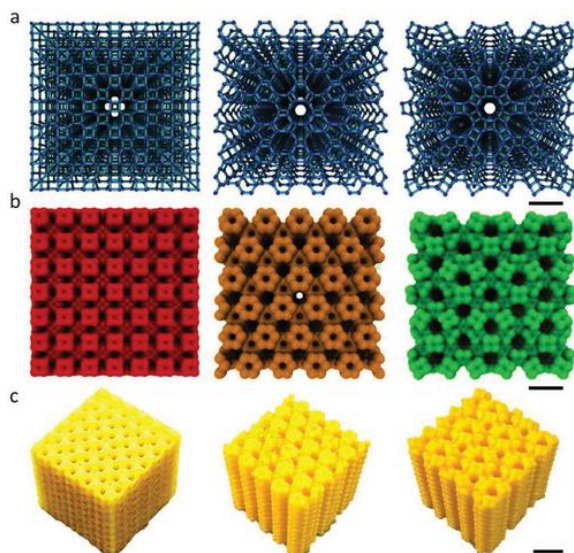


Obr. 4.75 – Numerický model analyzovaného jevu nárazu střely [151]

Stejného principu vytváření balisticky odolných struktur bylo využito i v případě dílčích částí konstrukce. Rozdílem v přístupu bylo zejména cílové umístění zamýšlené struktury. Jednalo se o 3D tištěný kompenzátor dopadové energie, který byl v případě experimentu vytvořen z polymeru PEEK zalitého do matrice a oboustraně opatřeného aramidovými vlákny.

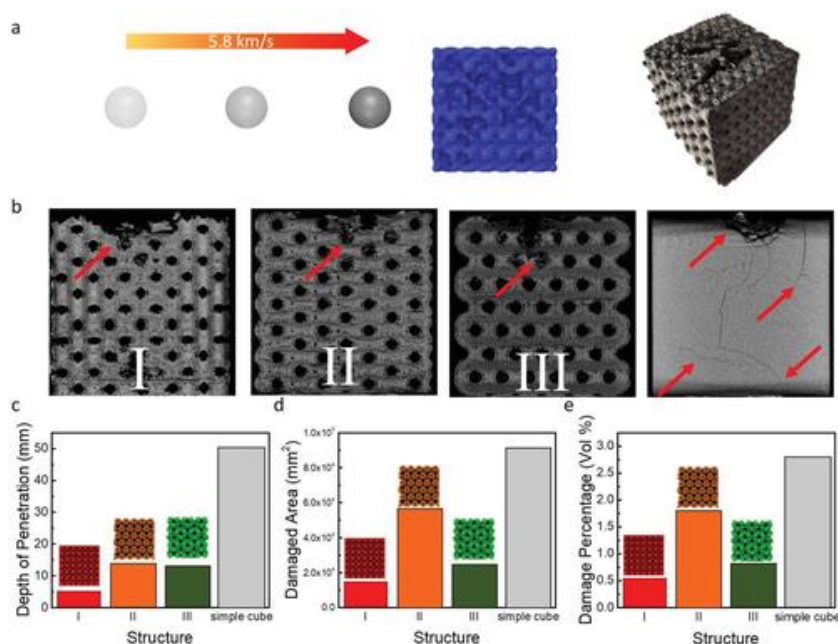
Kromě uvedeného přístupu je možné vytvářet struktury kompenzující rázové zatížení různými strukturami, např. tubulány, které jsou architektonickými analogiemi křížově propojených uhlíkových nanotrubic, viz Obr. 4.76 až Obr. 4.78 [152].

⁹ Za účelem posouzení balistické odolnosti vložek byly provedeny numerické simulace balistického nárazového jevu pomocí softwaru LS-Dyna. Výsledky numerické analýzy ukázaly vysoký potenciál 3D tištěných struktur z titanových slitin pro použití jako vložky do balistických vest. Ve všech analyzovaných případech byl projektil 9 mm zastaven uvedeným typem pancíře. Díky tzv. buněčné struktuře byla navíc nárazová energie projektilu rozložena na velkou plochu, což bylo potvrzeno otisky v balistické plastelině. Vtlaky v balistické plastelině získané při simulacích byly výrazně nižší než přijatelná hodnota parametru deformace zadní strany (BFD) požadovaná mezinárodními normami pro balistické ochrany jednotlivce [151].



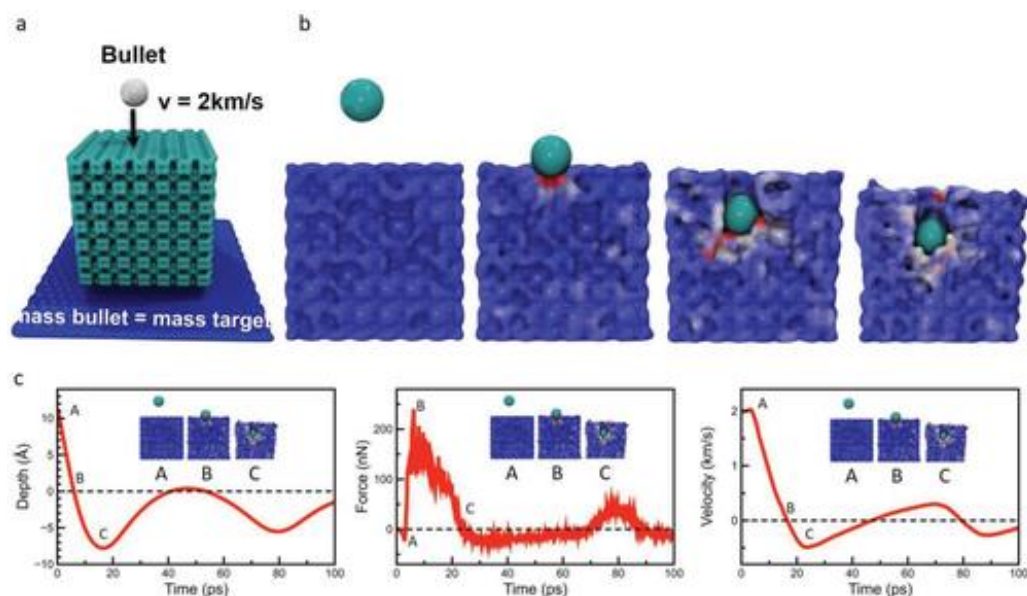
Obr. 4.76 – Strukturální modely trubic. I, II a III [152]

odkazují na 8-tetra-(2,2), 12-hexa-(3,3) a 36-hexa-(3,3) a) Geometricky optimalizované struktury získané ze simulací molekulární dynamiky; b) 3D vykreslené struktury tubulárnů ukazující jejich topologii; c) Fotografie 3D tištěných struktur tubulárnů založených na atomistických modelech. Tyto struktury byly tištěny pomocí 3D tiskárny s vysokým rozlišením a s PLA polymerovým vláknem. Měřítka: 1 cm. Všechny struktury jsou zobrazeny v krystalografickém směru [001]



Obr. 4.77 – Balistické výsledky [152]

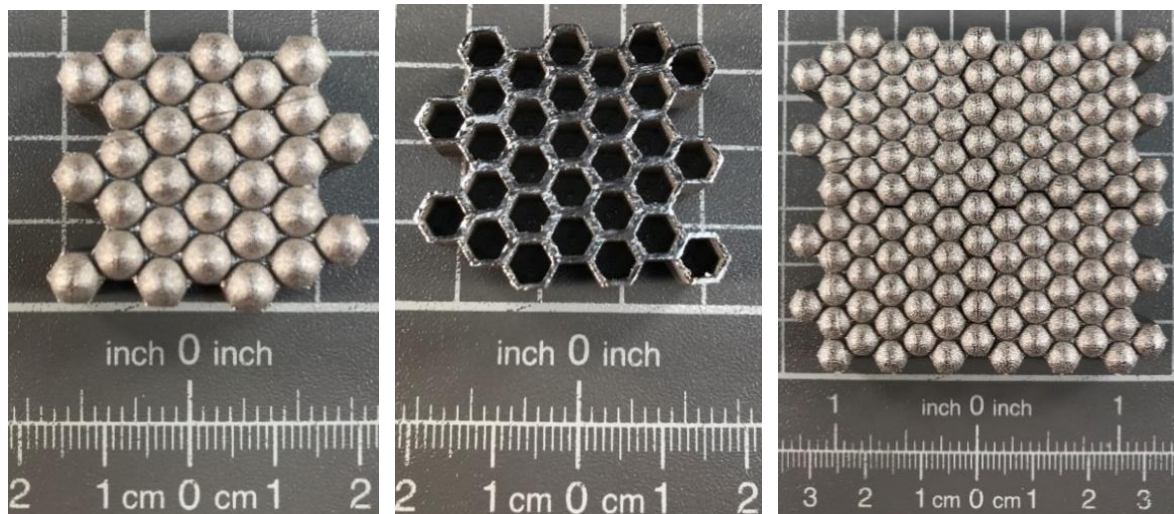
a) schematický obrázek znázorňující nárazovou zkoušku hyperrychlostí; b) CT snímky znázorňující hloubku průniku kulky v tubulárních konstrukcích a referenční krychli CHOP po nárazu hyperrychlostí; c) graf znázorňuje maximální hloubku průniku kulky pro každou konstrukci. Konstrukce I má nejmenší hloubku deformace; d) graf znázorňuje poškozenou plochu v každém vzorku po nárazu hyperrychlostí. Konstrukce I má také nejmenší plochu deformace; e) procento poškození objemu každé konstrukce bylo vypočteno na základě CT snímků. Referenční neporézní krychle má ve srovnání s ostatními konstrukcemi největší poškození



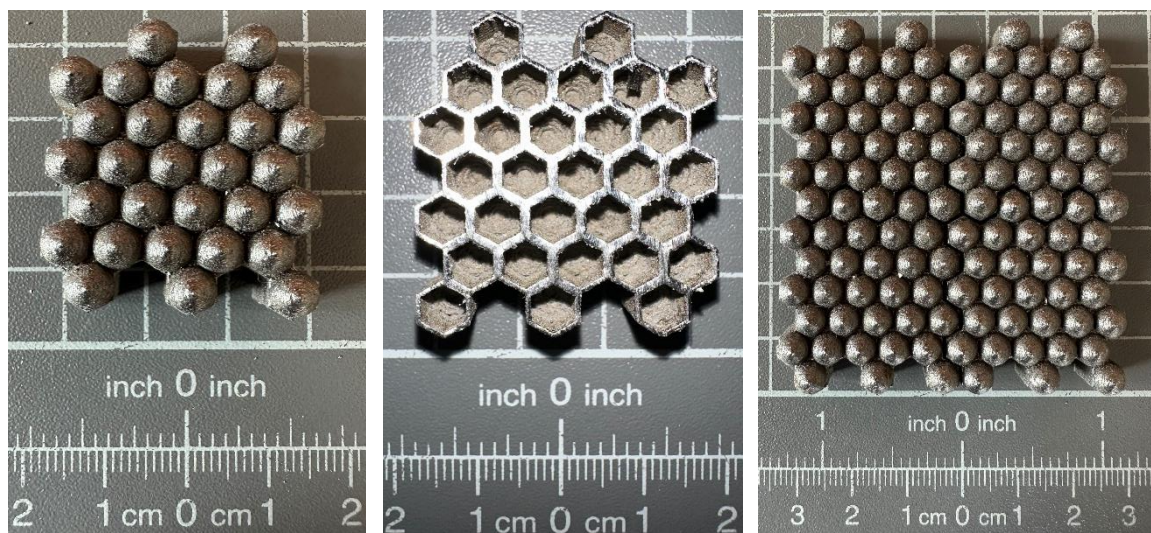
Obr. 4.78 – Schéma balistické simulace MD [152]

a) schéma balistické simulace MD; b) snímky průniku kulky uhlíkovou strukturou I. Snímky zobrazují polovinu konstrukcí pro snazší vizualizaci rozložení napětí kolem kulky; c) hloubka, síla v kulce a rychlost kulky ve třech různých časech zobrazených ve vložce. Přerušovaná čára představuje horní část povrchu konstrukce

S ohledem na výše uvedené informace byly navrženy části balistické ochrany ve tvaru včelí plástve, viz Obr. 4.79 a Obr. 4.80.



Obr. 4.79 – Navržená balistická ochrana ve tvaru plástve, Ti-6Al4V-ELI



Obr. 4.80 – Navržená balistická ochrana ve tvaru plástve, Ocel M300

Tyto prvky byly navrženy jako modulární z důvodu možného zasazení do jakéhokoliv geometricky složitého tvaru. Pro účely experimentů byly vybrány materiály Ti64-ELI a Maraging Steel M300. Základní parametry vytištěných dílů jsou uvedeny v Tab. 4-34 a Tab. 4-35.

Tab. 4-34 – Základní parametry Ti-6AL4V-ELI

	hmotnost [g]	délka [mm]	šířka [mm]	tloušťka [mm]
vzorek	$17,251 \pm 0,075$	$34,17 \pm 0,02$	$29,59 \pm 0,02$	$11,14 \pm 0,04$
Celkem	86,25			

Tab. 4-35 – Základní parametry M300

	hmotnost [g]	délka [mm]	šířka [mm]	tloušťka [mm]
Vzorek	$31,785 \pm 0,962$	$34,05 \pm 0,06$	$29,69 \pm 0,02$	$11,01 \pm 0,17$
Celkem	125,19			

Vytištěné struktury byly následně vyplněny naplněny keramickými částice Al_2O_3 . Jako matrice ke spojení keramického prášku s 3D tištěnou strukturou byla použita epoxidová pryskyřice LG700 a tvrdidlo HG700 se stechiometrickým poměrem 100:30.

Struktury uvedené na Obr. 4.79 a Obr. 4.80 jsou součástí experimentálního řešení zvýšení balistické odolnosti vícevrstevných pancířů. Balistická odolnost jednotlivých komponent a celku bude popsána v závěru této práce.

S ohledem na výše uvedené informace lze konstatovat, že budoucnost aditivních technologií nespočívá pouze v samotné technologii, ale ve výzkumu materiálů a multimateriálů, které mají multifyzikální vlastnosti a jejich praktické využití je skutečně unikátní.

4.6.2 Možnosti využití technologie COLD SPRAY

Mezi aditivními technologiemi vyniká metoda Cold Spray (CS) jako jedna z nejmodernějších a nejperspektivnějších metod. CS je technologie nanášení práškových materiálů na základové těleso za vzniku kvalitního povlaku s vysokou adhezí a nízkým obsahem pórů. Co je však obzvláště výhodné na technologii CS, je její schopnost vytvářet kompozitní materiály s kovovou maticí a keramickými částicemi. Tato kombinace kovových a keramických vlastností vede k výrobě součástí s vysokou odolností, což je zvláště přínosné v oblastech, jako je balistická ochrana vozidel.

Navzdory svým tradičním kořenům na počátku 20. století a intenzivnímu vývoji v Rusku a USA zůstává metoda CS v České republice a na Slovensku poměrně málo rozšířená. Oproti tradičním metodám Thermal Spray (TS) nabízí CS výhodu zachování nízkých teplot, což eliminuje vysokoteplotní degradační procesy, jako je oxidace, tepelné ovlivnění povrchu nebo odpařování prvků.

Technologie CS lze využít nejen jako nástroj pro tvorbu povlaků ale také pro aditivní výrobu dílů. CS představuje pro aditivní výrobu řadu výhod, které ji činí atraktivní volbou pro různé aplikace. Jedná se o nízkoteplotní proces, který eliminuje riziko tepelného poškození materiálů, a umožňuje vytváření povlaků s vysokou kvalitou povrchů, nízkou pórovitostí a vynikající adhezí. Díky kompatibilitě s různými materiály lze pomocí CS vytvářet povlaky z kovů, polymerů a kompozitů, čímž se rozšiřuje spektrum možností výroby. Tento proces je rovněž charakteristický svou rychlostí, což znamená, že součástky lze vyrábět efektivněji a rychleji než tradičními metodami (až $10 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$) [139], [140].

Vzhledem k tomu, že proces nepoužívá vysoké teploty ani škodlivé chemikálie, je považován za relativně bezpečný a ekologický. Navíc, protože probíhá za nízkých teplot, minimalizuje se v deponování materiálu vznik zbytkového napětí, což má pozitivní dopad na mechanické vlastnosti finálních produktů.

CS také umožňuje provádět opravy nebo zesílení stávajících dílů bez nutnosti jejich demontáže a přepravy, což prodlužuje jejich životnost a zároveň snižuje náklady. Díky schopnosti vytvářet součástky přímo z datového modelu je navíc zredukováno množství materiálového odpadu, což je výhodné oproti ostatním výrobním procesům zahrnujícím třískové obrábění. Další významnou výhodou je schopnost vyrábět složité geometrie s vysokou mírou přesnosti, což by tradičními metodami bylo obtížné nebo nákladné. Přenosné systémy CS pak umožňují aplikovat technologii přímo v terénu, což je ideální pro rychlé opravy.

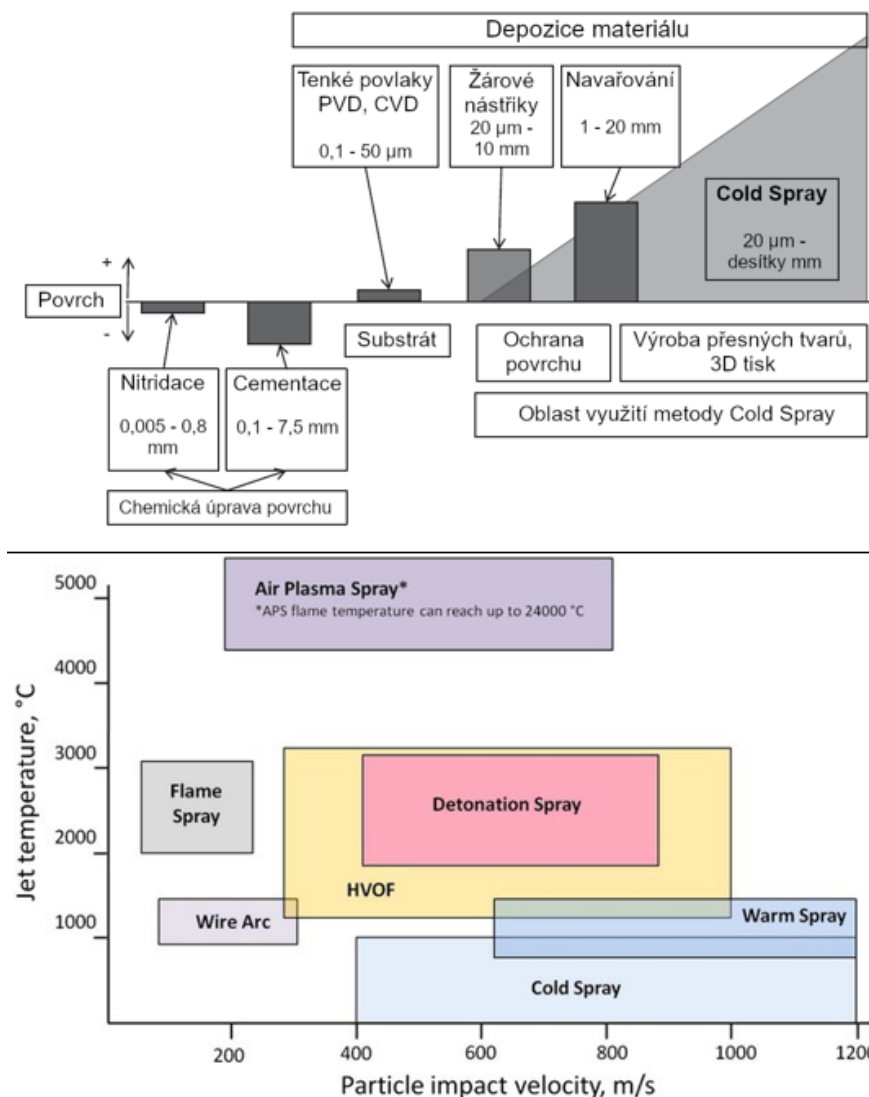
Metoda CS, v češtině někdy nazývána "studená kinetická depozice" nebo "studená kinetizace", je moderní technika vytváření kvalitních povlaků z práškových materiálů. Od tradičních metod povlakování se liší tím, jak je energie dodávána k transformaci prášku na kompaktní povlak. V tomto případě se místo tepelné energie využívá kinetická energie, což vyžaduje urychlení částic prášku na nadzvukové rychlosti. Toho se dosahuje smícháním práškových částic s vhodným plynem a jejich průchodem nadzvukovou (Lavalovou) tryskou. Pomocí tohoto plynu jsou částice následně dopraveny k substrátu, kde se při dopadu deformují a vytvářejí spojitý povlak.

Důležitým rysem metody CS je, že celý postup vytváření povlaku probíhá v pevném stavu, jak u práškového materiálu, tak u substrátu. I když nemusí být prováděn za pokojových teplot, často se využívají teploty vyšší, aniž by došlo k roztavení práškového materiálu. Toto specifické dodání energie částicím prášku dává povlakům vytvořeným technologií CS řadu výjimečných vlastností, jako je silná soudržnost, vysoká přilnavost k substrátu, velká tvrdost, nízká pórovitost a potenciálně neomezená tloušťka. Navíc se omezují vysokoteplotní degradační procesy, které jsou typické pro jiné metody nástřiků [139], [140], [143].

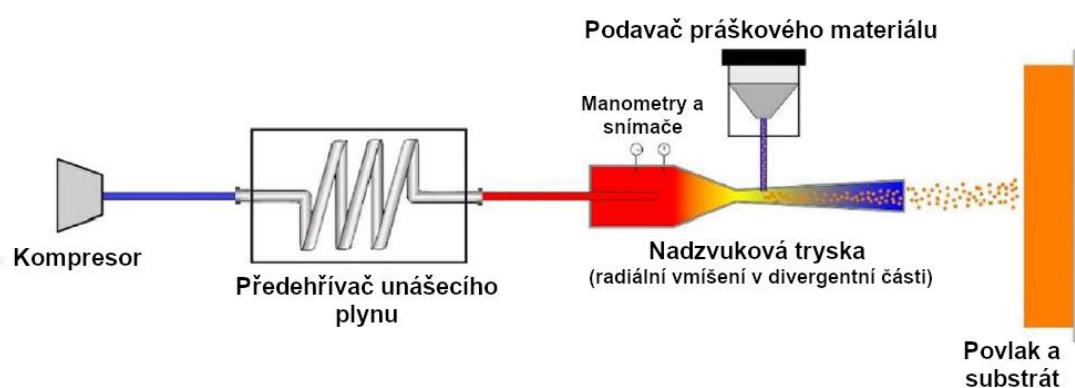
Metodu CS můžeme rozdělit na dva hlavní procesy depozice: nízkotlaký a vysokotlaký.

Nízkotlaká CS (LPCS) je optimalizována pro mobilní použití "v terénu". Díky nízké hmotnosti a kompaktnímu designu je ideální pro opravy komponent na místě bez složité demontáže. Systém LPCS pracuje s tlakem plynu až 3,5 MPa a teplotou okolo 500 °C. Omezení v maximálním tlaku unášecího plynu omezuje použitelnost materiálů, zejména na tvárné materiály jako AL nebo Cu. Konstrukční schéma LPCS je zobrazeno na Obr. 4.82.

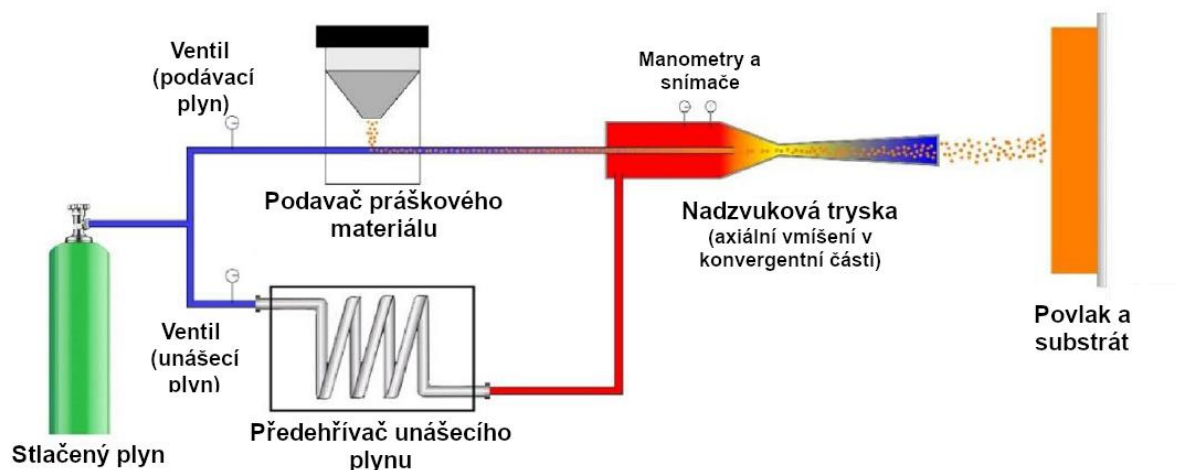
Vysokotlaká CS (HPCS) je navržena pro vysoké výkony a umožňuje dosažení vyšších tlaků a teplot (až 7 MPa a teploty do 1100 °C). Je prostorově náročnější a není snadno přenosná. Tato koncepce umožňuje zpracování širší palety materiálů za vysokých podmínek. Konstrukční schéma HPCS je zobrazeno na Obr. 4.83.



Obr. 4.81 – Zařazení CS mezi ostatní metody povlakování nebo chemické úpravy povrchu [140], [142]



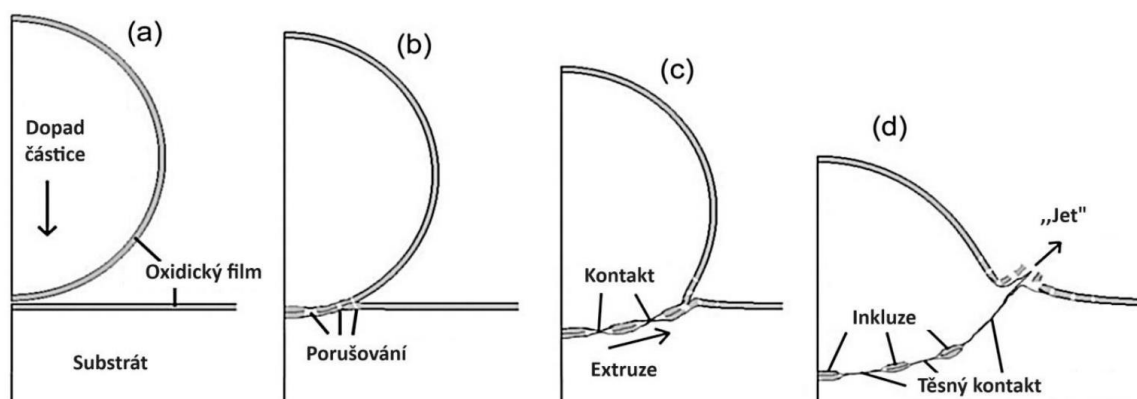
Obr. 4.82 – Schéma systému dle nízkotlaké koncepce LPCS [141]
Lze si povšimnout radiálního provedení vmišení práškového materiálu (tzv. downstream injection), což je pro tuto koncepci typické



Obr. 4.83 – Schéma systému dle vysokotlaké koncepce HPCS [141]

Zde si lze povšimnout axiálního mísení práškových materiálů (tzv. *upstream injection*). Díky vmísení částic práškového materiálu již v konvergentní části je prodloužena doba, při které jsou tyto částice ve styku s pracovním plynem, a je tak umožněn vyšší ohřev těchto částic

V procesu CS je interakce mezi částicí a substrátem a jejich následné spojení klíčové pro vlastnosti finálního povlaku. Efektivní přilnavost částice k substrátu nastane jen tehdy, když částice dosáhnou určité nezbytné dopadové rychlosti, která je unikátní pro každý materiál. Hlavním mechanismem vazby při metodě CS je adiabatická smyková nestabilita, k níž dojde, pokud částice zasáhne substrát rychlostí rovnou či vyšší, než je tato kritická rychlost. Tato skutečnost je zobrazena na Obr. 4.38, kde je patrná dynamika dopadu částic na substrát.



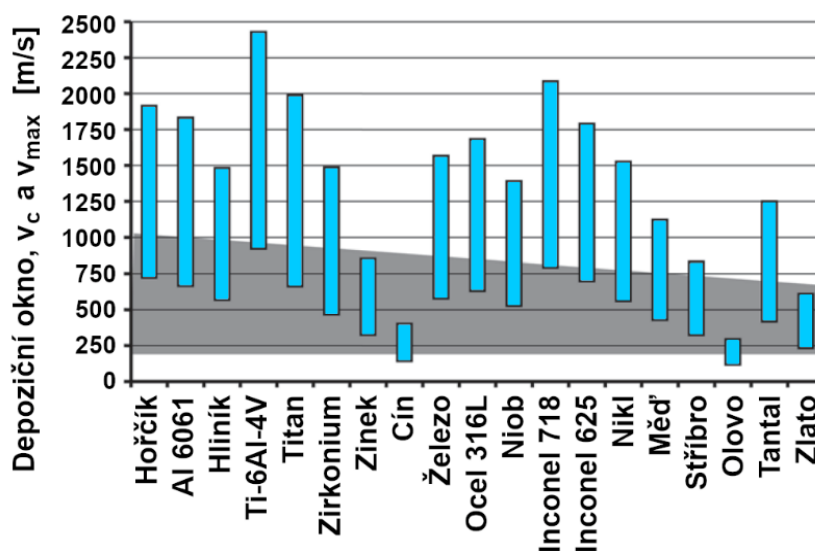
Obr. 4.84 – Interakce částice při dopadu na substrát [143]

Vysoká kinetická energie dopadajících částic působí na aktivaci povrchů částice i substrátu, což vede k porušení oxidické vrstvy a zlepšení přilnavosti částice. Kontaktem dojde k výrazné plastické deformaci a vytvářejí se intruze a extruze na rozhraní částice a substrátu, což vyvolá vymrštění materiálu z povrchu substrátu (tzv. *jet*) a navázání pevné vazby. Úspěch depozice práškových materiálů závisí na dosažení základní fyzikální podmínky: částice musí mít dostatečnou rychlost dopadu, která je označována jako kritická (v_{crit}). Dosažení kritické rychlosti je nutné pro vytvoření pevného spojení – adheze – mezi částicí a povrchem. Je-li

rychlost nižší, nedochází ke spojení, ale pouze k odražení materiálu od povrchu substrátu nebo již existujícího povlaku. Kritická rychlost se liší v závislosti na typu práškového materiálu, vlastnostech unášecího plynu a specifických procesních parametrech. Kromě minimální hranice rychlosti existuje i maximální rychlost depozice (v_{max}), při které ještě může docházet k vytváření povlaku. Překročení této hodnoty opět vede k erozi. Skutečná rychlost částic by se měla pohybovat v intervalu mezi těmito kritickými hodnotami:

$$v_{crip} \leq v \leq v_{max} \quad (4-22)$$

Tento interval se nazývá depoziční okno a představuje klíčový prvek pro úspěšnou depozici materiálu (Obr. 4.85).



Obr. 4.85 – Velikost depozičních oken pro různé materiály [140] při velikosti částice $20 \mu m$ a teplotě dopadu částice $20^\circ C$

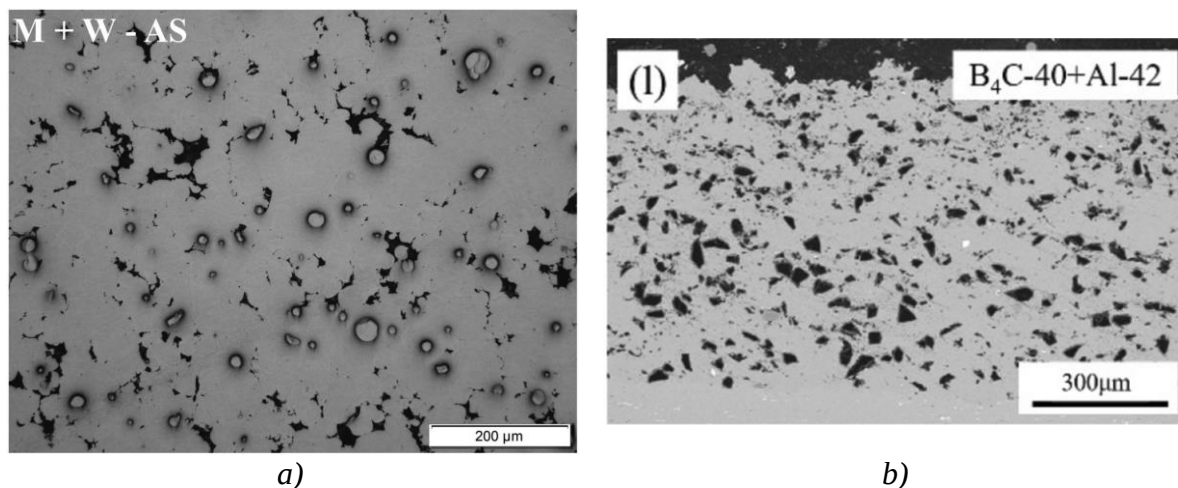
Vývoj materiálů pro balistickou ochranu vyžaduje komplexní přístup, který zahrnuje širokou rozsah fyzikálních, chemických a konstrukčních aspektů. Klíčovým prvkem je schopnost materiálu absorbovat a rozptýlit kinetickou energii střely, což zabraňuje průniku a minimalizuje dopadovou energii. Tato schopnost závisí na kombinaci materiálových vlastností, jako jsou pevnost, tvrdost a houževnatost. Tyto vlastnosti umožňují materiálu odolat bezprostřednímu nárazu střely a přitom se efektivně deformovat tak, aby absorboval co nejvíce energie.

Mechanické vlastnosti materiálů jsou fundamentální pro jejich odolnost vůči balistickým hrozbám. Materiály musí mít dostatečnou pevnost pro odolávání nárazu a zároveň zachovávat integritu struktury při vysokých deformacích.

Strukturální charakteristiky jsou v oblasti balistické odolnosti rovněž klíčové. Vícevrstvé materiály (lamináty) mohou výrazně zvýšit ochranné schopnosti tím, že kombinují různé materiály s rozdílnými vlastnostmi čímž je možné dosáhnout zvýšení schopnosti absorbovat kinetickou energii střely.

Výhody technologie CS pro vývoj balistických ochran lze rozdělit do několika základních směrů, které vyplývají z inherentních charakteristik této technologie. CS může aplikovat materiály s pozměněnými mechanickými vlastnostmi vzhledem k tradičním materiálům. Tímto přístupem lze dosáhnout vyšší tvrdosti nanášených vrstev kovu díky intenzivní plastické deformaci, kterou prodělávají částice deponovaného kovu při dopadu na substrát [143]. Tvrdost povrchové vrstvy je klíčovou vlastností materiálu používaného určeného pro balistické ochranné aplikace. Díky vysoké tvrdosti čelní dopadové vrstvy dochází k otupení nebo fragmentaci projektilu a tím k výraznému omezení penetračního účinku [144], [145], [146], [147]. Mikrostruktura CS vrstvy ve stavu po nástřiku je uvedena na Obr. 4.86.

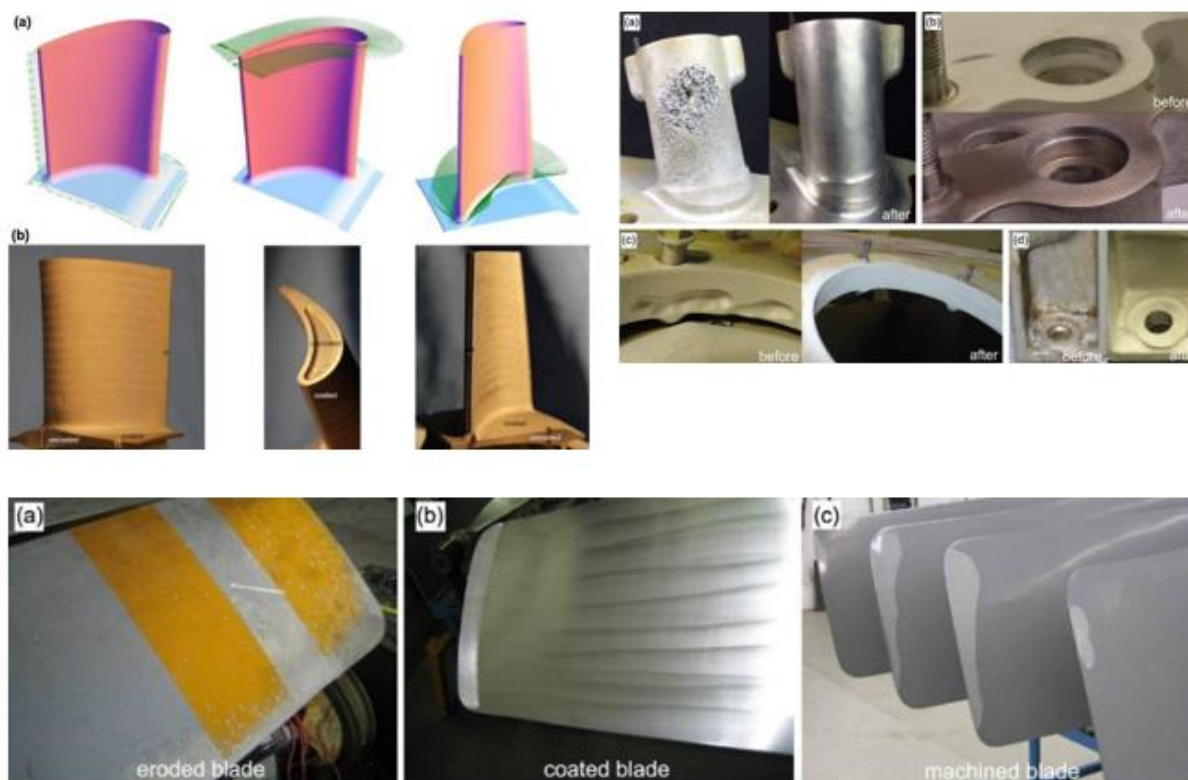
CS také umožňuje, jako jedna z mála technologií výroby, díky řízené depozici masivní vrstvy vytvořit kovokeramické nebo kovo-olymerní kompozitní materiály [148], [149], [153], [154], [155]. Tyto materiály poskytují značný potenciál pro vývoj nových balistických kompozitních materiálů.



a) b)
Obr. 4.86 – Mikrostruktura CS vrstvy ve stavu po nástřiku [157]
a) Ti s částicemi W [156]; b) Al s částicemi B₄C

Současné balistické ochrany mohou být snadno opraveny nebo zesíleny přidáním dalších vrstev materiálu pomocí technologie CS. Takto lze například prodloužit životnost vybavení a zároveň zlepšit jeho ochranné vlastnosti. Technologie CS je velmi vhodným nástrojem dimenzionální a částečně strukturální opravy poškozených součástí z titanových

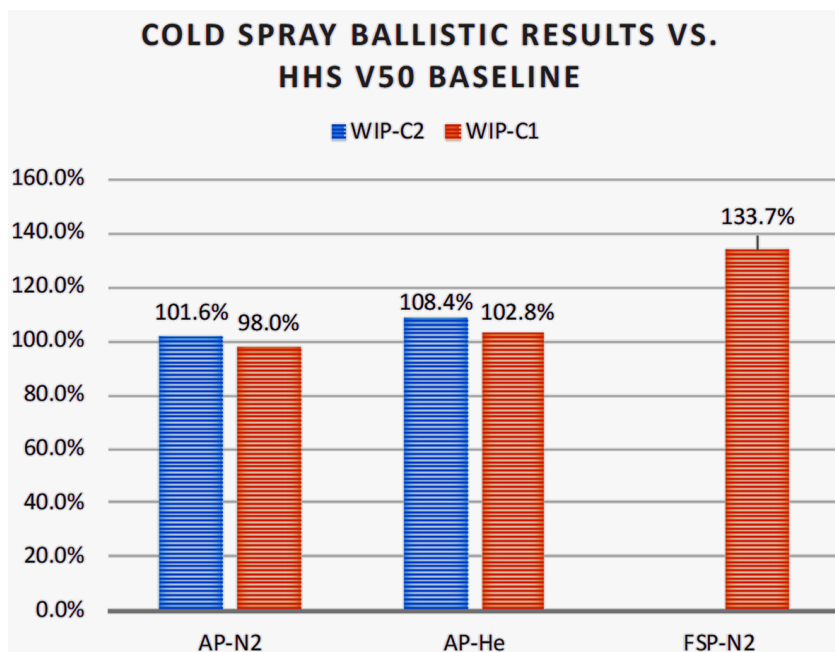
a hořčíkových slitin. Je hojně využívána v oblasti letectví a ve vojenských aplikacích, viz Obr. 4.87 [150], [158].



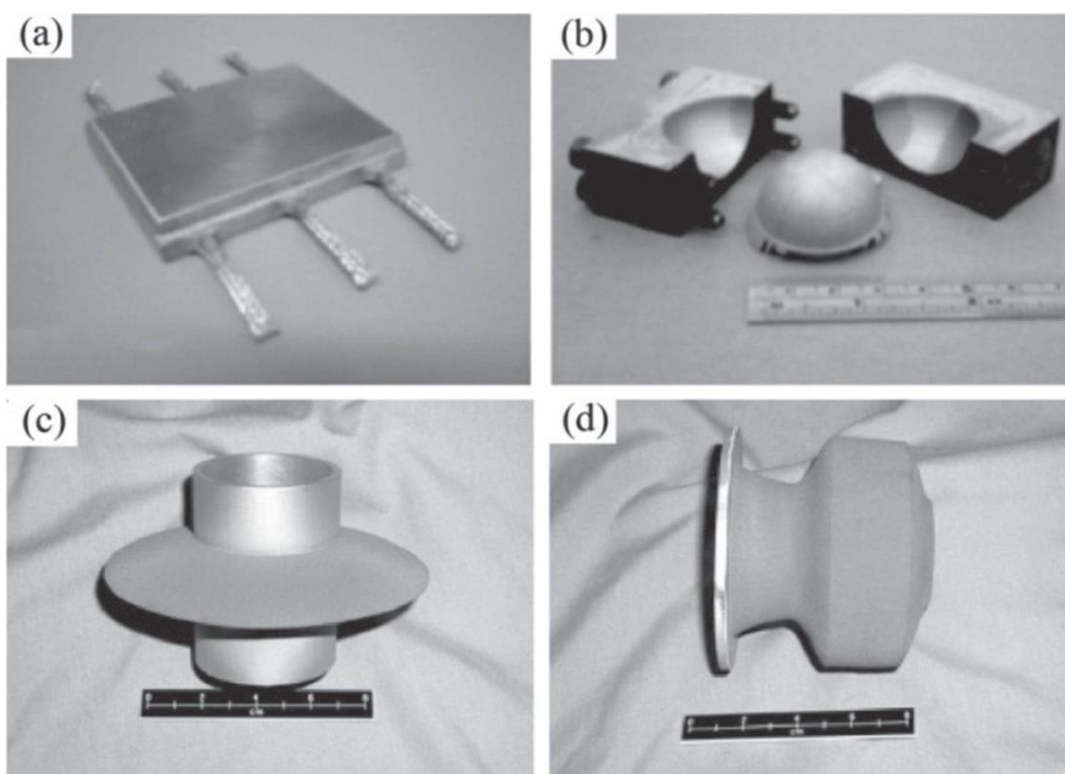
Obr. 4.87 – Příklady oprav pomocí CS technologie [158]
lopatka turbíny, komponenty z hořčíkových slitin, vrtulové listy

Tímto způsobem je možné opravovat pancéřové materiály nebo tyto materiály dále vylepšovat přímo na stávajících vozidlech. Výzkum vedený americkou armádní výzkumnou laboratoří DEVCOM se zaměřil na analýzu balistického výkonu CS nástřiků. Klíčovým ukazatelem bylo procento obnovení balistického výkonu vzhledem ke 100 % základního kovu. Testy byly provedeny na ocelovém plechu o rozměrech 12" x 12" s tloušťkou 6,3 mm a opravenou hloubkou 1 mm. K testování byly použity průbojné střely a střely simulující fragmentaci. Výsledky ukazují, že některé varianty CS nástřiků, zejména WIP-C2, překračují základní balistický výkon původního materiálu, což je povzbudivý výsledek pro vojenské aplikace. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 4.88 [159].

CS systémy jsou často spojeny s robotickým řízením trajektorie nástřiku a je tedy možné aplikovat materiály přímo na složité geometrie. Tento přístup umožňuje vytváření balistických ochran přesně na míru požadavkům uživatele nebo specifických částí vybavení. Velmi vhodnou slitinou pro tuto aplikaci je Ti slitina pro její vysokou balistickou účinnost a relativně dobrou dostupnost surovin pro aplikaci procesu CS [160], [161]. Příklad součástí vyrobených aditivním procesem CS je na Obr. 4.89.



Obr. 4.88 – Balistická efektivita CS opravených pancířů pomocí materiálu WIP pro průbojné a fragmentové střely [159]



Obr. 4.89 – Příklady součástí ze slitiny Ti vytvořených pomocí CS [162], [163]
a) tři opláštěné termočlánky vložené do součásti z Ti [162]; b) polokoule z Ti vytvořená formou [162]; c) trubka [163]; d) jedna osově souměrná součást [163]

Titanová slitina Ti-6Al-4V se často vyskytuje ve studiích dynamického chování a balistické odolnosti. Někteří autoři testovali tuto slitinu v různých stavech tepelného zpracování a s různou mikrostrukturou (včetně velikostí zrna). Bylo zjištěno, že tyto změny

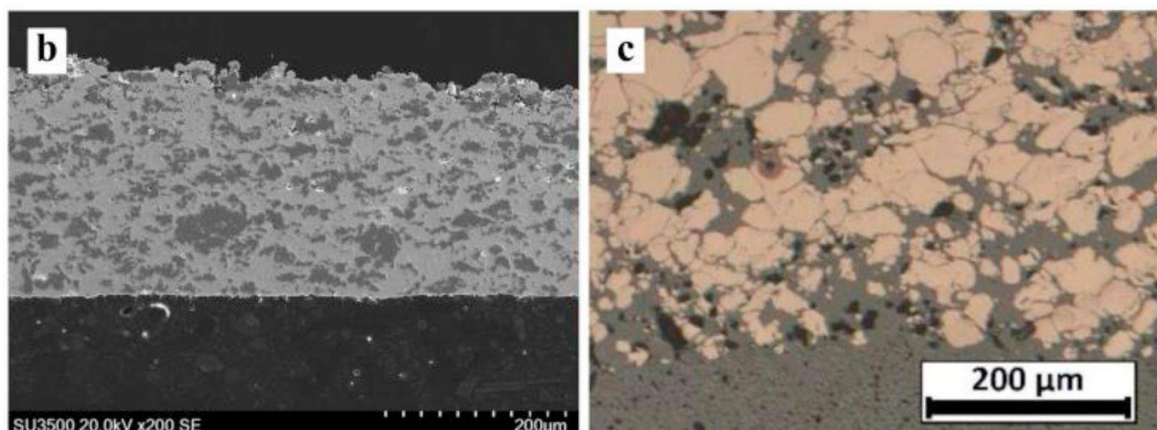
mají velký vliv zejména na statické hodnoty meze kluzu, meze pevnosti a houževnatosti, ale mají minimální vliv na balistickou odolnost [163], [164]. Ti slitiny se tedy jeví jako vhodný materiál pro tvorbu balistických ochran pomocí CS, kdy se mění mikrostruktura materiálu vlivem depozičního procesu, ale zároveň se výrazně zvyšuje tvrdost, což je jedna z klíčových materiálových vlastností pro balistickou odolnost.

V kombinaci CS s technologií 3D skenování a modelování lze získat přesnou geometrii konstrukce chráněného systému.

CS technologie s využitím Ti slitiny Ti-6Al-4V představuje inovativní přístup k vytvoření balistické ochrany vyrobené na míru. Tato technologie může nalézt uplatnění nejen v osobní ochranné výbavě, ale i ve specifických aplikacích, jako je např. balistická ochrana sedaček. Z CAD modelu nebo 3D scanu součásti lze získat přesné geometrické údaje, které jsou nezbytné pro následnou výrobu ochranných prvků. Tento proces zajišťuje, že ochrana bude přiléhat k sedačce bez omezení funkcí nebo komfortu uživatele. Na základě přesných modelů pak lze s pomocí robotického řízení nanášet titanovou slitinu Ti-6Al-4V přímo na povrchy sedaček nebo na předem vytvořené substráty, které se poté do sedaček montují.

Díky CS technologii lze materiál aplikovat s vysokou přesností a minimalizovat tak potřebu následného obrábění nebo úpravy. Aplikovaný materiál může být ihned po nástřiku funkční, což umožňuje rychlý přechod od prototypu k finálnímu produktu. V případě balistické ochrany sedaček by proces CS umožnil přesné pokrytí potřebných oblastí sedaček s důrazem na zóny, které jsou nejvíce vystavené riziku. Integrace CS technologie s titanovou slitinou Ti-6Al-4V tak otevírá cestu k pokročilé a specializované balistické ochraně.

CS umožňuje aplikovat širokou paletu materiálů (od kovů po polymery a kompozity), což umožňuje vývojářům experimentovat s různými kombinacemi materiálů pro dosažení optimálních balistických vlastností. Díky nízkým teplotám depozice lze nanášet buď teplotně citlivé materiály nebo lze nanášet tvárné kovy na polymerní substráty. Nejčastějším a nejvhodnějším polymerním substrátem se jeví PEEK který má dostatečnou termální i mechanickou odolnost pro tvorbu povlaku. Na Obr. 4.90 je zobrazen nástřik Cu/Sn na PEEK.



Obr. 4.90 – Nanesená vrstva obsahující Cu a Sn [118]
b) Cu a Sn (50/50 hm. %); c) PEEK a Cu (80/20 hm. %)

Velmi významná je možnost technologie CS vytvářet kompozitní materiály s vysokou strukturální integritou. Tato vlastnost je kritická v aplikacích vyžadujících materiály, které mohou odolat extrémním rázovým zatížením a zároveň udržet svoji funkčnost i po nárazu. Vývoj materiálů s vysokou pevností a odolností, které mohou být aplikovány pomocí CS, nabízí potenciál pro vytváření lehkých a efektivních balistických ochranných systémů. Jedinečná nízkoteplotní charakteristika CS je dále přínosná pro zachování vlastností použitých materiálů, eliminující rizika spojená s vysokoteplotními degradačními procesy, jako je oxidace nebo strukturní změny. To umožňuje využití široké škály materiálů, včetně těch, které by při vyšších teplotách ztrácely své vlastnosti.

Praktický přínos CS spočívá také v rychlosti výrobního procesu, který je zásadní pro aplikace vyžadující rychlou a efektivní produkci. Schopnost CS aplikovat materiály s vysokou přesností a s minimální potřebou dodatečného opracování znamená, že výroba balistických ochranných prvků může být rychlejší a efektivnější, což je zásadní pro rychlou adaptaci na měnící se požadavky v oblasti obrany a bezpečnosti.

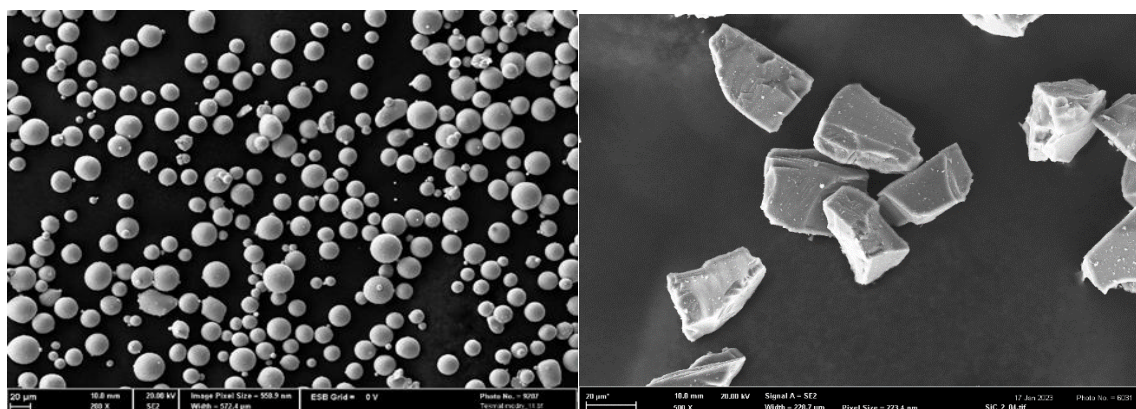
Vzhledem k těmto technickým přínosům by mělo být zaměření na výzkum a vývoj v oblasti CS prioritou zejména v oblasti balistické ochrany. Investice do dalšího studia a optimalizace technologie CS může přinést významné zlepšení v efektivitě a kvalitě balistických ochranných materiálů, čímž se zvýší ochrana a bezpečnost jednotlivců i vozidel. Česká republika, s jejím rostoucím vědeckým a průmyslovým potenciálem, má příležitost stát se plnohodnotným hráčem v této dynamicky se rozvíjející oblasti.

V rámci vlastního experimentálního řešení a využití této metody byly vytvořeny vzorky určené pro zajištění potřebné tvrdosti čelní dopadové vrstvy. Jako základní materiál matrice byl navržen Ti, do kterého bylo gradientně přidáno definované množství SiC (z důvodu dosažení

heterogenního materiálu). V rámci přípravy experimentu byla navržena a vytvořena koncentrace (viz Obr. 4.92 – Obr. 4.94):

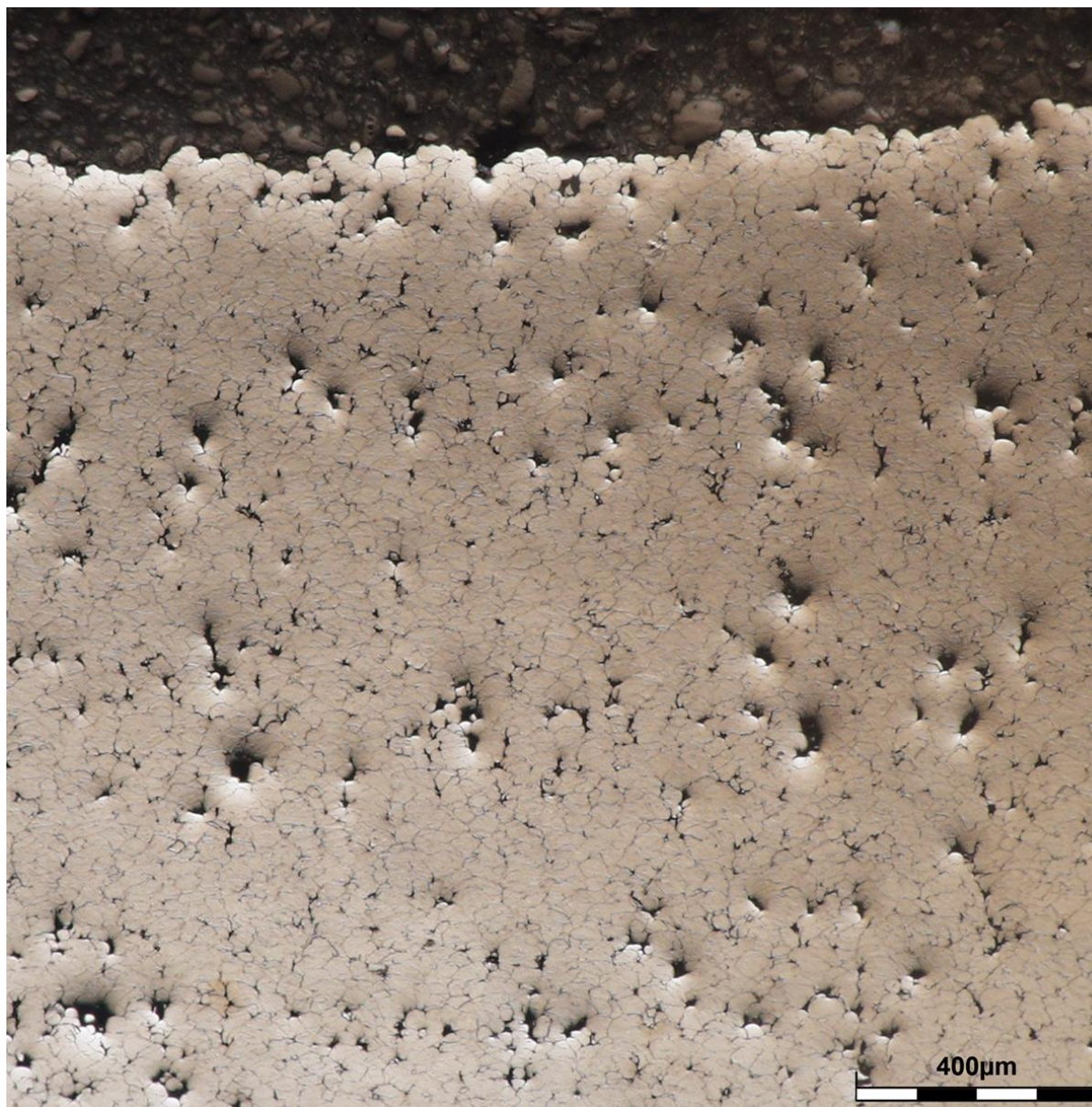
- 100 % Ti,
- 90 % Ti, 10 % SiC,
- 75 % Ti, 25 % SiC.

Nástřík (povlak) byl zhotoven z prášku Ti o velikosti částic od 25 do 40 μm , do kterého byly postupně v rámci technologie přidány částice SiC. Použité prášky jsou zobrazeny na Obr. 4.91.

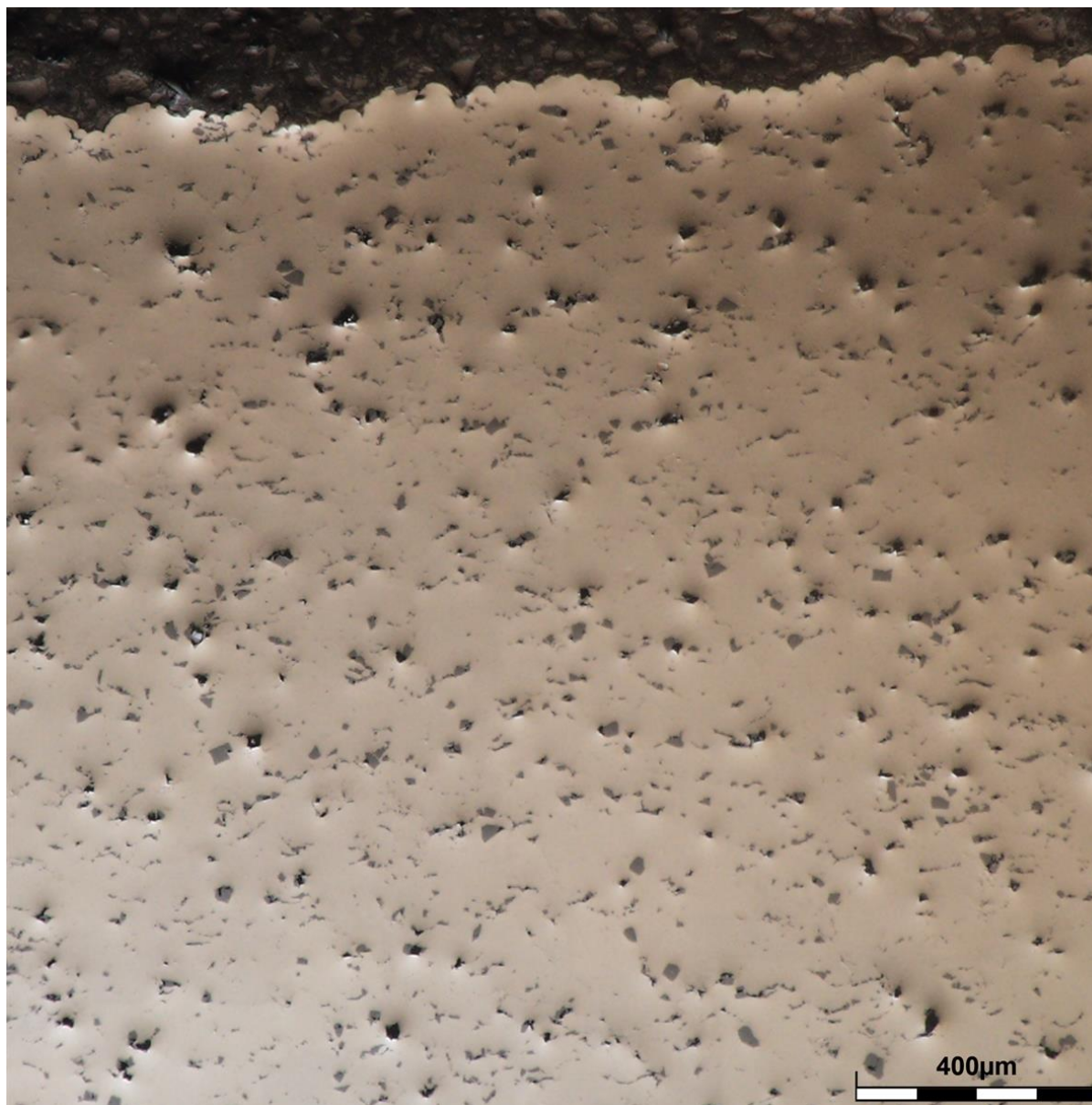


a) b)
Obr. 4.91 – Mikročástice pro technologii CS
a) SEM prášku Ti; b) SEM prášku SiC

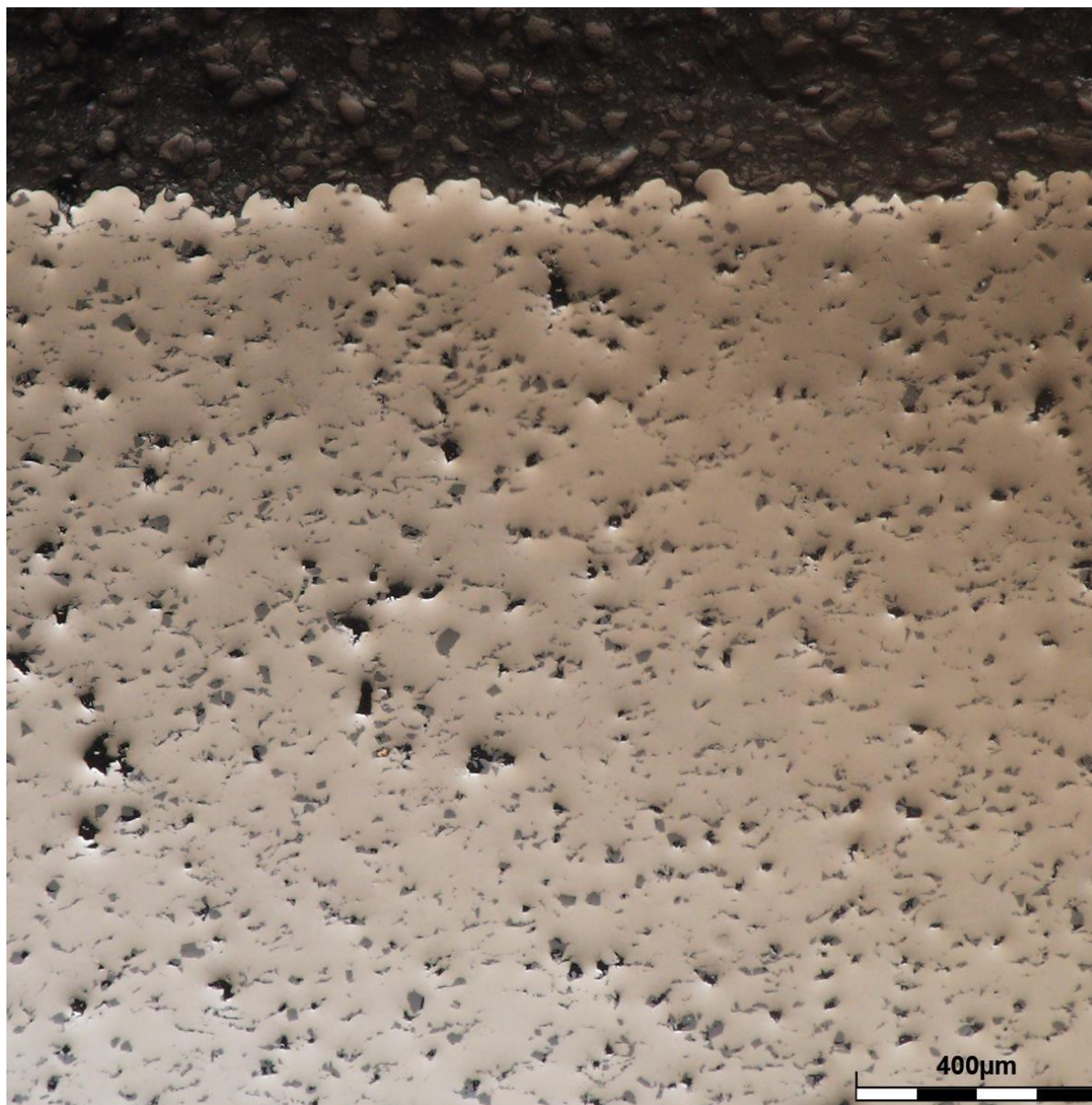
U všech uvedených kombinací byl zvolen hnací plyn dusík (N_2), tlak hnacího plynu byl 5 MPa, teplota hnacího plynu byla 950 $^{\circ}\text{C}$, rychlost posuvu trysky byla 500 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a vzdálenost trysky od základního materiálu byla 30 mm.



Obr. 4.92 – Zobrazení vzorku Ti vyrobeného technologií SC, zvětšeno 150x



Obr. 4.93 – Zobrazení vzorku Ti 90 %; SiC 10 % vyrobeného technologií CS, zvětšeno 150x



Obr. 4.94 – Zobrazení vzorku Ti 75 %; SiC 25 % vyrobeného technologií CS, zvětšeno 150x

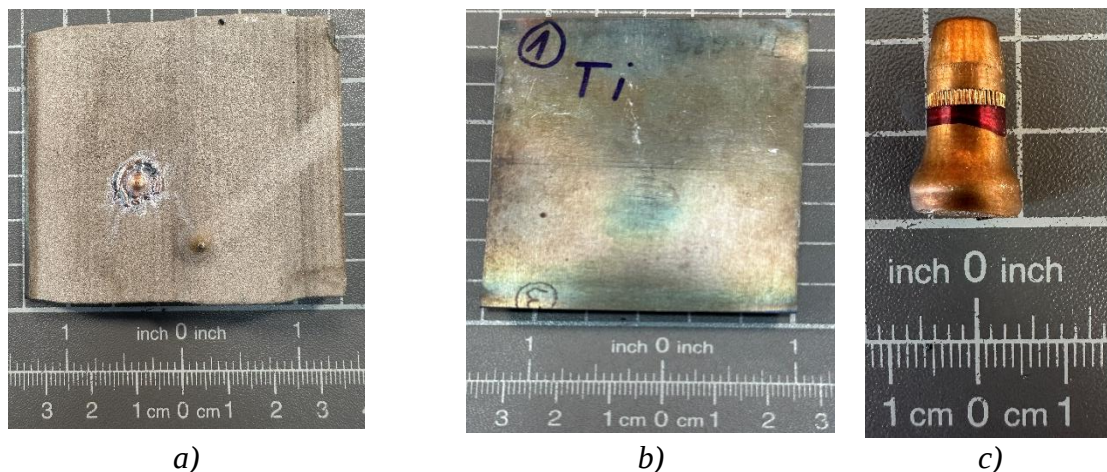
Změna koncentrace SiC respektuje požadavek na zvýšení tvrdosti čelní dopadové části, což je dokumentováno v Tab. 4-36 – Hodnoty povrchové tvrdosti. Zvýšení koncentrace SiC zvyšuje tvrdost aplikovaného povlaku.

Tab. 4-36 – Hodnoty povrchové tvrdosti

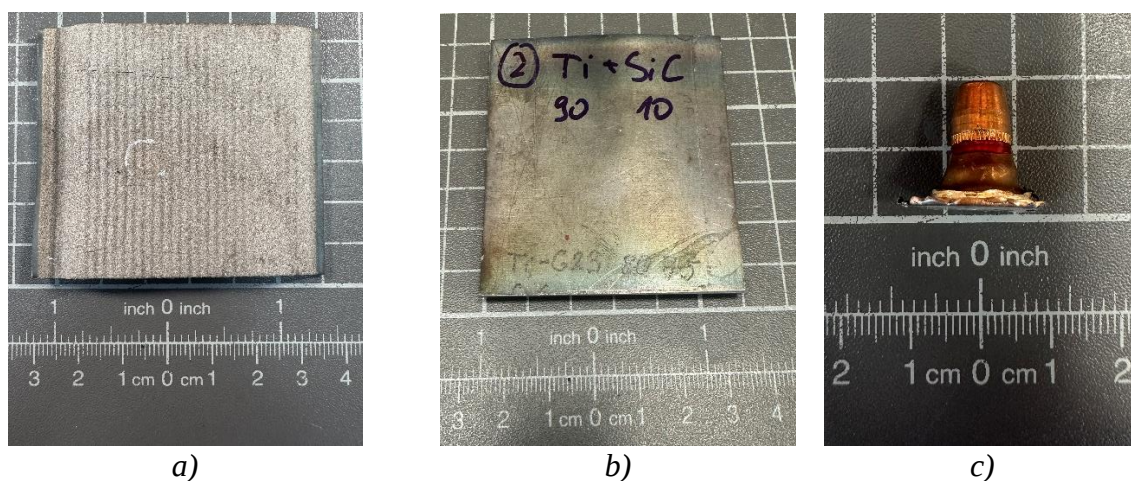
	100 % Ti Cold Spray				75 % Ti + 25 % Sic Cold Spray				90 % Ti + 10 % SiC Cold Spray			
	HV0,5	HRC	HV5	HRC	HV0,5	HRC	HV5	HRC	HV0,5	HRC	HV5	HRC
1.	363,6	37,1	356,8	36,3	443,2	44,6	441,7	44,4	376,9	38,4	460,8	45,2
2.	395,8	40,4	373,8	38,2	419,9	42,2	403,6	41	389,1	39,8	455,1	45
3.	346,2	35,1	361,1	36,8	432,5	43,9	422,3	41,7	451,2	44,8	399,5	40,9
4.	379,9	38,8	406,4	41,4	408,6	41,2	450,7	44,7	456,9	45	448,3	44,7
5.	369,4	37,7	380,3	38,8	431,8	43,8	463,7	45,7	411,8	41,6	427,5	43,2

	100 % Ti Cold Spray				75 % Ti + 25 % SiC Cold Spray				90 % Ti + 10 % SiC Cold Spray			
Průměr	370,9	37,8	375,7	38,3	427,2	43,1	436,4	43,5	417,2	41,9	438,2	43,8
Sm. odchylka	16,53	1,76	17,54	1,80	11,87	1,25	21,23	1,82	32,17	2,64	22,41	1,61

Ověření balistické odolnosti bylo provedeno s využitím Taylorova testu¹⁰. Experimentálně bylo prokázáno, že podíl SiC významně zvyšuje odolnost Ti proti penetraci, což je patrné i z obrázků střely i povlaku (Obr. 4.95 – Obr. 4.97).

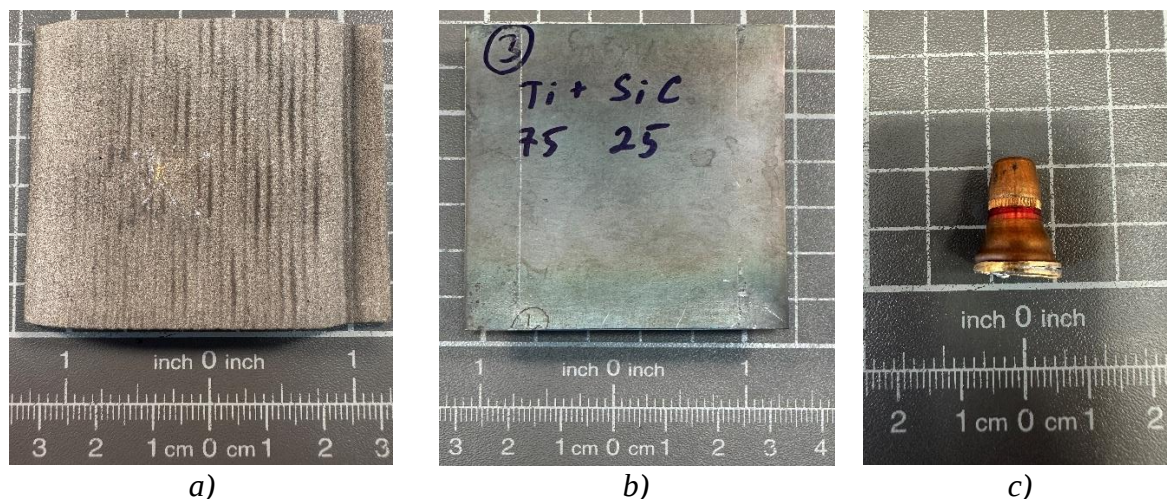


Obr. 4.95 – Taylorův test - vzorek 100 % Ti
a) přední strana; b) zadní strana; c) deformace střely 7,62 mm FMJ M80



Obr. 4.96 – Taylorův test - vzorek 90 % Ti + 10 % SiC
a) přední strana; b) zadní strana; c) deformace střely 7,62 mm FMJ M80

¹⁰ K porovnání balistické odolnosti byl proveden Taylorův rázový test. K verifikaci balistické odolnosti vyrobených vzorků byly použity puškové střely 7,62 mm M80 o hmotnosti 9,55 g, které byly delaborovány z náboje vojenské ráže 7,62 mm x 51 mm NATO FMJ. Princip střeleckého experimentu spočíval v dopadu střely na vyrobený vzorek, který byl upnutý v dopadišti. Střela vložená do nosiče je urychlena stlačeným vzduchem z pneumatického kanónu směrem k dopadišti. Před dopadem se střela od nosiče oddělí a dopadá na vzorek v dopadišti.



Obr. 4.97 – Taylorův test - vzorek 75 % Ti + 25 % SiC
a) přední strana; b) zadní strana; c) deformace střely 7,62 mm FMJ M80

Aditivně vytvořené součásti pancíře byly testovány v laboratorních podmínkách a částečně i v rámci střeleckého experimentu. Z uveřejněných experimentů vyplývá, že technologie aditivních technologií jsou využitelné pro potřeby vytváření specifických struktur využitelných v rámci inovací nových představných či mobilních pancířů.

Lze očekávat, že právě tyto technologie budou primárně udávat trendy v aplikacích nových gradientních materiálů s balistickými vlastnostmi. Z výše uvedeného představení technologií, stejně jako z dílčích výsledků experimentálního vývoje je patrné, že konstrukce dílčí částí pancířů se specifickými užitnými vlastnostmi, vyrobenými uvedenými technologiemi s potenciálem jejich kombinací, je jedním z očekávaných trendů v následujícím období.

5. Závěr

Vývoj materiálů a technologií má významný vliv na vývoj nových balistických materiálů. V dnešní době je známo více než 40.000 materiálů, které mohou být v různých formách implementovány do balistických ochran.

V dnešní době jsou nejvíce využívány kovové pancíře a dále pak pancíře kompozitní [27]. Poslední výzkumy, které byly prováděny i ve státních podnicích Ministerstva obrany ČR, např. Vojenský výzkumný ústav Brno naznačují, že významnou roli v systému ochrany techniky i jednotlivce hrají keramické pancíře. Jejich výhodami jsou jejich tloušťka vzhledem k dosažené balistické ochraně. Nevýhodou však zůstává jejich křehkost, hmotnost a omezená opakovatelná použitelnost po zásahu střelou. V tohoto důvodu se práce průřezově zaměřuje na perspektivy vývoje a výroby vrstvených pancířů (materiály a výrobní technologie), které jsou, svojí povahou, opakovaně použitelné jak v oblasti balistické ochrany vozidel, tak pro dílčí ochranu jednotlivce. Vhodnou kombinací materiálů vrstveného pancíře lze dosáhnout nižší hmotnosti při zachování balistické odolnosti ochrany oproti kovovému pancíři ARMOX 600T o tloušťce 5 mm, viz Tab. 5-1.

Tab. 5-1 – Porovnání plošné hmotnosti pancířů při zachování balistické odolnosti

materiál	tloušťka [mm]	Plošná hmotnost [kg·m ⁻²]	počet vrstev	testování balistické odolnosti
Twaron CT 747, matrice LG700 + HG700	47,9	49,6	90	STANAG 4569, AEP-55 úroveň ochrany I puškový náboj 7,62 x 51 mm NATO FMJ M80
Twaron CT 747, matrice TH10 (termoplast)	41,2	44,4	90	
Twaron CT 747, matrice ER68 (termoset)	38,3	42,4	90	
Endumax Shield XF33	16,9	22,7	100	
Armox 500T	6,5	55,7	-	
Ti-6Al-4V ELI	11,1	26,6	-	
Ocel M300	12,0	34,4	-	
Ti-6Al-4V ELI + keramika Al ₂ O ₃	12,3	34,7	-	
Ocel M300 + keramika Al ₂ O ₃	12,5	37,5	-	
Twaron CT 747, matrice LG700 + HG700	47,9	49,6	90	

Vrstvené pancíře mohou v dílčích aspektech přispět ke zvýšení vybraných užitných vlastností ochrany. Z pohledu uživatele lze za základní užité vlastnosti považovat tloušťku pancíře, hmotnost pancíře, stupeň balistické odolnosti a možnost manipulace. V rámci experimentálního výzkumu byly vyvinuty nové konstrukce balistických ochran a podařilo se propojit využití nových materiálů a výrobních technologií do jednoho funkčního systému.

V rámci konceptu předložené habilitační práce byly stanoveny dva základní cíle. Cílem první etapy bylo navrhnout čelní dopadovou část pancíře tak, aby bylo zajištěno zvýšení tvrdosti čelní části pancíře. Pro čelní část byl použit standardizovaný kovový pancíř ARMOX 600T a HARDOX 450. Pancíře byly povrchově upraveny technologiemi difuzních úprav cementace a nitridace (viz kapitoly 4.5.7 a 4.5.8) a to z důvodu dosažení lepších užitných vlastností, zejména tvrdosti povrchu. Původně zamýšlené (a dnes běžně používané) varianty pancířů tloušťky (5–8) mm byly postupně minimalizovány na úroveň tloušťky 3 mm a následně až 2 mm. S využitím uvedeného přístupu vedlo rovněž k významnému snížení hmotnosti čelní části pancíře. Snížení balistické odolnosti bylo kompenzováno dalšími přídavnými vrstvami vrstveného pancíře.



Obr. 5.1 – Průstřel čelní části pancíře HARDOX 450, tl. 2 mm se zobrazením rubové strany

Nejvýhodnější technologií, z hlediska dosažených výsledků balistické odolnosti, byla vyhodnocena technologie jednostranné nitridace v plynu u plechu HARDOX 450 (viz kapitola 4.5.8). Nejlepší variantou byl pancíř nitridovaný jednostranně, a to do hloubky 1 mm, viz Obr. 4.52. U pancíře, který byl opatřen oboustrannou vrstvou bylo dosaženo pronitridování celé tloušťky plechu 3 mm a 2 mm, což způsobilo významnou křehkost materiálů a snížení zastavujícího účinku kovového pancíře vůči střele ráže 7,62 mm x 51 mm.

Určení vhodné varianty kovového pancíře a difuzní technologie vycházelo z balistického střeleckého experimentu, kdy bylo při stejné konfiguraci vrstveného pancíře dosaženo vyšší balistické odolnosti právě u uvedené varianty plechu HARDOX 450 po jednostranné nitridaci.

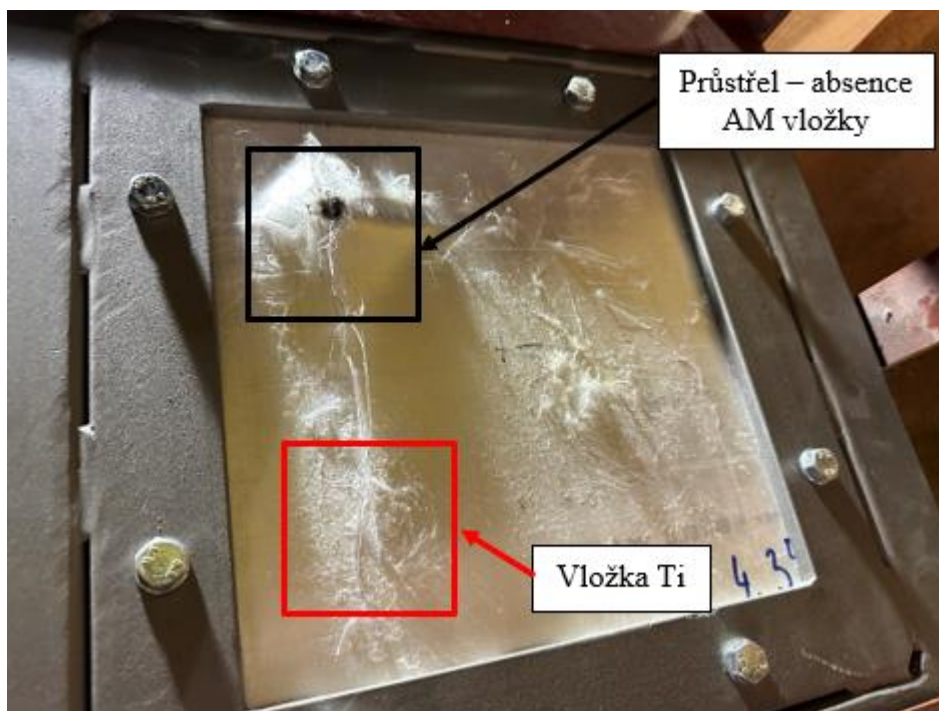
Řešení vedoucí k dosažení prvního cíle zahrnovalo výzkum kovových materiálů, zejména s ohledem na vliv legujících prvků na proces difuze a vývoj technologie, která využívá potenciálu nitridace v plynu s možností dosažení hloubky (1–1,5) mm. Parametry procesu byly navrženy tak, aby mohlo být dosaženo uvedené hloubky vrstvy. Přitom je známo, že oceli o koncentracích legujících prvků viz Tab. 5-2 v procesech nitridace dosahují běžně hloubky difuzní vrstvy do 0,5 mm. Nitridací pancíře nedošlo ke změně jeho geometrie, na rozdíl od cementace, kdy byla geometrie významně změněna (významná deformace plechů). Nitridace pancířů v plynu je pro tyto případy vhodnější variantou chemicko-tepelného zpracování než technologie cementace.

Předpokladem řešení této části práce bylo využít potenciálu kovových pancířů v kombinaci s povrchovými technologiemi vedoucími ke zvýšení povrchové tvrdosti. Tento fakt byl potvrzen laboratorním měřením mikrotvrdosti (viz Obr. 4.50, Obr. 4.52, Obr. 4.53, kapitoly 4.5.7 a 4.5.8) a následně střeleckými experimenty¹¹.

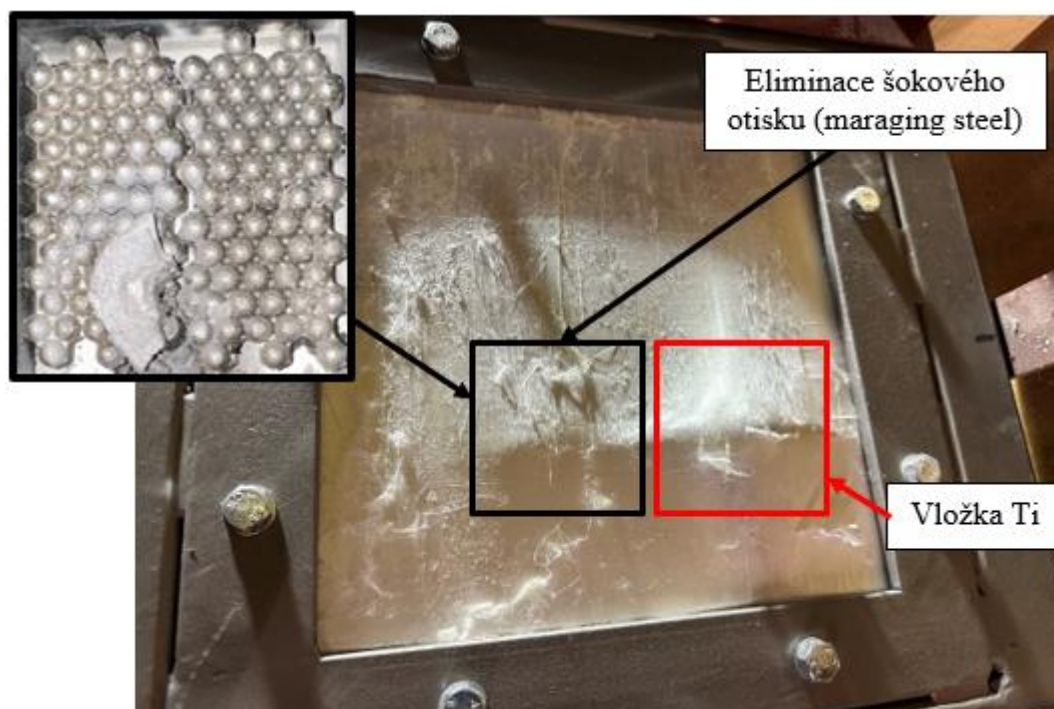
Tab. 5-2 – Chemické složení a vybrané mechanické vlastnosti ARMOX 600T [83]

Armox 600T	Chemické složení [hm. %]	Tvrdost [HBW]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0.2}$ [min MPa]	Tažnost A_5 [min %]
Datasheet	C (0.32); Si (0.40); Mn (1.2); P (0.010); S (0.003); Cr (1.0); Ni (1.8) B (0.005);	480–540	1450–1750	1250	8

¹¹ Během experimentálního řešení bylo střeleckým experimentem prokázáno, že je výhodné zvýšit tvrdost a s tím související křehkost materiálu pancíře pouze v jeho dílčí části. V případě zvýšení tvrdosti v celém průřezu materiálu je sice významně zvýšena jeho tvrdost, ale při průniku střely postrádá pancíř dostatečnou houževnatost. Vhodnou kombinací těchto vlastností, tedy vysoké tvrdosti na povrchu při současném dosažení požadované houževnatosti v jádru materiálu, lze efektivně dosáhnout zlepšení užitečných vlastností pancíře. To znamená, že lze snížit jeho tloušťku při zachování třídy balistické ochrany (viz kapitoly 4.5.7 a 4.5.8).



Obr. 5.2 – Průstřel vrstveného pancíře, Hardox 2mm/panel UHMWPE 32 vrstev



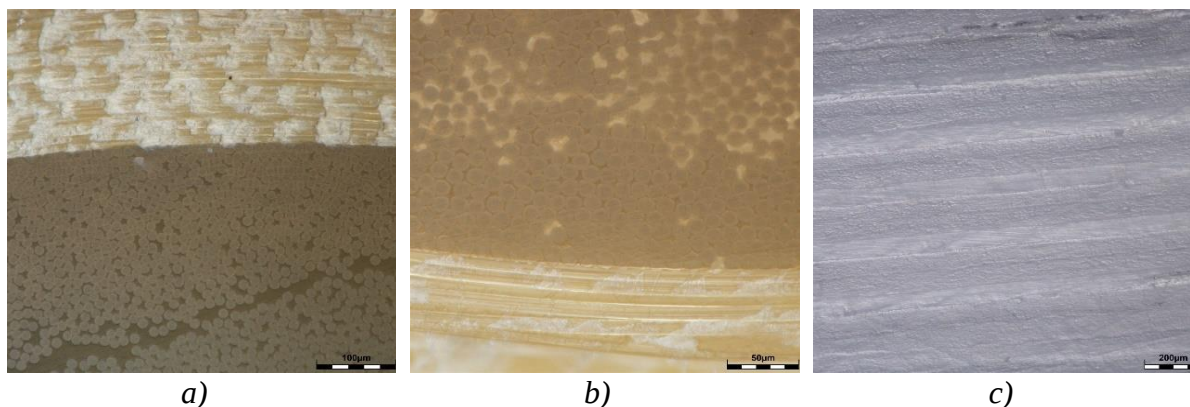
Obr. 5.3 – Zastavení střely, vrstvený pancíř Hardox 2mm/aditivně vytvořená vložka 5mm Ti/panel UHMWPE 32 vrstev



Obr. 5.4 – Vyvinutý vrstvený pancíř včetně zachycené střely

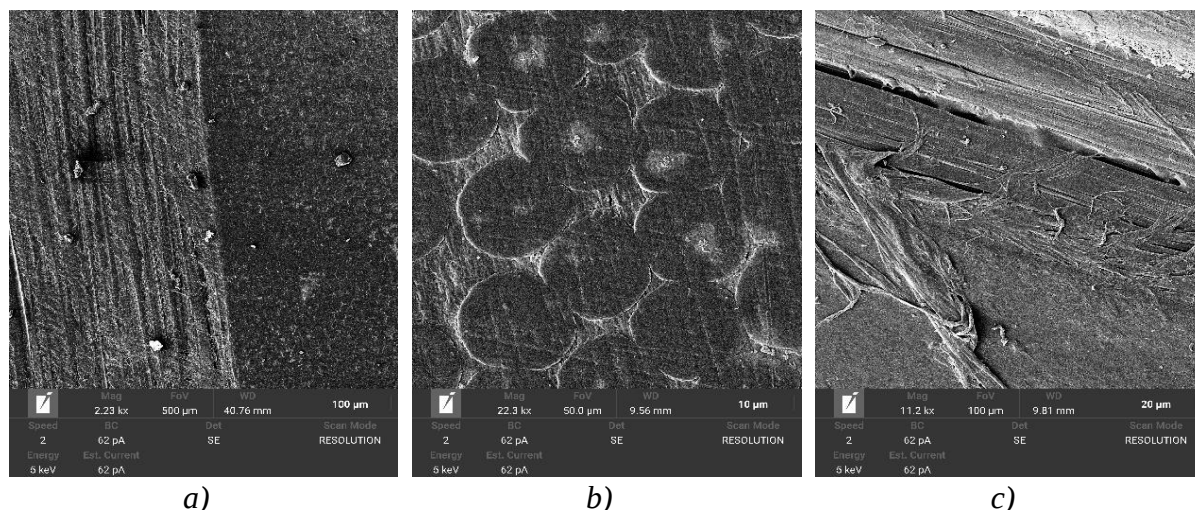
V rámci naplnění druhého cíle práce byla zpracována rozsáhlá rešerše o kompozitních materiálech a aditivních technologiích včetně dokumentace vlastních přínosů v rámci rozvoje vědecké práce. Tyto výstupy jsou uvedeny v rámci jednotlivých kapitol 4.3, 4.4 a 4.6.

V rámci rozvoje oblasti kompozitních materiálů byla věnována značná pozornost kompozitním materiálům na bázi tkanin, které jsou využívány nejen v oblastech balistických ochran jednotlivců, ale i pro potřeby balistických ochran vybraných částí vojenských vozidel.



Obr. 5.5 – Mikrostruktura kompozitních materiálů - optodigitální mikroskopie

a) Twaron CT 747 LG700 + HG700 (zvětšeno 500x); b) Twaron CT747 TH110 (zvětšeno 1000x);
c) Endumax Shield XF33 (zvětšeno 200x)

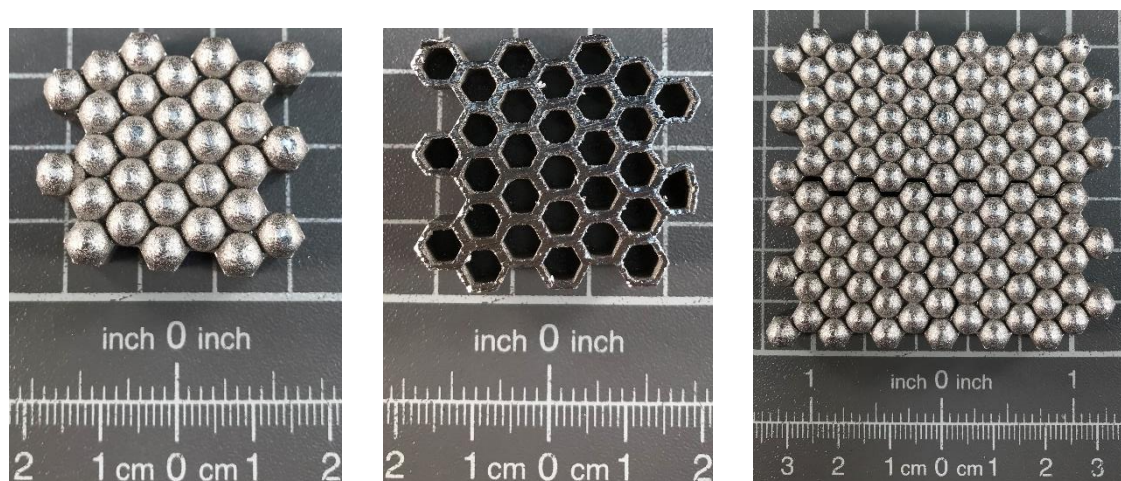


Obr. 5.6 – Mikrostruktura kompozitních materiálů - rastrovací elektronová mikroskopie
a) Twaron CT 747 LG700 + HG700 (zvětšeno 2.000x); b) Twaron CT747 TH110 (zvětšeno 22.000x); c) Endumax Shield XF33 (zvětšeno 11.000x)

Základní myšlenkou uvedené části práce bylo najít náhradu stávajících materiálů založených na bázi vláken kevlaru (twaronu) a ověřit hypotézu střeleckou zkouškou. Tento dílčí cíl byl naplněn s využitím potenciálu materiálu UHMWPE (viz kapitola 4.3.2). Právě uvedený materiál na bázi polyethylenu má při dodržení stejného stupně balistické odolnosti významně nižší hmotnost (Tab. 5-1).

Dílčí část práce byla věnována možnosti využití aditivních výrobních technologií jako východiska pro zlepšení užitných vlastností pancířů. Myšlenkou bylo vytvářet specifické konstrukce a materiály s využitím potenciálu aditivní výroby 3D tisku a technologie studené kinetické depozice (Cold Spray). V případě 3D tisku byly z materiálu na bázi Ti a Fe vytištěny vnitřní komůrkové konstrukce, tzv. voštiny (viz Obr. 5.3), které byly implementovány do vnitřní části vrstveného pancíře. Jejich umístění v systému ochrany umožnilo významně snížit celkovou hmotnost pancíře, jelikož konstrukce 3D tisknuté vložky byla vytištěna z Ti. Účelem umístění vložky bylo zvýšit balistickou odolnost systému v důsledku snížení čelní tloušťky kovového pancíře (Obr. 5.2 a Obr. 5.3).

V rámci střeleckého experimentu bylo potvrzeno, že dělení vnitřní struktury je velmi efektivní. Současně toto řešení umožňuje velmi jednoduchou výměnu poškozené části vnitřní vložky, která je sestavena jako modulární.



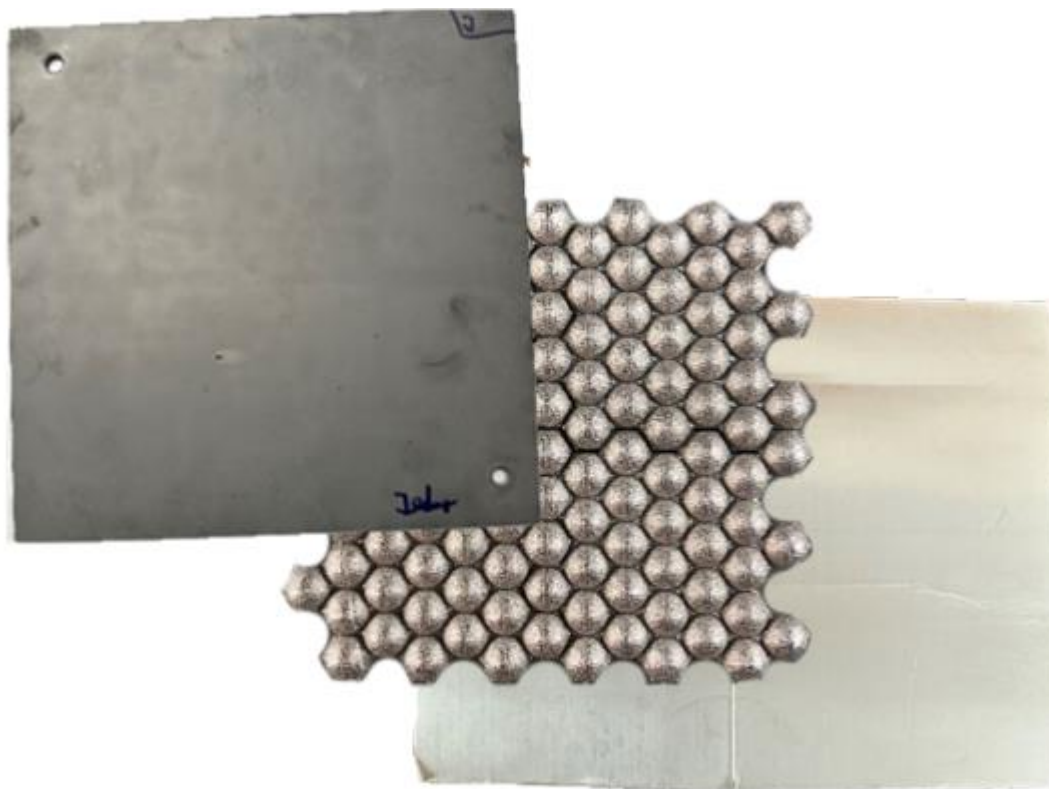
Obr. 5.7 – Zobrazení modulární vložky z Ti

V rámci střeleckého experimentu bylo potvrzeno, že výhodnějším řešením je struktura z oceli M350 (tzv. maraging steel) a to zejména s ohledem na její houževnatost. K průstřelu vrstveného pancíře však nedošlo ani v případě použití aditivně vytvořené Ti vložky. Nespornou výhodou využití Ti vložky je dosažení nízké hmotnosti celého vnitřního systému. Veškeré struktury vytvořené aditivním 3D tiskem byly zaplněny materiálem na bázi keramiky.

V případě implementace vnitřní struktury do systému vrstveného pancíře nedošlo k penetraci této části. Střela byla zastavena na úrovni aditivní vložky a došlo ke vzniku omezeného šokového otisku, což dokumentuje Obr. 5.3. Vložka tedy efektivně zvýšila balistickou odolnost na úroveň srovnatelnou s kovovým pancířem tloušťky 6,5 mm, např. ARMOX T600.

Nově vyvinutý vrstvený pancíř ve složení kovový pancíř s jednostrannou povrchovou úpravou 2 mm, aditivně vytištěná vložka z oceli nebo Ti plněná SiC, panel UHMWPE 35 vrstev nebyl v rámci experimentu prostřelen.

Experimentální řešení vrstveného pancíře nadále pokračuje a lze očekávat vznik zcela nového konceptu pancíře s balistickou odolností na úrovni 4, který bude využitelný pro zabezpečení ochrany osob ve vojenských operacích (zejména na základnách a vojenských nemocnicích).



Obr. 5.8 – Vyvinutý vrstvený pancíř Nitridovaný Hardox 450 (jednostranně, oboustranně)/3D tištěná struktura/ UHMWPE (Endumax Shield XF33)

Záměrem v rámci nové koncepce je využít potenciálu materiálu UHMWPE v kombinaci s geopolymery na bázi Al a Si. Očekávaným přínosem bude velmi nízká celková hmotnost systému ochrany.

V rámci práce byla vyvinuta vícevrstvá balistická ochrana využívající trendy nejmodernějších výrobních technologií. Jednoznačně byl prokázán pozitivní vliv aditivně vytvořené balistické vložky a to jak z hlediska penetrace střely, tak z hlediska vzniku případného šokového otisku, viz Obr. 5.8.

6. Literatura

- [1] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN 30 0024, *Základní automobilové názvosloví. Druhy silničních vozidel. Definice základních pojmů*. 14. 9. 1981.
- [2] Vyhláška o technické způsobilosti a pravidelných technických prohlídkách vojenských vozidel. In: *Sbírka zákonů*. 2018, částka 52.
- [3] VALA, Miroslav; BRAUN, Pavel; ŽALUD, Zdeněk; NEUMANN, Vlastimil a HOŠEK, František. *Teorie a konstrukce bojových a speciálních vozidel*. Díl I., Konstrukce vozidel. Brno: Univerzita obrany, 2017. ISBN 978-80-7231-391-4.
- [4] VLKOVSKÝ, Martin, IVANUŠA, Teodora, NEUMANN, Vlastimil, FOLTIN, Pavel, VLACHOVÁ, Hana. Optimizing Cargo Security During Transport Using Dataloggers. *Journal of Transportation Security*, 2017, **10**(3-4), 63-71. ISSN 1938-7741. doi:10.1007/s12198-017-0179-4.
- [5] NEUMANN, Vlastimil. Tracked vehicle analysis with simulation technologies support. *Machines Technologies Materials*, 2014, **8**(2), 44-47. ISSN 1313-0226.
- [6] NEUMANN, Vlastimil. Model of a steering axle of a military truck. In: *International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems*. Bologna: Medimond, 2016, s. 115-123. ISSN 2345-0088. ISBN 978-88-7587-737-8.
- [7] NEUMANN, Vlastimil. Possibilities of vehicle movement evaluation. In: *Transport Means 2015*. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2015, s. 177-180. ISSN 1822-296X.
- [8] NEUMANN, Vlastimil. Analysis of external load of tracked vehicle transmissions. In: *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics System ITELMS'2014*. Panevezys, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2014, s. 198-205. ISSN 2345-0088.
- [9] VALA, Miroslav; ŽALUD, Zdeněk a NEUMANN, Vlastimil. *Teorie a konstrukce bojových a speciálních vozidel*. Díl III, Bezpečnost a zkoušení vozidel. Brno: Univerzita obrany, 2017. ISBN 978-80-7582-023-5.
- [10] Členění, taktika a výcvik vojska. In: *Antický svět* [online]. 2015 [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <https://www.antickysvet.cz/26031n-cleneni-taktika-a-vycvik-vojska>.
- [11] Obrněné automobily - Úvod. *Panzernet* [online]. [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <http://panzernet.net/panzernet/stranky/auta/uvod.php>.
- [12] Mark I. *The tank museum* [online]. [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <https://tankmuseum.org/tank-nuts/tank-collection/mark-i>.
- [13] Tank Mark I. *Tank encyklopedia* [online]. 2016 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: https://tanks-encyclopedia.com/ww1/gb/tank_mki.php.
- [14] Relative Armor Thickness. *Panzerworld* [online]. 2021 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://panzerworld.com/relative-armor-thickness>.
- [15] VISINGR, L. *Ochrana tanků budoucnosti* [online]. Brno. [2004] [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: https://is.muni.cz/www/60659/1450261/1450264/ochrana_tanku.pdf.
- [16] Tiger. *Panzernet* [online]. [cit. 2023-11-10]. Dostupné z: <http://www.panzernet.net/panzernet/stranky/tanky/pz6.php>.
- [17] Od oceli k antiraketám: Jak funguje ochrana tanků? (1). *100 + 1* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://www.stoplusjednicka.cz/od-oceli-k-antiraketam-jak-funguje-ochrana-tanku-1>.
- [18] MACKSEY, K. *Tank proti tanku: ilustrovaná historie vzniku obrněných vozidel a popis jejich střetů na bojištích 20. století*. Praha: Deus, 2003. ISBN 80-862-1544-X.
- [19] LANGER, M. *Pancéřování a způsoby jeho překonávání*. Bakalářská práce. Zlín: UTB ve Zlíně. 2014, 63 s.
- [20] Armour. *Britannica* [online]. [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/tank-military-vehicle/Armour#ref521359>

- [21] Armor protection of the tanks of the second postwar generation T-64 (T-64A), Chieftain Mk5P and M60. *Ocel a oheň: Moderní a perspektivní tanky* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: http://btvt.info/3attackdefensemobility/432armor_eng.htm
- [22] MUNRO, B. *The Centurion Tank*. Ramsbury: Crowood, 2005. ISBN 18-612-6701-0.
- [23] Od oceli k antiraketám: Jak funguje ochrana tanků? (2). *100 + 1* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://www.stoplusjednicka.cz/od-oceli-k-antiraketam-jak-funguje-ochrana-tanku-1>.
- [24] PRIFTI, J., CASTRO, M., SQUILLACIOTI, R., CELLITTI, R. *Improved Rolled Homogeneous Armor (IRHA) Steel Through Higher Hardness*. In: Army Research Laboratory, 1997, 66 s.
- [25] DVOŘÁK, I., HRUBÝ, V. *Konstrukční materiály pro zbraně a munici*. Skripta S-1846. Brno: VAAZ, 1986, 74 s.
- [26] BUMBÁLEK, B., SVOBODA, E., ROLC, S., OBDRŽÁLEK, L. *Pancéřování lehkých bitevních letounů*. Studie. Brno: VA Brno, 1994, 32 s.
- [27] ROLC, Stanislav, Jaroslav BUCHAR, Jan KŘEŠŤAN, Josef KRÁTKÝ a Radek ŘÍDKÝ. *Pancéřová ochrana*. Praha: Academia, 2022. Gerstner. ISBN 978-80-200-3100-6.
- [28] DATA SHEET: *Armox* [online]. [cit. 2022-10-22]. Sweden, Oxelösund, SSAB. Dostupné z: <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/armox>.
- [29] DATA SHEET: *Hardox* [online]. [cit. 2022-10-22]. Sweden, Oxelösund, SSAB. Dostupné z: <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/hardox>.
- [30] DATA SHEET: *Mars* [online]. [cit. 2022-10-22]. Belgium, Charleroi, ArcelorMittal, Industeel. Dostupné z: <https://industeel.arcelormittal.com/product/protection-steels/>.
- [31] FURCH, Jan a Zdeněk KROBOT. *Technologie údržby bojových a speciálních vozidel: vysokoškolská učebnice*. Část III. Brno: Univerzita obrany, 2021. ISBN 978-80-7582-386-1.
- [32] YADAV, Ramdayal, Minoo NAEBE, Xungai WANG a Balasubramanian KANDASUBRAMANIAN. Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems. *RSC Advances* [online]. 2016, 6(116), 115145-115174. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C6RA24016J.
- [33] PETRÁSEK, Miloslav. *Bojová odolnost letadel: úvod do studia*. Brno: Univerzita obrany, 2011. ISBN 978-80-7231-843-8.
- [34] RAI, Roshan, Gaurav KUMAR, Sagar DAGAR, V. SOMASHEKAR, Chanfiou Ahmed MBOREHA a Priyank MODI. Numerical simulation of ballistic impact on aluminium 5083-H116 plate with Johnson cook plasticity model. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, 46, 10619-10627. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.01.373.
- [35] PÉREZ-BERGQUIST, Sara J., G.T. (Rusty) GRAY, Ellen K. CERRETA, Carl P. TRUJILLO a Alex PÉREZ-BERGQUIST. The dynamic and quasi-static mechanical response of three aluminum armor alloys: 5059, 5083 and 7039. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2011, 528(29-30), 8733-8741. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2011.08.046.
- [36] DEMIR, Teyfik, Mustafa ÜBEYLI a R. Orhan YILDIRIM. Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62mm armor piercing projectile. *Materials & Design* [online]. 2008, 29(10), 2009-2016. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2008.04.010.
- [37] LUI, Edward W., Alexander E. MEDVEDEV, Darren EDWARDS, Ma QIAN, Martin LEARY a Milan BRANDT. Microstructure modification of additive manufactured Ti-6Al-4V plates for improved ballistic performance properties. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2022, 301. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117436.
- [38] BRUCHEY, J. William. Suppression of Material Failure Modes in Titanium Armors. US Army Research Laboratory, USA, 2003 [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235135187_Suppression_of_Material_Failure_Modes_in_Titanium_Armors.
- [39] BHAT, Aayush, J. NAVEEN, M. JAWAID, M.N.F. NORRAHIM, Ahmad RASHEDI a A. KHAN. Advancement in fiber reinforced polymer, metal alloys and multi-layered armour systems for ballistic applications – A review. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2021, 15, 1300-1317. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2021.08.150.

- [40] BHATNAGAR, Ashok, ed. *Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications*. Second edition. Waltham, MA: Elsevier, 2016. ISBN 978-0-08-100406-7.
- [41] PLÍHAL, Bohumil. *Balistická ochrana*. Brno: Univerzita obrany, 2012. ISBN 978-80-7231-862-9.
- [42] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [43] BLESS, S. Using Depth-of-Penetration Tests to Design Transparent Armor. *Experimental Mechanics* [online]. 2013, 53(1), 47-51. ISSN 0014-4851. Dostupné z: doi:10.1007/s11340-012-9624-2.
- [44] POPA, Ioan-Dan a Florin DOBRIȚA. Considerations on Dop (Depth Of Penetration) Test for Evaluation of Ceramics Materials Used in Ballistic Protection. *ACTA Universitatis Cibiniensis* [online]. 2017, 69(1), 162-166. ISSN 1583-7149. Dostupné z: doi:10.1515/aucts-2017-0021.
- [45] FEJDYŚ, Marzena, Katarzyna KOŚLA, A. KUCHARSKA-JASTRZĄBE a Marcin LANDWIJT. Hybryde Composite Armour Systems with Advanced Ceramics and Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Fibres. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* [online]. 2016, 24(3(117)), 79-89. ISSN 1230-3666. Dostupné z: doi:10.5604/12303666.1196616.
- [46] TRIA, Djalel Eddine, Attef KOUADRIA, Jerzy MAŁACHOWSKI, Yehya BOUTEGHRINE a Amar MANAA. Performance evaluation of multilayered ceramic composite armors: New design and advanced predictive method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: *Journal of Materials: Design and Applications* [online]. 2022, 236(12), 2516-2538. ISSN 1464-4207. Dostupné z: doi:10.1177/14644207221098695.
- [47] Segmentovaná keramická deska se skelnou kompozitní vrstvou. In: *Balistická a protivýbuchová ochrana vojenské techniky*. [online]. [cit. 2022-09-08] Dostupné z: <https://www.vvubrno.cz/>.
- [48] CHEN, Xiaogang. *Advanced fibrous composite materials for ballistic protection*. Woodhead Publishing series in composites science and engineering. Cambridge, UK, 2016. ISBN 978-1-78242-461-1.
- [49] Balistické panely. In: *Stormblade* [online]. [cit. 2022-09-01]. Dostupné z: <http://stormblade.cz/balisticke-panely/>.
- [50] Piranha III In Danish Service ~ Armour Album. In: *Joint forces*. [online]. [cit. 2022-09-01]. Dostupné z: <https://www.joint-forces.com/features/40507-piranha-iii-in-danish-service-armour-album>.
- [51] Leopard 2 A6M CAN. In: *Panzer modell*. [online]. [cit. 2022-09-01]. Dostupné z: https://www.panzer-modell.de/referenz/in_detail/leo2a6m_can/leo2a6m.htm.
- [52] YADAV, Ramdayal, Minoo NAEBE, Xungai WANG a Balasubramanian KANDASUBRAMANIAN. Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems. *RSC Advances* [online]. 2016, 6(116), 115145-115174. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C6RA24016J.
- [53] JENA, Pradipta Kumar, M. A. Muthu MANICKAM, Sandeep VENKETACHARI, Satish Chandra SRIVASTAVA, Atul SRIVASTAVA, Santu CHAKRABARTY a K. Siva KUMAR. Microstructure, mechanical, ballistic property evaluation of RHA steel produced by continuous-casting route. *Journal of Applied Research and Technology* [online]. 2020, 18(1). ISSN 2448-6736. Dostupné z: doi:10.22201/icat.24486736e.2020.18.1.927.
- [54] VENKATARAMUDU, B., P.C. GAUTAM, Ashish PAMAN, V. MADHU a A.K. GOGIA. Dynamic Properties of RHA Steel under Planar Shock Loading using Explosive Driven Plate Impact System. *Defence Science Journal* [online]. 2015, 65(3), 196-202. ISSN 0976464X. Dostupné z: doi:10.14429/dsj.65.7952.
- [55] FARRAND, T., L. MAGNESS a M. BURKINS. Definition and use of RHA equivalences for medium calibre targets. In: *19th International Symposium of Ballistics* [online]. Switzerland, Interlaken, 2001. Dostupné z: <http://xrayct.com/documents/data/IBS19/TB151159.pdf>.
- [56] ELGY, I.D., S.D. CLARKE, B.J. FULLER, et al. Deformation of Armox 440T plates subject to buried explosive charge detonations: A benchmark for appliqué systems. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2021, 150. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2021.103819.
- [57] POPLAWSKI, Arkadiusz, Piotr KĘDZIERSKI a Andrzej MOROKA. Identification of Armox 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems. *Materials & Design* [online]. 2020, 190. ISSN 02641275. Dostupné z: doi: 10.1016/j.matdes.2020.108536.
- [58] GÖDE, Engin, Atanur TEOMAN, Barış ÇETİN, Kürşat TONBUL, Kemal DAVUT a Melih Cemal KUŞHAN. An experimental study on the ballistic performance of ultra-high hardness armor steel

- (Armox 600T) against 7.62 mm × 51 M61 AP projectile in the multi-hit condition. *Engineering Science and Technology, an International Journal* [online]. 2023, 38. ISSN 22150986. Dostupné z: doi:10.1016/j.jestch.2023.101337.
- [59] HUB, Juraj a Jan Komenda, J. Ballistic Resistance of Steel Plate Hardox Upon Impact of Non-Penetrating Projectiles. *Advances in Military Technology* [online]. 2009, 4(2), 79-91. Dostupné z: <https://www.aimt.cz/index.php/aimt/article/view/1649>.
- [60] BØRVIK, T., S. DEY a A.H. CLAUSEN. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2009, 36(7), 948-964. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003.
- [61] LIU, Zhenguang, Shoudong CHEN, Xiuhua GAO, Guanqiao SU, Linxiu DU, Jianping LI, Xiaonan WANG a Xiaowei ZHOU. Microstructure Evolution and Mechanical Property of Low-Alloy Steel Used for Armor Layer of Flexible Pipe During Thermomechanical Process and Hot Rolling Process. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2019, 28(1), 107-116. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-018-3723-x.
- [62] WEILAN Liu, Chen ZHAOFENG, Cheng XINGWANG, Wang YANGWEI, Richard Amankwa ADJEI a Xu JIANG. Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor, *Composites Part B: Engineering*, [online]. 2016, 33-40, ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.071>.
- [63] LUI, Edward W., Alexander E. MEDVEDEV, Darren EDWARDS, Ma QIAN, Martin LEARY a Milan BRANDT. Microstructure modification of additive manufactured Ti-6Al-4V plates for improved ballistic performance properties. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2022, 301. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117436.
- [64] FEJDYŚ, Marzena, Katarzyna KOŚLA, A. KUCHARSKA-JASTRZĄBE a Marcin LANDWIJT. Hybryde Composite Armour Systems with Advanced Ceramics and Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Fibres. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* [online]. 2016, 24(3(117)), 79-89. ISSN 1230-3666. Dostupné z: doi:10.5604/12303666.1196616.
- [65] CHEN, Xiaogang. *Advanced fibrous composite materials for ballistic protection*. Woodhead Publishing series in composites science and engineering. Cambridge, UK, 2016. ISBN 978-1-78242-461-1.
- [66] SIVAKUMAR, V., R. Sundhara PANDIYAN a R. SOWMIYA. Numerical Study on Ballistic Impact Performance of Hybrid Thermoset Composites Subject to Multi-Bullet Hits. *Journal of Failure Analysis and Prevention* [online]. 2023, 23(1), 191-205. ISSN 1547-7029. Dostupné z: doi:10.1007/s11668-022-01561-z.
- [67] SCAZZOSI, Riccardo, Samia Danuta BREJÃO DE SOUZA, Sandro Campos AMICO, Marco GIGLIO a Andrea MANES. Experimental and numerical evaluation of the perforation resistance of multi-layered alumina/aramid fiber ballistic shield impacted by an armor piercing projectile. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2022, 230. ISSN 13598368. Dostupné z: doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109488.
- [68] HU, Pengcheng, Yuansheng CHENG, Pan ZHANG, Jun LIU, Haifu YANG a Jianyong CHEN. A metal/UHMWPE/SiC multi-layered composite armor against ballistic impact of flat-nosed projectile. *Ceramics International* [online]. 2021, 47(16), 22497-22513. ISSN 02728842. Dostupné z: doi: 10.1016/j.ceramint.2021.04.259.
- [69] ŠLAJS, Miroslav. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnost Ti slitin*. Brno, 2012. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [70] CAMPBELL, F.C. *Structural Composite Materials*. [online]. ASM International, 2010. ISBN 9781615031405. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=D3Wta8e07t0C>.
- [71] K. BAJPAI, Pramendra a SINGH, Inderdeep (ed.). *Reinforced Polymer Composites*. [online]. Wiley, 2019. ISBN 9783527345991. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9783527820979>.
- [72] LENGSEFELD, Hauke, WOLFF-FABRIS, Felipe, KRÄMER, Johannes, LACALLE, Javier a ALTSTÄDT, Volker. *Composite Technology Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*. 1.st. Munich: Hanser, 2016. ISBN 978-1-56990-599-9.
- [73] CARRILLO, J.G.; GAMBOA, R.A.; FLORES-JOHNSON, E.A. a GONZALEZ-CHI, P.I. Ballistic performance of thermoplastic composite laminates made from aramid woven fabric and polypropylene

- matrix. *Polymer Testing* [online]. 2012, roč. 31, č. 4, s. 512-519. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.02.010>. [cit. 2023-10-21].
- [74] BHOWMIK, Sumit; JAGADISH, a RAY, Amitava. Abrasive Water Jet Machining of Composite Materials. online. In: GUPTA, Kapil (ed.). *Advanced Manufacturing Technologies*. Materials Forming, Machining and Tribology. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 77-97. ISBN 978-3-319-56098-4. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56099-1_4. [cit. 2023-11-02].
- [75] WANG, Bing; ZHONG, Shuncong; LEE, Tung-Lik; FANCEY, Kevin a MI, Jiawei. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. *Advances in Mechanical Engineering* [online]. 2020, roč. 12, č. 4. ISSN 1687-8140. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1687814020913761>. [cit. 2023-03-25].
- [76] HAYES, Brian S. a GAMMON, Luther M. *Optical Microscopy of Fiber-Reinforced Composites* [online]. 1.st. ASM International, 2010. ISBN 978-1-62708-349-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.omfrc.9781627083492>. [cit. 2023-11-02].
- [77] COMMITTEE D30 ON COMPOSITE MATERIALS. *ASTM International* [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.astm.org/get-involved/technical-committees/committee-d30>.
- [78] ŚLAWSKI, Sebastian; SZYMICZEK, Małgorzata; KACZMARCZYK, Jarosław; DOMIN, Jarosław a ŚWITOŃSKI, Eugeniusz. Low Velocity Impact Response and Tensile Strength of Epoxy Composites with Different Reinforcing Materials. *Materials* [online]. 2020, roč. 13, č. 14. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13143059>.
- [79] MENA-TUN, J. L.; GONZALEZ-CHI, P. I. a DÍAZ-DÍAZ, A. Tensile Properties of Thermoplastic-Laminated Composites Based on a Polypropylene Matrix Reinforced with Continuous Twaron Fibers. *Advances in Polymer Technology* [online]. 2013, roč. 32, č. 1. ISSN 0730-6679. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/adv.21318>.
- [80] HARIS, A. a TAN, V.B.C. Effects of spacing and ply blocking on the ballistic resistance of UHMWPE laminates. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2021, roč. 151. ISSN 0734743X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103824>.
- [81] YANG, Zhiming; LIU, Jinxi; WANG, Fuchi; LI, Shukui a FENG, Xinya. Effect of fiber hybridization on mechanical performances and impact behaviors of basalt fiber/UHMWPE fiber reinforced epoxy composites. *Composite Structures* [online]. 2019, roč. 229. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111434>.
- [82] KOUTSOMICHALIS, Aggelos; KALAMPOUKAS, Thomas a MOUZAKIS, Dionysios E. Mechanical Testing and Modeling of the Time-Temperature Superposition Response in Hybrid Fiber Reinforced Composites. *Polymers* [online]. 2021, roč. 13, č. 7. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym13071178>.
- [83] VILIŠ, Jindřich; NEUMANN, Vlastimil; VÍTEK, Roman; ZOUHAR, Jan; POKORNÝ, Zdeněk, MAREK, Milan. Analysis of Ballistic Impact of 7.62 mm FMJ M80 Rifle Projectile into Twaron/UHMWPE Composite Armor. *JOURNAL OF COMPOSITES SCIENCE*, 2023, 7(9), 390. ISSN 2504-477X. doi:10.3390/jcs7090390.
- [84] CHEN, Li; CAO, Mingjin a FANG, Qin. Ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene laminate with different thickness. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2021, roč. 156. ISSN 0734743X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103931>.
- [85] SHEN, Yonghua; WANG, Yangwei; YAN, Zhaopu; CHENG, Xingwang; FAN, Qunbo et al. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Projectile Nose Shape on the Deformation and Energy Dissipation Mechanisms of the Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composite. *Materials* [online]. 2021, roč. 14, č. 15. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma14154208>.
- [86] WANG, Hongxu; HAZELL, Paul J.; SHANKAR, Krishna; MOROZOV, Evgeny V. a ESCOBEDO, Juan P. Impact behaviour of Dyneema® fabric-reinforced composites with different resin matrices. *Polymer Testing* [online]. 2017, roč. 61, s. 17-26. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.04.026>.
- [87] YU, B.; KARTHIKEYAN, K.; DESHPANDE, V.S. a FLECK, N.A. Perforation resistance of CFRP beams to quasi-static and ballistic loading: The role of matrix strength. *International Journal of Impact*

- Engineering* [online]. 2017, roč. 108, s. 389-401. ISSN 0734743X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.04.002>.
- [88] SEVKAT, Ercan; LIAW, Benjamin a DELALE, Feridun. Ballistic performance of hybrid and non-hybrid composite plates. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* [online]. 2012, roč. 47, č. 7, s. 453-470. ISSN 0309-3247. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0309324712457897>.
- [89] LIU, Xiaofei; LI, Maoqing; LI, Xin; DENG, Xiaobin; ZHANG, Xinhua et al. Ballistic performance of UHMWPE fabrics/EAMS hybrid panel. *Journal of Materials Science* [online]. 2018, roč. 53, č. 10, s. 7357-7371. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2055-4>.
- [90] ZULKIFLI, Faiz; STOLK, Jan; HEISSERER, Ulrich; YONG, Alex; LI, Zhiyi et al. Strategic positioning of carbon fiber layers in an UHMwPE ballistic hybrid composite panel. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2019, roč. 129, s. 119-127. ISSN 0734743X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.02.005>.
- [91] DA SILVA, Leandro F; LAVORATTI, Alessandra; PEREIRA, Iaci M; DIAS, Rafael R; AMICO, Sandro C et al. Development of multilaminar composites for vehicular ballistic protection using ultra-high molecular weight polyethylene laminates and aramid fabrics. *Journal of Composite Materials* [online]. 2019, roč. 53, č. 14, s. 1907-1916. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0021998318815959>.
- [92] BERÁNKOVÁ, Irena; MIKULÍKOVÁ, Regina a KŘEŠTAN, Jan. Ballistic efficiency of hybrid laminates based on aramid and UHMWPE prepregs. *Manufacturing Technology* [online]. 2022, roč. 21, č. 6, s. 757-761. ISSN 12132489. Dostupné z: <https://doi.org/10.21062/mft.2021.092>.
- [93] POKORNÝ, Zdeněk. *Možnosti ovlivňování základních charakteristik vrstev při chemicko-tepelném zpracování ocelí*. Brno, 2017. Habilitační práce. Univerzita obrany.
- [94] HOLEMÁŘ, A., HRUBÝ, V. *Iontová nitridace v praxi*. Praha: SNTL, 1989, s. 168-181.
- [95] GROTE, K., ANTONSSON, E. *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. 2. vydání. Berlin: Springer Heidelberg, 2008.
- [96] HRUBÝ, V., KADLEC, J. *Povrchové technologie*. Brno: VA, 1997, 120 s.
- [97] KRÁL, Lubomír.: *Termodynamické a difuzní charakteristiky systému Fe-C-Mn*. Brno, 2006. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [98] PŘENOSIL, B. *Nitrocementace*. Praha: SNTL, 1964, 229 s.
- [99] LEINEWEBER, A., GRESSMANN, T., MITTEMEIJER, E. J. Simultaneous Control of the Nitrogen and Carbon Activities during Nitrocarburising of Iron. In: *Surface and Coating Technology*, 2012, vol 206, s. 2780–2791.
- [100] DAVIS, J. R. *Surface hardening of steels: understanding the basics*. Ohio: ASM International, 2002.
- [101] STRÁNSKÝ, K. *Termodynamika kvazistacionární difuze uhlíku v ocelích a její aplikace*. ACADEMIA nakladatelství: Československá akademie věd, Praha, 1977. 148 s.
- [102] TOTEN, G., HOWES, M., INOUE, T. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. 1. vyd. Ohio: ASM, 2002.
- [103] YU, Z., XU, X., WANG, L., QIANG, J., HEI, Z. Structural characteristics of low-temperature plasma nitrided layers on AISI 304 stainless steel with an α' -martensite layer. In: *Surface and Coatings Technology*. 153(2). s. 125-130, 2002.
- [104] BANNYKH, O. A. et al. Development of Nitriding in Russia. Third Period (1960 – 1980): Low temperature thermochemical treatment. In: *Metal Science and Heat Treatment*. 2000, vol. 41(5), s. 174-182.
- [105] BANNYKH, O. A. et al. Development of Nitriding in Russia. Fourth Period (1980 – present time): Low temperature thermochemical treatment. In: *Metal Science and Heat Treatment*. 1999, vol. 43(3-4), s. 131-137.
- [106] WANG, L., JI, S., SUN, J. Effect of nitriding time on the nitrided layer of AISI 304 austenitic stainless steel. In: *Surf Coat Technol*. s. 5067–5070, 2006.
- [107] POKORNÝ, Zdeněk. *Plazmová nitridace dutin*. Brno, 2011. Disertační práce. Univerzita Obrany.

- [108] POSPÍCHAL, M a kol. *Základy nauky o materiálu, část 4. Experimentální metody*, S-355/4 A, Vojenská akademie v Brně, 2002.
- [109] LIN, Y., LU, J., WANG, L., XU, T., XUE, Q. Surface nanocrystallization by surface mechanical attrition treatment and its effect on structure and properties of plasma nitrided AISI 321 stainless steel. In: *Acta Materialia*. 54(5), s. 599–605, 2006.
- [110] DATA SHEET: Armox 500T [online]. [cit. 2023-04-26]. SSAB Oxelösund. Dostupné z: <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/armox/product-offer/armox-500t>.
- [111] DATA SHEET: Armox 600T [online]. [cit. 2023-04-26]. SSAB Oxelösund. Dostupné z: <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/armox/product-offer/armox-600t>.
- [112] DATA SHEET: SECURE 600 PROTECTION STEELS [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.ilsenburger-grobblech.de/en/portfolio/our-brands/secure-protection-steels.html>.
- [113] DATA SHEET: SECURE 500 PROTECTION STEELS [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.ilsenburger-grobblech.de/en/portfolio/our-brands/secure-protection-steels.html>.
- [114] HORÁK, R., ŠEDIVÝ V. *Balisticky a NBC odolné mobilní prvky pro krizové situace*. Studie k projektu 2A-3TP1/096. Brno, 2009, 90 s.
- [115] BHADSHIA, H.K.D.H. Hard Bainite. *The Minerals, Metals and Materials Society*, Cambridge CB2 3QZ, U.K., Volume 1, 2005, p. 469-484.
- [116] DWIGHT, D.; COL. *Ballistic Testing of SSAB Ultra-High-Hardness Steel for Armor Applications*. Army Research Laboratory, 2008, 52 p.
- [117] DZURENDA, J., NOVÁK M., POSPÍCHAL M.: *VRSTVA - Optimalizace vrstveného pancíře pro obvodový plášť speciální kontejnerové skříně*. Šternberk. VOP-026 Šternberk, s.p.
- [118] ADAMEC, M. *Heterogenní ocelový pancíř se zvýšenou odolností proti penetraci malorázovou průbojnou střelou*. Brno, 2003. Disertační práce. Univerzita obrany.
- [119] ASM HANDBOOK: *Heat Treating*. Volume 4, 1991, ISBN 0-87170-379-3.
- [120] GREXA, J., ŘEBÍČEK, V. *Munice I*. VAAZ v Brně, 1972.
- [121] HALLQUIST, J. *LS-DYNA Examples Manual*. Livermore software technology corporation, Digital manual. 1999.
- [122] PYE, D. *Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing*. 2. vydání. Ohio: ASM International, 2003.
- [123] FIELD M., KAHLES J. F., CAMMET, J. T. Review of measuring methods for surface integrity. In: *Annals of the CIRP*. 21(2), s. 219-237, 1971.
- [124] LESKOVAR, P., GRUM, J. The metallurgical aspects of machining, In: *Annals of the CIRP*. 35(2), s. 550, 1986.
- [125] MACHERAUCH, E., KLOSS, K. H. Residual stress measurement at LLB. In: *Proceedings of the international conference on residual stresses*. Garmisch-Partenkirchen (Germany). s. 3–26, 1986.
- [126] WANG, L., JI, S., SUN, J. Effect of nitriding time on the nitrided layer of AISI 304 austenitic stainless steel. In: *Surf Coat Technol*. s. 5067–5070, 2006
- [127] MITTEMEIJER, E. J, BIGLARI, M. H., BÖTTGER, A. J, VAN DER PERS N. M., SLOOF, W. G., TICHELAAR, F. D. Amorphous precipitates in a crystalline matrix; precipitation of amorphous Si₃N₄ in α -Fe. In: *Scripta Materialia*. 41(6), s. 625–630, 1999.
- [128] FITZPATRICK, M. E., LODINI, A. *Analysis of Residual stress by diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation*. London: CRC Press, 2003.
- [129] TOTEN, G., HOWES, M., INOUE, T. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. 1. vyd. Ohio: ASM, 2002.
- [130] YU, Z., XU, X., WANG, L., QIANG, J., HEI, Z. Structural characteristics of low-temperature plasma nitrided layers on AISI 304 stainless steel with an α' -martensite layer. In: *Surface and Coatings Technology*. 153(2). s. 125-130, 2002.
- [131] WITHERS, P. J., BHADSHIA, H. K. D. Residual stress-Nature and origins. *Materials Science and technology*. 17, s. 366–375, 2001.

- [132] LI, Y., WANG, L., XU, J., ZHANG, D. Plasma nitriding of AISI 316L austenitic stainless steels at anodic potential. In: *Surface and Coatings Technology*. 206, s. 2430., 2012.
- [133] DOBROCKÝ, D. *Ověření vybraných mechanických vlastností nitridovaných vrstev konstrukčních ocelí v širokém rozsahu teplot*. Brno, 2015. Disertační práce. Univerzita Obrany.
- [134] BUMBÁLEK, L., BUMBÁLEK, B., MAZAL, P., LIŠKUTÍN, P. *Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004.
- [135] PROCHÁZKA, Jiří, POKORNÝ, Zdeněk, JASENÁK, Jozef, MAJERIK, Jozef, NEUMANN, Vlastimil. Possibilities of the Utilization of Ferritic Nitrocarburizing on Case-Hardening Steels. *Materials*, 2021, 14(13), 3714. ISSN 1996-1944. doi:10.3390/ma14133714.
- [136] HOLEŠOVSKÝ, F. Zbytková napětí broušených povrchů. *Technologické inženýrstvo*. vol. 1, s. 21–26. 2004.
- [137] HOSNIA, S. S., SCHACHERLB, R. E., MITTEMEIJER, E.,J. Nitriding behavior of Fe₄V and Fe₂V alloys. In. :*Acta Materialia*. 53(7), s 2069–2079. 2005.
- [138] TOENSHOFF, H. K., DENKENA, B. *Basics of Cutting and Abrasive Processes*. Berlin: Springer Heidelberg, 2013.
- [139] TECHNICAL COMMITTEE : ISO/TC 261. ISO/ASTM 52900:2015, *Additive manufacturing. Gneral principles. Terminology*. 2015.
- [140] Markforged Industrial 3D Printer: Carbon Fiber, Fiberglass, Kevlar. Metal and Carbon Fiber 3D Printers for Manufacturing. In: *Markforged* [online]. [cit. 2023-06-10]. Dostupné z: <https://markforged.com/3d-printers/mark-two>.
- [141] LIU, B.; WANG, Y.; LIN, Z.; ZHANG, T. Creating Metal Parts by Fused Deposition Modeling and Sintering. *Mater Lett* 2020, 263, doi:10.1016/j.matlet.2019.127252.
- [142] THOMPSON, Y.; GONZALEZ-GUTIERREZ, J.; KUKLA, C.; FELFER, P. Fused Filament Fabrication, Debinding and Sintering as a Low Cost Additive Manufacturing Method of 316L Stainless Steel. *Addit Manuf* 2019, 30, doi:10.1016/j.addma.2019.100861.
- [143] JANSÁ, J., VOLODARSKAJA, A., HLINKA, J., ZÁRYBNICKÁ, L., POLZER, S., KRAUS, M., HAJNÝŠ, J., SCHWARZ, D., PAGÁČ, M. Corrosion and Material Properties of 316L Stainless Steel Produced by Material Extrusion Technology. *J Manuf Process* 2023, 88, doi:10.1016/j.jmapro.2023.01.035.
- [144] JAHED, H.; ROOSTAEI, A.A. *Cyclic Plasticity of Metals: Modeling Fundamentals and Applications: A Volume in Elsevier Series on Plasticity of Materials*; 2021.
- [145] GOKULDOSS, P.K.; KOLLA, S.; ECKERT, J. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials* 2017, 10, 672, doi:10.3390/ma10060672.
- [146] GIBSON I., R.D.W., S.B. *Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct DigitalManufacturing. 1sted.*; Springer: New York, 2010.
- [147] MEHRPOUYA, M.; TUMA, D.; VANEKER, T.; AFRASIABI, M.; BAMBACH, M.; GIBSON, I. Multimaterial Powder Bed Fusion Techniques. *Rapid Prototyp J* 2022, 28, 1–19, doi:10.1108/RPJ-01-2022-0014.
- [148] SUN, X.; CHEN, F.; HUANG, H.; LIN, J.; TANG, X. Effects of Interfaces on the Helium Bubble Formation and Radiation Hardening of an Austenitic Stainless Steel Achieved by Additive Manufacturing. *Appl Surf Sci* 2019, 467–468, 1134–1139, doi:10.1016/j.apsusc.2018.10.268.
- [149] KRISTOFFERSEN, M.; COSTAS, M.; KOENIS, T.; BRØTAN, V.; PAULSEN, C.O.; BØRVIK, T. On the Ballistic Perforation Resistance of Additive Manufactured AlSi10Mg Aluminium Plates. *Int J Impact Eng* 2020, 137, doi:10.1016/j.ijimpeng.2019.103476.
- [150] COSTAS, M.; EDWARDS-MOWFORTH, M.; KRISTOFFERSEN, M.; TEIXEIRA-DIAS, F.; BRØTAN, V.; PAULSEN, C.O.; BØRVIK, T. Ballistic Impact Resistance of Additive Manufactured High-Strength Maraging Steel: An Experimental Study. *International Journal of Protective Structures* 2021, 12, doi:10.1177/20414196211035486.

- [151] ZOCHOWSKI, P.; BAJKOWSKI, M.; GRYGORUK, R.; MAGIER, M.; BURIAN, W.; PYKA, D.; BOCIAN, M.; JAMROZIAK, K. Ballistic Impact Resistance of Bulletproof Vest Inserts Containing Printed Titanium Structures. *Metals (Basel)* 2021, 11, doi:10.3390/met11020225.
- [152] SAJADI, S.M.; WOELLNER, C.F.; RAMESH, P.; EICHMANN, S.L.; SUN, Q.; BOUL, P.J.; THAEMLITZ, C.J.; RAHMAN, M.M.; BAUGHMAN, R.H.; GALVÃO, D.S.; et al. 3D Printed Tubulanes as Lightweight Hypervelocity Impact Resistant Structures. *Small* 2019, 15, doi:10.1002/sml.201904747.
- [153] MAZZUCATO, F.; AVERSA, A.; DOGLIONE, R.; BIAMINO, S.; VALENTE, A.; LOMBARDI, M. Influence of Process Parameters and Deposition Strategy on Laser Metal Deposition of 316L Powder. *Metals (Basel)* 2019, 9, doi:10.3390/met9111160.
- [154] NIRMAL, R.R.; PATNAIK, B.S.V.; JAYAGANTHAN, R. FEM Simulation of High Speed Impact Behaviour of Additively Manufactured AlSi10Mg Alloy. *Journal of Dynamic Behavior of Materials* 2021, 7, doi:10.1007/s40870-020-00285-1.
- [155] MĚŠÍČEK, J.; ČEGAN, T.; MA, Q.P.; HALAMA, R.; SKOTNICOVÁ, K.; HAJNYŠ, J.; JUŘICA, J.; KRPEC, P.; PAGÁČ, M. Effect of Artificial Aging on the Strength, Hardness, and Residual Stress of SLM AlSi10Mg Parts Prepared from the Recycled Powder. *Materials Science and Engineering: A* 2022, 855, doi:10.1016/j.msea.2022.143900.
- [156] TOTHTAȘCĂU, M.; RĂDUȚĂ, A.; STOIA, D.I.; LOCOVEI, C. Influence of the Energy Density on the Porosity of Polyamide Parts in SLS Process. *Proceedings of the Solid State Phenomena*. 2012. Vol. 188.
- [157] The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing - 3Dnatives. *Impression 3D et Imprimante 3D : Meilleur Prix, Comparatif, News* [online]. [cit. 2023-03-15] 2020. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/3d-printing-technologies/directed-energy-deposition/>.
- [158] ASHBY, M. Designing Architected Materials. *Scr Mater* 2013, 68, doi:10.1016/j.scriptamat.2012.04.033.
- [159] MENEGHETTI, G.; RIGON, D.; COZZI, D.; WALDHAUSER, W.; DABALÀ, M. Influence of Build Orientation on Static and Axial Fatigue Properties of Maraging Steel Specimens Produced by Additive Manufacturing. In *Proceedings of the Procedia Structural Integrity*; 2017; Vol. 7.
- [160] MOONEY, B.; KOUROUSIS, K.I. A Review of Factors Affecting the Mechanical Properties of Maraging Steel 300 Fabricated via Laser Powder Bed Fusion. *Metals (Basel)* 2020, 10.
- [161] BRYTAN, Z.; KRÓL, M.; BENEDYK, M.; PAKIELA, W.; TAŃSKI, T.; DAGNAW, M.J.; SNOPIŃSKI, P.; PAGÁČ, M.; Czech, A. Microstructural and Mechanical Properties of Novel Co-Free Maraging Steel M789 Prepared by Additive Manufacturing. *Materials* 2022, 15, 1734, doi:10.3390/ma15051734.
- [162] SAJADI, S.M.; WOELLNER, C.F.; RAMESH, P.; EICHMANN, S.L.; SUN, Q.; BOUL, P.J.; THAEMLITZ, C.J.; RAHMAN, M.M.; BAUGHMAN, R.H.; GALVÃO, D.S.; et al. 3D Printed Tubulanes as Lightweight Hypervelocity Impact Resistant Structures. *Small* 2019, 15, doi:10.1002/sml.201904747.
- [163] PORTELA, C.M.; EDWARDS, B.W.; VEYSSET, D.; SUN, Y.; NELSON, K.A.; KOCHMANN, D.M.; GREER, J.R. Supersonic Impact Resilience of Nanoarchitected Carbon. *Nat Mater* 2021, 20, doi:10.1038/s41563-021-01033-z.
- [164] CONNORS, M.; YANG, T.; HOSNY, A.; DENG, Z.; YAZDANDOOST, F.; MASSAADI, H.; EERNISSE, D.; MIRZAEIFAR, R.; DEAN, M.N.; WEAVER, J.C.; et al. Bioinspired Design of Flexible Armor Based on Chiton Scales. *Nat Commun* 2019, 10, doi:10.1038/s41467-019-13215-0.

7. Přehled publikační činnosti

Recenzovaný odborný článek [Jimp]

- [1] VILIŠ, Jindřich, NEUMANN, Vlastimil, VÍTEK, Roman, ZOUHAR, Jan, POKORNÝ, Zdeněk, MAREK, Milan. Analysis of Ballistic Impact of 7.62 mm FMJ M80 Rifle Projectile into Twaron/UHMWPE Composite Armor. *JOURNAL OF COMPOSITES SCIENCE*, 2023, 7(9), 390. ISSN 2504-477X. **IF 3,300**. doi:10.3390/jcs7090390
- [2] BUMBÁLEK, Michal, JOSKA, Zdeněk, POKORNÝ, Zdeněk, SEDLÁK, Josef, MAJERÍK, Jozef, NEUMANN, Vlastimil, KLIMA, Karel. Cyclic Fatigue of Dental NiTi Instruments after Plasma Nitriding. *MATERIALS*, 2021, 14(9), 2155. ISSN 1996-1944. **IF 3,748**. doi:10.3390/ma14092155
- [3] MAJERÍK, Jozef, BARÉNYI, Igor, POKORNÝ, Zdeněk, SEDLÁK, Josef, NEUMANN, Vlastimil, DOBROCKÝ, David, JAROŠ, Aleš, KRBAŤA, Michal, JAMBOR, Jaroslav, KUSENDA, Roman, SAGAN, Miroslav, PROCHÁZKA, Jiří. Analysis of the OCHN3MFA steel in terms of cutting forces and cutting material flank wear mechanisms in hard turning processes. *BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES-TECHNICAL SCIENCES*, 2021, 69(6), e139203. ISSN 0239-7528. **IF 1,515**. doi:10.24425/bpasts.2021.139203
- [4] PROCHÁZKA, Jiří, POKORNÝ, Zdeněk, JASENÁK, Jozef, MAJERIK, Jozef, NEUMANN, Vlastimil. Possibilities of the Utilization of Ferritic Nitrocarburizing on Case-Hardening Steels. *Materials*, 2021, 14(13), 3714. ISSN 1996-1944. **IF 3,748**. doi:10.3390/ma14133714
- [5] BALLA, Jiří, KRIST, Zbyněk, RACEK, František, MELŠA, Pavel, NEUMANN, Vlastimil, LE, Cong Ich. Analysis and Parameter Identification of Automatic Cannon Carriages. *Defence Science Journal*, 2018, 68(6), 525-532. ISSN 0011-748X. **IF 0,589**. doi:10.14429/dsj.68.12395
- [6] VLKOVSKÝ, Martin, IVANUŠA, Teodora, NEUMANN, Vlastimil, FOLTIN, Pavel, VLACHOVÁ, Hana. Optimizing Cargo Security During Transport Using Dataloggers. *Journal of Transportation Security*, 2017, 10(3-4), 63-71. ISSN 1938-7741. **IF 1,300**. doi:10.1007/s12198-017-0179-4

Recenzovaný odborný článek [Jsc]

- [1] ČORŇÁK, Štefan, NEUMANN, Vlastimil, VEVERKA, Josef. Contribution to the thermal stress solution of a vehicle brake system. *Transport means : proceedings of the International Conference*, 2011(1), 116-119. ISSN 1822-296X.

Recenzovaný odborný článek [Jost]

- [1] NEUMANN, Vlastimil. Analysis of the vehicle undercarriage. *Machines, Technologies, Materials*, 2015, 9(7), 25-28. ISSN 1313-0226.
- [2] NEUMANN, Vlastimil. Simulation of truck moving. *Logistika*, 2014(5/2014), 656-663. ISSN 1231-5478.
- [3] NEUMANN, Vlastimil. Tracked vehicle analysis with simulation technologies support. *Machines Technologies Materials*, 2014, 8(2), 44-47. ISSN 1313-0226.
- [4] NEUMANN, Vlastimil, ČORŇÁK, Štefan. Thermal stress solution of a vehicle brake system. *Science & military*, 2012, 7(1), 93-99. ISSN 1336-8885.

Stat' ve sborníku [Dwos]

- [1] KŘIŠŤÁLOVÁ, Dana, NEUMANN, Vlastimil, ŽÁKOVÁ, Pavla, KONECKÝ, Štěpán, KRÁLÍČEK, Jiří, FOLTIN, Pavel, KUTĚJ, Libor, ZEŽULA, Jan, ŠČŮREK, Radomír. Ground Visibility Analyses, Algorithms and Performance. In: Mazal J., Fagiolini A., Vasik P., Turi M., Bruzzone A., Pickl S., Neumann V., Stodola P. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham: SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING

AG, 2022, roč. 13207, č. 13207, s. 61-73. ISSN 0302-9743. ISBN 978-3-030-98259-1. doi:10.1007/978-3-030-98260-7_4.

- [2] TÚRÓ, Tomáš, NEUMANN, Vlastimil, KROBOT, Zdeněk. Aspects of Technical Requirements for the Future Autonomy of Military Vehicles. In: *Modelling and Simulation for Autonomous Systems*. Rome, Italy: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018, 2018, s. 374-380. ISSN 0302-9743. ISBN 978-331976071-1. doi:10.1007/978-3-319-76072-8_26.
- [3] NEUMANN, Vlastimil, KROBOT, Zdeněk. Analysis of track line parameters and their influence on track line stress. In: *Transport Means 2017*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2017, s. 788-793. ISSN 1822-296X.
- [4] NEUMANN, Vlastimil, VALA, Miroslav. Protection of Critical Infrastructure Component Against a Vehicle Attack. In: *TRANSPORT MEANS 2017, PTS I-III*. Kaunas: KAUNAS UNIV TECHNOLOGY PRESS, 2017, s. 368-372. ISSN 1822-296X.
- [5] NEUMANN, Vlastimil. Model of a steering axle of a military truck. In: *International Conference on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems*. Bologna: Medimond, 2016, s. 115-123. ISSN 2345-0088. ISBN 978-88-7587-737-8.
- [6] NEUMANN, Vlastimil. Suspension mechanism of combat tracked vehicles. In: *Transport Means 2016*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2016, s. 48-53. ISSN 1822-296X.
- [7] NEUMANN, Vlastimil. Possibilities of vehicle movement evaluation. In: *Transport Means 2015*. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2015, s. 177-180. ISSN 1822-296X.
- [8] NEUMANN, Vlastimil. Analysis of the stress of the planetary transmission. In: *ICMT 2015 - International Conference on Military Technologies 2015*. Brno: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015, s. 157-162. ISBN 978-80-7231-976-3. doi:10.1109/MILTECHS.2015.7153744
- [9] NEUMANN, Vlastimil. Analysis of a Load of a Tracked Vehicle Suspension System. In: *Transport Means 2014*. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2014, s. 457-460. ISSN 2351-4604.
- [10] NEUMANN, Vlastimil. Vehicle evaluation with simulating technologies support. In: *Transport Means*. Kaunas, Litevská republika: Kaunas University of Technology, 2013, s. 173-176. ISSN 1822-296X.
- [11] NEUMANN, Vlastimil. Vehicle moving evaluation with simulating technologies support. In: *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systém ITELMS'2013*. Kaunas, Litevská republika: Kaunas University of Technology, 2013, s. 179-184. ISSN 2345-0088.

Stat' ve sborníku [Dsc]

- [1] KROBOT, Zdeněk, ŠVÁSTA, Adam, NEUMANN, Vlastimil. Diagnostic Tools and Internal Network Architecture of Nowadays Special and Combat Vehicles Operated within the Army of the Czech Republic. In: *Transport Means - Proceedings of the International Conference*. Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas, 2022, roč. 2022-October, s. 353-359. ISSN 1822-296X. doi:10.5755/e01.2351-7034.2022.P1.
- [2] KROBOT, Zdeněk, HRUBÝ, Jaroslav, PARKER WHAM, Brad, NEUMANN, Vlastimil, FURCH, Jan. Experimental Analysis of Blunt Impact on Human Head Caused by a Moving Object – Injury Potential Approach. In: *International Conference on Military Technologies 2021 (ICMT 2021)*. Piscataway: IEEE, 2021. ISBN 978-1-6654-3724-0. doi:10.1109/ICMT52455.2021.9502778.
- [3] KROBOT, Zdeněk, HRUBÝ, Jaroslav, NEUMANN, Vlastimil, TÚRÓ, Tomáš. The Injurious Effects of Freely Transported Objects on a Crew in Military Vehicles during Traffic Accidents. In: *ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies*. Brno, Czech Republic: University of Defence, 2019, s. 8870080. ISBN 978-172814593-8. doi:10.1109/MILTECHS.2019.8870080.
- [4] TÚRÓ, Tomáš, NEUMANN, Vlastimil, KROBOT, Zdeněk. Health and usage monitoring system assessment. In: *Krivanek V. ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies, Proceedings*. Brno: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, s. 8870072. ISBN 978-172814593-8. doi:10.1109/MILTECHS.2019.8870072.

NEUMANN, V. *Možnosti zvýšení užitečných vlastností balistických ochrany*. Brno 2023. Habilitační práce. Univerzita obrany.

- [5] NEUMANN, Vlastimil. Stress of the steering mechanism of combat tracked vehicles. In: Transport Means - Proceedings of the International Conference. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2018, roč. 2018-October, s. 549-554. ISSN 1822-296X.
- [6] KROBOT, Zdeněk, TÚRÓ, Tomáš, NEUMANN, Vlastimil. Using Vehicle Data in Virtual Model for Maintenance System Support. In: 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). Piscataway, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, s. 171-174. ISBN 978-153861988-9. doi:10.1109/MILTECHS.2017.7988750.
- [7] NEUMANN, Vlastimil, KROBOT, Zdeněk, TÚRÓ, Tomáš. Stress of a Vehicle Propulsion Mechanism. In: International Conference on Military Technologies (ICMT). Piscataway, NJ 08854-4141 USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, s. 179-184. ISBN 978-1-5386-1988-9. doi:10.1109/MILTECHS.2017.7988752.
- [8] NEUMANN, Vlastimil. Analysis of external load of tracked vehicle transmissions. In: Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics System ITELMS'2014. Panevezys, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2014, s. 198-205. ISSN 2345-0088.

Stat' ve sborníku [D]

- [1] MAZAL, Jan, TÚRÓ, Tomáš, ZEZULA, Jan, KŘIŠŤÁLOVÁ, Dana, NEUMANN, Vlastimil. VYUŽITÍ POKROČILÝCH SIMULACÍ V PROCESU AUTOMATIZACE OPERAČNĚ-TAKTICKÉHO ROZHODOVÁNÍ VE VOJENSTVÍ. In: Sborník zkonference CAE Forum 2022 TechSim Engineering s.r.o.. Praha: TechSim Engineering s.r.o., 2022, s. 56-59. ISBN 978-80-908297-1-8.
- [2] NEUMANN, Vlastimil. Analysis of vehicle obstacle negotiation capability. In: Armament and Technics of Land Forces 2016. Liptovský Mikuláš: Akadémia ozbrojených síl generála M. R. Štefánika Liptovský Mikuláš, 2016, s. 157-167. ISBN 978-80-8040-537-3.
- [3] NEUMANN, Vlastimil. Development of combat tracked vehicle suspension mechanism. In: Deterioration Dependability Diagnostics. Brno: University of Defence, 2016, s. 23-37. ISBN 978-80-7231-376-1.
- [4] NEUMANN, Vlastimil. MSC.ADAMS utilization for vehicle movement evaluation. In: Medzinárodná vedecká konferencia o vojenských a špeciálnych technológiách 2016. Trenčín: Fakulta špeciálnej techniky, Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 2016, s. 24-31. ISBN 978-80-8075-743-4.
- [5] NEUMANN, Vlastimil. Model of a tracked vehicle with multibody dynamics software support. In: Armament and Technics of Land Forces 2015. Liptovský Mikuláš, Slovenská republika: Akadémie ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika, 2015, s. 156-170. ISBN 978-80-8040-518-2.
- [6] NEUMANN, Vlastimil. Možnosti simulace pohybu bojových pásových vozidel. In: 41. mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015, s. 84-89. ISBN 978-80-7494-196-2.
- [7] NEUMANN, Vlastimil. Simulation of the vehicle manoeuvring. In: Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems 2015. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2015, s. 197-202. ISSN 2345-0088.
- [8] NEUMANN, Vlastimil. Tracked vehicle analysis with simulation technologies support. In: International Scientific-technical Conference trans&MOTAUTO'14. Varna, Bulgaria: Scientific-technical union of mechanical engineering, 2014, s. 20-23. ISSN 1310-3946.
- [9] NEUMANN, Vlastimil. Mathematic model of a truck. In: Deteriorability, Dependability, Diagnostics. Brno: University of Defence Brno, 2013, s. 307-314. ISBN 978-80-7231-939-8.
- [10] NEUMANN, Vlastimil. Simulation technologies support in construction of combat and special vehicles. In: Transfer 2013. Trenčín: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 2013. ISBN 978-80-8075-607-9.

NEUMANN, V. *Možnosti zvýšení užitečných vlastností balistických ochrany*. Brno 2023. Habilitační práce. Univerzita obrany.

- [11] NEUMANN, Vlastimil. Využití simulačních technologií v konstrukci bojových a speciálních vozidel. In: Setkání uživatelů programů MSC.Software 2013. Brno: MSC.Software s.r.o., 2013, s. 1-9. ISBN 978-80-260-4173-3.
- [12] ČORNÁK, Štefan, BRAUN, Pavel, NEUMANN, Vlastimil. A contribution to economical and ecological assessment of electromobility. In: ELECTROMOBILITY 2011. Česká republika, Praha: ČVUT v Praze, 2011, s. 44-51. ISBN 978-80-01-04818-4.
- [13] NEUMANN, Vlastimil, ČORNÁK, Štefan. Thermal stress solution of a vehicle brake system. In: Armament and Technics of Land Forces 2011. Liptovský Mikuláš: Akadémia ozbrojených síl gen. M. R. Štefánika, 2011, s. 110-115. ISBN 978-80-8040-431-4.

Uspořádání konference [M]

- [1] POKORNÝ, Zdeněk, STUDENÝ, Zbyněk, HORÁK, Vladimír, ŠTOLLER, Jiří, NEUMANN, Vlastimil, DOBROCKÝ, David, JOSKA, Zdeněk, DOBŠÁKOVÁ, Lenka, PROCHÁZKA, Jiří, VILIŠ, Jindřich. MaTeDaS 2023 17th International Conference on Materials and Technologies for Defense and Security. Brno, Lednice, Česká republika. 24.5.2023. Uspořádání konference.
- [2] MAZAL, Jan, STODOLA, Petr, KŘIŠŤÁLOVÁ, Dana, PODHOREC, Milan, FRANTIŠ, Petr, NEUMANN, Vlastimil, FARLÍK, Jan, KŘIVÁNEK, Václav, MALÝ, Vlastimil, VALIŠ, David. Military Advanced Robotic Systems (MARS) Conference. Praha, Česká republika. 20.10.2016. Uspořádání konference.
- [3] STODOLA, Jiří, ŠŤASTNÝ, Jiří, VALIŠ, David, NEUMANN, Vlastimil. Deterioration Dependability Diagnostics. Brno, Česká republika. 6.10.2015. Uspořádání konference.
- [4] STODOLA, Jiří, ŠŤASTNÝ, Jiří, VALIŠ, David, NEUMANN, Vlastimil. Deterioration Dependability Diagnostics. Brno, Česká republika. 7.10.2014. Uspořádání konference.

Ostatní [O]

- [1] NEUMANN, Vlastimil, DVORÁK, Martin, STUDENÝ, Zbyněk, POKORNÝ, Zdeněk, DOBROCKÝ, David, JOSKA, Zdeněk, DOBŠÁKOVÁ, Lenka, PROCHÁZKA, Jiří, VILIŠ, Jindřich. Proceedings of Abstracts MATEDAS 2023. [sborník-celek]. Brno: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Military Technology, University of Defence, 2023, 128 p.
- [2] ČORNÁK, Štefan, NEUMANN, Vlastimil, BRAUN, Pavel. Měření vnitřního mikroklimatu ve vozidle BVP-2 při střelbě z kulometu a kanónu. Audiovizuální tvorba. 2016.

Uspořádání workshopu [W]

- [1] TÚRÓ, Tomáš, NEUMANN, Vlastimil. MILVA NGVA Working Group Meeting VII/ 2014. Prague, Česká republika. 16.9.2014. Uspořádání workshopu.