



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VÝROBA KOMPOZITU PRO BALISTICKÉ ÚČELY

MANUFACTURING OF COMPOSITE FOR BALLISTIC PURPOSES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Aleš Majchrák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Zouhar,  
Ph.D.

BRNO 2023

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Aleš Majchrák</b>
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Zouhar, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Výroba kompozitu pro balistické účely

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kompozity jsou hojně využívány pro svoje jedinečné vlastnosti, jako je tuhost vs. pevnost vs. váha. Další vlastností při použití speciálních materiálů je odolnost proti opotřebení a průrazům při vysokých rychlostech. Tato vlastnost se využívá pro výrobu balisticky odolných materiálů, kde jedním z hlavních kritérií je váha. Práce se zaměřuje na výrobu kompozitního strukturálního panelu, který bude poskytovat balistickou ochranu. Výroba bude realizována pomocí lisování, prepregu a infuzí. Testovací panely budou podrobeny zkouškám, jak mechanických vlastností, tak balistickým. Pro výroby budou využity materiály aramidové a UHMPWE.

### Cíle diplomové práce:

1. Literární rešerše – materiály, metody výroby, zkoušky.
2. Výroba testovacích panelů a vzorků.
3. Testy vzorků.
4. Vyhodnocení vzorků na základě testů a zkoušek.

### Seznam doporučené literatury:

JONES, R. M. Mechanics of Composite Materials. 2. Boca Raton: CRC Press, 1999. ISBN 9781315272986. Dostupné z: doi:10.1201/9781498711067

BHATNAGAR, A. Lightweight Ballistic Composites. 2 nd. Duxford, UK: Elsevier, 2016. ISBN 9780081004067.

MAZUMDAR, S. K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0585-3.

KASSAPOGLOU, Ch. Design and analysis of composite structures: with applications to aerospace structures. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. Aerospace series. ISBN 978-1-118-40160-6.

CAMPBELL, F. C. Structural composite materials. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. ISBN 1615030379.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o vysokopevnostních vláknových kompozitních materiálech se zaměřením na využití v balistické ochraně. Jejím cílem byla výroba kompozitních panelů a ověření jejich vlastností. Teoretická část se zabývá tématem vláknových kompozitů a balistické ochrany. Praktická část sestává z výběru vhodných technologií výroby panelů z daných materiálů, samotného procesu výroby, přípravy vzorků a jejich testování. Použitými materiály při výrobě byly aramid Twaron a z řady UHMWPE Endumax. Panely měly tři různé matrice – epoxidovou pryskyřici, matrici s termosetem a termoplastem. Výrobní metody sestávaly z vakuové infuze, lisování a autoklávu. Byly provedeny zkoušky tahem, ohybem a zkoušky balistické na zařízení Taylorova testu a v balistické laboratoři. Výsledky potvrdily vysoké meze pevnosti a schopnost materiálu absorbovat kinetickou energii. Při balistických zkouškách byla sledována míra odolnosti materiálu vůči balistickému impaktu s ohledem na standard NIJ 0101.06 a byly určeny mezní vrstvy v rámci námi testovaných vzorků.

### Klíčová slova

balistická ochrana, kompozitní materiály, aramidy, UHMWPE, Taylorův test

## ABSTRACT

The master thesis deals with high-strength fiber composites with a focus on their use in ballistic protection. It's aim is to manufacture of composite panels and to test their properties. The theoretical part discusses the fiber composites area and ballistic protection. The experimental part consists of the choice of the suitable technologies for the production of the panels of the given materials, the production process itself, the preparation of the samples and their testing. Materials used for production were Twaron from aramides group and Endumax from the UHMWPE group of materials. Panels had three different matrices – epoxide resine, thermoset matrix and thermoplastic matrix. Manufacturing methods consisted of vacuum infusion, hot press and autoclave. Tensile and bending tests were examined, so as ballistic tests on the Taylor anvil test device and in ballistic laboratory. The results confirmed the high strenght of the material and its ability to absorb kinetic energy. During ballistic tests, the amount of material resistance against the ballistic impact was observed with regard to the NIJ 0101.06 standard and the limit thickness within tested samples was defined.

### Keywords

ballistic protection, composites, aramides, UHMWPE, Taylor anvil test

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MAJCHRÁK, Aleš. *Výroba kompozitu pro balistické účely* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145747>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Zouhar.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Výroba kompozitu pro balistické účely vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně, 25.5. 2023

místo, datum

Aleš Majchrák

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Janu Zouharovi, PhD. za cenné rady a připomínky, poskytnuté během vypracování diplomové práce. Dále děkuji především své rodině za vytrvalou podporu během celé doby studia.

## OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD .....	10
1 BALISTICKÁ OCHRANA A MATERIÁLY .....	11
2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....	14
2.1 Aramidy .....	16
2.1.1 Struktura .....	17
2.1.2 Vlastnosti .....	18
2.2 UHMWPE .....	19
2.2.1 Struktura .....	20
2.2.2 Vlastnosti .....	20
2.3 Možnosti dalších vláknových kompozitních materiálů .....	21
2.3.1 Skelná vlákna .....	22
2.3.2 Uhlíková vlákna .....	23
2.4 Biokompozity .....	24
2.5 Metody výroby vláken .....	26
2.5.1 Aramidy .....	26
2.5.2 UHMWPE .....	27
2.5.3 Skelná vlákna .....	30
2.5.4 Uhlíková vlákna .....	32
3 VLASTNOSTI A VYUŽITÍ KOMPOZITŮ V BALISTICKÉ OCHRANĚ .....	35
3.1 Deformační vlastnosti .....	35
3.2 Mechanické zkoušky kompozitních materiálů .....	38
3.3 Balistické normy a standardy .....	38
3.4 Aktuální stav poznání v oblasti balistické ochrany .....	40
3.5 Použití .....	42
3.5.1 Balistická ochrana .....	43
3.5.2 Jiné použití kompozitů .....	46
4 VÝROBA KOMPOZITNÍCH PANELŮ .....	51
4.1 Technologie výroby vakuovou infuzí .....	51
4.2 Lisování s vrstvou prepregu .....	53
4.3 Autokláv .....	55
4.4 Lisování Endumaxu .....	56
4.5 Řezání vodním paprskem .....	58
5 MECHANICKÉ A BALISTICKÉ ZKOUŠKY .....	60
5.1 Zkouška tahem .....	61

---

5.2 Zkouška ohybem .....	63
5.3 Taylorův test pro vyhodnocení balistické ochrany.....	68
5.4 Zkoušky na balistické zkušebně .....	73
ZÁVĚR.....	79

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

Seznam výkresů

## ÚVOD

Jedním z hlavních aspektů lidského pokroku napříč tisíciletími byla a je materiálová věda. Vynalézání a modifikace nových materiálů patřilo mezi základní stavební kameny veškerého vývoje sahajícího od kamenných pazourků, přes slitiny a ocel až po nejmodernější nanomateriály. Odvěké snahy o nadvládu, vedoucí k bezpočtu ozbrojených konfliktů a válek, byly jedním z akceleratorů hledání efektivnějšího využití stávajících a případně nalezení pokročilejších materiálů. Každý technický náskok znamenal značnou výhodu. S rozvojem střelných zbraní dostaly konflikty nový rozměr a prakticky nejrychlejší progres techniky proběhl ve 20. století. Byl provázen světovými válkami a právě během tohoto období se posouval vývoj vysokým tempem vpřed. Důležitou oblastí se stala ochrana osob, účastníků se těchto konfliktů. V tomto odvětví nastal otřes při vynalezení aramidových vláken (prvním na trhu bylo vlákno Nomex v roce 1967), které prokázaly vysoké mechanické vlastnosti při nízké hmotnosti. V dalších letech se počet dalších vysokopevnostních vláken rozrůstal a vznikl v podstatě nový sektor balistické ochrany, kdy kožené a textilní vesty a ocelové helmy postupně začaly být nahrazovány vestami a helmami z lehkých kompozitů s výztuhou aramidů či UHMWPE vláken v kombinaci s dalšími materiály, jako např. keramika či kov. Kompozity začaly být hromadně užívány také v pancířích obrněných vozidel a od té doby v podstatě probíhá souboj dvou linií vývoje, kde proti sobě stojí balistický sektor se stále účinnějšími zbraněmi, hlavicemi a projektily, a sektor balistické ochrany s využitím sofistikovaných ochranných systémů s využitím nejmodernějších materiálů. [1]

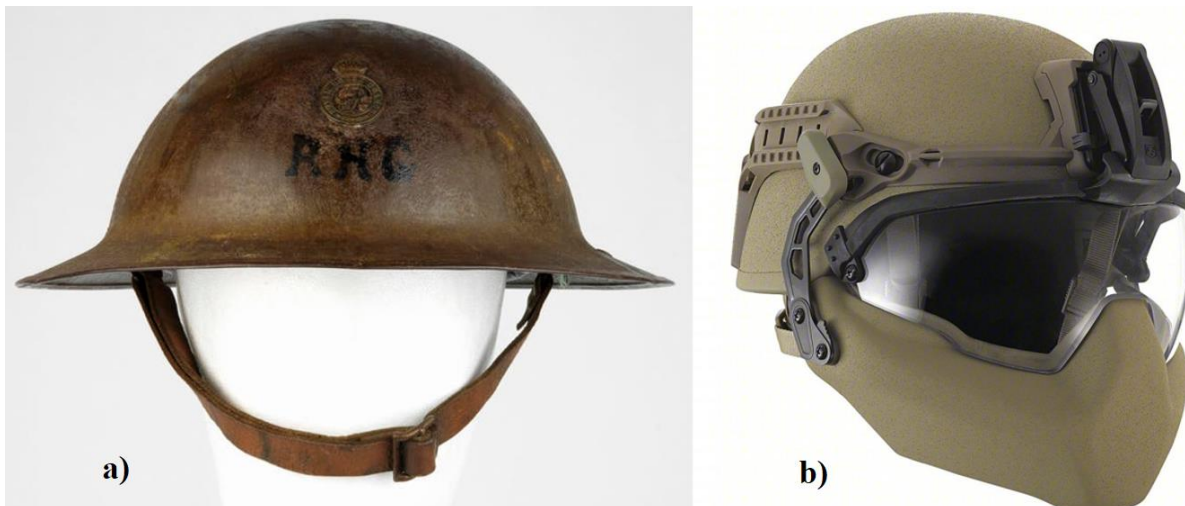
Tato práce se zaměřuje na vláknové kompozity s polymerní maticí pro balistickou ochranu. Poskytují značnou míru absorpce energie a díky vysokému poměru pevnosti vůči hmotnosti jsou vhodným konstrukčním materiálem pro celou řadu aplikací. Rešerše popisuje typy vláken využívaných ve vysokopevnostních kompozitech s polymerními maticemi, jejich výrobu a použití. Kompozity jsou popsány z pohledu jejich mechanických a deformačních vlastností, mechanických zkoušek, norem, standardů a použití s ohledem na využití zejména v balistické ochraně. Zde tvoří kompozity obvykle střední vrstvu vícevrstevných pancířů s využitím keramické tříštivé čelní plochy a zadní tlumící stěny, která může být z kovu, gumy či taktéž kompozitu a pohlcuje případné zbytky fragmentů střely a reziduální energii.

V rámci experimentální části byl stanoven cíl v podobě výroby kompozitních panelů pro balistické účely, které projdou zkouškami mechanických vlastností a budou testovány na míru balistické odolnosti a jejich chování vůči balistickému impaktu. Při dimenzování kompozitu pro tyto účely bylo nutno zohlednit celou řadu faktorů – výběr materiálu, vhodného typu tkaniny, typ matrice a především technologii výroby i následného zpracování. Zvoleným materiálem byla aramidová vlákna a UHMWPE, patřící mezi nejvyužívanější vlákna v balistice. Pro stanovení jejich mechanických vlastností byly provedeny zkoušky tahem a ohybem, a balistická odolnost a schopnost absorpce energie byly ověřeny pomocí Taylorova testu a testů na balistické zkušebně.

## 1 BALISTICKÁ OCHRANA A MATERIÁLY

S rozvojem střelných zbraní se začaly souběžně rozvíjet dvě linie technického vývoje – jak zlepšit palebnou sílu a účinnost, ale také, jak efektivně a účelně této hrozbě čelit. Tyto dvě „soupeřící“ linie se průběžně více či méně doháněly – ve chvíli, kdy ochrana vůči munici dosáhla účinné a obstojné úrovně, přišel vývoj efektivnější a průbojnější munice, načež forma balistické ochrany byla opět o něco vylepšena. Palebná munice prošla od svého počátku při vynalezení střelného prachu dlouhým vývojem, od kovových koulí až po sofistikované projektily rozličných konstrukcí a konceptů. V palebné síle a míře impaktu hraje roli několik aspektů – úst'ová rychlost, materiál, hmotnost a geometrie střely, její konstrukce a případné sekundární efekty. Typů projektilů existuje velké množství a při dimenzování efektivní balistické ochrany je vhodné uvažovat, jaké konkrétní hrozbě bude při aplikaci nejčastěji čelit. Statisticky nejvíce zranění a úmrtí na bojišti však představují střepiny a šrapnely explozí, nicméně proti nim je drtivá většina dnešních ochranných prvků dostatečně odolná.

Nebudeme-li uvažovat nespočet různých kovových brnění, kroužkovou zbroj, dřevěné štíty apod., které měly za úkol chránit bojovníka před bodnými a sečnými ranami kopí, mečů, případně šípů, tak o prvopočátku balistické ochrany můžeme mluvit až v průběhu 20. století. Ve válečných konfliktech se nošení brnění postupně omezovalo, jelikož se postupně ukazovalo jako čím dál více neúčinné a snižovalo pohyblivost. Přestože občas takové kovové brnění dokázalo zastavit smrtelnou kulku tehdejších palných zbraní (muškety), tak stále mělo charakter ochrany primárně před chladnými zbraněmi. V momentě, kdy bojiště naplno ovládly střelné zbraně se potřeba brnění vytratila a po několik dalších století jediný prvek ochrany vojáka představovala helma. Helmy mají historii dlouhou jako válčení samotné, a právě u nich se můžeme skrze doslova několik tisíciletí, kdy byly vyráběny z kůže či zejména z kovu, přenést na počátek 20. století. V době 1. světové války se začaly používat helmy z měkké oceli, a významným se stal nástup helem typu Brodie (obr. 1 a) z manganové oceli Hadfield, obsahující 12 % manganu, s vysokou nárazovou odolností. Ocel poté zůstala konstrukčním materiálem helem až do 70. let 20. století. [2]



Obr. 1 Srovnání ocelové helmy Brodie (a) s moderní aramidovou helmou typu FAST (b) [3; 4].

Množství konfliktů motivovalo spolu s vyspělostí zbraní snahu o další vývoj balisticky odolných materiálů. Cílem bylo a stále je najít optimální materiál v poměru míry ochrany a hmotnosti. Týkalo se to kromě segmentu osobní ochrany také pancéřování vozidel, jelikož ocelové pancíře, relativně úspěšně využívané za 2. světové války, sice poskytovaly značnou míru ochrany, avšak vysokou daní byla vinou hmotnosti velmi špatná mobilita (rychlost a manévrovatelnost), nehledě na vysokou spotřebu paliva. Zásadní zlom nastal při testování prvního vláknového materiálu v balistice – nylonu. Brzy se ukázalo, že přináší solidní úroveň

ochrany proti balistickým hrozbám a prvního využití doznal již v průběhu 2. světové války, kdy z něj byly vyráběny ochranné vesty, které však měly spíše charakter ochrany vůči střepinám. V roce 1965 byl firmou DuPont vyvinut aromatický polyamid kevlar, který záhy získal pozornost jako velmi lehký a odolný balistický materiál. Vzniklo tak nové odvětví balistických kompozitů. [1]

Dnešní koncept balistické ochrany má většinou hybridní charakter – konstrukce je složena ze dvou či více vrstev několika materiálů (obr. 2). Někdy je tento systém nazýván jako multi-vrstvené pancéřování, přičemž obvyklou skladbu tvoří [5]:

- přední čelní plocha – tříštivá složka (tvrdý pancíř),
- střední podkladová vrstva – (měkký pancíř),
- zadní stěna.



Obr. 2 Typická struktura vesty s vícevrstevným pancířem [6].

Obecně platí, že kombinace několika materiálů v několika vrstvách poskytuje jako celek lepší performanci vůči impaktu, než jednotlivé materiály samotné. Na poli balistické ochrany se využívá několik různých druhů materiálů. Mezi ně patří [6]:

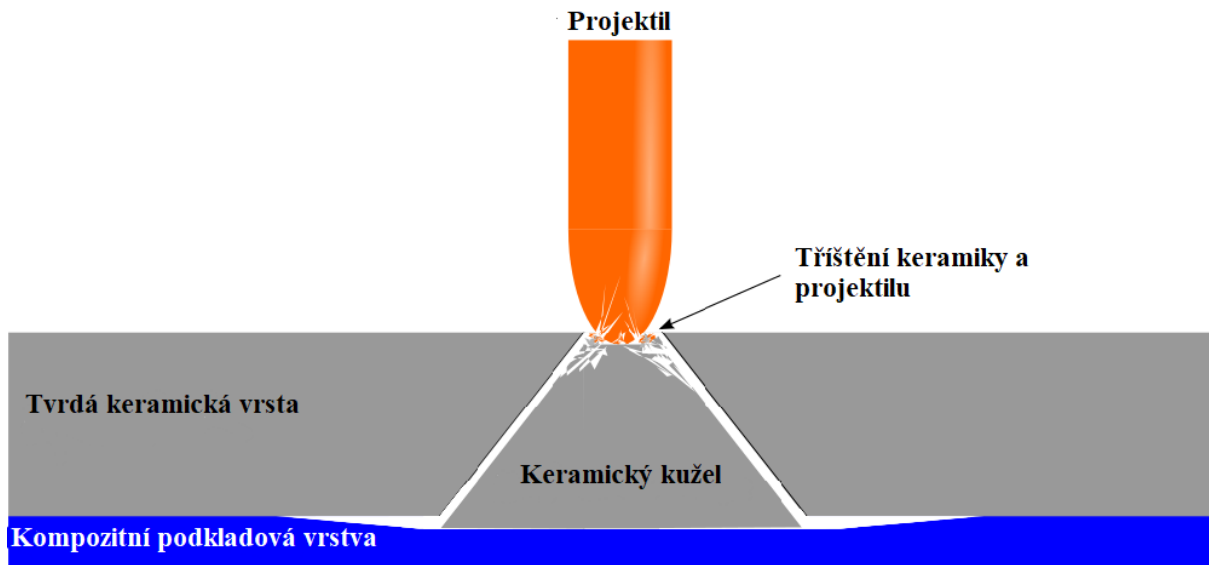
- balistická keramika,
- balistická vysokopevnostní ocel,
- balistické gely,
- vláknové kompozity.

Balistická keramika je součástí téměř každého pancíře v podobě čelní tříštivé složky. Poskytuje vysokou tvrdost, nutnou pro deformaci střely a její vychýlení, čímž je snížena koncentrace rázové síly a energie je rozložena do větší plochy. Sama o sobě však nedokáže pohltit veškerou kinetickou a rázovou energii, a proto je při pancířích dimenzovaných pro vyšší rychlosti projektilů nutné, aby tyto pancíře obsahovaly podkladovou měkkou vrstvu. Ta pohltí reziduální energii a případné fragmenty projektilu či keramiky, jelikož kvůli vysoké křehkosti dojde při nárazu k jejímu roztržení (obvykle se vytváří konická vrstva keramiky, jdoucí ve směru nárazu a vytváří silové působení na podkladovou vrstvu), jak je znázorněno na obr. 3. Jako balistická keramika se označují zejména tři druhy keramických materiálů [7]:

- oxid hlinitý (alumina),
- karbid křemíku,

- karbid boru.

Nejpoužívanějším keramickým materiálem v balistice je karbid boru, mající nejnižší hustotu a zároveň nejlepší mechanické vlastnosti. Z balistické keramiky dosahuje nejvyšších hodnot modulu pružnosti a především tvrdost. V závislosti na velikosti částic a technologii výroby přes dosahuje tvrdost hodnot přes 3000 HV a po diamantu a kubickém nitridu boru se karbid boru řadí na třetí místo v pořadí nejtvrdějších materiálů vůbec. Lze se setkat také s oxidem hlinitým o vysoké čistotě a karbidem křemíku, které mají nižší produkční náklady, avšak jejich mechanické vlastnosti jsou ve srovnání s karbidem boru horší a využití v balistice je méně časté. Výzkumem pro balistiku procházejí dále např. nitrid křemíku či oxid hlinitý vytvrzený zirkonem. [7; 8]



Obr. 3 Dvouvrstvý pancíř keramika – kompozit při nárazu projektilu [9].

Alternativou keramiky může být vysokopevnostní ocel typu Armox, která taktéž může být využita jako čelní vrstva. Náklady jsou oproti keramice nižší, avšak nevýhodou je její vysoká hmotnost a v některých aspektech horší mechanické vlastnosti, kvůli čemuž je využití keramiky častější. Setkat se lze také s ultra vysokopevnostní ocelí (např. Armox Advance), využívanou zejména v automobilovém průmyslu. Obecně je tato část keramické a ocelové balistické ochrany nazývána jako tvrdý pancíř (tvrdé pláty). [6]

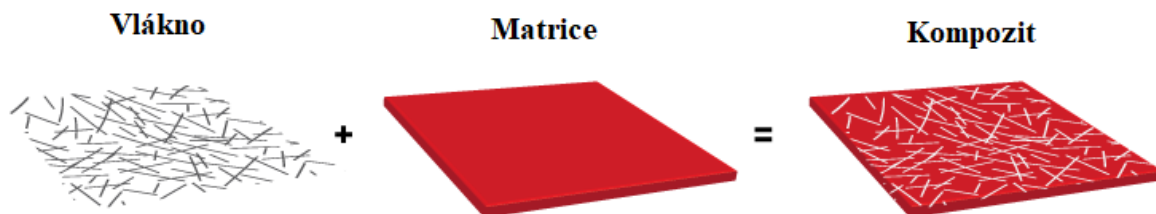
Asi nejvýznamnější roli v oblasti balistické ochrany hrají kompozity – konkrétně vláknové kompozity s polymerní matricí. Mezi ně se na tomto poli řadí zejména aramidy, jež byly prvními vláknovými kompozity v balistice, a UHMWPE (vysokomolekulární polyethylen). Tvoří střední vrstvu vícevrstevných pancířů, přináší vysoký poměr pevnosti a hmotnosti a mají zásadní vliv na míru absorpce energie při nárazu a zachycení fragmentů náboje. Jako součást pancířů, např. pro zadní vrstvu se někdy využívají ještě dva další typy vláken – skelná a uhlíková vlákna. Pozornost bude v rámci této práce zaměřena právě na tuto skupinu materiálů – vláknové kompozity pro balistiku, označované jako měkký pancíř. Jednotlivé materiály a typy těchto vláken budou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách. [5; 6]

## 2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity jsou materiály, které jsou tvořeny dvěma či více komponentami s odlišnými fyzikálními i chemickými vlastnostmi. Jejich charakter je tak nehomogenní a výsledný celek má jedinečné a kompaktnější vlastnosti, než jednotlivé složky zvláště – efekt označovaný jako synergie. Dimenzovány jsou kompozitní systémy tak, aby byly upozaděny hlavní nedostatky jeho komponent a vynikly jejich přednosti. Hlavními přínosy a výhodami kompozitu jsou vysoká pevnost a tuhost v kombinaci s nízkou hmotností. Obecně jsou kompozity složeny z výztuhy a matrice (obr. 4), přičemž pro zařazení materiálu mezi kompozity je nutno, aby podíl výztuhy činil minimálně 5 %. Podle výztuhy rozlišujeme kompozity částicové a vláknové, přičemž ve většině případů je výztuhový komponent mnohem tvrdší a tužší než matrice, která je spojitou fází a plní funkci pojiva. Kromě spojování výztuhové fáze má matrice za úkol také přenášet zatížení a měla by být schopna si zachovat vlastnosti i při poruchách. Poměrné prodloužení matrice při přetržení by mělo být vyšší, než mezní prodloužení výztuhové složky, aby byla zajištěna ochranná funkce (obvykle platí pro matrice kovové a polymerní). [10; 11]

V souvislosti s obecně nejznámějšími a nejpoužívanějšími kompozity, využívanými také v balistické ochraně, se mluví o vláknových kompozitech, které mají na trhu dominantní postavení. Výsledná tloušťka výrobku z kompozitu s kontinuálními vlákny se utváří vrstvením a vzniká tak laminát. Vlastnosti jsou určeny orientací vláken v jednotlivých vrstvách. Setkat se lze s tzv. hybridními lamináty, kde jednotlivé vrstvy mají různé výztuhy (např. uhlíková a polymerní vlákna). Vlákna jsou v zásadě dělena podle materiálu na 5 typů [10]:

- skleněná,
- uhlíková,
- polymerní,
- keramická,
- kovová.



Obr. 4 Obecná struktura vláknového kompozitu [12].

Aby vlákna měla parametry pro využití v balistice, a bylo možno je označit jako vysokopevnostní, musí jejich molekulová struktura splňovat základní kritéria – vysoce orientované molekuly ve směru osy vlákna, hmotnost a délka řetězce by měla být co nejvyšší, a vlákno by mělo být krystalické a bez defektů. Kompozity s kontinuálními vlákny jsou o poznání odolnější, než kompozity částicové, což je vykoupeno vyšší cenou. Vrstvy tkaniny (obr. 5 a) v laminátu se často pokládají v různých orientacích pro zlepšení mechanických vlastností, jelikož obecně zde panuje značná anizotropie. Vlastnosti materiálu jsou úměrné průměru vláken – čím menší, tím lepší, nicméně opět na úkor vyšší ceny. Mezi nejpoužívanější vlákna v pevnostních kompozitech se řadí aramidy, UHMWPE, karbon a skelná vlákna. Jejich nejčastější formou jsou tkaniny (obr. 5), které mohou být tkané několika způsoby. Důležitou složkou je spojitá fáze matrice, v případě vláknových kompozitů obvykle polymerní (např. pryskyřice). Nutnou podmínkou vytvoření kompozitu je dobrá soudržnost materiálu výztuhy a matrice. Kromě orientace a geometrie vláken zajišťuje také ochranu vůči abrazi a přenos sil mezi vlákny při zátěži. Ve srovnání s výztuží má obvykle vyšší plasticitu, nižší mechanické vlastnosti a nižší hmotnost. Matrice může být [1; 10; 11]:

- polymerní,

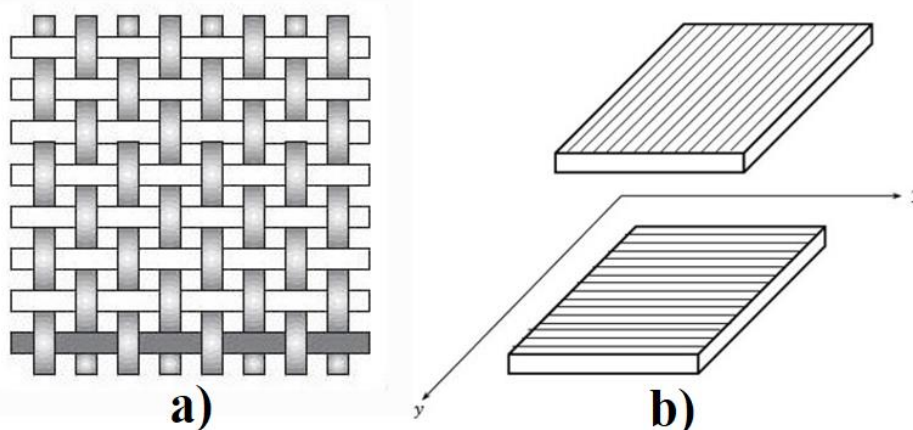
- kovová,
- keramická,
- uhlíková,
- skleněná,
- sklokeramická.

Optimální množství vytvrzovací komponenty je obecně kolem 70 %. Při vyšším množství by zde již bylo příliš málo matrice pro efektivní soudržnost. Polymerní matrice v kompozitech mohou být dvou typů – termoplast nebo termoset (reaktoplast). Termoplast má vysokou viskozitu a je zpracován při zahřátí nad teplotu tání. Po ztuhnutí je možno jej opětovně rozehrát k dalšímu zpracování. Naproti tomu termoset je zpočátku nízko viskózní a po zahřívání, kdy je tvárný, ztuhne a již není možné jej znovu tavit a formovat. [13]

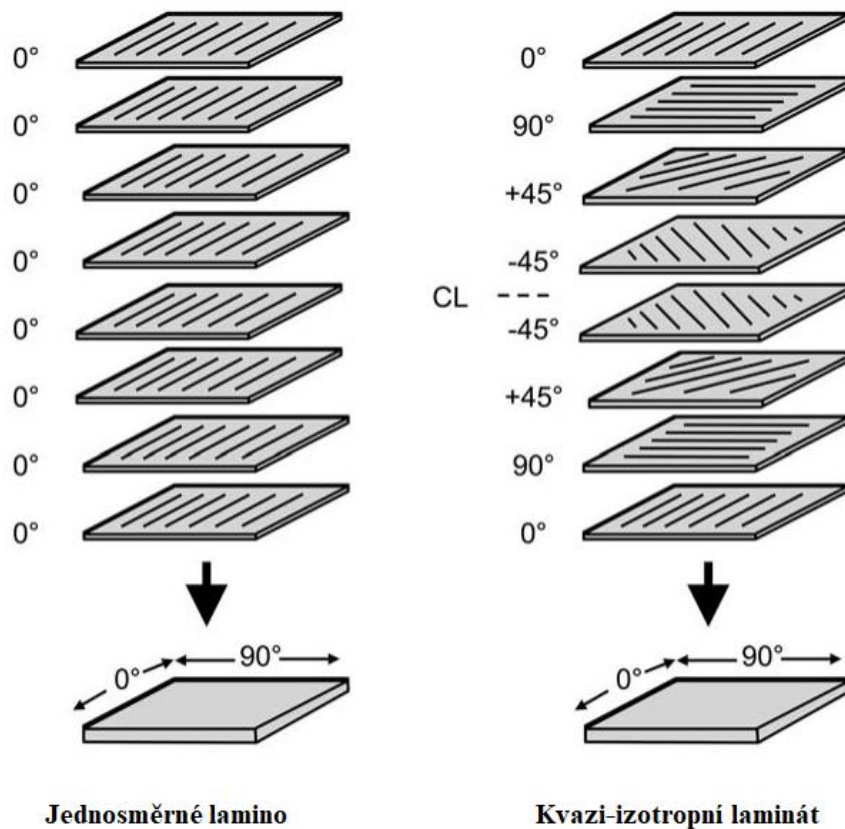
Typickou vlastností kompozitů je anizotropie. Na rozdíl např. od kovů, jež jsou obecně považovány za izotropní, tedy že mají ve všech směrech shodné vlastnosti, kompozity díky orientaci vláken mají v různých směrech různé vlastnosti. Jsou klasifikovány jako ortotropní materiál, tzn. že vlastnosti se liší ve třech vůči sobě kolmých směrech. Výsledný komponent z kompozitu je tvořen několika vrstvami, označovaných jako laminát a jeho vlastnosti jsou ovlivněny kompozicí vrstev. Rozlišuje se 6 druhů laminátů [13; 14]:

- jednosměrný (lamino) – všechny vrstvy orientovány shodně (obr. 6 vlevo),
- úhlované lamináty – vrstvy vůči sobě natočené ve stejném úhlu, ale opačných orientacích, např.  $[30^\circ, -30^\circ]$ ,
- pravoúhle orientované lamináty – tzv. cross-ply lamináty (obr. 5 b), vrstvy orientovány v úhlech  $[0^\circ, 90^\circ]$ ,
- symetrické lamináty – orientace vrstev symetrická dle středové čáry laminátu, např.  $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]$ ,
- balancované lamináty – pro každou orientovanou vrstvu připadá vrstva opačně orientovaná, např.  $[0^\circ, 30^\circ, -30^\circ, 30^\circ, -30^\circ, 0]$ , nejedná se o symetrické uspořádání,
- kvazi-izotropní lamináty – každá další vrstva je vůči předchozí natočena ve stejném úhlu (obr. 6 vpravo).

Jednosměrná lamina jsou velmi pevná v daném podélném směru, nicméně ve směru kolmém jsou slabá, jelikož zátěž nepřenáší vlákna, ale polymerní matrice. Při porovnání meze pevnosti vláken, která může přesahovat 3500 MPa, a matrice (35–70 MPa), je patrný značný rozdíl. Z toho důvodu jsou kompozity s kontinuálními vlákny obvykle produkovány jako lamináty a nejčastější skladbou je orientace  $[0^\circ, 90^\circ]$ , kdy jsou jednotlivé vrstvy na sebe pokládány pootočené o  $90^\circ$ . V případě kvazi-izotropních laminátů poskytuje struktura prakticky stejnou pevnost ve všech směrech. Někdy se do tohoto rozdělení zahrnují ještě lamináty označované jako hybridní, které jsou složeny z více materiálů, např. karbon a skelná vlákna. [13]



Obr. 5 Struktura tkaniny (a) a znázornění struktury  $[0^\circ; 90^\circ]$  (b) [15; 16].

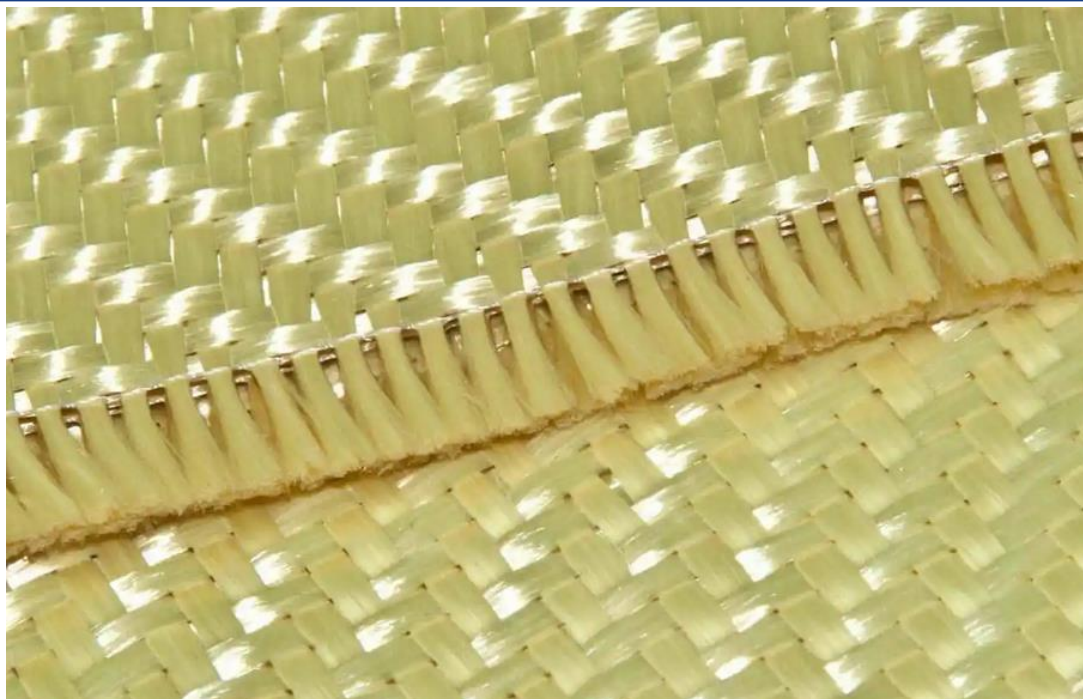


Obr. 6 Znárodnění rozdílů struktury lamina a laminátu [13].

Vlastnosti kompozitů je determinují pro mnohé aplikace, kde je jejich využití vhodnější, než jiných materiálů, např. kovů. Primárním přínosem je zmiňovaná nízká hmotnost v kombinaci s vysokou pevností a tuhostí. Další důležitou charakteristikou je vysoká odolnost vůči korozi a únavovému opotřebení. Mez únavy při cyklickém zatěžování s vrubem je také mnohem vyšší, než u kovů, avšak při statické zátěži u kompozitu s vrubem či poškozením je odolnost nižší, jelikož křehkost kompozitů hůře snáší koncentrace napětí. Použití je omezeno teplotou, která má na vlastnosti významný vliv a s rostoucí teplotou mechanické vlastnosti klesají (konkrétní rozsahy teplot závisí na daném materiálu). Nízké teploty nemají tak zásadní vliv. [13]

## 2.1 Aramidy

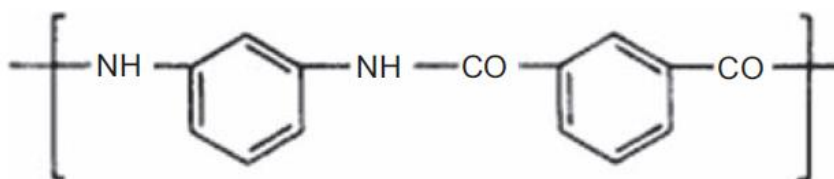
Aramidy jsou vlákna organického původu. Prvním typem takového vlákna byl meta-aramid Nomex, uvedený na trh roku 1967 firmou DuPont. Vyznačoval se vysokou odolností vůči vysokým teplotám a získal široké uplatnění v průmyslu a dodnes je využíván pro výrobu ochranných prvků proti žáru (rukavice, pláště, kombinézy), které jsou využívány nejen v průmyslu, ale také záchrannými a ozbrojenými složkami. O deset let později byl touto firmou vyvinut a představen nový materiál Kevlar, který je nejpoužívanějším a nejrozšířenějším typem aramidového vlákna (detail tkaniny na obr. 7). Typově stejný materiál je znám i pod jinými obchodními názvy jiných výrobců, např. Twaron firmy Teijin. Vysoká pevnost těchto vláken je často využívána pro výrobu kompozitních materiálů, kde mají roli výtuhového prvku. V kombinaci s vhodnými matricemi (různé typy pryskyřic) je pak dosahováno velmi pevných a zároveň lehkých struktur. Kombinace jeho vlastností jej také předurčuje k častému využití v oblasti balistické ochrany, kde tvoří kompozitní vrstvu obvykle v kombinaci s dalšími materiály, nejčastěji s tříštinovou vrstvou z balistické keramiky. Charakteristickým atributem je také vysoká otěruvzdornost, a proto je využíván v ochranných textiliích, kterými mohou být pracovní oděvy i motoristické doplňky. [5; 13]



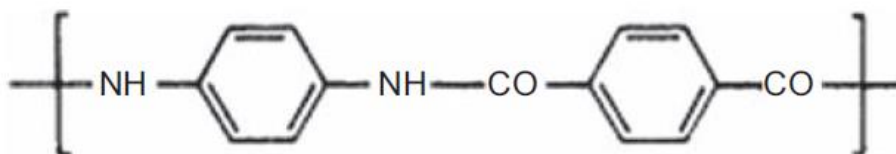
Obr. 7 Tkanina Kevlaru [17].

### 2.1.1 Struktura

Ve své podstatě spadají aramidy do kategorie nylonu a z chemického hlediska jsou to aromatické polyamidy (čímž vzniklo samotné označení aramid). Rozdíl mezi nylonem a aramidem spočívá v typu chemické vazby. V případě vazby mezi saturevanými molekulami s přímým řetězcem vznikají alifatické amidy – nylon. Pokud vazba nastane mezi nesaturevanými benzenovými jádry, vznikají aromatické amidy – aramidy. Tento typ vazby je pro aramidy důležitý z hlediska jejich vlastností, které budou podrobněji rozebrány dále. Z hlediska struktury chemického řetězce je nutno zmínit dva typy pozice vazby na benzenové jádro – para vazba a meta vazba. Srovnání těchto vazeb je možno posoudit na obr. 8 a 9. Pozice para vede k vytváření tuhých molekul, a tedy pevnější struktury. Mají ji dva velmi známé a používané materiály pod obchodními názvy Kevlar a Twaron a díky tomuto uspořádání řetězce mají oproti materiálům s meta vazbou vyšší pevnost a teplotní odolnost. [1; 13]



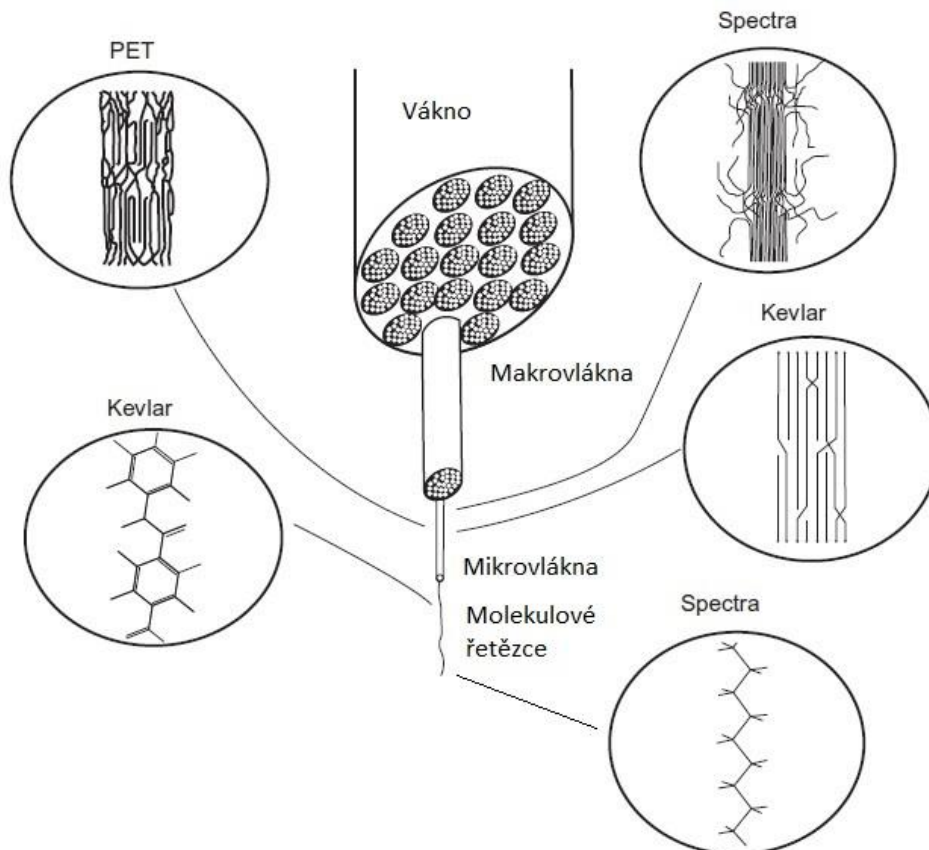
Obr. 8 Meta aramid (Nomex) [1].



Obr. 9 Para aramid (Kevlar) [1].

Samotná struktura aramidových vláken je ve formě vysoce uspořádaných krystalických polymerových řetězců, které jsou vázány do menších vláken (obr. 10). Každé aramidové vlákno je tedy tvořeno z bezpočtu dalších, průměrem mnohem menších vláken takřka

mikroskopických rozměrů (kolem 600 nm). Názorně se přesvědčit o tomto poznatku bylo možno během přípravy aramidových panelů při stříhání jednotlivých vrstev – na okrajích se vlákna třepila a bylo vidět velké množství těchto malých vláken. Aromatická jádra s kovalentní vazbou mají za následek krystalickou a pevnou strukturu a svazky jednotlivých vláken by se daly přirovnat k struktuře prutů, kdy čím vyšší množství vláken, tím pevnější je tento celek. Vazby mezi jednotlivými řetězci jsou tvořeny van der Waalsovými silami a vodíkovými můstky, které jsou relativně slabé. Nepříliš silná je také adheze k matrici. Při vyšším napětí a zejména abrazi proto snadno dochází k porušování, kdy tyto slabé vazby neudrží molekuly u sebe a nastává fibrilace. Tu lze pozorovat jako rozvláknění, respektive třepení vláken. [1; 13]



Obr. 10 Struktura vláken [1].

### 2.1.2 Vlastnosti

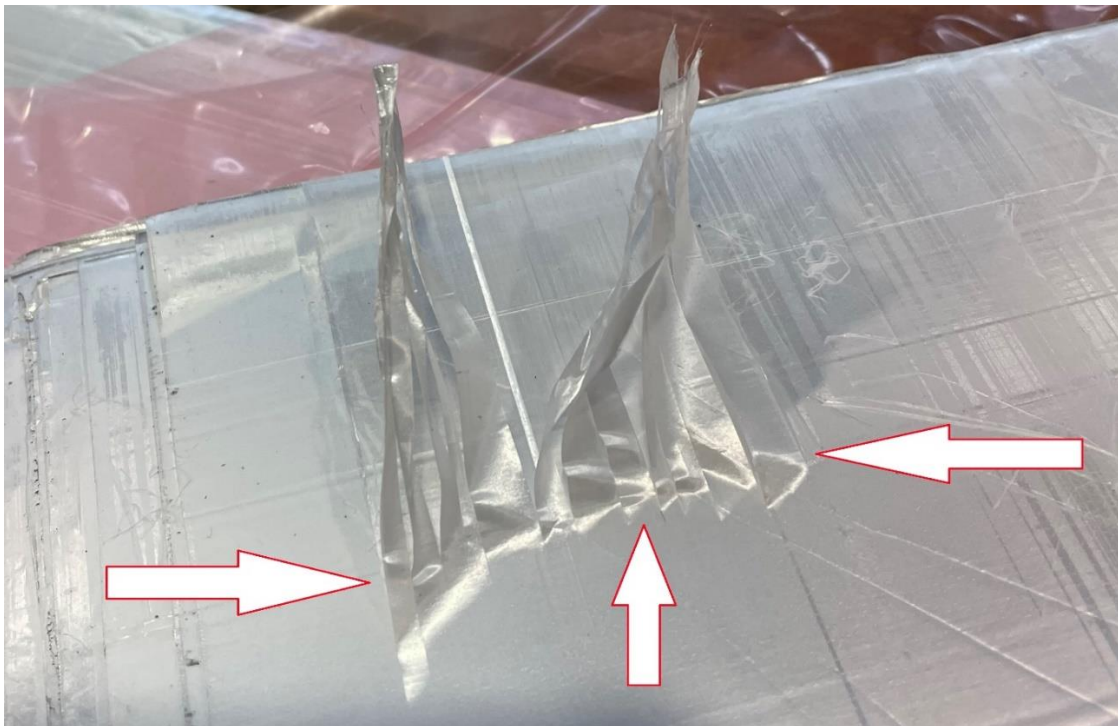
Aramidová vlákna mají specifické vlastnosti, které je předurčují k mnoha jedinečným aplikacím, kde nabízejí spoustu výhod oproti jiným, např. kovovým materiálům. Mezi základní atributy aramidů patří vysoký poměr pevnost versus váha, tedy i přes svou nízkou hustotu (kolem  $1,44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) mají aramidy vysokou mez pevnosti, tuhost a modul pružnosti. V hodnotách tuhosti se aramidová vlákna nachází mezi skelnými vlákny a karbonem. [13]

Díky benzenovým jádrům mají aramidy dobrou stabilitu za vyšších teplot a vyznačují se také mírou ohnivzdornosti. Rozklad materiálu začíná na teplotě  $425 \text{ }^\circ\text{C}$ , přičemž rozsah použitelných teplot je zhruba od  $-200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při teplotě nad  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  však začíná docházet k oxidaci, a proto se obvykle nepoužívají pro aplikace za teplot nad touto hranicí. Chemicky jsou velmi odolné vůči rozpouštědlům s výjimkou velmi silných kyselin. V závislosti na konkrétním typu aramidů jsou schopny v různé míře vstřebávat vlhkost, např. Kevlar 49 dokáže při relativní vlhkosti okolí 60 % vstřebat přibližně 4 %. Hodnota prodloužení aramidů odpovídá pouze 25 % hodnoty pevnosti v tahu. Tento fakt tedy významně ovlivňuje, respektive limituje použití aramidů pro aplikace vyžadující ohyb či jiný způsob flexibility materiálu. [13]

Nejsignifikantnější vlastností aramidů je tuhost. Společně s nízkou váhou, principem a charakterem deformačního chování tvoří klíčové vlastnosti pro významnou oblast použití aramidů – balistickou ochranu, což se týká především para-amidů s vyšší pevností. Aramidová vlákna jsou schopna vstřebat vysoké množství energie deformace. Mají dobré tahové vlastnosti, během tlakového zatížení u nich probíhá plastická deformace a během lámání při tahovém namáhání dochází k fibrilaci. Díky tomu jsou tato vlákna schopna vstřebat velké množství energie a deformace materiálu má pak tvárný charakter, v porovnání s např. již zmíněnými skelnými či karbonovými vlákny, kde dochází ke křehkému porušení. O něco hůře reagují aramidová vlákna na podélná zatížení, příčná a smyková napětí. Aramidy mají také záporný koeficient teplotní roztažnosti, stejně jako některé jiné kompozitní materiály (např. karbon). Degradují za působení UV záření. [13]

## 2.2 UMHWPE

UHMWPE je zkratka a označení pro polyethylenová vlákna s velmi vysokou molekulovou hmotností. Byly vyvinuty v 50. letech 20. století. Chemicky jsou identické běžnému polyethylenu a patří tak mezi termoplasty, avšak jejich molekulová hmotnost je vyšší. Jejich hustota je  $0,97 \text{ g/cm}^3$ , což je mezi vlákny jedna z nejnižších hustot vůbec. Jsou tedy lehčí, než aramidové vlákna i voda. Hlavní metodou výroby je gel-spinning (předání gelu). Takto vyrobená vlákna mají kromě zmiňované molekulové hmotnosti také vysoký stupeň krystalinity, orientaci molekul a velmi dlouhé molekulové řetězce. Mezi nejznámější vlákna patří Spectra, Dyneema či Endumax. Zmiňované typy vláken se hojně využívají v aplikacích balistické ochrany, jelikož kombinace vysoké tuhosti, pevnosti, schopnosti absorpce kinetické energie a nízké hmotnosti je ideálním předpokladem pro jejich využití ve strukturách čelících balistickým impaktům. Obvykle se pro tyto účely nevyrábí v podobě klasické tkaniny z vláken, ale spíše jako tenká vrstva či film z pásek materiálu, které nemají kruhový průřez jako klasické vlákno (zachyceno na obr. 11). Tato struktura poté vykazuje vyšší balistickou odolnost. Díky biokompatibilitě a vysoké odolnosti vůči abrazi jsou využívány pro výrobu polymerních součástí kloubních protéz. [1; 5; 13]

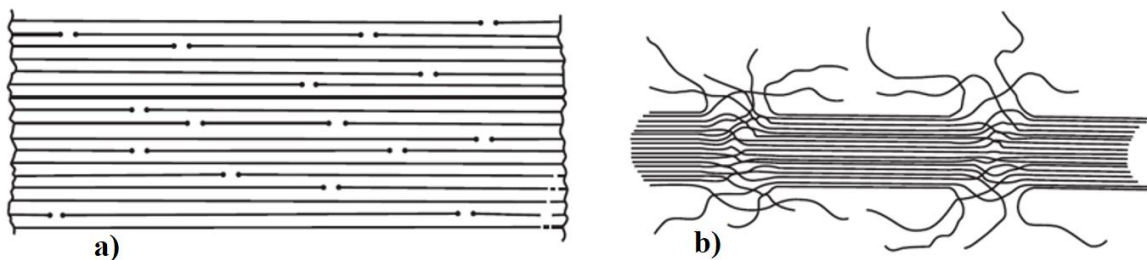


Obr. 11 Detail páskové struktury materiálu Endumax Shield XF33.

### 2.2.1 Struktura

Polyethylenové řetězce jsou vysoce paralelně orientovány (přes 85 %) a jsou spojeny van der Waalsovými můstky. Kromě vysokého stupně orientace řetězce zde panuje také vysoký stupeň krystalinity, která dosahuje až 95 %. Charakter této struktury vychází z velké části z metody výroby – tzv. spinning gel process, který lze přeložit jako proces namotávání nataveného gelu. Princip výroby vláken bude rozebrán v dalších kapitolách, nicméně právě díky tomuto procesu mají vlákna nízký stupeň vzájemného zapletení a mohou tak být vysoce tažena (používá se pojem super-tažena, z anglického super-drawn), což následně způsobuje vysoce orientovaný řetězec, který determinuje mechanické vlastnosti těchto vláken. [1; 13]

Z pohledu morfologie jsou UHMWPE uspořádány z vláken. Každé vlákno se v podélném směru skládá z několika makrovláken o tloušťce 100-150 nm, kdy každé makrovlákno je tvořeno svazkem mikrovláken. Tloušťka mikrovláken je 6-10 nm a jsou vzájemně spojeny kovalentními vazbami skrze malé amorfní sféry. Pro teoretické výpočty pevnosti se mnohdy používá model dokonalého jednoosého uspořádání mikrovláken v podélném směru, který však není reálný. Skutečné uspořádání mikrovláken je na obr. 12 b). Předmětem současných výzkumů je mimo jiné molekulová struktura řetězců, ze kterých jsou složena jednotlivá mikrovlákna. Za předpokladu zvýšení počtu a rozšíření, respektive prodloužení těchto molekul by se mohlo docílit zvýšení pružnosti i pevnosti, jelikož tyto řetězce by byly schopny překlenout zmiňované amorfní sféry a vytvořit tak kompaktnější strukturu vláken. [1]



Obr. 12 Dokonalé jednoosé vs. skutečné uspořádání vláken [1].

### 2.2.2 Vlastnosti

Vlastnosti UHMWPE kompozitů vychází z jejich struktury a jsou ovlivněny také způsobem výroby vláken. Slabé vazby mezi molekulovými řetězci mají za následek nižší stabilitu za zvýšených teplot, jelikož krystalická struktura se snadněji naruší. Bod tání se pohybuje kolem 145 °C a proto se tyto materiály běžně používají pro aplikace, kde nebudou vystaveny dlouhodobějšímu působení teplot nad 80-90°C. Naopak velmi dobře odolává kryogenním teplotám, které nemají na vlastnosti markantní vliv, a to až do -50°C. UHMWPE vlákna jsou velmi odolná vůči povrchové abrazi, nedegradují pod vlivem UV záření, většina chemikálií nenaruší jejich povrch ani strukturu, nevstřebávají vlhkost a mají nízký koeficient tření. [1; 18]

UHMWPE materiály lze používat ve více formách – buď jako vlákna, nebo pásy (stuhý). Liší se v postupu výroby a mírně také ve vlastnostech. Vlákna se vyrábí procesem namotávání gelu (gel spinning) z extrudéru. Pásy jsou vyrobeny extruzí pevného skupenství. Struktura této formy nemá tak precizní molekulární uspořádání jako vlákna. Dosahuje nicméně některých velmi dobrých vlastností, díky kterým jsou právě UHMWPE pásy používány mimo jiné i jako součásti balistické ochrany, zejména díky vysoké nárazové odolnosti – tedy schopnosti vstřebávat energii a nárazy bez porušení. Mají perfektní rozměrovou a chemickou stabilitu, pevnost a modul pružnosti. Pevnost je v poměru hmotnosti při srovnání s běžnou ocelí až 15x vyšší. Modulem pružnosti UHMWPE vlákna převyšují aramidy a dosahují i dobrých tahových hodnot. Naopak v tlakovém zatížení, podobně jako u aramidů, dochází k porušování mnohem rychleji kvůli vzniku poruch ve struktuře označovaných jako kink band (smyková pásma). Vlákna se začnou ohýbat, vybočovat ze své původní rovnoběžné struktury, přecházejí do smyku

a celá matrice tak začne postupně ztrácet pevnost. Vzhledem k tomu, že polyethylenová vlákna patří mezi termoplasty, mají poměrně nízkou creepovou odolnost a pod kontinuálním zatížením dochází k porušení i za nižších teplot. Díky vyšší povrchové adhezi lze UHMWPE materiály dále modifikovat a zlepšovat jejich vlastnosti pomocí různých povrchových vrstev. Srovnání vlastností materiálů je v tab. 1. [1; 13; 20]

Tab. 1 Přehled vlastností vybraných materiálů [13; 20; 21; 22].

Materiál	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Tažnost [%]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Koef. tepl. roztažnosti [10 <sup>-6</sup> °C]	Průměr vlákna [μm]
Kevlar 49	3790	131	2,8	1,44	-2,0	12
Twaron	2700-3600	60-145	2,3-4,2	1,45	-	12
Spectra	3100	172	0,7	0,97	-	27
Endumax Shield	2000	170	1,7	0,97	-	-
S-2 Glass	4480	87	5,4	2,48	2,9	5-10
Karbon (PAN)	3450-5000	220-240	1,5-2,2	1,88	-0,4	5-10
Ocel C45	540-740	210	17	7,85	11,5	-

### 2.3 Možnosti dalších vláknových kompozitních materiálů

Kompozitních materiálů s vláknovou výztuhou existuje velké množství, nicméně ne všechny jsou vhodné pro využití v oblasti balistické ochrany. Hlavní roli s nejširším použitím hrají již popisované aramidy a UHMWPE materiály. Lze se ale setkat také s testováním či používáním dalších typů materiálů, kdy se mnohdy pro aplikace v balistické obraně používají hybridní koncepty. Ty mohou mít charakter kombinace dvou či více druhů materiálů buď pro kompozitní panel jako celek – např. keramická vrstva a laminát z aramidu, ale také hybridní laminát, kdy jedna vrstva má vláknovou výztuhu např. z aramidu a další z karbonu. Kombinovat tak lze vícero druhů kompozitů, či kompozity s kovy nebo zmiňovanou keramikou. Mezi další vláknové materiály, využívané v těchto aplikacích, patří především uhlíková a skelná vlákna. Skelná vlákna jsou vyráběna již téměř 100 let, a přestože v mnohých aplikacích jsou nahrazovány novějšími vlákny s lepšími vlastnostmi, stále mají v oblasti vláken a vláknových kompozitů důležité místo. Uhlíková vlákna patří mezi nejpoužívanější a nejdynamičtější se rozvíjející materiál, který je znám v mnoha podobách – od běžné karbonové tkaniny, přes grafitová vlákna až po uhlíkové nanotrubic. Různé vrstvy v laminátech se mohou používat nejen za účelem vylepšení vlastností kompozitu, ale také pro snížení nákladů. Vzhledem k vyšší ceně a občasným problémům s dostupností karbonu se pro některé aplikace, kde nebyly požadovány vysoké vlastnosti, vyráběly lamináty s využitím několika vrstev ze skelných vláken. Cena produktu pak byla nižší, a zároveň laminát dosahoval poměrně dobrých vlastností oproti čistému karbonu. Lze se setkat i s tkaninami ze dvou různých materiálů, typicky např. aramidovo-uhlíková tkanina, či její imitace s využitím diolenu (stejný vzhled, mechanické vlastnosti o něco nižší), která je znázorněna na obr. 13. [13]



Obr. 13 Aramidovo – diolenová tkanina.

### 2.3.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna kombinují dobrou pevnost v tahu, chemickou odolnost a odolnost vůči rázům, přičemž jejich cena je v porovnání s jinými kompozitními materiály výrazně nižší. Z toho důvodu jsou mají značné komerční a průmyslové využití. V porovnání s jinými vlákny, např. karbonem, mají srovnatelné hodnoty pevnosti v tahu, avšak jsou značně limitovány především nízkým modulem pružnosti a únavovou odolností, kdy při kontinuálním statickém zatížení ztrácí pevnost. Hodnoty mechanických vlastností některých skelných vláken jsou uvedeny v tab. 2. Nejsou vhodné k použití ve vlhkém prostředí, přestože neabsorbují vodu přímo do svého objemu. Rizikem jsou molekuly vody, které ulpí na povrchu vláken a vytvoří velmi tenkou vrstvu, vedoucí ke snižování povrchové energie a tím i pevnosti. Kromě toho mohou také vznikat mikrotrhliny. Proto je nutno na povrch vláken nanášet ochranné povlaky ještě před tím, než jsou vlákna sdružena ve svazky, jelikož vzájemným kontaktem se poškozuje jejich povrch. Poškozený povrch dokáže absorbovat vlhkost a pevnost se tak může snížit až o 50 %. Nejznámějšími typy skelných vláken jsou E-glass a S-2 glass (E sklovina a S sklovina). E sklo je tvořeno směsí oxidů  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  a  $\text{B}_2\text{O}_3$ . S sklo má vyšší podíl  $\text{SiO}_2$  (65%) a má vyšší modul pružnosti i pevnost. Existuje také např. kompozit Glare, hliník vyztužený skelnými vlákny, používaný zejména v letectví. [10; 13; 23]

Tab. 2 Mechanické vlastnosti skelných vláken [1].

Vlastnost	E-glass	S-glass
Mez pevnosti v tahu [GPa]	3,4	4,5
Modul pružnosti [GPa]	72-80	87-90
Tažnost [%]	3-4	5,4
Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2,55	2,49

Z pohledu struktury jsou skelná vlákna amorfním materiálem, který nenabývá krystalické struktury pevných materiálů, ani kapalně charakteristiky kapalin. Základní složkou je oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ), který je doplněn o další oxidové složky, které určují výsledné vlastnosti. Krystalizační rychlost této směsi roztavených oxidů je velmi nízká, což je příčinou amorfního charakteru struktury. Skelná vlákna obsahují několik komponent – především křemičitý písek, vápenec, kyselinu boritou, které jsou v různém množství doplněny o jíl, živec, síran sodný či fluorit. Průměr jednotlivých vláken v tkanině (obr. 14) se pohybuje v rozmezí 5-20  $\mu\text{m}$ . [1; 10; 13]



Obr. 14 Tkanina skelných vláken [24].

### 2.3.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna a karbon jsou v současnosti jedněmi z nejvyužívanějších typů vláken. Nabízí velmi dobrou kombinaci vlastností, především vysokou pevnost v tahu i tlaku, dobře odolávají únavovému opotřebení a nepodléhají korozi. Mají vysokou chemickou odolnost a tlumicí schopnost. Velkou výhodou karbonu je kombinace uvedených vlastností s nízkou hmotností (hustota karbonových vláken činí  $1,88 \text{ g/cm}^3$ ). Jejich průměr je běžně v rozmezí 5-10  $\mu\text{m}$ . Karbonová a uhlíková vlákna se vzájemně liší ve své struktuře – uhlíková vlákna obsahují více než 99 % uhlíku, kdežto karbon má obsah uhlíku v rozmezí 93–95 %. Maximální použitelnou teplotou pro vlákna uhlíková i karbon je 500 °C. Díky svým vlastnostem mají velmi širokou škálu použití, nicméně neřadí se mezi materiály balisticky odolné, a samy o sobě se nepoužívají jako balistická ochrana z důvodu křehkosti karbonových vláken. Nicméně i přesto je třeba karbon v souvislosti s balistickou ochranou zmínit, jelikož jednu či více vrstev karbonu lze použít jako doplňující komponent balistického panelu či pancíře, kdy může systému dodat tlumicí efekt, lepší vstřebání nárazové energie a posílí integritu struktury. [1; 13]

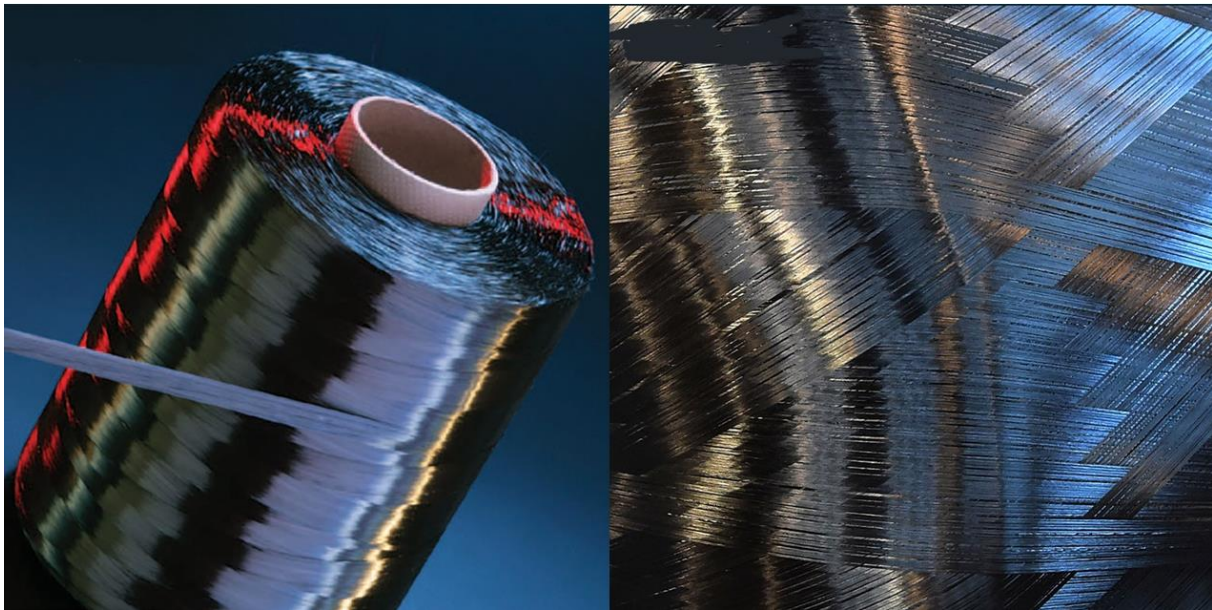
Vlastnosti grafitu jsou určeny strukturou – krystalickou mřížkou, která má podobu hexagonálních vrstev. Základ tvoří tzv. bazální roviny s velmi silnými kovalentními vazbami. Ty jsou drženy pospolu slabými van der Waalsovými silami. Kvůli tomu jsou tyto materiály značně anizotropní a panují velké rozdíly např. v pevnosti a pružnosti v podélném a příčném směru. Hodnoty modulu pružnosti v podélném směru mohou dosahovat až 1000 GPa, naproti tomu ve směru příčném jen kolem 35 GPa. Typickým znakem uhlíkových vláken je křehkost, která je ještě vyšší, než u vláken skelných. [10; 13]

Karbonová vlákna jsou složena z převážné části z grafitu a uhlíkatého materiálu a struktura je formována během výroby, kdy dochází ke karbonizaci a grafítizaci za vysokých teplot. Během těchto procesů jsou krystality grafitu náhodných orientací postupně formovány do rovin rovnoběžně s vláknem. Vlastnosti vycházejí z hlediska výroby na typu výchozího materiálu, podmínkách jednotlivých procesů (napětí vláken a teplota) výroby a samozřejmě pak z jeho struktury – krystalické mřížky. Jistý vliv pak mají možné defekty struktury, které významněji ovlivňují zejména pevnost v tahu. Koeficient teplotní délkové roztažnosti je záporný, nicméně tepelná vodivost u vláken na bázi smoly je velmi vysoká. Pro zvýšení soudržnosti s polymery

a proti vzájemnému poškození vláken se používají povrchové úpravy. Povrch vláken se elektrochemicky očistí a následně je nanesen povlak z epoxidové pryskyřice. [10; 13]

Vyrobený karbon je obvykle dodáván, jak bylo již zmíněno, v podobě příze (stuhy) - svazků vláken (obr. 15), která jsou k sobě velmi lehce spojena povrchovou vrstvou epoxidu. U těch je velké množství variant podle počtu vláken, kterému odpovídá i značení, např. 3k znamená 3000 vláken. Náročná odvětví typu kosmonautiky využívají většinou svazky 3k, 6k a 12k, jelikož menší velikost přináší lepší mechanické vlastnosti. V komerčním užití se pak často užívají typy 48k či 200k, které jsou levnější a vlastnosti pro dané spektrum aplikací jsou dostatečné. [13]

Vlákna karbonu i vlákna uhlíková jde v podstatě vyrobit ze tří výchozích materiálů, respektive prekurzorů – rayon, smola a polyakrylonitril (PAN). Vlákna na bázi polyakrylonitrilu jsou nejpoužívanější, zejména pro vysokou efektivitu produkce. [13]



Obr. 15 Příze karbonu a detail jednotlivých svazků [25].

## 2.4 Biokompozity

Biokompozity jsou materiály, složené z alespoň dvou komponent, přičemž minimálně jedna z nich je přírodního charakteru. Přináší nové vhledy do vysoko pevnostních materiálů s nízkou hmotností, které nabízí dobré mechanické vlastnosti v kombinaci s hmotností a zároveň přináší benefit v podobě relativně dobré dostupnosti přírodně vyskytujících se materiálů a jisté míry recyklovatelnosti či dokonce biodegradability. Obecně lze přírodní vlákna rozdělit na tři kategorie [5]:

- živočišná vlákna,
- minerální vlákna,
- lignocelulózová (rostlinná) vlákna.

V kontextu vláknových biokompozitů, které mohou být charakterizovány jako vysokopevnostní a využity mj. i na poli balistické ochrany, se hovoří o kompozitech vytvrzených rostlinnými vlákny. Ta patří mezi vlákna obsahující celulózu a získávají se převážně z rostlin tropických oblastí. Ve srovnání s vlákny živočišnými a minerálními mají snadnou dostupnost, a především nejsou nákladná na zpracování. Podoba, ve které jsou nejčastěji produkovány a používány, je ve formě polymerních kompozitů s vláknovou výztuhou. Tato přírodní vlákna by mohla v budoucnu více či méně nahrazovat vlákna syntetická, což by výrazně přispělo k snížení výrobních nákladů a zátěži životního prostředí. Výrazně nižší je také energetická zátěž na výrobu. Příkladem takových přírodních rostlinných

vláken jsou juta, sisal (obr. 16), bagasa, ramie, bambus či kokosová vlákna, z nichž některé mají nižší hustotu než kevlar. [26; 27]



Obr. 16 Vlákna sisalu [28].

Studiemi bylo zjištěno, že teplota degradace rostlinných vláken je kolem 240 °C. Jsou náchylnější na vlhkost, kterou snadněji pohlcují, přičemž s vyšší mírou vlhkosti klesá jejich pevnost. Experimenty se nyní zaměřují na chemické úpravy, zlepšující vlastnosti vláken. Např. jutová vlákna obohacená o činidlo hydrogenuhličitán sodný vykázala vyšší krystalinitu, termální stabilitu a drsnost povrchu vláken. Acetylací se může výrazně redukovat vlhkost z vláken – acetyl na sebe naváže hydroxilové skupiny, a výsledkem je tak zpevnění vlákna. Kyselina akrylová pak může zvýšit přenos mechanického napětí a vazebnou kapacitu. Rozšířenou metodou produkce je tzv. hybridizace. Ta znamená, že jsou přírodní vlákna doplněna a částečně nahrazena syntetickými vlákny (skelnými či uhlíkovými), např. formou laminátu tkanin juty, kenafu a skelných vláken. Tyto struktury vykázaly vyšší mechanické vlastnosti a odolnost vůči degradaci absorpcí vody za současného zachování snížených nákladů díky přítomnosti rostlinných vláken. [26; 27; 29]

Kompozity s přírodními vlákny mohou být využity také v aplikacích balistické ochrany. Setkat se lze zejména s rostlinnými vlákny, ale ve výzkumech byla použita např. i vlákna čedičová. V provedených studiích byly např. testovány hybridní pancíře s využitím rostlinných vláken, obvykle jako prostřední prvek celkové konstrukce multi-vrstvého pancíře. Většina z nich měla 30% podíl přírodního vlákna ve střední vrstvě. Výzkum s využitím ramie, kdy čelní keramický plát byl následován střední vrstvou aramidových a ramiových vláken v epoxidu (podíl ramie činil 30 %) a zadní vrstvou z hliníkové slitiny, prokázal srovnatelnou odolnost s kompozitem 100 % aramidu s epoxidem. Podobně hovoří také jiný výzkum s využitím vláken kokosových, avšak vzorek již nedokázal vzhledem k značné delaminaci a vytažení vláken čelit druhému zásahu. Experiment s jutovými vlákny (30% koncentrace vláken s epoxidem) vykázal vůči kalibru 7,62 mm opět podobnou odolnost, jako kevlar. Hlavním mechanismem poškození vláken v těchto studiích bylo vytažení vláken, delaminace, lámání a natahování. Výsledky z uvedených studií prokazují, že materiály obstály v rámci povoleného 44mm limitu průstřelu. Norma NIJ pro stupeň 3 nicméně požaduje, aby zkoušený objekt vydržel 6 výstřelů. Výzkumy však naznačují, že má smysl se touto oblastí dále zabývat, jelikož dosažení srovnatelných vlastností při využití přírodních vláken přináší zejména finanční úsporu, kterou lze srovnat v tabulce 3 (data pro porovnání nákladů vláken jsou z roku 2018). [5; 26; 30]

Tab. 3 Srovnání výsledků biokompozitů pro balistickou ochranu [5].

Typ kompozitu	Podíl přírodního vlákna [%]	Hloubka průstřelu [mm]	Úspora nákladů vůči Kevlaru
Juta tkanina s epoxidem	30	21 ± 3	94,9
Guaruman vlákna s epoxidem	30	30 ± 3	81,1
Sisal vlákna s polyesterem	30	22 ± 3	94,9
Kokosová vlákna s epoxidem	30	24 ± 6	73,7
Bambus s epoxidem	30	17,5 ± 1,8	30,0

## 2.5 Metody výroby vláken

Pro výrobu vláken využívaných v kompozitních materiálech existuje celá řada různých metod, jelikož každý materiál vyžaduje specifický postup s ohledem na jednotlivé chemické a fyzikální vlastnosti. Samostatným tématem je výroba kompozitů s vláknovou výztuhou, tedy kombinace vláken s matricí. Tato oblast je popsána v experimentální části, kde byly vyráběny kompozitní panely a tato kapitola se tedy bude zaměřovat pouze na výrobu vlastních vláken. Pro všechny materiály má výroba syntetických vláken totožný princip – roztavení či rozpuštění výchozí látky, určitý chemický proces, následnou extruzi a případné další zpracování a úpravy. Mezi nejznámější metody patří např. mokré zvlákňování suchou tryskou u aramidů či gel spinning (předení gelu) u UHMWPE vláken. Pro výrobu UHMWPE pásek, které se v některých aplikacích hodí lépe než vlákna, je využíváno slinování polymerního prášku. Příkladem zařízení, na kterém probíhá mokré zvlákňování pro výrobu jak aramidových, tak i kolagenových, celulózových či akrylových vláken může být stroj Wet Spinner firmy Areka (obr. 17). V případě přírodních vláken je postup odlišný, jelikož se nejedná o syntetická vlákna. Jsou extrahována z přírodních zdrojů a tkaniny jsou tak v podstatě jen zpracovanou formou přírodního produktu. Produkce může být buď živočišného, nebo rostlinného původu a v případě rostlinných vláken lze ještě rozlišovat, zda je rostlina pěstována jen pro získání vláken (např. sisal, bavlna), či zda představují vlákna pouze vedlejší produkt (banánovník, kokosovník). [13; 31]



Obr. 17 Zařízení Wet Spinner pro mokré zvlákňování [32].

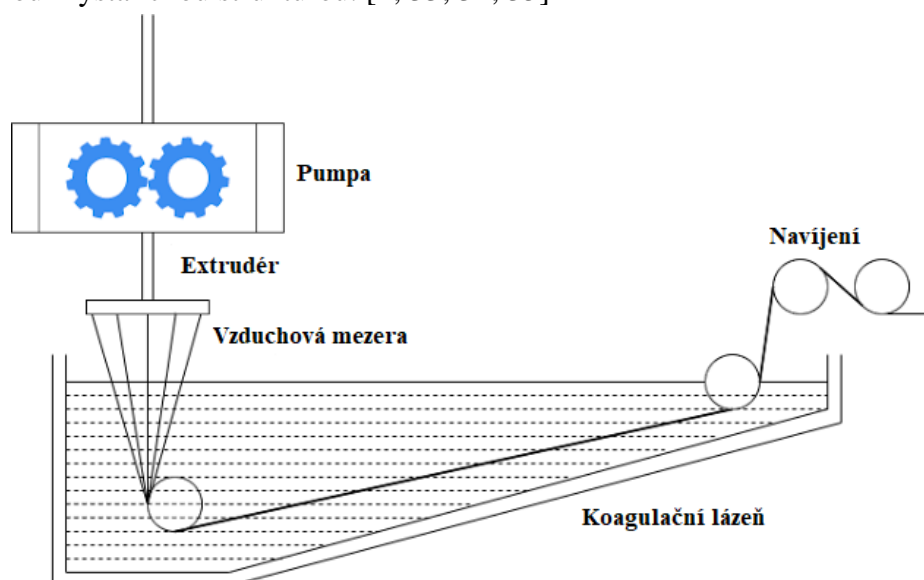
### 2.5.1 Aramidy

Vzhledem k faktu, že aramidy degradují ještě před dosažením bodu tání, není možné k výrobě využít tavení, a proto je nutno využít metodu na bázi roztoku. Výroba aramidových vláken spočívá v procesu zvaném dry-jet wet spinning, tedy mokré zvlákňování suchou tryskou

(schéma znázorněno na obr. 18). Tato metoda je kombinací dvou různých výrobních metod – suchého a mokrého zvlákňování a zahrnuje výhody obou metod. Předění je rychlé, má vysokou koncentraci a umožňuje kontrolu kinetiky v koagulační (srážecí) lázni. Obecný postup výroby je následující [1]:

- rozpuštění polymeru,
- extruze,
- tažení vláken,
- koagulační lázeň,
- tuhnutí vláken.

Vstupní látkou je polymer (jeho typ závisí na tom, zda je předmětem výroby meta či para aramid), který je rozpouštěn do podoby roztoku viskózní kapaliny. Kevlar je například připraven reakcí para-fenylenu diaminu s acylchloridem kyseliny tereftalové v organickém rozpouštědle, kde vzniká chemickým složením látka aromatického polyamidu (aramidu), který již dále vstupuje do procesu výroby vláken. Výchozí anizotropní roztok je extrudován zvlákňovací tryskou z nerezové oceli či drahých kovů nejprve do vzduchové mezery, obvykle o délce kolem 50 mm. Zde probíhá prodloužení pod tahovým napětím, případně může docházet k ztenčení. Během tohoto procesu dochází k orientování struktury do jednoho směru. Důležitým prvkem je, aby bylo bezprostředně po opuštění kapiláry vlákno drženo v napětí, aby nemohlo dojít k relaxaci struktury, snížení orientace vláken a výslednému zhoršení mechanických vlastností vlákna. Následně materiál přechází do koagulační lázně. Zde již nedochází k rozpouštění, lázeň nedokáže rozpouštět žádnou ze složek vstupujícího materiálu, naopak probíhá srážení materiálu a následné tuhnutí vláken. Po koagulaci jsou vzniknuvší vlákna opláchnuta od zbytků rozpouštědel, vysušena a navíjena, čímž také vzniká napětí, vhodné pro stabilizaci struktury. Vlákno je také pod tahovým napětím obvykle tepelně zpracováno pro vyšší pružnost. Výsledkem je tedy pevné a pružné vlákno s vysoce orientovanou krystalickou strukturou. [1; 33; 34; 35]



Obr. 18 Schéma dry-jet wet spinning [36].

## 2.5.2 UHMWPE

UHMWPE polymery vyžadují kvůli své vysoké hmotnosti molekul speciální způsob výroby a nelze na ně aplikovat obdobné postupy, jako pro jiné polymery. Jejich struktura a chemické složení by během tavení degradovala dříve, než by se materiál dostal do kapalné fáze. Za vysokých teplot mají tyto polymery také velmi vysokou viskozitu, znemožňující užití

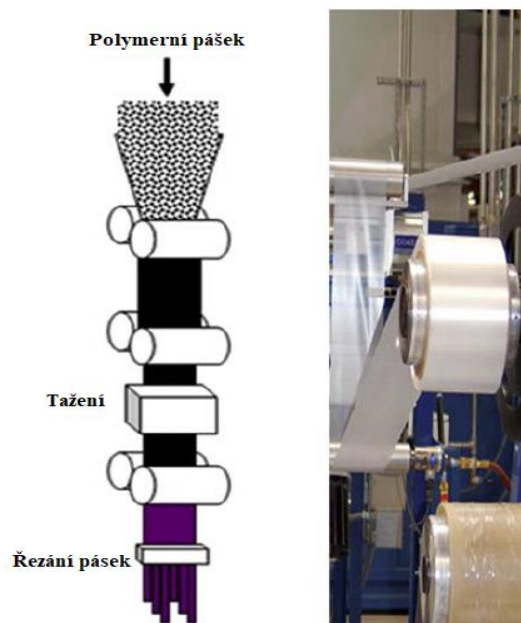
konvenčních metod, např. vstřikování. Proto byla zavedena metoda výroby zvaná gel-spinning (předení gelu), mající dva typy postupu, lišící se počtem rozpouštědel. Hlavními kroky jsou [1; 18]:

- uvolnění molekulového řetězce rozpouštědlem,
- extruze gelového vlákna,
- tažení a vysušení vláken.

V případě použití jednoho rozpouštědla je rozpouštědlo využito k uvolnění a „naředění“ velmi dlouhých molekulových řetězců UHMWPE polymeru. Je připraven roztok s koncentrací polymeru kolem 15 %, který se již chová za vyšších teplot obdobně, jako např. nylon, a tudíž jej lze po zahřátí extrudovat skrze standardní trysku. Průchodem vypařovací komorou je většina rozpouštědla odstraněna a vzniká gelové vlákno. Během následného tažení jsou vypařeny zbytky rozpouštědla a dochází k zarovnání molekul ve struktuře, a tudíž zvýšení meze pevnosti v tahu. Varianta s jedním rozpouštědlem se může provést také způsobem s využitím tekuté lázně. V tomto případě je vlákno sestávající z roztoku extrudováno tryskou a prochází vzduchovou mezerou. Gelové vlákno vzniká následným průchodem tekutou lázní. To je poté taženo v peci, kde se vypaří rozpouštědlo a vlákna získávají vysokou pevnost a tuhost díky vysoké orientaci struktury. [1; 18]

Metoda s použitím dvou rozpouštědel spočívá v podobném principu. První rozpouštědlo má nízkou molekulovou hmotnost, např. vosk či minerální olej, a rozváže molekuly UHMWPE. Tento roztok pak lze za zvýšených teplot tavit a spřádat běžným způsobem. Po této extruzi vlákno prochází tekutou lázní, kde se vytváří gelové vlákno. Přidáním druhého rozpouštědla se první rozpouštědlo extrahuje a následně se vysuší a získává se podoba výsledných pevných vláken. Pro zlepšení mechanických vlastností mohou opět vlákna ještě projít tažením. [1; 18]

Obecně metoda gel-spinning vytváří velmi houževnatá vlákna s vysokým modulem pružnosti, avšak je poměrně nákladná, zejména na množství přísad (rozpouštědel). V 90. letech minulého století byla firmou Nippon Chemical vynalezena metoda pro výrobu UHMWPE pásek a stuh, která není založena na použití rozpouštědel, nýbrž na procesech komprese a slinování (schematicky na obr. 19) a vytváří nevláknité pásy při mnohem nižších výrobních nákladech. Pro co nejvyšší pevnost je zapotřebí specifické morfologie polymeru – platí, že čím je méně propletený molekulový řetězec, tím vhodnější je pro tuto metodu. Nevýhodou ve srovnání s metodou gel-spinning může být nižší houževnatost, modul pružnosti je podobný. [1; 18]

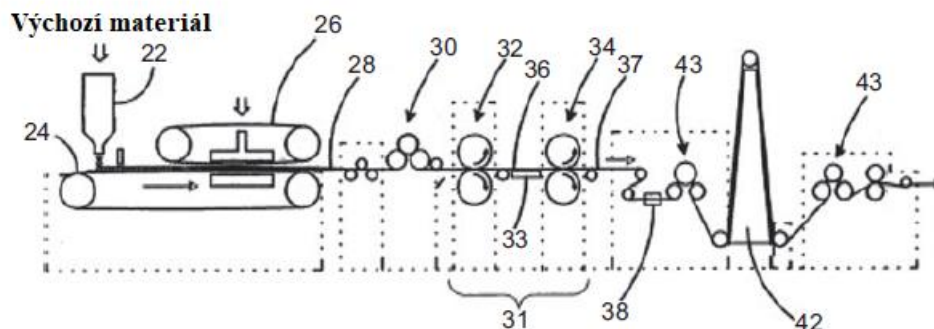


Obr. 19 Schéma slinování pásek [13].

Technologie práškového zpracování je rozšířenou metodou výroby pro široké spektrum materiálů, využívá se v oblasti keramiky, kovů, ale také třeba farmacie nebo právě UHMWPE polymerů. Výroba pásek začíná nasypáním prášku na dopravník (pohyblivý pás, na obr. 20 pozice 24), stlačením a zhutněním výchozího polymerního prášku za studena (pozice 26). Výroba probíhá v následujících krocích [1; 18]:

- stlačení a zhutnění prášku za studena,
- slinování,
- extruze a tažení do podoby pásek.

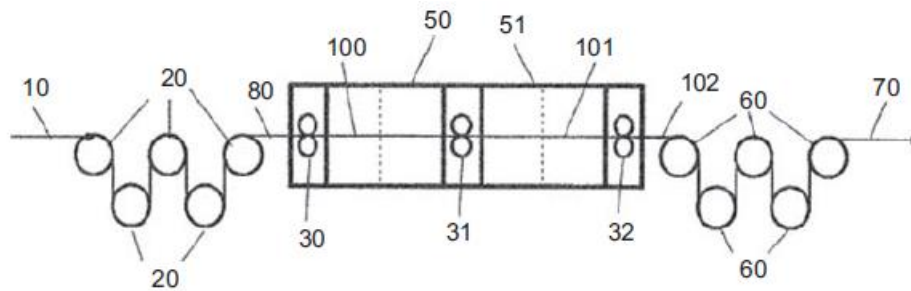
Během zhutnění dochází k zvyšování hustoty a snižování pórovitosti, jelikož dochází k elastickým deformacím a částice vyplňují mezery ve struktuře. Slinování je proces stlačení prášku do podoby tenkého plátku za zvýšené teploty (dosahujících tavicích teplot pro daný materiál). Vzniknuvší slinutý plátek pak dále prochází systémem válečků, kdy je jimi za zvýšené teploty dále extrudován, stlačován a tažen, a po průchodu štěrbinami upraven do podoby stuhy. Během tohoto procesu také nabývá struktura své orientace (ve směru pohybu stlačovacího zařízení). Celkový počet technologických operací při této výrobě závisí na každém výrobcu, nicméně tažení a válcování probíhá několikrát, viz obr. 21, jelikož od nich se odvíjí výsledné mechanické vlastnosti vlákna. Důležitou roli hrají také teplota, čas pod zátěží a rychlost, jakou deformace probíhá. Mez pevnosti v tahu je ovlivněna tlakem při zpracování polymerního prášku – při vyšším tlaku se ve struktuře nachází méně prázdných mezer a částice jsou mezi sebou v těsnějším kontaktu, což se projeví právě vyšší mírou tahové pevnosti. Pásky vyrobené slinováním mají nižší teplotu tavení (138,5 °C), což je pravděpodobně způsobeno natavením části povrchu při slinování a zvýšenou adhezí těchto částic. [1; 18]



Obr. 20 Schéma výroby pásek [1].

V této oblasti je třeba zmínit ještě jednu metodu, kterou vyvinula firma Honeywell International (US Patent 8,236,119), jež spočívá defacto v konverzi vlákna na pásku. Jako vstupní materiál je zde vlákno, vyrobené metodou gel-spun, které je taženo pod tahovým napětím, čímž získává pevnost, a na závěr stlačeno takovým způsobem, že získá podobu pásky. Páska pak prochází skrze další válečky při napětí v daném tahovém poměru, čímž se zabraňuje bezprostřední relaxaci struktury. Výsledná pevnost těchto pásek je pak zhruba dvojnásobná v porovnání s metodou slinování. [1]

Schematicky je tento proces znázorněn na obrázku č. 9, kde je výchozí filamentová příze (pozice 10) navinuta systémem válečků (20) a na pozicích 30–32 je tažena a kompresována. Páska (102) je transportována válečky (60) k případnému dalšímu zpracování a procesům. [1]



Obr. 21 Schéma výroby UHMWPE pásek na principu metody dle patentu Honeywell [1].

### 2.5.3 Skelná vlákna

Princip výroby spočívá v roztavení výchozích složek skla v pevném stavu a rychlém ochlazení. Tímto procesem se předejde krystalizaci a vzniká sklo s amorfni či náhodně orientovanou atomární strukturou. Výroba vysokopevnostních skelných vláken vychází ze stejného základu, jako výroba skla – komponenty vláken jsou smíchány a roztaveny v peci, odkud jsou rozžhavená vlákna extrudována a ochlazována vodou, čímž vzniká filament, který je vinut do svazků (schematicky na obr. 22). [13]

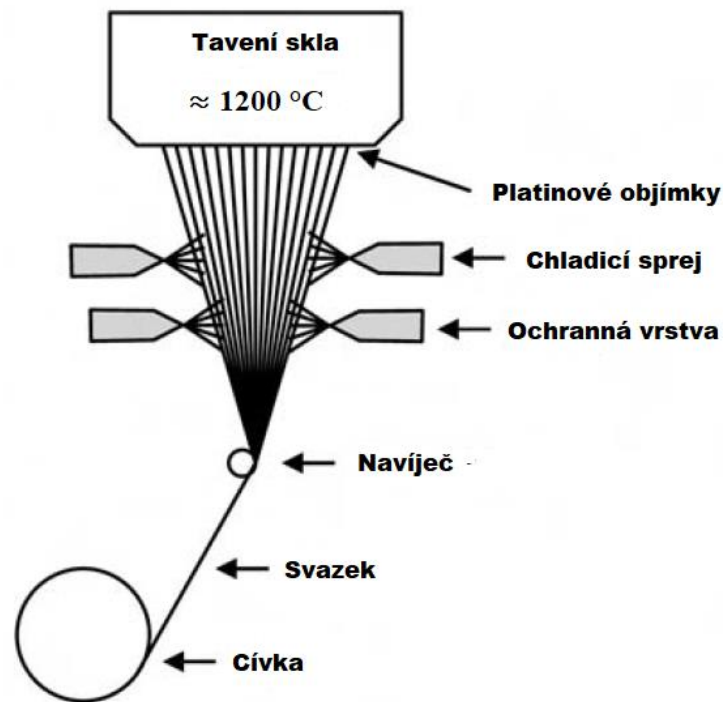
Jak bylo již zmíněno, přestože lze vyrobit sklo jen z čistého oxidu křemičitého, je pro výrobu vláken použito několik přísad a modifikátorů za účelem snížení tavicích teplot a dosažení některých vlastností. Jako příklad lze zmínit S-glass vlákna, jejichž základ tvoří oxidy křemíku, hliníku a hořčíku, přičemž pro náročnější aplikace je pro zvýšení pevnosti ve vyšším množství zastoupen křemík. Průběh výroby skelných vláken je následující [13]:

- příprava výchozí směsi,
- tavení,
- zvlákňování,
- chlazení,
- povrchová úprava.

Po automatizovaném smíchání a navážení složek probíhá tavení. Celá směs je dopravena do plynové pece, která sestává ze tří částí. V první fázi pece probíhá tavení za teplot kolem v rozmezí 1500–1700 °C. Surový materiál je přidáván seshora do lože s již roztaveným sklem, kde se postupně taví a mísí. Tavenina projde rafiněrem, kde je teplota mírně snížena na 1370 °C. V třetí sekci dochází skrze průchody na spodní straně pece k extruzi roztaveného skla do podoby vláken (obr. 23 a). Objímky s průchody extrudéru musí být zahřívány, aby nedocházelo k ochlazování taveniny během extrudování a tím pádem k negativnímu ovlivnění vlastností a spojitosti. Vzhledem k vysokým teplotám musí být objímky extrudéru z žáruvzdorného materiálu (slitiny platiny a rhodia).

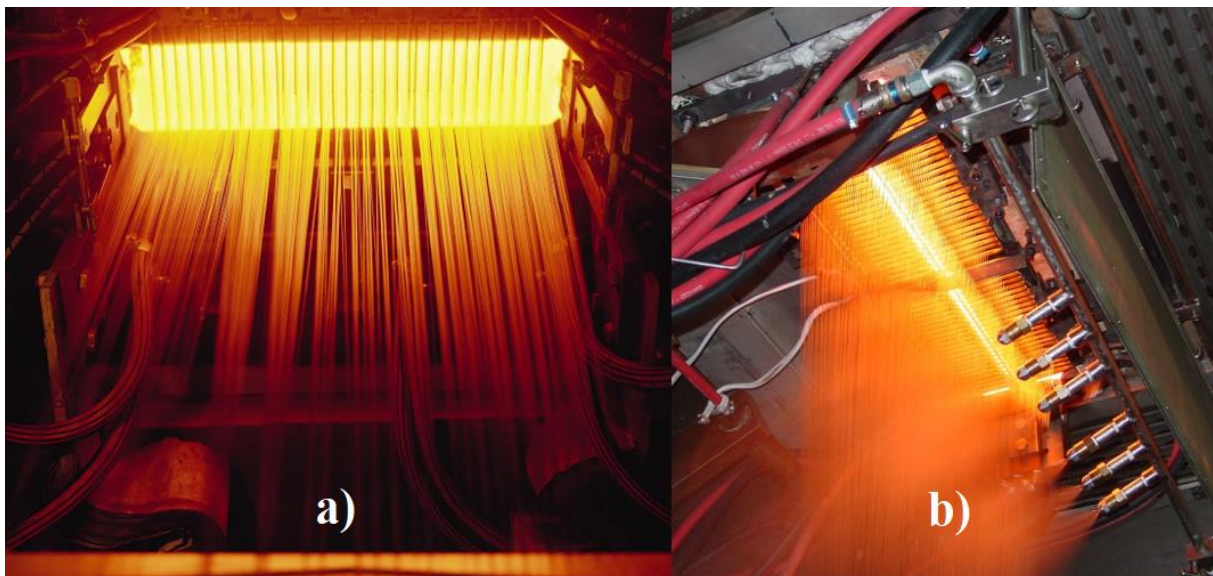
Důležitými prvky během tohoto procesu je zachování homogenní teploty taveniny v celém objemu, a také kontrola přívodu kyslíku do pece. Moderní pece spalují téměř výlučně kyslík, což napomáhá efektivnějšímu procesu tavení, ale také vzniká výrazně méně emisí a snižují se náklady na energii. Obecně byly průmyslové pece předmětem nejen ekologických debat a tudíž je zde znát jasný trend a snaha o maximální efektivitu a čistotu. [1; 13]

Při zvlákňování je teplota taveniny regulována na teplotu pro ideální míru viskozity vhodnou pro extruzi. Existují dva způsoby, kterými se tato fáze realizuje. První je metoda přímé výroby vláken, kdy je tavenina dopravena přímo do zařízení k extruzi vláken. Druhou pak je tzv. marble proces, kdy jsou komponenty skelných vláken roztaveny, nastříhány a následně válcovány do kuliček o průměru zhruba 1,5 cm. Ty mohou být podle kvality roztrženy, ochlazeny a předány do dalšího provozu, kde dojde k opětovnému natavení a vlastnímu procesu tvorby vláken extruzí. Tato metoda umožňuje kontrolu kvality z pohledu nečistot, ale ve srovnání s metodou přímé výroby vláken je logisticky i ekonomicky náročnější, tudíž je využívána méně. [13]



Obr. 22 Schéma výroby skelných vláken [13].

Bezprostředně po extruzi jsou vzniklá vlákna chlazená vodou (obr. 23 b) či vodním sprejem za účelem dosažení amorfní struktury. Takto ochlazené extrudované útvary poté zachycuje navíječ za působení vysokých otáček a tlaku do podoby filamentu. Filament je posléze v podobě prástu obvykle namotán na cívku. [1; 13]



Obr. 23 Extruze (a) a chlazení (b) filamentu skelných vláken [37; 38].

Pro ochranu mechanických vlastností obvykle prochází skelná vlákna povrchovou úpravou. Ve své podstatě jsou totiž monolitním a křehkým materiálem podléhajícím lineárně elastickému modelu. Křehkost je pak závislá na mikrotrhlinách a defektech ve struktuře, přičemž kvůli vysokému stupni ochlazování během výroby jsou v povrchové vrstvě nejvyšší vnitřní pnutí. Tato pnutí významným způsobem ovlivňují míru pevnosti. Filament bez povrchové úpravy degraduje za působení abraze a vzdušné vlhkosti, která se může během tažení vstřebávat do

defektů ve struktuře a pevnost tímto může být snížena až o 20 %. Z toho důvodu je bezprostředně po vytvoření na vlákna aplikována povrchová vrstva škrobu a maziva, chránící povrch během dalších kroků výroby (navíjení apod). Po provedení veškerých mechanických procesů lze tuto vrstvu odstranit např. rozpouštědly. Po odstranění této ochranné vrstvy následuje nanesení povlaku (např. silany), který výrazně zvyšuje mechanické vlastnosti, odolnost skelných vláken a upevňuje soudržnost vláken a matrice. [13]

Poslední fází produkce skelných vláken je vytvoření svazků, skládajících se z jednotlivých filamentů. Svazky jsou následně namotány na cívku/buben a vysušeny v troubách, jelikož po ochlazování a povlakování jsou stále vlhké, což je pro balení a expedici nepřijatelné. [13]

#### 2.5.4 Uhlíková vlákna

Výroba uhlíkových vláken se odvíjí od druhu vlákna, které jsou známa tři – rayonová vlákna, PAN vlákna a vlákna na bázi smoly. Výroba může být provedena ve dvou variantách, lišícími se teplotou zpracování: [11; 13]

- karbonizovaný stav,
- grafitizovaný stav.

Vlákna na bázi rayonu jsou vyrobena z dřevěné drti, u které dochází k extrakci celulózy a během mokrého namotávání vznikají vlákna. Pro dosažení karbonové struktury a charakteru následně prochází tepelnými úpravami za teplot 205–410 °C. Na rozdíl od ostatních typů vláken, využívaných pro vznik karbonu, rayonová vlákna nemusí projít natahováním a lze je karbonizovat bez tavení. Nicméně vlastnosti těchto vláken jsou poté o poznání horší, a proto, je-li třeba vyšší pevnosti a pružnosti, prochází vlákna grafitizační úpravou za teplot kolem 2900 °C, kdy jsou natahována až o 50 %. Během tohoto procesu rotují roviny kolem osy vlákna a je snížena pórovitost. Z pohledu vlastností a efektivity výroby (výtěžek produkce) tato vlákna nejsou v porovnání s jinými typy tolik atraktivní a nejsou tak často využívána. [13]

Nejčastěji využívanou formou karbonu (kolem 90 % produkce) jsou vlákna z polyakrylonitrilu – PAN vlákna. Jejich průměr je 7,6–10 μm a mají vysoký stupeň orientace. Výtěžek produkce (poměr hmotnosti výchozího materiálu a hmotnosti výsledného produktu) dosahuje 50 %. Modul pružnosti těchto vláken se běžně pohybuje v rozmezí 205–310 GPa, mez pevnosti 3,5–7 GPa. [13]

Výrobní proces PAN vláken má pět fází [13]:

- zformování vlákna pomocí navíjení a natahování,
- oxidace a stabilizace,
- karbonizace,
- grafitizace,
- povrchová úprava.

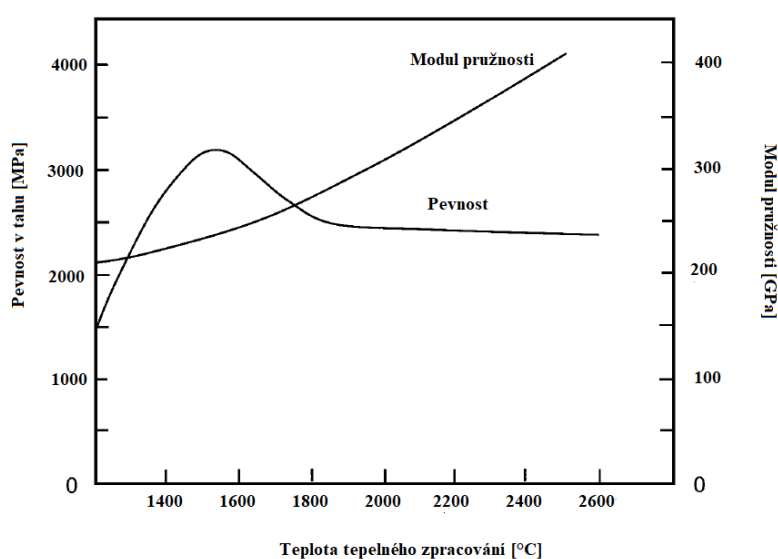
Výroba PAN vláken začíná polymerizací akrylonitrilového monomeru. Jelikož u akrylonitrilu dochází k rozkladu před roztavením, je nutné připravit roztok s použitím rozpouštědla, nejčastěji s dimethyly. Vytvoření vlákna a namotání může probíhat buď za sucha, kdy se rozpouštědlo vypaří nebo za mokra, kdy je vlákno umístěno do koagulační lázně, přičemž dnes je užíváno pouze navíjení za mokra. Výsledné vlastnosti jsou v této fázi ovlivněny složením roztoku, teplotou a koncentrací koagulační lázně. Při formování je vlákno natahováno (o 500–1300 %), což je pro dosažení vysokopevnostního vlákna nezbytný krok. [13; 39]

Další fází je oxidace (tepelné seřízení), která stabilizuje strukturu a zamezuje tavení během karbonizace. Vlákna jsou napínána a na vzduchu zahřata na teploty v rozmezí 200–300 °C po dobu 1–2 hodin. Zde se PAN jakožto termoplast přemění na neplastovou sloučeninu, která odolá vysokým teplotám v další fázi produkce. Díky napětí, během kterého dochází k prodloužení o 300–500 %, se rozevírají pevně semknuté molekulové řetězce. Jelikož celý proces probíhá v oxidačním prostředí, tak je v molekulách vázán vodík na kyslík a v podobě

vodní páry vypařen. V této fázi tak mohou vznikat silné vazby C=C se zabudovanými skupinami -OH a -CO v rámci struktury. [13; 39]

Závěrem probíhá karbonizace v dusíkové atmosféře za teplot 980–1595 °C. Vlákna se zmenšují v průměru, ztrácí kolem 50 % hmotnosti a polyakrylonitril je přeměněn na karbon. Zahřívání probíhá pozvolna tempem 22 °C·min<sup>-1</sup> a během zahřívání se uvolňuje velké množství různých látek – např. voda, oxid uhličitý či metan. Průměr výsledných vláken je 5-8 μm a vzniklé krystaly jsou velmi malé, což přispívá vysoké pevnosti. [13]

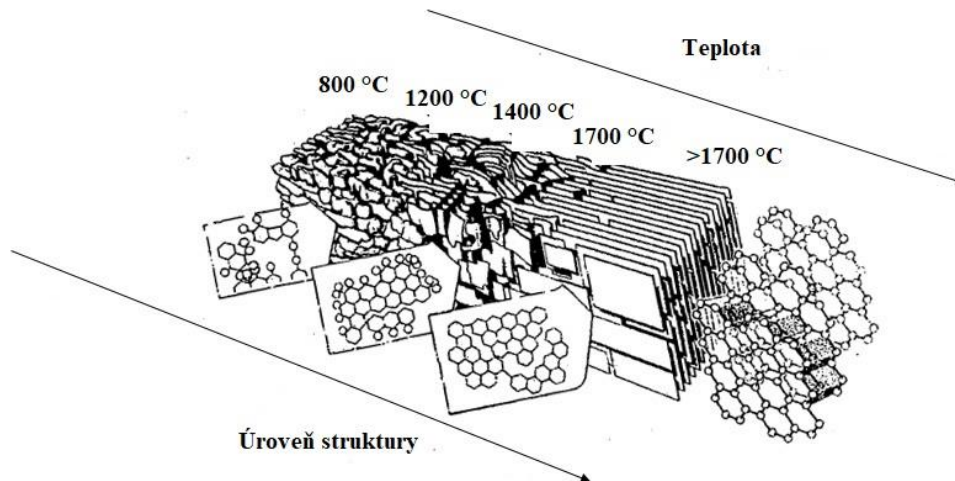
V případě, že výsledným produktem má být nikoliv karbon, ale grafitové vlákno, následuje grafitizace. Spočívá v zahřátí vláken na grafitizační teplotu v rozsahu 1980–3040 °C, při které se zbytkové uhlíkaté složky materiálu transformují na grafit (obr. 25) a dosahuje se vyšší krystalinity a modulu pružnosti (obr. 24). Pružnost narůstá společně s teplotou grafitizace, nicméně pevnost po dosažení svého vrcholu s rostoucí teplotou naopak klesá. [13]



Obr. 24 Závislost pevnosti a pružnosti karbonu na teplotě grafitizace [13].

Nutnou součástí výroby karbonu je povrchová úprava, jelikož neupravený povrch karbonu velmi špatně přilne k epoxidovým pryskyřicím, používaným pro soudržnost matrice. Nízká adheze může negativně ovlivnit mechanické vlastnosti, zejména pevnost v tahu a smyku. Z toho důvodu projde povrch karbonu elektrolytickou oxidací, která odstraní slabé povrchové vrstvy, naleptá vlákna a připojuje reaktivní skupiny (karboxyly, karbonyly a hydroxyly) na povrch vláken, díky čemuž pak dochází k dobrému spojení a přilnutí k matrici a pryskyřicím. [13]

Na závěr je obvykle na povrch vláken aplikována ochranná povrchová vrstva v podobě epoxidu. Ta činí v celkové hmotnosti materiálu pouze kolem 1 % a má za následek ochranu vlákna před abrazí a snížení tření pro lepší manipulaci. [13]



Obr. 25 Změna struktury uhlíkových vláken při tepelném zpracování [40].

Třetím typem výroby karbonu z pohledu výchozího materiálu je karbon na bázi smoly, která je vedlejším produktem destilace uhlí, ropy a asfaltu. Je náchylnější k poruchám ve struktuře (výstupky, mezery, díry). Z pohledu mechanických vlastností platí stejné závislosti jako u PAN vláken – i zde s rostoucí grafitizační teplotou roste pružnost, ale pevnost po dosažení maxima klesá. Krystalová struktura je zde díky vysokým grafitizačním teplotám vysoce orientovaná a rovnoběžná s osou vlákna, což pozitivně ovlivňuje modul pružnosti, na druhou stranu tato struktura hůře odolává stříhovému napětí a celkový poměr těchto vlastností není příliš vyvážený. Velmi vysoké jsou hodnoty teplotní vodivosti tohoto typu vláken. Dosahuje hodnot až  $1000 \text{ W} \cdot \text{mK}^{-1}$ , což je ve srovnání s PAN vlákny až padesátinásobek, a dokonce převyšuje kovové vodiče. To souvisí s již zmíněnou vysoce orientovanou strukturou, jejíž krystaly se strukturně blíží dokonalému grafitovému krystalu a díky vysokému zarovnání kolem osy vlákna nemají částice možnost vybočit ze směru proudění. Vlákná s vysokým modulem pružnosti na bázi smoly se často používají v kosmonautickém průmyslu pro aplikace, kde představuje hlavní roli tepelná vodivost, umožňující odvod tepla z určených míst struktury.

Vlákná produkovaná touto variantou lze v zásadě rozdělit na dvě skupiny – izotropní vlákna a vlákna s mezofází. Izotropní vlákna mají znatelně horší mechanické vlastnosti, ale jsou také výrazně levnější. Výchozí materiál je taven za nižších teplot a karbonizován. [13]

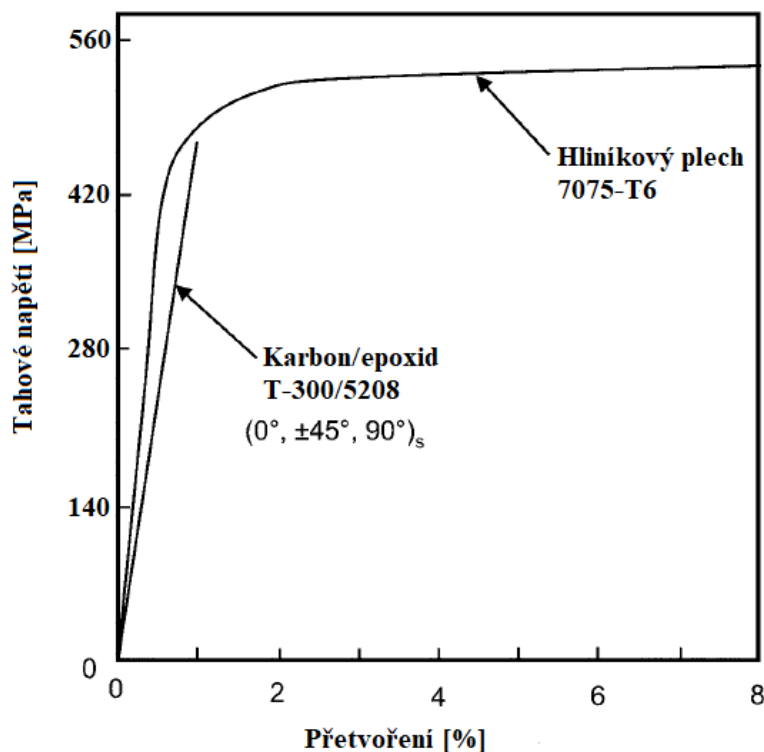
Vlákná s mezofází mají vysoký modul pružnosti (vyšší než PAN vlákna) a střední pevnost (nižší než PAN). Jejich výroba má podobné kroky jako produkce PAN vláken [13]:

- polymerizace,
- navíjení mezofáze,
- termosetová tepelná úprava,
- karbonizace a grafitizace.

Výroba začíná zahřátím uhelného dehtu na teplotu  $425 \text{ °C}$  po dobu až 40 hodin, při které vzniká vysoce viskózní tekutina – mezofáze. Ta je obvykle vytvořena v podobě taveniny skrze trysku zahřátou na teplotu  $570\text{--}850 \text{ °C}$  a stlačena inertním plynem. Rychlost tažení je velmi vysoká, kolem  $120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a vytvořená vlákna mají průměr  $10\text{--}15 \text{ }\mu\text{m}$ . Důležitým aspektem tohoto kroku je poměr tažení – až  $1000:1$  (výsledný průměr vlákna  $10\text{--}15 \text{ }\mu\text{m}$ ), který má vliv na orientaci a jednotnost struktury. Vzhledem k tomu, že v tuto chvíli má vlákno charakter termoplastu, je nutno provést tepelné úpravy za teploty  $300 \text{ °C}$  v oxidickém prostředí, kterými se charakter vláken změní na termoset. Zabraňuje se tím relaxaci a slučování vláken a struktura je stabilnější. Následně již může proběhnout pomalá karbonizace při  $1000 \text{ °C}$  (nutno předejít uvolňování plynů a tvorbě bublin ve struktuře) a poté grafitizace za obvyklých teplot. [13; 41]

### 3 VLASTNOSTI A VYUŽITÍ KOMPOZITŮ V BALISTICKÉ OCHRANĚ

Jak bylo zmíněno v předešlých kapitolách, dnešní koncept balistické ochrany má obvykle hybridní charakter a v oblasti osobní ochrany či pancérování vozidel se zřídka využívá pouze jednoho materiálu pro skladbu pancíře. Pro návrh balistické ochrany je vhodné znát parametry, pro které bude pancíř dimenzován a samozřejmě chování materiálů, jež budou použity. Materiálové modely jsou dobře popsány v případě kovů a keramiky, avšak s použitím kompozitů přichází s popisem mechanických vlastností problémy. Kompozity nemají homogenní složení a jejich chování je mnohdy anizotropní, tudíž se obtížněji popisuje jejich chování za působení mechanické zátěže. Pro ukázkou odlišného chování je na obr. 26 uvedeno srovnání typického průběhu křivky napětí-deformace karbonového laminátu s matricí epoxidové pryskyřice a hliníkového plechu. Vlastnosti jsou ovlivněny materiálem a morfologií vláken, typem matrice, způsobem vrstvení a případnými dalšími úpravami. K vyhodnocení vlastností lze využívat standardní zkoušky destruktivní i nedestruktivní, povětšinou je však vhodné provést modifikace podmínek zkoušek či zkušebního zařízení. Chování při balistickém impaktu při dimenzování ochrany je nutno ověřit samotnou balistickou zkouškou např. v balistických zkušebnách a laboratořích. Následně je vyhodnoceno na základě platných směrnic, norem a standardů pro balistickou ochrany, které definují třídy ochrany, podmínky a parametry výstřelů a přípustné deformace. Kromě balistiky lze tyto kompozity využívat také jako konstrukční materiál pro strukturální díly, kde je pro dané aplikace potřebné využití jejich vlastností i přes vyšší náklady.



Obr. 26 Srovnání tahové křivky karbonu a hliníku [13].

#### 3.1 Deformační vlastnosti

Kompozity jsou ve své podstatě heterogenní materiály s anizotropními vlastnostmi. To jim přináší řadu výhod v mechanických vlastnostech, ale zároveň značně komplikuje popis a predikci chování při zatížení a vzniku defektů struktury, jelikož na rozdíl od jiných materiálů, které obvykle selhávají procesem iniciace a postupného šíření jedné hlavní trhliny, porušení

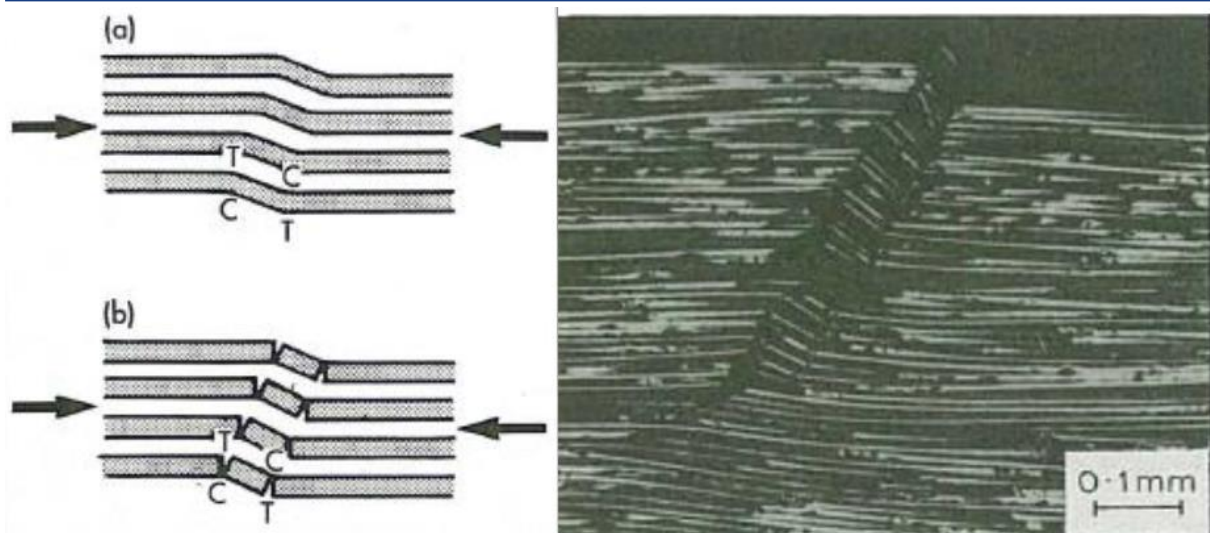
kompozitů je velmi komplexní proces. Mezi hlavní mechanismy porušení vláknových kompozitů s polymerní matricí patří delaminace a lom matrice, s případnými dalšími následky v podobě vyvlékání vláken ze struktury a jejich lámání. [42; 43]

Hlavním poruchovým mechanismem kompozitů je delaminace (porušení soudržnosti vrstev a jejich rozvrstvení), která je důsledkem slabé interlaminární lomové houževnatosti. Jedná se o defekt vedoucí k oddělování jednotlivých vrstev (obr. 27) a probíhá v rovině (na rozdíl od kovů, kde je jedním z hlavních mechanismů poškození lom skrze tloušťku materiálu). Je nutno zmínit, že byť je delaminace zmiňována ve smyslu poškození, tak tento proces je zároveň jedním z hlavních aspektů umožňujících materiálu pohlcení kinetické energie a přispívá také k zvýšení lomové houževnatosti. Při impaktu je čelní strana panelu zhutněna a vytvoří se boule, tok materiálu, který se pohybuje před projektilem. Ten během penetrace zpomaluje, načež kvůli vyššímu ohybu kompozitního materiálu dochází k delaminaci snadněji (zejména v tenkých vrstvách). Tímto mechanismem se delaminovaná oblast zvětšuje směrem k zadní stěně panelu. Delaminace může mít příčinu také ve vlhkosti a teplotě. Vzhledem k tomu, že kompozity do jisté míry absorbují vlhkost (liší se dle matrice a míry vlhkosti), pak při jejím zmrznutí hrozí expanze, která může narušit matrici, a při tepelném zpracování za vysokých teplot může vzniknout pára, jejíž tlak může být natolik vysoký, že způsobí delaminaci. [10; 11]



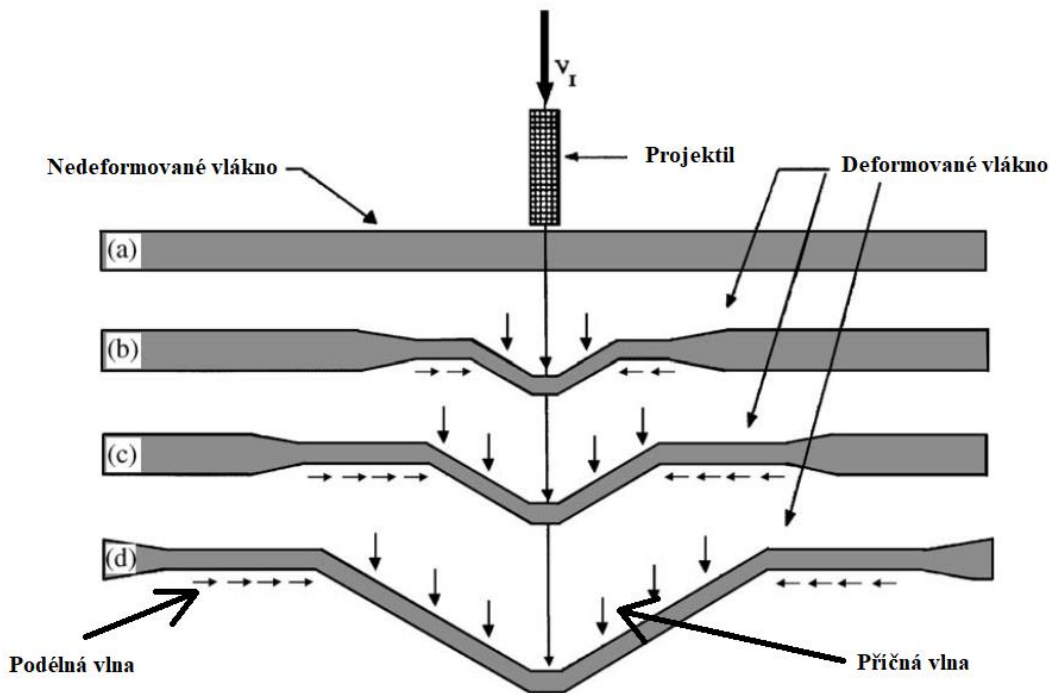
Obr. 27 Delaminace aramidového kompozitu.

Praskání matrice je časté u laminátů s orientací  $[0, 90^\circ]$ . Jsou-li vrstvy otočeny vůči sobě o  $90^\circ$ , pak zde panuje anizotropie a při tahovém napětí nesou vrstvy kolmé na směr zatížení nižší zátěž, než vrstvy ve směru  $0^\circ$  na směr tahového napětí. Vlákná ve vrstvě  $0^\circ$  mají při natahování tendenci se smršťovat směrem dovnitř a při tahu vyvíjí tlak na vrstvu ve směru  $90^\circ$ , která však tomuto zamezuje a tím vznikají další napětí tahová napětí, kolmá na osu zatížení, vedoucí k oddělování vláken od matrice a jejím prasklinám. Při vysokém zatížení a postupné saturaci prasklin může být lom matrice iniciován také ve vrstvách  $90^\circ$ . Riziko tohoto poškození je nutno zohlednit i při výrobě laminátu, jelikož vlákna mají mnohem nižší koeficienty teplotní roztažnosti než polymerní matrice a při ochlazování z vytvrzovacích teplot tak může vznikat v matrici reziduální tahové napětí, kolmé na podélný směr vláken. To je typické zejména pro křehká uhlíková vlákna, která jsou vytvrzována za vysokých teplot a při ochlazování může dojít k lomům v matrici. Při tlakovém zatížení a kompresi dochází k vybočování vláken a formaci struktury kompresních lomů, zvaných jako kink band struktura (viz obr. 28). [43]



Obr. 28 Lomová struktura při kompresi [43].

Při aplikacích balistické ochrany je proces porušení materiálu specifický, zejména kvůli vysoké míře kinetické energie při nárazu. Impakt projektilu vyvolává rázové vlny – podélnou vlnu v přízi a příčnou v napjaté oblasti (obr. 29), šířící se rychlostí zvuku. Tyto vlny spolu vzájemně interagují v úchytných bodech, resp. v bodech, kde se prolínají v rámci tkanin. Mohou vést k vytvoření deformace kuželovitého tvaru skrze celou tloušťku, jelikož příze je nucena k pohybu vpřed spolu s projektilem, čímž dochází k absorpci zbývající kinetické energie. Může také docházet k lámání a vyvlečení vláken ze struktury – k tomu dochází na přední a zadní straně panelu a při vysoké míře energie může být doprovázeno prasklinami v matrici. V případě, že impakt způsobí vyšší napětí, než které vlákna odolají, dochází k trhlinám. Dalším možným typem porušení je smyková deformace. Při překročení únosného napětí materiálu dochází k jeho prasklinám, ale dosahuje-li impaktová energie ještě vyšších hodnot, pak náraz projektilu vyvolává stříhové napětí v tloušťce materiálu a může docházet k selhání charakteru smykového poškození. Obecně platí, že tkaniny bez propletení vláken přenášejí vlnění v mnohem nižší míře, proto se pro pancéřování používají tkaniny bez propletení, nebo lamináty struktury  $[0, 90^\circ]$ . Přidáním pryskyřice do struktury kompozitu se výrazně snižuje přechodná deformace v momentu impaktu. Ta má charakter elastické deformace s minimálním podílem deformace plastické, nicméně výrazně zvyšuje celkové pnutí a námahu materiálu, které by jinak mohlo přispět k poruše materiálu. Snižit míru elastické deformace lze také přidáním vytvrzovacích vrstev do struktury. V průběhu impaktu dochází při této elastické deformaci, resp. při její eliminaci, k nejvyšší míře disipace energie. [5]



Obr. 29 Schéma přize před a během impaktu [44].

### 3.2 Mechanické zkoušky kompozitních materiálů

Pro kompozitní materiály existuje velké množství zkoušek, kterým mohou být podrobeny za účelem zjištění vlastností. Mezi ně se řadí běžné mechanické zkoušky – jak statické (zkouška tahem, tlakem ohybem, krutem a stříhem), tak dynamické (zkoušky rázem, vrubové houževnatosti). Poměrně často se testují na creep a únavovou odolnost. Z pohledu fyzikálních vlastností mohou různé zkoušky sledovat hustotu, absorpci vody, odolnost povrchu vůči abrazi a tvrdost. Podobně jako u kovů, i pro kompozity lze provádět nedestruktivní zkoušky – např. ultrazvuková, radiografická či termografická. Pro kompozity s polymerní či keramickou maticí nelze používat metody magnetické a elektromagnetické. Existuje zde však odlišnost vůči kovům – kompozity se skládají z několika vrstev, a tudíž u nich panuje určitá nehomogenita a anizotropie. Pro jednotlivé materiály bylo proto vyvinuto množství pomůcek, kterými se specializuje a optimalizuje způsob a průběh testování pro kompozity. V průběhu rozvoje kompozitních materiálů si mnohé společnosti, zejména v aeronautice, vytvářely vlastní modifikace zkoušek. Jejich postupy se postupně sjednocovaly a dnes je průběh zkoušek standardizován podle platných norem. Hlavními mezinárodními standardy pro kompozity jsou normy ASTM, ISO a CEN. Pro relevantní vyhodnocení zkoušek a testů je nutno znát a brát zřetel na základní parametry a informace o testovaném materiálu – míru anizotropie, konstrukci laminátu, citlivost na teplotu a vlhkost, a v případě kompozitu s orientací vláken jen v jednom směru také na fakt, že v jednom směru bude materiál velmi tuhý a pevný, v druhém naopak slabý a pružný. [10; 13; 45]

### 3.3 Balistické normy a standardy

Z pohledu balistiky existuje mnoho standardů, norem a zkoušek pro ověření příslušného stupně balistické ochrany. Vzhledem k tomu, že použití těchto materiálů v ochranných prvcích má přímý vliv na ochranu zdraví a života, je správný průběh a vyhodnocení těchto zkoušek klíčovým krokem vývoje. V praxi čelí tyto prostředky dynamickému zatížení, nárazům a deformacím při vysokých rychlostech. Proto je efektivní během testování vystavovat materiál zatížení obdobného charakteru, tedy explozím a impaktům střeliva. V rámci jednotlivých

standardů se obvykle rozlišuje, jakému typu impaktu čelí – projektily s nízkou/vysokou rychlostí, fragmenty či výbuch – testy jsou pak dimenzovány na tyto podmínky. Vstupními parametry jsou zde zejména úst'ová rychlost, ráže, hmotnost a konstrukční typ munice. Významnou roli hraje také zamýšlená aplikace testovaného materiálu/součásti, proto jsou standardy rozděleny také na testovací metody pro balistickou ochranu vozidel civilních, vojenských, či pro personální využití, ať už pro armádu, policii a jiné ozbrojené složky, nebo pro civilní využití.

Norem je celá řada, a proto zde bude pouze krátce a stručně zmíněno několik z nich. V rámci vojenských vozidel jsou v platnosti normy STANAG 4559 a AEP-55. Obě jsou vydány NATO a vzájemně na sebe navazují. STANAG 4559 je kratším dokumentem, popisujícím požadavky vůči vysokorychlostní munici, municí středního kalibru a dělostřeleckým hrozbám. Udává také požadavky pro testování vozidla při explozi pod ním (např. při najetí na minu). AEP-55 je testovací metodou na základě požadavků STANAG 4559. Ve svých třech částech popisuje tři základní typy ohrožení – kinetická energie a artilerie, miny a třetí část je zaměřena na improvizovaná výbušná zařízení. Každá část je rozdělena do několika sekcí, které obvykle postupně definují typ munice a druh hrozby, reakci systému, vybavení a náležitosti aparatury, vyhodnocení z hlediska poškození materiálu a bezpečnosti posádky. Součástí je také několik příloh s dalšími informacemi, podrobnostmi, vyhodnoceními a možnostmi. [1]

Personální ochrana je dimenzována na ruční palné zbraně menších ráží a i zde je velké množství testovacích metod a platných norem, neboť při těchto aplikacích musí materiál kromě vlastního zastavení náboje také eliminovat velikost deformace materiálu na zadní straně, která by taktéž mohla mít fatální následky. Velikost vyboulení, resp. penetrace je stanovena normou NIJ na 44 mm. Při překročení tohoto limitu by došlo k traumatizujícím následkům a při testování by materiál byl vyhodnocen jakožto nevyhovující. NIJ (americký národní institut justice) klasifikuje pět úrovní balistické ochrany (detaily v tab. 4) [1; 46]:

- IIA – měkký pancíř, lehký a nedetekovatelný
- II – podobný IIA, vyšší odolnost
- IIIA – stále označováno jako měkké, ale objemnější a vyšší stupeň ochrany
- III – tvrdý pancíř, obsahuje kovové a/nebo kompozitní pláty
- IV – nejsilnější dostupný osobní pancíř, pro vojenské účely, proti průrazným nábojům.

Příkladem konkrétní normy může být NIJ Standard-0101.07 z roku 2018 o balistické odolnosti osobního pancíře. Tento standard, vydaný americkým Národním Institutem pro justici je používán téměř všemi západními zeměmi jako směrodatné vodítko pro balistickou ochranu a vyšel za posledních několik desítek let v několika verzích, přičemž každá z nich byla aktualizována vzhledem k postupnému vývoji a trendům v požadavcích a nových hrozbách. Podobně jako standardy pro pancíře vozidel, obsahuje tento 58stránkový dokument obecné definice, požadavky na materiál, laboratorní testovací vybavení, postup zkoušek (např. umístění jednotlivých zkušebních výstřelů na testovaném objektu) i vyhodnocení jak pro měkké, tak tvrdé části ochrany a 9 příloh s dalšími upřesněními a testovacími postupy, kde je např. odkazováno na konkrétní normy aplikovatelné pro dané měření či zkoušku. Novinkou oproti verzi 0101.06 je např. příloha H, popisující design měkkých částí ochrany přizpůsobených pro ženy. Testovány jsou také vnější vlivy – např. vystavení zkušebního objektu zvýšeným teplotám, vysoké vlhkosti apod, kdy testy probíhají až po vystavení vzorku těmto vlivům a je zkoumána, zda vlastnosti degradují, případně do jaké míry. NIJ kromě jednotlivých úrovní ochrany definuje také typ munice, na kterou je daný stupeň dimenzován a která by měla být při testování využita (tab. 3). [1; 5; 47]

Tab. 4 Testovací projektily pro jednotlivé úrovně ochrany dle normy NIJ [46].

Typ pancíře	Testovací kolo	Nominální průměr projektilu [mm]	Váha projektilu [g]	Testovací úst'ová rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
IIA	1	9,0	8,0	373
	2	10,0	11,7	352
II	1	9,0	8,0	398
	2	9,1	10,2	436
IIIA	1	9,0	8,1	448
	2	10,9	15,6	436
III	1	7,62	9,6	847
IV	1	7,62	10,8	878

### 3.4 Aktuální stav poznání v oblasti balistické ochrany

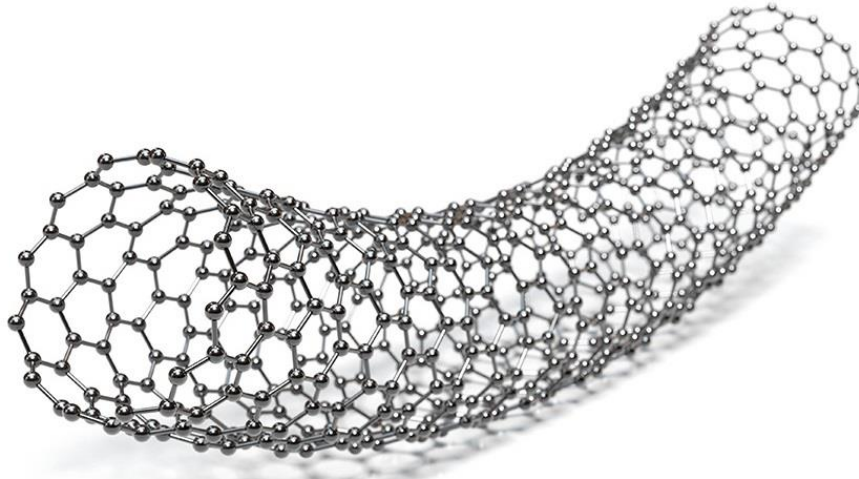
Sektor obrany je díky investicím a intenzivním výzkumům na vysoké úrovni a stále hledá nová řešení. Efektivnější obranné prostředky dodávají uživatelům (ať už v podobě států či ozbrojených útvarů) konkurenční výhodu a mohou tak částečně přispět k udržení pozice či moci. Velmi důležitou roli zde hrají vysokopevnostní materiály s nízkou hmotností.

Použití kompozitních materiálů s nízkou hmotností a dobrými mechanickými vlastnostmi přináší velké množství výhod, z nichž mezi ty nejzásadnější patří úspora hmotnosti, se kterou je spojena mimo jiné zejména nižší spotřeba paliva a míra emisí. Z toho důvodu se tyto materiály staly natolik využívanými v kosmickém průmyslu, letectví, postupně i v automobilovém odvětví a rozvíjí se dále. V mnohých aplikacích se využívají relativně nově vyvinuté speciální typy kompozitů – např. plasty vyztužené uhlíkovými vlákny, které se využívají zejména v letectví a automobilovém průmyslu. Kombinují flexibilitu polymeru s tuhostí uhlíkových vláken, a poskytují tak ideální kombinaci vlastností pro dané aplikace při úspoře hmotnosti dosahující až 50 %. Příkladem použití polymerů s výztuhou uhlíkovými vlákny mohou být křídla, trup a stabilizátory víceúčelového bojového letounu páté generace F-35 Lightning firmy Lockheed Martin. Značně se rozvíjí zmiňovaná oblast biokompozitů pro jejich teplotní stabilitu, mechanické vlastnosti a také jistou míru biodegradability. Pozornost si získávají zejména biokompozity v podobě struktur vytvrzených rostlinnými vlákny. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.8, přináší podobné mechanické vlastnosti, značné snížení produkčních nákladů a také jsou mnohem šetrnější k životnímu prostředí. Relativně novou skupinou naturálních vláken, jež se aktuálně vyvíjí a testuje na poli vysokopevnostních kompozitů, jsou vlákna rostliny *Cyperus malaccenis*, která se doposud užívala např. při balení zboží, avšak díky použití v lanech či nábytku se rozvíjí jejich možný potenciál. [30]

Další vývoj je tak poháněn nejen snahou o nízké emise a úsporu pohonných hmot, ale samozřejmě také v oblasti balistické ochrany cílem v podobě ultralehkých a zároveň efektivních pancířů.

V oblasti současných trendů a poznání v balistické ochraně je nutno zmínit uhlíkové nanomateriály. Mezi ně patří uhlíkové nanotrubicе a grafen, které jsou přidávány jako vytvrzovací komponent do kovových matic používaných v pancířích vozidel. Příkladem je pancíř Kryron – hliníková matrice vyztužená uhlíkovými nanotrubicemi (vizualizace nanotrubic je na obr. 30), vyvinutá firmou Bourque Industries. Je aplikovatelný pro využití jak

v rámci osobní ochrany, tak pro bojová vozidla. Konstrukce je doplněna kevlarovou vrstvou. Splňuje stupeň III, respektive v modifikaci typ X-Round až stupeň IV NIJ, dokáže odolat několika zásahům po sobě a měl by být schopný čelit všem hromadně produkovaným ručním palným zbraním. Často se lze setkat s využitím keramiky, např. izraelský systém LIBA využívá keramických kuliček v rámci struktury v kombinaci s vrstvou UHMWPE a kevlaru, kde kuličky plní roli tříštivého prvku a dají se při zásahu a poškození vyměnit za nové. [30; 48]



Obr. 30 Vizualizace struktury karbonové nanotrubičky [49].

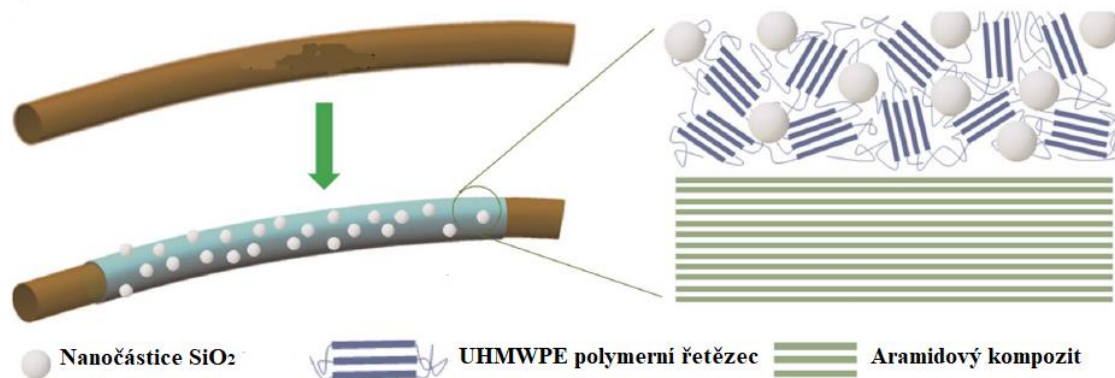
V rámci budoucího vývoje materiálů pro balistickou ochranu je kromě samotného hledání efektivnějších systémů nutné hledat také možnosti pro snížení produkčních nákladů, jelikož zpracování a výroba komponent z těchto materiálů je velmi drahá a omezuje tak oblast a míru použití. Přispět může také simulační software, který dokáže přesněji simulovat chování materiálu při impaktu a částečně tak nahradit destruktivní zkoušení materiálu, nákladného na čas i prostředky. Obecnou globální snahou ve všech odvětvích je snaha o šetrnější řešení vůči životnímu prostředí, která zasahuje i do oblasti balistické ochrany. Proto se také věnuje pozornost dalším výzkumům chemických úprav zejména rostlinných vláken, které by zvyšovaly jejich mechanické vlastnosti a umožnily tak vláknům organického původu co nejširší využití. Výzkumy a testování použití rostlinných vláken v polymerních kompozitech pro balistické užití probíhá velmi intenzivně a je dosahováno slibných výsledků, jak bylo zmíněno v kapitole 1.5. Jako nejvhodnější způsob, prokazující nejlepší výsledky, se aktuálně jeví využití hybridních laminátů rostlinných a syntetických vláken s zhruba 30% zastoupením bio vláken (nejčastěji Kevlar). Kromě rostlinných vláken se např. prováděl výzkum s čedičovými vlákny, které v kombinaci s UHMWPE vlákny při poměru 60:40 dosahovaly velmi dobrých výsledků při balistických testech, kdy tato kombinace vykazovala vyšší odolnost než laminát vyrobený pouze z UHMWPE vláken. Přínosem navíc byla vysoká odolnost čedičových vláken vůči vysokým teplotám, jelikož jsou vyráběna tavením čediče. [26]

Pozornost byla v posledních letech zaměřena na tzv. biologicky inspirované kompozity, tedy na struktury vytvořené na základě biologických celků, např. článkované pancíře inspirované pásovcem či kompozitní struktury ve stylu rybích šupin. Tyto výzkumy jsou v relativně rané fázi a potýkají se zejména se stabilitou horní pevné vrstvy na měkkém podkladu. Při výzkumech byly využívány spíše tvrdé materiály jako sklo či kov (karbid křemíku či hliníku). Dalším z takových konceptů je perleťová struktura s vysokou pevností a tuhostí. Byly provedeny výzkumy perleťových struktur z fotopolymerů či karbidu boru, u kterého byly hodnoty reziduálních kinetických energií projektilu po průstřelu u perleťových struktur ve srovnání s monolitickým blokem nižší. [26] [50]

Pro střední vrstvu pancířů je testována kovová pěna, která při zkouškách balistické odolnosti vykazovala velmi dobré výsledky. Sestávala z kompozitního složení ocel–ocel či niklem

vytvrzeného hliníku a dokázala absorbovat vysoké množství energie. Při výzkumech tvořila vždy prostřední vrstvu a byla doplněna standardní přední a zadní vrstvou z kovu, keramiky či kompozitu. Další možností je produkce materiálu aditivními technologiemi, např. 3D tiskem, slinováním či spékáním. Zde je výhodou možnost kombinace několika materiálů (např. slitiny titanu a hliníku), ovlivnění velikosti zrna a mřížky, která má vliv na balistické vlastnosti. [26]

Velkým rozvojem a zájmem prochází nanomateriály a nanokompozity nejsou výjimkou. Výzkumy přinesly velké množství poznatků a nových materiálových možností. Příkladem jsou speciálně upravené organické jíly, které poskytují výrazné zpevnění i za nízkého obsahu výztuže. Pevnost v tahu je po přidání 3–5 % této výztuže zvýšena až o 48 %. Konkrétním příkladem je přidání nanojílu do kompozitu E skla s epoxidovou maticí. Byla tím zvýšena mj. soudržnost vláken s maticí a odolnost vůči vysokorychlostním impaktům, nicméně docházelo k výraznější delaminaci zejména na zadní straně panelu. Již byl zmíněn grafen, který lze aplikovat jako povlak na povrch aramidu a je tím dosahováno mnohem vyšší absorpce energie. Vliv měl zvýšený koeficient tření mezi vlákny s povlakem. Jeden z provedených výzkumů prokázal, že přidáním 0,3 hm. % dochází k zvýšení absorpce energie o 52 %. Kromě toho také byla výrazně zvýšena soudržnost aramidových vláken s grafenovo–epoxidovou maticí. Vzhledem k horší odezvě vláknových kompozitů při impaktu v příčném směru byl testován povlak vláken pomocí UHMWPE s nanočásticemi oxidu křemičitého (obr. 31). Dosáhlo se tím vyššího modulu pružnosti a tvrdosti v příčném směru vláken. [11; 26; 51; 52]



Obr. 31 Aramidové vlákno s UHMWPE povlakem [52].

Obecně zatím zůstává dominantní formou ochrany vícevrstevný pancíř s čelní (tříštvou), střední a zadní vrstvou (běžné složení keramika–kompozit–slitina/guma/karbon), a zdá se, že cestou tohoto konceptu se bude pokračovat i v budoucích výzkumech. Materiály jednotlivých vrstev jsou však průběžně modifikovány na základě nejnovějších poznatků s ohledem na efektivitu a nákladnost.

### 3.5 Použití

Jak již bylo zmíněno, velmi rozsáhlou a specifickou oblastí použití kompozitních materiálů je balistická ochrana. Právě na tomto poli probíhaly ve 20. století intenzivní průzkumy a vývoje, vedoucí k vzniku těchto materiálů. Nicméně díky svým vlastnostem se poměrně záhy začaly využívat i mimo vojenské aplikace a získaly široké využití v průmyslu. Díky jejich vysokým mechanickým vlastnostem a nízké hmotnosti se hojně začaly využívat v oblasti letectví, kosmonautiky a posléze také v automobilovém průmyslu. 50 % prvků letounu Boeing 787 Dreamliner bylo vyrobeno z kompozitních materiálů. Konstrukce moderních stíhaček obsahuje velké množství kompozitních struktur, stejně jako pancíře tanků, části trupů lodí či draků dopravních letadel. Kevlarová a karbonová vlákna jsou mimo jiné součástí výztuhy pneumatik vozů Formule 1. Do popředí se dostávají nejen jako materiál pro konstrukční prvky, ale také jako designová záležitost, a to nejen v architektuře a domácích doplňcích, ale i v interiérech automobilů. Roli hrají také v důležitém odvětví zelené energie, jelikož se využívají jako jeden

z hlavních materiálů pro výrobu listů vrtulí větrných elektráren. Vývoj vláken stále pokračuje a postupně tak kompozity v mnohých odvětvích nahrazují běžně užívané materiály, např. namísto ocelových lan se začínají používat lana z UHMWPE vlákna Dynemaa (obr. 32), které je v současnosti nejpevnějším známým vláknem. [53; 54; 55]



Obr. 32 Použití lan z vlákna Dynemaa v těžebním průmyslu [56].

### 3.5.1 Balistická ochrana

Díky svým jedinečným vlastnostem jsou kompozitní materiály vytvrzené vlákny používány ve velké míře jako balistická ochrana. V této oblasti se používá jiný typ tkanin, než jaký se běžně užívá pro laminaci. Pro balistiku se užívají tkaniny tkané jako 3D ortogonální s hustějším obsahem vláken, zatímco pro vysokopevnostní lamináty jsou tkaniny tkané většinou jako 2D (hladké tkaniny), jejichž vlákna jsou spíše lehce zploštělá. Výzkumy prokázaly vyšší odolnost 3D tkanin vůči balistickému impaktu o 2,4–7 % ve srovnání s 2D. Důvodem je minimální zvlnění vláken 3D tkaniny, které je u 2D tkanin výraznější. Srovnání pásek a vláken přinesl americký patent pod označením U.S. Pat. No. 4,623,574. Sledoval rezistenci kompozitních struktur s vytvrzením páskami a struktur s vláknovými přízemi. Výsledky vykazaly vyšší efektivitu a absorpci energie u páskových kompozitů, i přesto, že příze má oproti páskám vyšší houževnatost. Příkladem může být UHMWPE, používané pro účely balistiky právě v podobě pásek, obvykle v podobě struktury  $[0, 90^\circ]$  – typickým příkladem je Endumax. [1; 44; 58]

Důležitým aspektem při dimenzování balistické ochrany je absorpce energie (SEA, jednotka  $J \cdot Kg \cdot m^{-2}$ ). Na její míru má v omezené míře vliv mimo jiné i tření mezi projektilem a materiálem. Při balistickém impaktu kompozitu může dojít k třem možným scénářům [26; 44]:

- a) Počáteční energie projektilu je vyšší, než absorpční energie materiálu a dochází k úplné perforaci s reziduální rychlostí projektilu.
- b) počáteční energie projektilu je vyrovnána energií absorpční, dochází k úplnému průstřelu, ale bez reziduální energie a rychlosti.
- c) Absorpční energie materiálu je vyšší, než iniciální energie projektilu, a dochází pouze k parciální perforaci.

Do této oblasti patří osobní ochranné pomůcky, jako jsou neprůstřelné vesty, helmy, či balistické štíty, tak i pláty a panely využívané jako součást pancířů obrněných vozidel. Jejich úkolem je nejen přímé zastavení projektilů, ale také ochrana před střepinami při explozích, neboť právě ty mají statisticky za následek vyšší ztráty na životech. Dimenzování stupně ochrany se odvíjí od účelu a funkcionality – termín „neprůstřelný“ je nepřesný, jelikož např.

vesty jsou většinou stavěny, aby dokázaly odolat rážím 5,56–7,62 mm za vysokých rychlostí ( $920 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $830 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pro 7,62 mm). Vyšší ráže tuto ochranu s největší pravděpodobností prostřelí, nehledě k extrémnímu nárazovému efektu, který sám o sobě může mít fatální následky. Případná vesta proti rážím 12,7 mm či vyšším by již byla velmi těžká i rozměrná a mobilitu by snižovala takovým způsobem, že by výsledkem byla vyšší zranitelnost dané osoby. [1]

Neprůstřelných vest existuje velké množství, lišící se zejména účelem, od kterého se odvíjí konstrukce. Od malých vest, dimenzovaných proti menším ručním zbraním, které se dají nosit např. pod kabátem či sakem (typické využití pro vysoké politiky apod); až po velké těžké vesty určené vojákům v předních liniích ozbrojených konfliktů. Vesty obvykle sestávají z tzv. tvrdých a měkkých částí. Měkké části jsou vyrobeny z kompozitních vláken vysoké tuhosti a houževnatosti, a jejich vysoká odolnost je přímo úměrná jejich výrobním nákladům. Typicky se pro tyto účely používají pláty z mnoha vrstev tkaniny para-amidů (Kevlar, Twaron), nebo UHMWPE, v uspořádání  $[0, 90^\circ]$  (UHMWPE pásy). Tvrdou část ochrany ve vestách obvykle představují keramické pláty (karbid křemíku, karbid boru či oxid hlinitý), které jsou stavěny před kompozitní vrstvu a mají za následek roztržení či jiný typ degradace projektilu. Tato vrstva může být v některých případech tvořena pouze kompozitem, konkrétně UHMWPE. Pohlcení střepin a zbytkové impaktní energie pak již obstará vrstva kompozitu. Při konstrukci vest je nutné brát zřetel na ochranu životně důležitých orgánů – srdce, plíce, játra, ledvina, slezina či velké tepny. Vesty mohou vážit i přes 10 kg, což představuje značnou limitaci uživatele v hybnosti i výkonu. Proto na tomto poli neustále probíhají další výzkumy za účelem vynalezení nových systémů, konstrukcí a materiálů s vyšší performancí a zároveň nižší hmotnosti. [1]

Dalším esenciálním prvkem ochrany ozbrojených složek je helma. Helmy byly v různých podobách využívány prakticky od nepaměti a v dobách světových válek v 20. století byly prakticky jediným prvkem ochrany vojáků. V posledních desetiletích prošly intenzivními modifikacemi a dnes poskytují velmi dobrý stupeň ochrany při zachování nízké hmotnosti. Až do zhruba 70. let minulého století byly helmy kovové, než se i při jejich konstrukci začaly využívat kompozity (hlavní roli zde mají aramidy). Současné helmy mají obvykle dvě vrstvy – vnější skořepinu a vnitřní pěnovou podložku (polyethylen), tlumící rázy. Skořepina byla často tvořena para-aramidy, případně v kombinaci s nylonem. Dnes má většina moderních helem hybridní koncept z kombinace aramidu, UHMWPE a karbonu. Příkladem může být celosvětově rozšířená a hojně používaná helma typu FAST (obr. 33 vpravo), jejíž váha je kolem 1400 g. Primárně jsou helmy konstruovány, aby odolaly fragmentům střepin a jiným nebalistickým rizikům. Typická balistická odolnost odpovídá zhruba projektilu o hmotnosti 1 g za rychlostí  $450\text{--}600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . [1]



Obr. 33 Kevlarová helma NATO polských sil (vlevo) a hybridní helma FAST (vpravo) [58; 59]

Součástí balistické ochrany, zvláště pro armádu, mohou být také balistické brýle (designované pro použití s helmou, obvykle z polykarbonátu), ochrana krku ( límce) a suspenzor. [1]

Neustále probíhá intenzivní vývoj za účelem optimalizace balistické ochrany, kde se hledá vhodný kompromis mezi váhou, mírou odolnosti a uživatelského komfortu. Příkladem novějších konceptů může být např. britský systém Virtus (obr. 34). Jeho konstrukce klade vyšší důraz na ergonomii a je lehčí. Umožňuje variabilitu ve stupni ochrany – jednotlivé vrstvy ochrany plátů se dají ubírat či přidávat, čímž se mění kromě míry ochrany také hmotnost. Umožňuje také rychlé sundání výstroje (pomocí uvolňovacího mechanismu) v nouzových situacích a rovněž váha je díky konstrukci vhodněji rozložena. [1]



Obr. 34 Různé formy systému Virtus s vyznačením míst s balistickou ochranou [60].

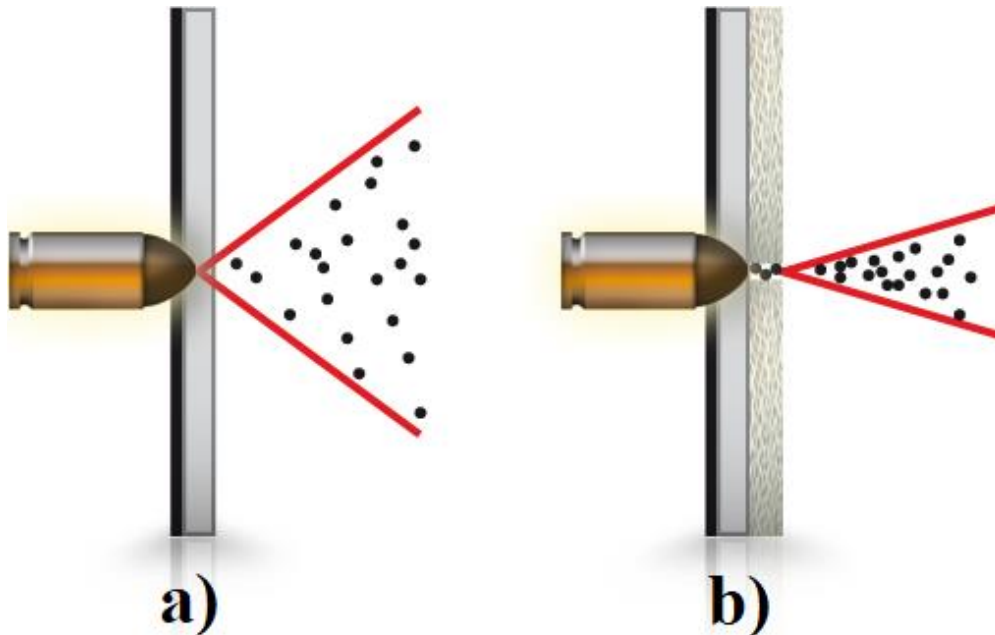
Kompozity se v rámci balistické ochrany široce uplatňují také u obrněných vozidel, u kterých je nutno chránit posádku a vitální části vozidel před střepinami z explozí, minami, municí apod. V dřívějších dobách bylo běžné, že vojenská vozidla (kromě tanků a obrněných transportérů) měla mnohem nižší stupeň pancéřování pro vyšší mobilitu, resp. měla chráněna pouze některé části, nicméně v posledních dekáдах se forma ozbrojených konfliktů změnila, a častá je forma partyzánských střetů militaristických skupin (např. Blízký východ), která vedla k zvýšení pancířové ochrany za předpokladu využití materiálů s nižší hmotností. Dnes jsou tak standardně vybavena tato vozidla pancéřováním na vnější i vnitřní straně. [1]

Vnitřní stranu chrání tvrdá vnější vrstva – obvykle buď keramický nebo kovový plát, jehož úlomky mohou představovat vážné nebezpečí i přesto, že samotný projektil byl zastaven. Proto je velmi důležitá vrstva vnitřní, která má charakter tříštivé vložky a je tvořena kompozitním materiálem. Tato vrstva má tři úkoly [1]:

- zachytit úlomky zadní strany předcházející křehké vrstvy, které byly odtrženy při nárazu projektilu,

- zachytit střepiny projektilu,
- redukovat nebezpečí a letalitu posádky za případného průniku.

Jak je vidět na obr. 35, vnitřní tříštivá vrstva omezuje úhel, ve kterém se rozptýlí průchozí střepiny, díky čemu se výrazně snižuje počet ohrožených členů posádky. Poměrně obvyklý koncept pancéřování vozidel obsahuje ještě jednu, doplňovací vnější vrstvu. Ta je z keramiky, nebo z vysoce tvrdé oceli a jejím úkolem je deformace či roztržení projektilu. Díky tomu se pro druhou vnější vrstvu může použít měkkší ocel, která by spolu s kompozitní vnitřní vložkou měla pohltit fragmenty střepin [1].



Obr. 35 Úhel rozptýlu bez tříštivé vložky (a) a s vložkou (b) [61].

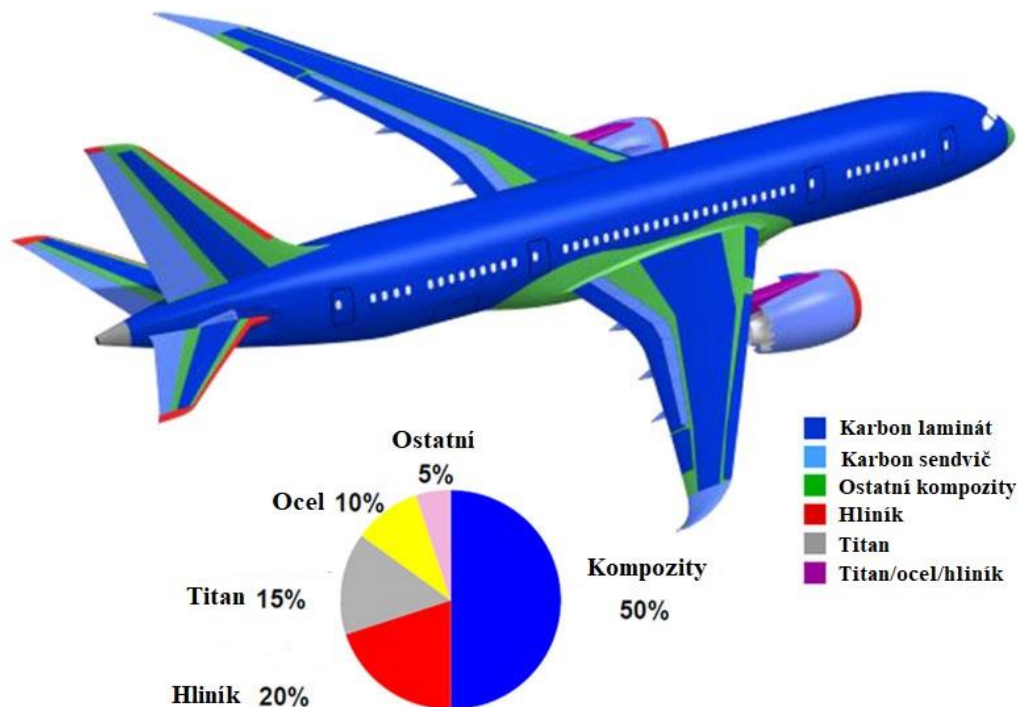
Alternativou mohou být hybridní koncepty, kdy je vnější tvrdá a vnitřní kompozitní část sestavena v jeden celek, zpravidla v podobě desek spojených k sobě. Používají se také v podobě ručně přidělaných souprav, které lze v případě potřeby na vozidlo rychle a jednoduše přimontovat či odmontovat. Zvyšuje se tím variabilita a efektivnost vozidla. [1]

Samostatnou kapitolou jsou tanky, kde je pancéřování klíčovým ochranným aspektem. Prvním tankem s rozsáhlým kompozitním pancéřováním byl sovětský T-64 (60. léta 20. století). Dnes je vyvinuto velké množství konceptů, které většinou stojí na hybridním charakteru keramiky a kompozitu. Nejnovější výzkum pracuje již například s využitím uhlíkových nanotrubic. Kompozity ve vojenském odvětví hrají významnou roli také v letectví a námořnictví, jak již bylo zmíněno. Zde však nehrají primární roli v oblasti balistické ochrany, ale spíše jako vhodný a lehký konstrukční materiál. Nicméně i zde je třeba, aby loď a letadla byla schopna alespoň do jisté míry odolat penetraci projektilu. Významné je jejich použití u bojových vrtulníků – létají totiž nízko a jsou často v přímém kontaktu s bojovou linií a nepřátelskou palbou, proto mají poměrně značnou míru balistické ochrany, a vzhledem k limitaci hmotností jsou zde kompozity nepostradatelné. [62; 63]

### 3.5.2 Jiné použití kompozitů

Kompozity díky kombinaci vysoké pevnosti, korozivzdornosti a nízké hmotnosti získaly významnou roli napříč celým spektrem aplikací. Nevýhodami, které mohou jejich použití limitovat, jsou poměrně vysoká cena a omezený rozsah teplot, do kterých je lze aplikovat. Prakticky nenahraditelnými se staly ve vojenském průmyslu – pro námořní účely je ceněna jejich korozivzdornost, v aeronautice jde především o úsporu hmotnosti, která je klíčová nejen

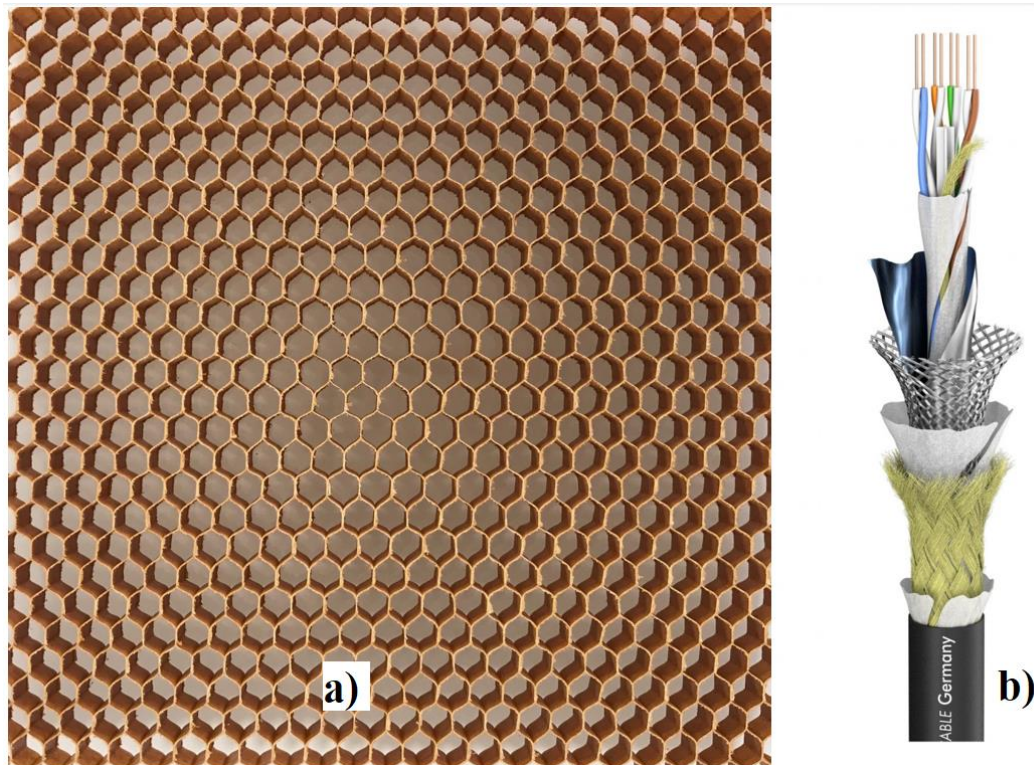
pro výrobní náklady, ale také pro úsporu paliva a manévrovací schopnosti letounu. V průběhu let se zvýšil podíl kompozitů v konstrukcích letadel a stíhačích letounů až o desítky procent (obr. 36). Pro srovnání lze uvést stíhačky F-15 z roku 1972 a F-22 z konce devadesátých let. Konstrukce F-15 byla tvořena kompozity pouze z 2 %, zatímco F-22 již má 25–30 % kompozitů. V oblasti letectví a kosmonautiky dochází díky využití kompozitních materiálů k hmotnostní úspoře 15–25 %. Samostatnou kapitolou je balistická ochrana, ať už v podobě osobní výbavy (helmy, vesty) nebo jako součást pancířů obrněných vozidel. [64]



Obr. 36 Materiálová struktura letadla Boeing 787 [65].

Aramidy mají široké spektrum využití. Často se s nimi lze setkat ve sportovním odvětví, kde jsou z nich vyrobeny jak části náčiní, tak ochranné pomůcky. Poměrně časté je užívání kevlarových návleků např. v ledním hokeji, kdy jejich neprůřeznost chrání krk či jiné části těla hráčů před řeznými zraněními bruslemi. Obdobně je velmi rozšířené užití v průmyslu v podobě neprůřezných rukavic a jiných ochranných oděvů. Důležitou roli hrají při výrobě tlakových nádob. Jejich podíl na konstrukci snižuje váhu nádoby při stejném tlakovém zatížení a zároveň dodává některé další vlastnosti, jakými jsou např. odolnost vůči rázům a za nízkých teplot. Byly testovány i celokompozitní tlakové nádoby, které měly pouze zhruba desetinovou váhu při zachování stejných tlaků, avšak nevýhodou byla pórovitost struktury, a tudíž postupné pronikání plynu z nádoby. Nejčastěji se tak používají hybridní koncepty kovu a kompozitu, kdy se využije vzájemné kombinace tuhosti kovu a pevnosti kompozitu a zároveň dochází k zhruba 30% úspoře hmotnosti nádoby. Setkat se s aramidami lze u kabelů – jejich odolnost a pružnost je vhodná pro jejich opletení a výztuhu (obr. 37 b). Vzhledem k vysokým hodnotám meze pevnosti v tahu hrají významnou roli na poli konstrukcí v roli tažných prutů. Pro specifické aplikace se používá aramidový papír, (na bázi aramidových vláken Nomex), chemickým složením příbuzný Kevlaru, avšak s nižší mechanickou odolností. Jedná se o aramidový materiál malé tloušťky (rozsah cca 0,04–0,76 mm), který je odolný vůči zvýšeným teplotám a kromě mechanickým vlastností aramidů má také dielektrické vlastnosti. Využívá se zejména jako izolace v elektrotechnice. V sendvičových konstrukcích se používá aramidový papír v honeycomb strukturách (tedy struktura včelí plástve, obr. 37 a). Po vytvoření hexagonální struktury jsou pokryty vrstvou fenolové pryskyřice, která dodá systému soudržnost a podílí se

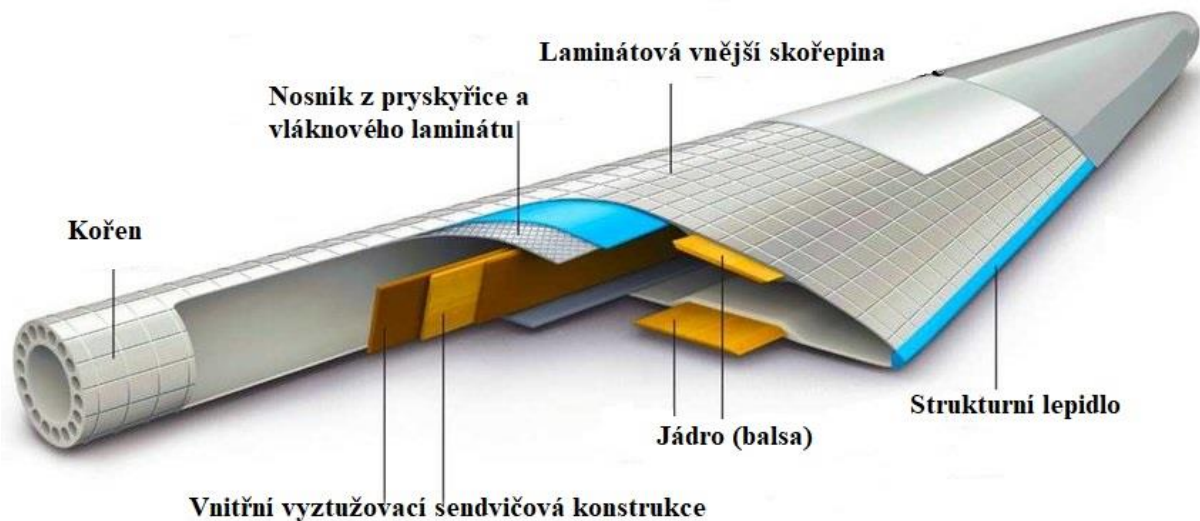
na odolnosti vůči vysokým teplotám. Vyrábí se z nich extrémně lehké, ale velmi odolné a tuhé ohnivzdorné panely zejména pro odvětví leteckého průmyslu a kosmonautiky. [13; 66; 67; 68; 69; 70]



Obr. 37 Honeycomb struktura (a) a aramidová ochrana kabelu (b).

UHMWPE mají při aplikacích limitaci v podobě nízké teploty tání, jinak však nabízí těžko nahraditelnou kombinaci obzvláště nízké hmotnosti a pevnosti. Jednou z oblastí využití je námořní průmysl při stavbě lodí, kde je kromě korozivzdornosti ceněna také mechanická odolnost za nízkých teplot a houževnatost. V těžebním průmyslu je používán jako ochranný materiál některých vnějších částí strojů a zařízení či pro výrobu trubek – zde je klíčovým aspektem především vysoká odolnost vůči abrazi, nízký koeficient tření a samomaznost. V námořnictví, průmyslu i sportu se používají UHMWPE lana, která jsou extrémně pevná a odolná vůči narušení a přetržení. Jako příklad lze jmenovat vlákno Dynemaa firmy DSM, které je poměrově na hmotnost téměř 15x silnější než ocel. Studie, které se zabývaly tahovou pevností, naměřily hodnoty meze pevnosti v tahu jednoho vlákna Dynemaa až 4,25 GPa. Díky tomu je lze použít nejen k ukotvení namísto lan ocelových, ale také jako nosná lana v konstrukcích a jeřábech. V rámci sportu jsou hojně využívána horolezecká lana a taktéž je rozšířená výroba tětiv luků z UHMWPE. Své využití mají v oblasti biomedicíny – díky nízkému koeficientu tření, samomaznosti, chemické stabilitě a biokompatibilitě se z nich vyrábí kloubní náhrady. Pro tyto aplikace je však nutné zlepšit jejich strukturální a chemickou stabilitu a odolnost vůči povrchovému opotřebení, která není v důsledku van der Waalsových sil ideální pro takto choulostivé aplikace. Proto musí materiál, resp. vyrobený implantát, projít další úpravou, kterou je technologie spojování molekul gama ozařováním. Během této technologie dojde k uvolnění volných radikálů uhlíku, které vytvoří pevné kovalentní vazby. Residuální volné radikály však přispívají k oxidaci a snižují povrchovou stabilitu, a proto se dnes vyvíjí metody a technologie, které by zlepšily tyto vlastnosti. Příkladem může být stabilizace pomocí antioxidantů, které na sebe navážou tyto radikály, čímž je značně zamezeno oxidačním dějům, oslabujícím povrch materiálu. Výsledkem celého procesu (ozařování a následná úprava) je pak stabilizovaná struktura s dlouhou životností, vysoce odolná vůči oxidaci. [18; 73; 74; 75; 76; 77]

Ve vojenském průmyslu nemají skelná vlákna tak široké využití, jako např. aramidy či UHMWPE, navíc je v některých aplikacích v poslední době nahrazuje karbon. V dopravním průmyslu však mají své místo a lze se s nimi setkat poměrně často. Lopatky rotoru vrtulníků jsou vytvrzovány skelnými vlákny pro zlepšení únavové odolnosti. Osobní auta mají ze skelných vláken vyrobeny některé komponenty ve formě lisovaných desek. Trup menších rybářských lodí či závodních jachet je velmi často tvořen právě skelnými vlákny v kombinaci s polyesterem (opět zde hraje roli korozivzdornost a hmotnost materiálu oproti kovu). Z podobného důvodu jsou z nich vyráběny kyslíkové bomby na potápění, které díky nižší hmotnosti uskladní větší objem vzduchu a umožňují snadnější manipulaci. Jejich využití v prostředí vodní dopravy se týká i třeba částí vodních skútrů (úspora hmotnosti). Důležitým komponentem jsou skelná vlákna ve vyztužených konstrukcích, např. jako vytvrzovací prvek betonu. V kontextu zelené energie jsou větrné elektrárny jednou z nejdynamičtěji rozvíjenou metodou získávání elektrické energie. Klíčovou roli zde hrají lopatky (obr. 38), které mohou být dlouhé až 37 metrů a vážit až 5,2 tuny. Převažujícím materiálem pro jejich výrobu jsou polyester či epoxid vyztužený kontinuálními skelnými vlákny. V roce 2007 jich bylo vyrobeno na 50 000. [13]



Obr. 38 Obvyklá konstrukce lopatky větrné elektrárny [78].

Uhlíková vlákna jsou mezi všemi vláknovými kompozity v dnešní době nejrozšířenější. Jejich cena je vyšší než např. skelných vláken, nicméně v mnohých aplikacích, vyžadujících vysoké nároky materiálu, jsou nezastupitelné. Týká se to zejména letectví a kosmonautiky, neboť právě vojenské letectví bylo prvním odvětvím, kde se začala karbonová vlákna využívat ve větší míře. Draky helikoptér jsou téměř z celé části tvořeny karbonem a kevlarom. Jak je vidno na obr. 36 – dopravní letadla a letadla obecně mají konstrukce na bázi kompozitů a podstatnou část z nich tvoří karbon v různých formách. Setkat se s nimi běžně lze v automobilovém průmyslu, přičemž značné zastoupení mají v motorsportu, kde hraje roli každý gram navíc. Formule mají velkou část konstrukce – podvozek, křídla, kryt motoru i části samonosné karoserie – z karbonu. Ve sportu je karbon využíván jako konstrukční materiál rámu horských kol, vyrábí se z něj florbalové a golfové hole (nikoliv však čepele), pro lední hokej jsou již hokejky celé vyrobeny z karbonového kompozitu. V lyžích a snowboardech, které jsou dnes obvykle vyráběny jako sendvičové konstrukce, jsou karbonová vlákna jako součást výztuhy zcela běžná. Tenisové rakety se neustále inovují pro dosažení co nejnižší hmotnosti a zároveň tuhosti a snadné ovladatelnosti. Běžné jsou nejen karbonové či kombinované rakety z karbonu a aramidu, ale dokonce i grafitové rakety. Ve zbrojařství se také vyrábí některé součásti z karbonu. V oblasti balistické ochrany není karbon typickým materiálem, zejména kvůli své křehkosti, nicméně lze jej najít třeba v balistických štítech, spíše jako prvek pro zpevnění a kompaktnost struktury.

V poslední době získává karbon širší pozornost v oblasti designu. Karbonová textura se často imituje z jiných materiálů, nicméně samotný karbon se využívá pro výrobu stylových prvků domácností i doplňků s futuristickým nádechem (obr. 39). [13; 79]



Obr. 39 Karbonový designový kufr [80].

## 4 VÝROBA KOMPOZITNÍCH PANELŮ

Praktická část je zaměřena na výrobu zkušebních panelů z kompozitu. Materiály zvolenými pro tento účel jsou z Twaron CT 747, Twaron CT 747 TH110, Twaron ER 68 (aramidy) a Endumax Shield XF33 (UHMWPE). Jedná se o syntetické vláknové kompozity, které byly zpracovány z výchozí podoby tkaniny. Vlastnosti těchto materiálů jsou specifikovány v tabulce 5. Charakter těchto materiálů se liší, a tudíž každý kompozitní panel z těchto čtyř materiálů má svou vlastní metodu výroby. Pro Twaron CT 747 se jednalo o vakuovou infuzi, kde funkci matrice vytvořila epoxidová pryskyřice. Twaron CT 747 TH110 obsahoval vrstvu tzv. prepregu, tedy předimpregnované částečně vytvrzené pryskyřice TH110, která se řadí mezi termoplasty. Panely byly vyrobeny lisováním za zvýšené teploty, kdy došlo k roztavení pryskyřice a opětovnému zatuhnutí. Stejně tak vrstvu prepregu měl Twaron ER 68, jehož předimpregnovaná vrstva obsahovala termosetovou pryskyřici ER 68 a panely byly vyrobeny v autoklávu. Endumax, sestávající z UHMWPE pásek a termoplastické matrice polyolefinu, byl stejně jako Twaron CT 747 TH 110 také lisován za zvýšených teplot. Způsob výroby termoplastických dílů lisováním byl v rámci VUT pilotním postupem a bylo nutno vhodně zvolit celou výrobní aparaturu. Vytvořené panely byly následně využity ke zkouškám vlastností. Pro Taylorův test, tahovou a ohybovou zkoušku musely být vzorky zpracovány z původních panelů o rozměrech 350 x 350 mm na menší technologii řezáním vodním paprskem. Pro střelecké zkoušky byly rozměry panelů 300 x 300 mm a okraje panelů musely být ořezány také. Provedené zkoušky byly jak statické (tahová a ohybová zkouška), tak dynamické (Taylorův test, test balistickou zbraní). Po provedení zkoušek následovalo jejich vyhodnocení s ohledem na míru balistické ochrany. Výroba panelů i následné zkoušky probíhaly v průběhu roku 2021 a začátku roku 2022 [81].

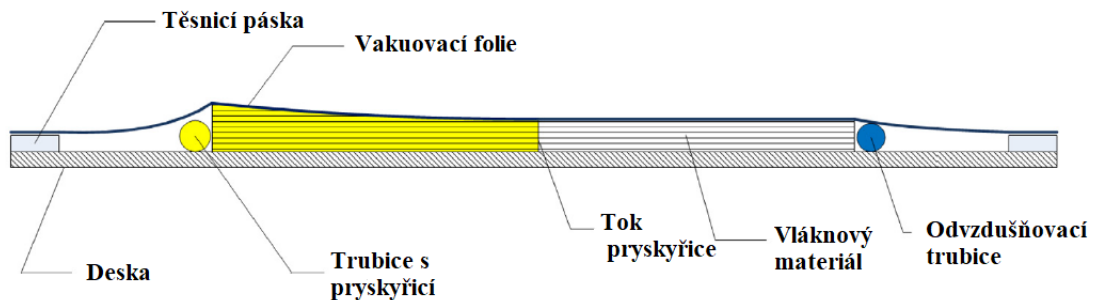
Tab. 5 Vlastnosti použitých materiálů [20; 21].

Materiál	Modulus [GPa]	Hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ ]	Lineární hustota [dtex]	Mezní houževnatost [cN/tex]	Mezní pevnost [N]	Prodloužení při lomu [%]
Twaron CT 747	91	1,44	3360	235	770	3,45
Endumax	170	0,97	950	220,8	208	1,7

### 4.1 Technologie výroby vakuovou infuzí

Vakuová infuze je jednou z metod výroby kompozitních panelů a plátů. Skládá se ze dvou fází – vakuování a infuze (schematicky na obr. 40). Vakuování zaručuje dostatečnou soudržnost a jistou míru komprese jednotlivých vrstev a zároveň redukuje zbytky vzduchu ve struktuře, které by vytvářely strukturní defekty v podobě prázdných míst a vzduchových bublin. Infuze probíhá na základě tlakového rozdílu mezi vakuem a přísunem pryskyřice. Díky tomu je pryskyřice tlačena do dutiny pod vakuem, zvyšuje se tlak v dutině a tloušťka vakuovaného vláknového materiálu roste. Existuje velké množství různých metod a modifikací, které využívají velmi sofistikované postupy pro optimalizaci výroby kompozitu vakuovou infuzí. Např. Boeing patentoval metodu CAPRI (kontrolovaná infuze pryskyřice za atmosférického tlaku), u které je výchozí vrstva materiálu střídavě vakuována a provzdušňována pod cyklickým zatěžováním a odlehčováním. Výsledkem je nižší tlakový gradient a pomalejší tok pryskyřice, což může být v jistých aplikacích žádoucí. Podobně lze využívat také měřicí metody pro kontrolu tlaku a detekci úniku vzduchu – např. manometr, ultrazvukové mikrofony či detekce s využitím helia.

Metoda je využívána např. pro výrobu velkých kompozitních součástí typu lopatek větrných elektráren či krytů křídel letadel. [82; 83; 84; 85]



Obr. 40 Schéma technologie vakuové infuze [85].

Pro výrobu kompozitních panelů z Twaronu CT 747 byl zvolen postup s využitím lepidla na bázi epoxidové pryskyřice. Výroba probíhala infuzní metodou VARTM (vakuum podpořený transfer pryskyřice) za atmosférického tlaku (resp. vývěvou byl tlak 0,99 atm), tedy nejjednodušším způsobem vakuové infuze, probíhající v rovině. Plošné rozměry těchto panelů byly stanoveny na čtverec o délce 350 mm. Pro dosažení co nejkvalitnějšího výsledku panelů bez vad bylo zapotřebí pečlivě dodržet přesný postup a kontrolovat veškeré prvky výroby. Postup výroby panelu byl následující: [85]

- očištění a příprava plochy (skleněné desky),
- naskládání vrstev aramidové tkaniny,
- přiložení separační folie a hermetické uzavření soustavy,
- vakuování,
- příprava epoxidové pryskyřice,
- vakuová infuze,
- vytvrzování.

Vrstvy tkaniny byly skládány jednoduše na sebe ve stejné orientaci. Některé studie se zabývaly vlivem uspořádání na balistickou odolnost, kdy byla orientace vláken jednotlivých vrstev vůči sobě různě pozměněna (např. pootočení o 22,5° vždy po 2 vrstvách), nicméně v našem případě nebyla tato varianta testována. Pro snadnější vyjmutí z vakuovací folie byly použity dvě technologické vrstvy – separační folie a textilní strhávací vrstva (známá jako peel-ply). Do soustavy byly přiloženy dvě trubice – jedna propustná pro vytvoření vakua a druhá pro pozdější přítok epoxidu. Posledním prvkem v přípravě celé sestavy pro vakuování bylo zakrytí nepropustnou folií s izolační gumou. Zvláštní pozornost bylo nutno věnovat místům, kudy do uzavřené sestavy vrstev vstupovaly trubice a při prvním zkušebním odsávání vzduchu bylo detekováno několik míst s nedokonalým těsněním. Po eliminaci těchto průduchů proběhlo desetiminutové vakuování vakuovým kompresorem. Pro tuto metodu je vakuování nutné, jelikož by bez něj nemohlo proběhnout správné nasycení, nicméně vakuování se často provádí také u technologií lisování a dalších, jelikož je tím zvýšena soudržnost vrstev, snížena porozita a zefektivněno plnění formy. [10; 86]

Po vakuování bylo třeba připravit matrici na bázi epoxidu. Skládala se z epoxidové pryskyřice LG 700 a tužidla HG 700. Pro správné ztuhnutí a vlastnosti bylo nutné dodržet poměr těchto složek pro požadovaný objem. Objem potřebné pryskyřice byl stanoven výpočtem objemu, přičemž bylo uvažováno, že bude zaplněno 50 % celkového objemu panelu. Jedna vrstva twaronu má na výšku 0,5 mm, pro výpočet bude uvažována vrstva 20 ks (tedy 1 cm na výšku). Výpočet pro objem panelu tvaru kvádru, resp. krychle, byl tudíž následující:

$$V = a \cdot b \cdot c, \quad (4.1)$$

kde: a, b – rozměry stran panelu [cm],

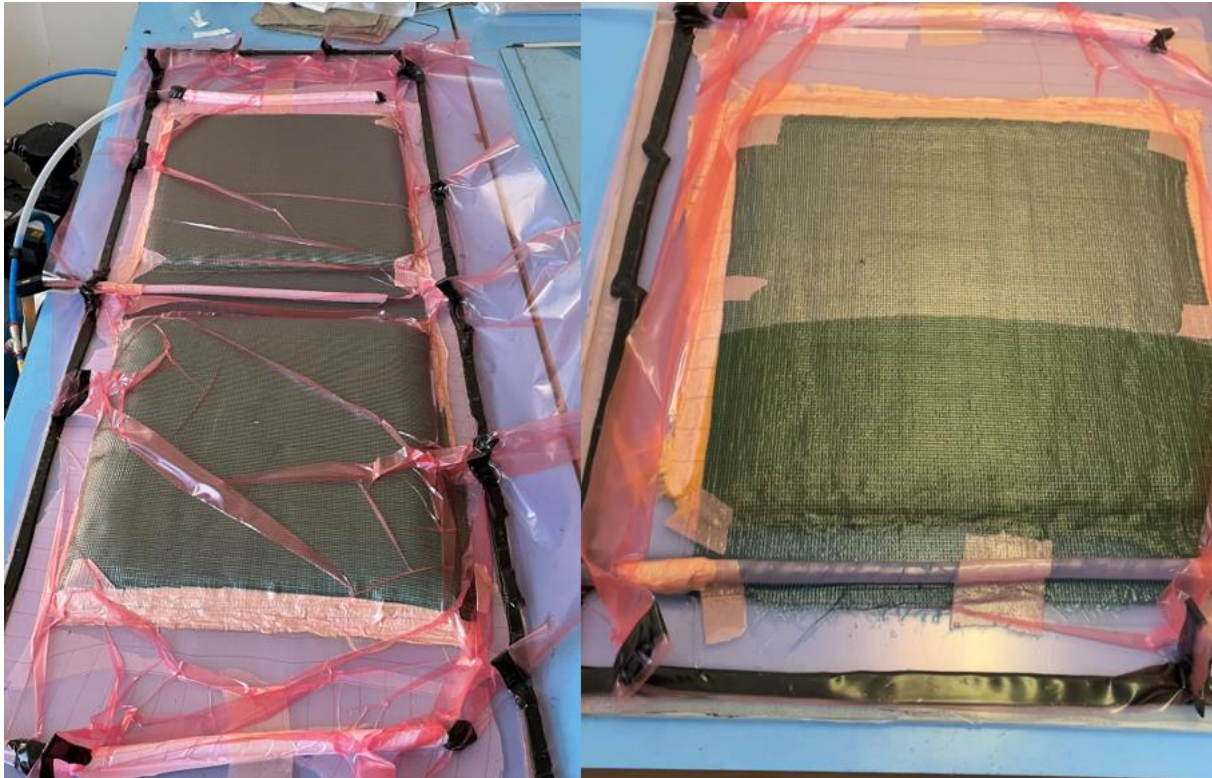
$c$  – výška panelu [cm].

Po dosazení za rozměr panelu 350x350 mm a následné uvažování 50% výplně:

$$V = 35 \cdot 35 \cdot 1 = 1225 \text{ cm}^3 = 1,225 \text{ l}$$

$$V = 1,225 \cdot 0,5 = 0,625 \text{ l.}$$

Vzhledem k předpokládaným ztrátám během procesu byl zvolen objem pryskyřice 0,9 l. Z tabulky pro daný objem byl určen poměr množství pryskyřice a tužidla na 100:30. Obě složky byly promíchány a umístěny do vakuové pece, kde byly při vakuování odstraněny bubliny, které by znehodnocovaly mikrostrukturu budoucí matrice pórovitostí. Posléze byla provedena vlastní infuze pryskyřice do struktury (vzlínáním), přebytečnou pryskyřici bylo poté nutno rozlít do co největší plochy, aby se předešlo exotermické reakci a případnému samovznícení. Proces tuhnutí a vytvrzení trval 24 hodin za pokojové teploty 22 °C. Touto metodou bylo vyrobeno několik panelů v rozsazích 10–60 vrstev. Na obr. 41 lze vidět aparaturu a průběh výroby.



Obr. 41 Aparatura vakuové infuze a detail toku pryskyřice.

## 4.2 Lisování s vrstvou prepregu

Jednou z možností produkce tkanin ze syntetických vláken je tkanina s předimpregnovanou vrstvou pryskyřice, označovanou zkráceně jako prepreg. Pryskyřice je v rámci balisticky odolných kompozitních struktur velmi důležitým prvkem, avšak sama o sobě charakteristiky pro balistickou ochranu nemá, slouží jako pojivo vláken a napomáhá přenosu kinetické energie v systému. Ovlivňuje chování kompozitu a proto by její typ měl být volen s ohledem na požadované vlastnosti a výrobní metodu. Ve vysokopevnostních aplikacích či balistické ochraně je žádoucí co nejvyšší možný podíl výztuhy a méně pryskyřice. Vrstvy s prepregem jsou tak vhodnou formou materiálu pro výrobu těchto komponent v těchto oblastech. Princip výroby spočívá v lisování za vysokých teplot (např. v autoklávu), kdy dojde k roztavení pryskyřice a následnému zatuhnutí a vytvrzení celé struktury. Obecně lze pryskyřice, resp. polymerní matrice rozdělit na dvě skupiny – termosety a termoplasty. Výroba z materiálu s prepregem probíhá lisováním za zvýšených teplot (125–170 °C, dle typu pryskyřice). [10]

Termosety mají dobré mechanické vlastnosti a v kombinaci s aramidovými či skelnými vlákny dodávají systému vysokou tuhost a pevnost. Vyznačují se také teplotní stabilitou a odolností vůči vlhkosti. Tyto vlastnosti vycházejí z hustých síťovaných struktur vznikajících během vytvrzování (chemický proces za působení tepla), po kterém jsou molekuly spojeny kovalentními vazbami. Po vytvrzení nelze termoset opětovně tavit ani rozpouštět. Prepregové tkaniny jsou vyrobeny ponořením do kapalné pryskyřice a následně mohou být uchovány ve zmrazeném stavu, aby se předešlo předčasnému vytvrzení. Produkce výsledných kompozitních panelů či struktur je poté provedena za aplikace tlaku a zvýšené teploty, tedy obvykle lisováním. Mezi nejpoužívanější termosety patří epoxidy, fenoly, vinylestery a polyestery. Na přelomu 20. a 21. století byly aramidy a skelná vlákna s fenolovou pryskyřicí nejpoužívanějším materiálem pro výrobu kompozitních pancířů obrněných vozidel. [10]

Termoplasty neobsahují reaktivní chemické složky a mají snadnější skladovatelnost. Mohou být skladovány bez zmrazení a jelikož nedochází k vytvrzování, mohou být opětovně přivedeny do stavu taveniny a upravovány. Díky tomu mohou být snadno recyklovány. Díky tuhosti, tuhosti a chemické stabilitě mohou být využívány pro balistické účely, avšak vyšším teplotám odolávají hůře než termosety. Technologie nanášení filmu prepregu a výroba laminátu je obdobná jako u termosetů a probíhá pod vysokým tlakem za zvýšené teploty. Zástupci jsou polyuretan, polyethylen, pogumované elastomery či akryly. [1; 10]

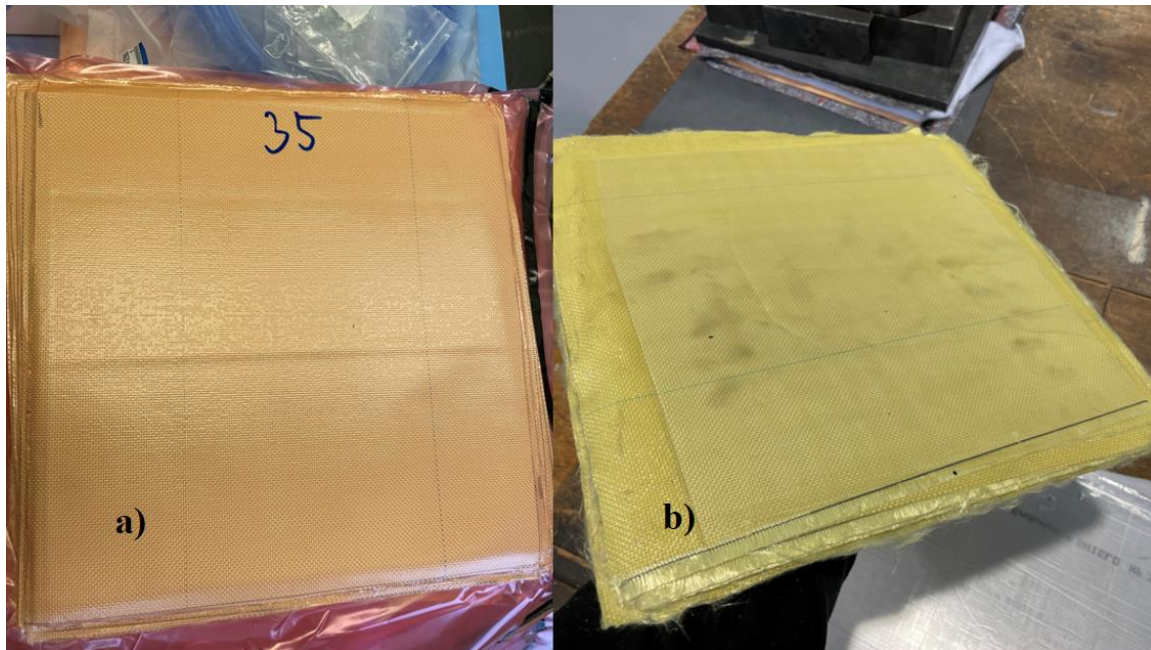
Pro výrobu kompozitních panelů s prepregem technologií lisování byl zvolen materiál Twaron CT 747 TH 110. Předimpregovaná vrstva TH 110 je na bázi polyolefinu a řadí se mezi termoplasty. Nastříhaná tkanina o rozměrech 350 x 350 mm byla připravena na požadovaný počet vrstev a následně hermeticky uzavřena a vakuována pro vyšší soudržnost a do určité míry eliminaci vzduchových kapes (snížení porozity). Folie použité k vakuování byly nepřilnavé vůči pryskyřicím a sloužily také jako separační vrstva. Finální vytlačení vzduchu ze struktury proběhla až následně během zátěže pod vysokým tlakem. Výroba panelu probíhala lisováním na trhacím stroji ZD 40, který má maximální tlak 400 kN. Materiál byl umístěn mezi předeřáté hliníkové desky s dvěma vnitřními okruhy (chladicí a topicí), na kterých byly umístěny z každé strany desky ocelové. Výrobní kroky byly následující:

1. Nahřátí lisovacích desek na 140 °C a předeřátí vzorku v peci na 120 °C.
2. Založení dílu do lisu mezi nahřáté desky a zatížení pod tlakem.
3. Výdrž pod tlakem za teploty 140 °C a síle 350 kN po dobu 20 minut.
4. Ochlazování na teplotu 80 °C, po dosažení této teploty odtížení.
5. Vyjmutí z lisu a dochlazení pod zátěží.

Dochlazení panelů pod zátěží probíhalo kvůli zabránění relaxaci materiálu. Výsledná struktura měla poměr vláken vůči matici 28:72. Vzhledem k množství zkoušek a testů, kterým byl materiál podroben, bylo panelů vyrobeno větší množství a příklady parametrů vyrobených panelů jsou v tabulce 6. Na obr. 42 je ukázka vakuované vrstvy před a po lisování.

Tab. 6 Příklady vyrobených panelů.

Počet vrstev	Tloušťka [mm]	Váha [kg]
60	27,9	3,72
30	13,3	1,92
38	15,2	2,41
25	10,4	1,52



Obr. 42 Materiál před (a) a po lisování (b).

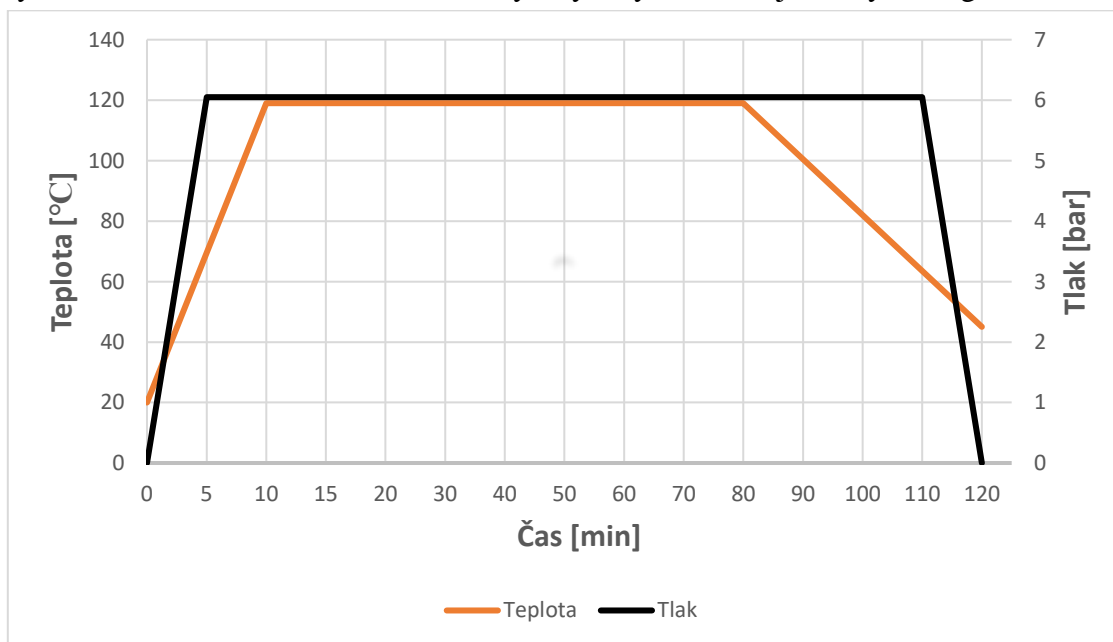
### 4.3 Autokláv

Pro výrobu a vytvrzování lisovaných panelů lze využít zařízení autokláv. Jedná se o zahřívanou tlakovou nádobu (obr. 43), umožňující vyvinout podmínky kontrolovaného tlaku a teploty, čímž lze velmi přesně kontrolovat výrobu. Je vhodný pro výrobu kompozitních panelů s využitím vrstvy prepregu, kdy jsou jednotlivé vrstvy v požadovaném počtu naskládány na sebe, vakuovány a uzavřeny v autoklávu. Rozsah použitelných pracovních teplot i tlaků se velmi liší podle typu zařízení a účelu (autoklávy se využívají např. k sterilizaci nástrojů), nicméně autoklávy jsou schopny dosahovat teplot od 120 °C až po zhruba 760 °C, a tlaku v rozsahu 275–69 000 kPa. Většina zařízení dokáže provést vakuování, tudíž vstupním objektem je pouze navrstvený materiál ve vakuovacím obalu. Další výhodou tohoto zařízení je rovnoměrné rozložení tlaku na povrch materiálu, díky čemuž je v kombinaci s vysokými teplotami a tlakem eliminováno riziko vzniku prázdných míst a jiných vad ve struktuře. Rozsah dosahovaných teplot (přes 120 °C) umožňuje výrobu matic z více teplotně odolných pryskyřic a umožňuje tak výrobu velmi pevných a díky vysokým tlakům a značné kompresi také lehkých kompozitů. Proces vytvrzování za vysokého tlaku a teploty trvá až několik hodin (v závislosti na tloušťce vrstvy a typu materiálu). Technologie výroby v autoklávu je účinná a kvalitní, ale poměrně neekonomická, jelikož vyžaduje velmi rychlý nástup vysokých teplot a tlaku. Využívá se zejména pro výrobu součástí pro letecký a kosmický průmysl. [1; 87]



Obr. 43 Zařízení autokláv [1].

Technologie výroby panelů v autoklávu byla zvolena pro materiál Twaron CT 747, s předem impregnovanou vrstvou termosetové pryskyřice ER 68. Jednalo se tedy také o materiál s vrstvou prepregu. Nejprve byl připraven požadovaný počet vrstev v daných rozměrech (350 x 350 mm), které byly vakuovány. Po vakuování byly umístěny do autoklávu, kde byly zatíženy tlakem 10 bar. Vytvrzování probíhalo za teploty 120 °C po dobu 1 hodiny (průběh na obr. 44). Touto technologií byly vyrobeny 3 panely, všechny po 30 vrstvách. Poměr vláken vůči matici ve výsledné struktuře činil 40:60. Průběh výroby a vytvrzování je zachycen v grafu na obr. 30.



Obr. 44 Průběh výroby a vytvrzování panelů v autoklávu.

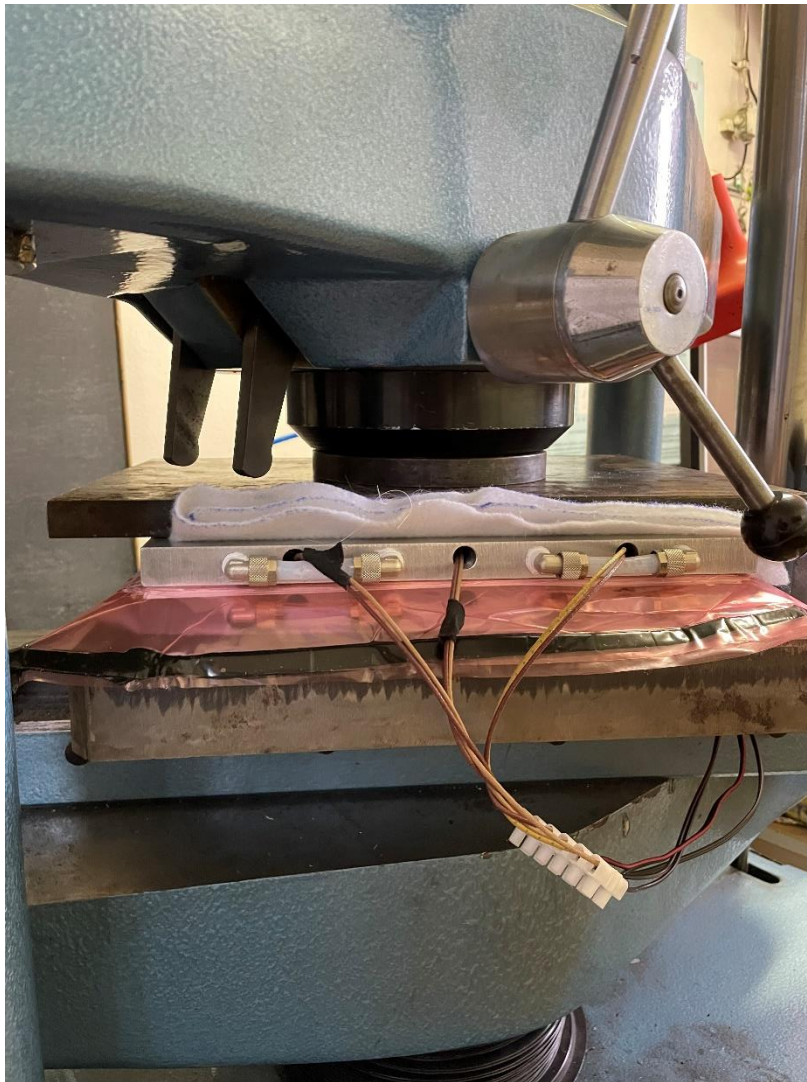
#### 4.4 Lisování Endumaxu

Pro výrobu zkušebních panelů z UHMWPE materiálu Endumax Shield XF33 bylo zvoleno lisování za zvýšené teploty. Endumax byl použit v podobě filmu, který je složen z UHMWPE pásek, uspořádaných v úhlech [0°, 90°], a termoplastické matrice polyolefinu, která je již obsažena ve struktuře filmu. Endumax obsahuje velmi nízké množství matrice, zhruba 10-20 %,

a většina struktury je tak tvořena polyethylenem. Materiál byl nastříhán na čtverce o rozměrech 350 x 350 mm a navrstvené vzorky byly vakuovány. Lisování probíhalo opět na trhacím stroji ZD 40 za zcela totožných podmínek jako při lisování vzorků s prepregem. Předehřev byl proveden pouze pro hliníkové lisovací desky, lisovaný materiál se v peci již nepředehřival. Lisovací síla činila 350 kN za teploty 140 °C po dobu 15-20 minut – v závislosti na počtu vrstev (do 25 vrstev probíhalo lisování 15 minut, nad 25 vrstev 20 minut). Po 15, respektive 20 minutách byl okruh ochlazen na 80 °C, došlo k odtížení a odebrání lisovaného panelu, který chladnul pod gravitačním zatížením ocelové desky, aby struktura neprošla relaxací. Lisovací aparatura je zachycena na obr. 45. Panelů bylo vyrobeno taktéž vyšší množství, pro ilustraci o tloušťkách a hmotnostech panelu je přiložena tabulka č. 7.

Tab. 7 Parametry vyrobených panelů z Endumaxu.

Počet vrstev	Tloušťka [mm]	Hmotnost [kg]
95	15,1	1,75
65	10,3	1,13



Obr. 45 Lisování na stroji ZD 40.

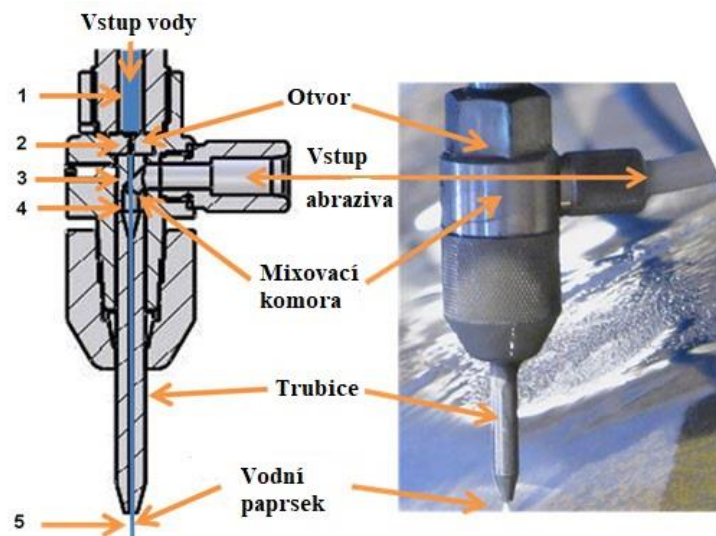
## 4.5 Řezání vodním paprskem

Pro jednotlivé zkoušky bylo nutno vyrobené panely připravit na požadované rozměry. Vzhledem k obtížné obrobiteľnosti tuhých a pevných vláknových kompozitů konvenčními metodami byla pro tento účel zvolena technologie řezání vodním paprskem. Použitým strojem byl Flow Mach 300. Zhotovené vzorky měly vzhledem k rozdílným účelům, na které byly posléze použity, různé rozměry.

Řezání vodním paprskem je v dnešní době velmi důležitou a používanou metodou dělení materiálu. Jedná se o erozivní proces povrchu hydroabrazivním paprskem a umožňuje vysoce přesné obrobení materiálů, které jsou jinými metodami velmi těžko proveditelné, a to i pro vyšší tloušťky materiálů. Při prvním doteku vysokoenergetického paprsku s materiálem dochází k vysoké koncentraci tlaku na velmi malé ploše, vzniká prohlubeň a startovací otvor, jež je dále prohlubován a výsledkem je řezná spára. Obrábět jím lze takřka všechny materiály, s výjimkou např. tvrzeného skla s vysokým vnitřním pnutím. Z pohledu obráběného materiálu nevzniká žádný odpadový materiál (tříška apod). Mezi nesporné výhody této technologie patří kromě širokého spektra tvrdých materiálů, které lze takto obrábět, také vysoká kvalita a přesnost řezu, studený řez (negeneruje se teplo a neexistuje tepelně ovlivněná oblast), vysoká produktivita (rychlejší než elektroerozivní obrábění), obrábění tvarově složitějších součástí a poměrně vysoká tloušťka řezu. Ta závisí na materiálu, obecně se udává limit kolem 250 mm, nicméně při speciálních konfiguracích lze řezat ocel o tloušťce až 450 mm. Vytvrzené kompozity lze bez poškození struktury jinou metodou obrobít jen velmi obtížně, jelikož může docházet k delaminaci, abrazi povrchu či okrajů materiálu a k tepelnému ovlivnění. Díky tomu je tato technologie pro uvedené typy pevných vláknových kompozitů ideální metodou. Rozlišují se dva základní typy: [13; 88]

- řezání čistým vodním paprskem,
- vodní paprsek s přísadou abraziva.

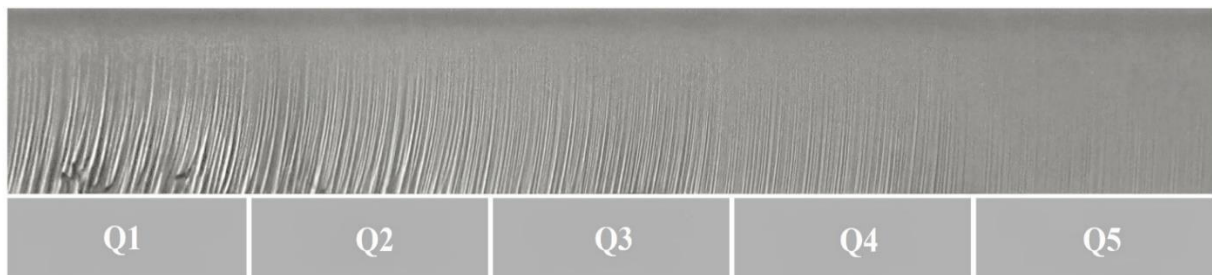
Technologie byla vyvinuta v 70. letech minulého století a s přidáváním abrazivní složky se začalo o něco později za účelem řezání skla a keramiky v rámci amerického vesmírného výzkumu. Princip technologie spočívá v abrazivním porušování děleného materiálu tlakem vodního paprsku. Paprsek vychází z trysky řezací hlavy (obr. 46) a hodnota pracovního tlaku je 800–1400 bar (lze však dosahovat až 6500 bar). Trysky jsou vyrobeny z vysoce pevných a oteruvzdorných materiálů, např. karbidu wolframu. Průměr vodního paprsku je v závislosti na typu trysky 0,075–2,5 mm a dosahuje nadzvukové rychlosti 1–4 mach. Tlak je vyvíjen tlakovými čerpadly, která jsou určena svým vodním průtokem a příkonem. [88]



Obr. 46 Schéma řezné hlavy [90].

Pro dělení nekovových materiálů (guma, lamináty, lepenka, papír) se používá čistý vodní paprsek. Rychlost řezání se odvíjí od materiálu – pro laminát se pohybuje kolem  $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , pro papír až  $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Při řezání kovových a jiných tvrdých materiálů (ocel, titan, slinutý karbid, kámen) se využívá přídavku abraziva do vodního paprsku. Je tím výrazně zvýšen tlakový řezací efekt, nicméně zvyšují se náklady jak na abrazivo samotné, tak na náročnější aparaturu, jelikož abrazivní tryska je přibližně čtyřikrát dražší než tryska na vodní paprsek. Jako abrazivo se používá např. safír, křemičitý písek, kubický nitrid boru či diamant. Řezná rychlost pro ocel se běžně pohybuje kolem  $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . [88]

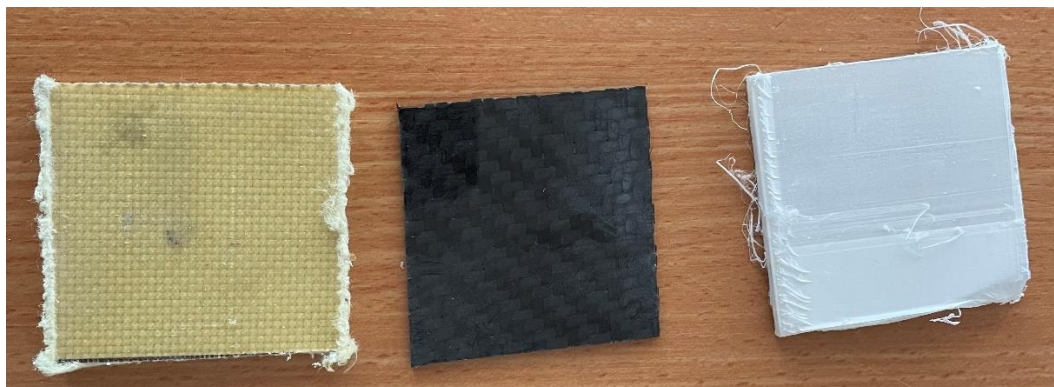
Kvalita řezu je ovlivněna posuvovou rychlostí řezací hlavy, tlakem paprsku a výškou obráběné součásti. Může docházet k ztrátě tlaku, projevující se odchýlením od skutečného směru proudu a řez má tak zaoblený tvar (stupně Q1 a Q2 na obr. 48). Rychlost posuvu a vzdálenost trysky od děleného materiálu má vliv na případný vznik zkosení řezné hrany. Řezání probíhá za studena a bez otřepů. Dosažitelná běžná přesnost řezu je  $\pm 0,2 \text{ mm}$  a aritmetická úchylnka profilu  $Ra 3,2$ , nicméně v nejmodernějších strojích lze dosahovat přesnosti až  $0,02 \text{ mm}$  na  $1 \text{ m}$  délky. Kvalitu řezu vyhodnocuje 5 kvalitativních stupňů (Q1-Q5), viz obr. 47, a detail řezu kompozitním panelem aramidu matricí s epoxidovou pryskyřicí je uveden na obr. 48. Ořezané vzorky pro Taylorův test jsou na obr. 49. [88; 91]



Obr. 47 Kvalitativní stupně řezu vodním paprskem [92].



Obr. 48 Detail řezu twaronového panelu vodním paprskem.



Obr. 49 Vzorky pro Taylorův test připravené vodním paprskem.

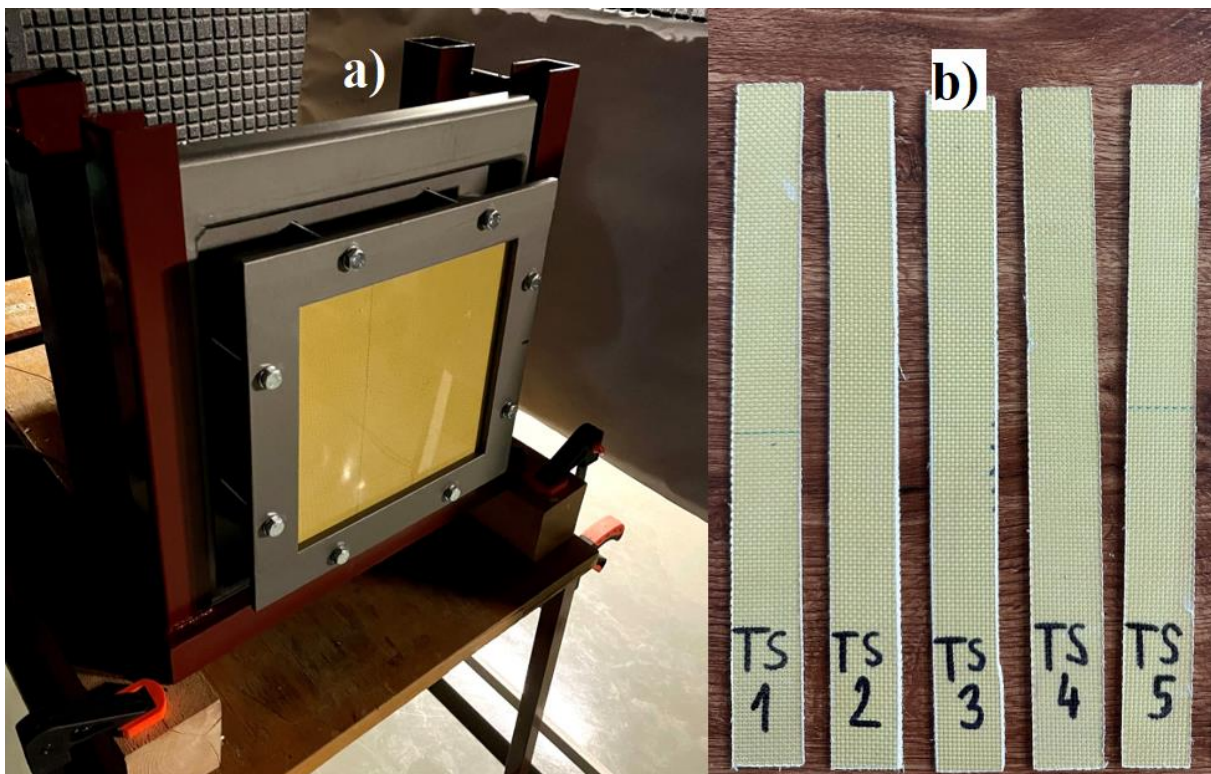
## 5 MECHANICKÉ A BALISTICKÉ ZKOUŠKY

Závěrečným úkolem a cílem této práce bylo zkoušení a následné zhodnocení mechanických a balistických vlastností vyrobených kompozitních panelů. Na základě výsledků zkoušek lze provést posouzení, zda jsou tyto materiály vhodné pro zamýšlené aplikace v balistické ochraně, případně dalších aplikacích s vysokými požadavky na materiál. Panely byly pro jednotlivé zkoušky obrobny (ořezány) na požadované rozměry do podoby čtvercových panelů a podélných pásek (obr. 50). Mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny na základě dvou provedených zkoušek:

- zkouška tahem,
- zkouška tříbodovým ohybem.

Pro vyhodnocení balistických vlastností byla využita ostrá munice, primárně projektil ráže 7,62 mm typu M80 (obr. 51), a byla provedena celkem dvě testování:

- balistický test na zařízení Taylorova testu,
- zkoušky na balistické zkušebně.



Obr. 50 Podoba materiálu pro zkoušky – čtvercové panely (a), pásky (b).



Obr. 51 Projektil M80 ráže 7,62 mm.

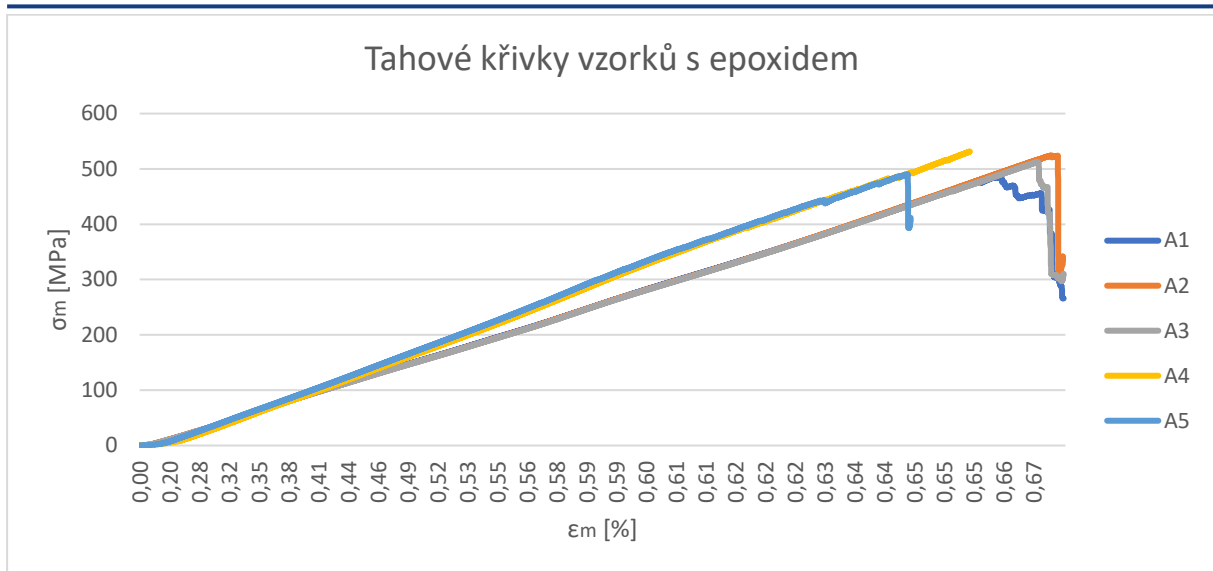
## 5.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem patří mezi základní zkoušky mechanických vlastností. Jedná se o zkoušku destruktivního charakteru, tedy dojde při ní k zničení testovaného vzorku. Testované těleso má obvykle kruhový či obdélníkový průřez a je uchyceno do čelistí zkušebního stroje. Sledována je působící zátěžová síla (dynamometr) a prodloužení zkušebního vzorku (pomocí průtahoměru nebo na základě pohybu příčnicku stroje). Výstupem této zkoušky je diagram napětí – deformace, odvozená z měřené závislosti síly a prodloužení. Z diagramu lze určit smluvní mez kluzu a mez pevnosti materiálu. [93]

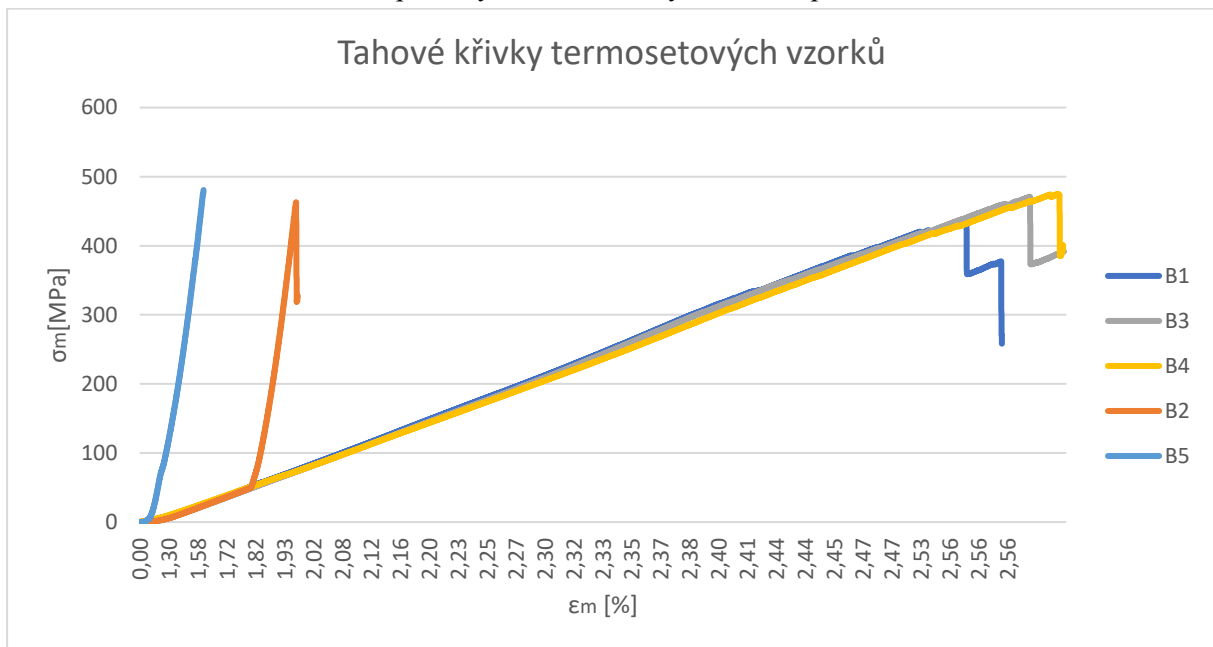
Tahová zkouška probíhala na stroji Zwick Z100. Testovány byly vzorky ze dvou materiálů, Twaron CT 747 s epoxidovou matricí LG 700 (vzorky A1–A5) a Twaron CT 747 s matricí termosetu ER 68 (vzorky B1–B5), přičemž od obou bylo zkoušeno pět vzorků. Rozměry zkušebních vzorků činily 25 x 250 mm a byly připraveny vodním paprskem. Vzorky byly složeny z 5 vrstev, odpovídající zhruba 2 mm tloušťky. V průběhu zkoušky byly uchyceny v upínacích čelistech zkušebního stroje (obr. 54). Byly měřeny hodnoty tahového napětí a délkového přetvoření. Maximální hodnoty těchto veličin pro jednotlivé vzorky, které tedy udávají hodnotu meze pevnosti v tahu  $\sigma_m$  včetně statistických veličin jsou uvedeny v tabulce 8 (hodnoty vzorků B2 a B5 nebyly ve statistických výpočtech zahrnuty). Hodnoty délkového přetvoření  $\varepsilon_m$  jsou vzhledem k nízkým hodnotám uvedeny v procentech. Tahové křivky vzorků jsou uvedeny níže v grafech (obr. 52 a 53) a stav termosetových vzorků po tahové zkoušce je zachycen na obr. 54. U vzorků B2 a B5 došlo při zkoušce k prokluzu vzorků v čelistech přípravku a jejich data tedy nejsou relevantní, jelikož téměř nedocházelo k nárůstu síly, ale prodloužení bylo na základě prokluzu dále měřeno. Graficky je to patrné na obr. 47. Vyšších hodnot mezi pevnosti dosahovaly vzorky s matricí epoxidové pryskyřice – v průměru o 9 % a nejvyšší hodnotou bylo 531,5 MPa vzorku A4. Vzorky s termosetovou matricí vykázaly vyšší hodnoty přetvoření, v průměru téměř čtyřnásobně (nejvíce vzorek B1 – 2,56 %).

Tab. 8 Výsledky tahové zkoušky.

Vzorek	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_m$ [%]	Vzorek	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_m$ [%]
A1	485,6	0,018	B1	438,4	2,562
A2	524,5	0,672	B2	462,7	356,738
A3	512,4	0,096	B3	470,9	1,218
A4	531,5	0,102	B4	474,9	0,45
A5	490,5	0,906	B5	480,7	
$\bar{x}$	508,9	0,359		465,5	1,410
$s_x^2$	329,2	0,130		218,6	0,762
$s_x$	18,1	0,360		14,8	0,873



Obr. 52 Grafické průběhy tahové zkoušky vzorků s epoxidovou maticí.



Obr. 53 Grafické průběhy tahové zkoušky vzorků s termosetovou maticí.



Obr. 54 Průběh tahové zkoušky a termosetové vzorky po zkoušce.

## 5.2 Zkouška ohybem

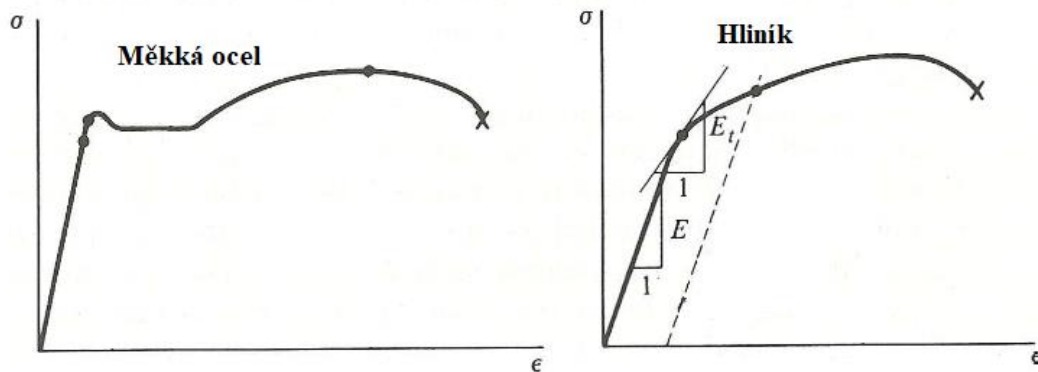
Zkouška ohybem se řadí mezi běžné zkoušky mechanických vlastností, přičemž se také jedná o zkoušku destruktivního charakteru. Zkušební vzorek, obvykle kruhového či obdélníkového průřezu, je uchycen mezi dvě podpory (většinou válečky). Zkušební stroj poté vyvíjí tlakové zatěžování doprostřed tělesa (tříbodový ohyb). V případě čtyřbodového ohybu působí dva trny zkušebního stroje ve dvou místech vzorku, která jsou rozložena symetricky ke středu tyče. Měřeným aspektem je průhyb tělesa (přemístění jeho středu) vzhledem ke krajním podporám. Cílem zkoušky je získání závislosti průhybu tyče na síle a získaným atributem materiálu je mez pevnosti v ohybu. [93]

Zkouška byla provedena na stejném stroji, jako zkouška tahová, tedy Zwick 100, avšak s jiným přípravkem. Jednalo se o tříbodový ohyb, kdy vzorky byly položeny na dvou podporách a zatíženy trnem (obr. 57). Testovány byly vzorky ze všech materiálů použitých v experimentální části práce – Twaron s matricí termoplastu (vzorky označeny A1–A5), termosetu (B1–B5), epoxidové pryskyřice (C1–C5) a Endumax (D1–D5). Od každého materiálu bylo zkoušeno pět vzorků, připravených na vodním paprsku, jejichž rozměry činily 15 x 80 mm. Tloušťka vzorků byla zhruba 5 mm a složena byla z 10 vrstev pro Twaron a 30 vrstev v případě Endumaxu. Výsledné naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 9 a 10, grafická znázornění průběhu napětí a deformace jsou na obr. č. 58–61. V tab. 9 a 10 jsou uvedeny dvě hodnoty pro modul pružnosti –  $E_{fn}$  (automatická hodnota určená softwarem) a  $E_{fv}$ , určená výpočtem. Stanovit modul pružnosti pro kompozity je obtížné, jelikož je složité správně určení mezi přetvoření, v rámci kterých je vyhodnocována hodnota modulu pružnosti, protože grafické průběhy nemají např. v porovnání s kovy tak striktní a jednoznačný průběh. Srovnání materiálů s a bez výrazné meze kluzu lze vidět na obr. 55, kde je u křivky hliníku naznačena tečna křivky. Kompozity mají průběh podobný (obr. 56). Z toho plyne vysoký rozptyl modulů u jednotlivých vzorků jednak v rámci hodnot určených programem, ale zejména při srovnání těchto hodnot s hodnotami vypočtenými. Pro zhodnocení výsledků budou uvažovány hodnoty dopočítané, hodnoty určené softwarem zkoušky nebyly počítány správně a jsou nerelevantní. Výpočet hodnot  $E_{fv}$  byl prováděn dle následujícího vzorce pro hledání směrnice křivky  $\sigma$ - $\varepsilon$ :

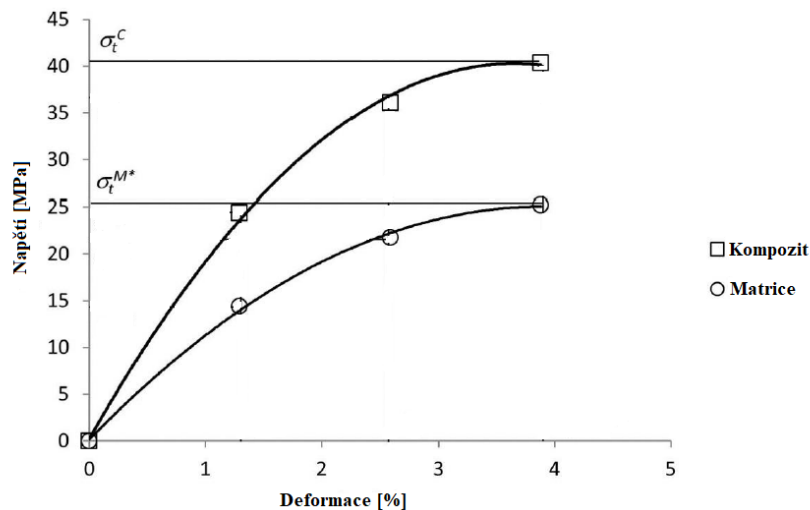
$$E_{fv} = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}, \quad (2.2)$$

kde:  $\sigma_{f2}$  – napětí horní meze [MPa],

$\sigma_{f1}$  – napětí spodní meze [MPa],  
 $\varepsilon_{f2}$  – přetvoření horní meze [-],  
 $\varepsilon_{f1}$  – přetvoření spodní meze [-].



Obr. 55 Srovnání diagramu napětí-deformace oceli a hliníku [94].



Obr. 56 Srovnání typické křivky napětí-deformace matrice a kompozitu [95].

Vždy je přiložen graf jednoho testovaného vzorku daného kompozitu, přičemž uvedená křivka má typický průběh ohybové zkoušky pro daný materiál v rámci provedeného měření. Ve většině grafů lze pozorovat počáteční téměř nulový nárůst napětí, který byl zřejmě způsoben prokluzem a vystředěním přípravku. Dále je u některých grafů (zejména u termoplastových vzorků A) patrné viditelné kolísání (místa téměř oscilování) hodnot. Bylo zapříčiněno delaminací vzorků během zkoušky, kdy se postupně jednotlivé vrstvy oddělovaly a napětí při tomto procesu tedy mírně kolísalo vlivem poklesu a následného nárůstu při delaminaci jednotlivých vrstev. Principiálně se průběhy jednotlivých vzorků daných matric příliš nelišily. Grafické průběhy všech ostatních vzorků jsou uvedeny v přílohách. Srovnání vzorků před a po provedení zkoušky je uvedeno na obr. 62.



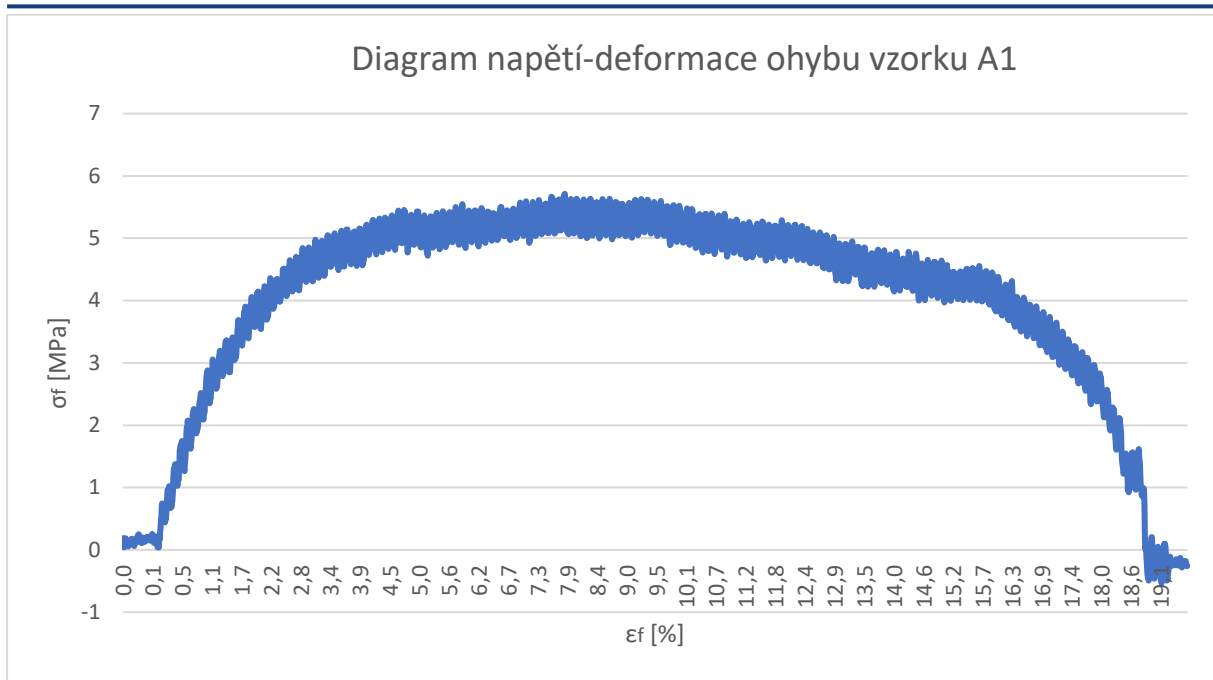
Obr. 57 Průběh ohybové zkoušky.

Tab. 9 Přehled výsledků ohybové zkoušky Twaronu s termoplastem a termosetem.

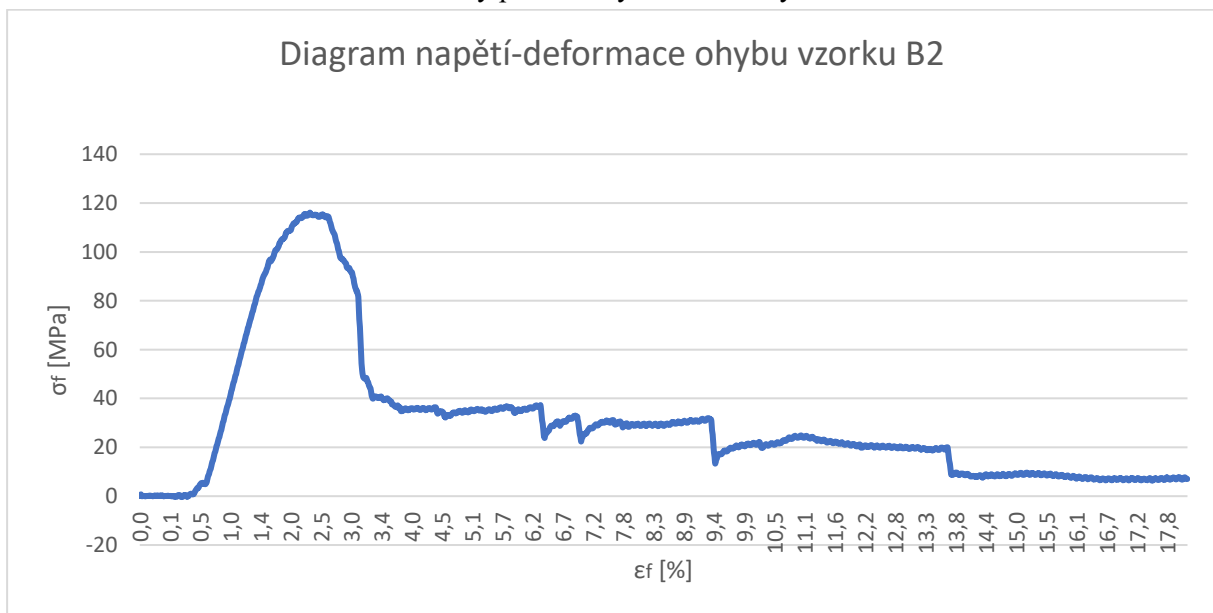
Vzorek	$E_{fn}$ [MPa]	$E_{fv}$ [MPa]	$\sigma_{fC}$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\varepsilon_{fm}$ [%]		$E_{fn}$ [MPa]	$E_{fv}$ [MPa]	$\sigma_{fC}$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\varepsilon_{fm}$ [%]
A1	370,9	129,2	5,3	5,7	7,8	B1	1813,4	9884,2	89,0	113,6	1,5
A2	461,4	201,2	7,2	7,9	6,1	B2	455,0	6652,4	35,9	116,1	2,3
A3	415,2	283,9	7,7	8,5	9,3	B3	360,4	5543,3	60,1	114,9	2,8
A4	243,9	145,6	5,2	5,3	6,8	B4	1423,0	7444,2	76,8	123,6	2,8
A5	147,4	140,1	6,6	6,9	6,5	B5	546,9	6705,8	66,9	117,5	2,7
$\bar{x}$	327,8	180,0	6,4	6,9	7,3		919,7	7246,0	65,7	117,1	2,4
$s_x^2$	11390,5	3320,1	1,0	1,5	1,3		343964,5	2108549,4	317,5	12,1	0,2
$s_x$	115,7	57,6	1,0	1,2	1,1		586,5	1452,1	17,8	3,5	0,5

Tab. 10 Přehled výsledků ohybové zkoušky Twaronu s epoxidovou pryskyřicí a Endumaxu.

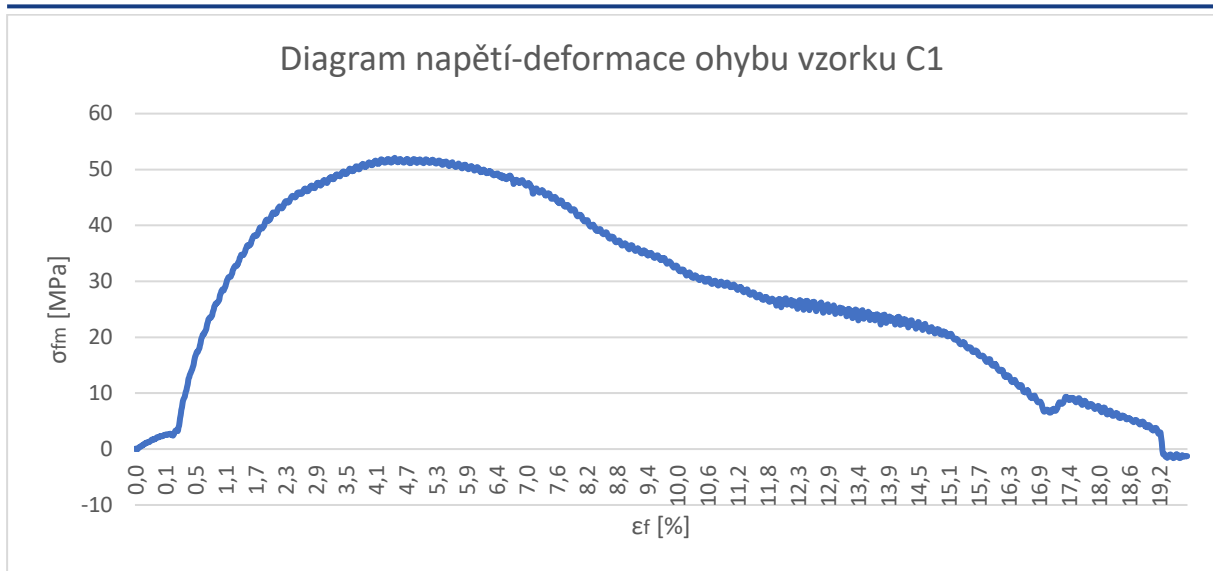
Vzorek	$E_{fn}$ [MPa]	$E_{fv}$ [MPa]	$\sigma_{fC}$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\varepsilon_{fm}$ [%]		$E_{fn}$ [MPa]	$E_{fv}$ [MPa]	$\sigma_{fC}$ [MPa]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\varepsilon_{fm}$ [%]
C1	2678,5	1194,8	50,5	52,1	4,4	D1	2034,9	3109,3	26,8	49,4	1,7
C2	2479,8	1204,2	48,7	53,5	10,7	D2	1073,3	2999,1	21,4	48,0	1,9
C3	2848,5	710,7	53,3	57,6	8,6	D3	127,1	3396,2	22,4	49,8	1,8
C4	2196,3	833,4	50,7	51,8	6,9	D4	1425,6	3369,5	22,4	49,6	1,8
C5	1869,5	830,4	44,9	45,6	5,7	D5	869,4	3313,1	16,3	46,3	1,6
$\bar{x}$	2414,5	954,7	49,6	52,1	7,3		1106,1	3237,4	21,9	48,6	1,8
$s_x^2$	121375,6	41919,7	7,8	14,9	4,8		396041,0	24318,9	11,2	1,8	0,0
$s_x$	348,4	204,7	2,8	3,9	2,2		629,3	155,9	3,3	1,3	0,1



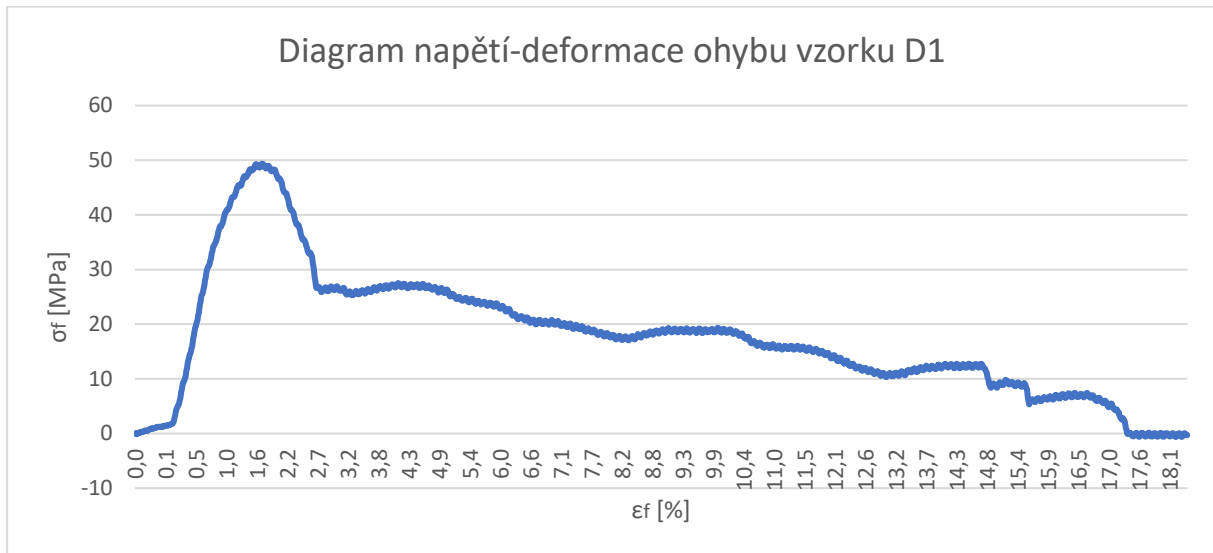
Obr. 58 Grafický průběh ohybové zkoušky vzorku A1.



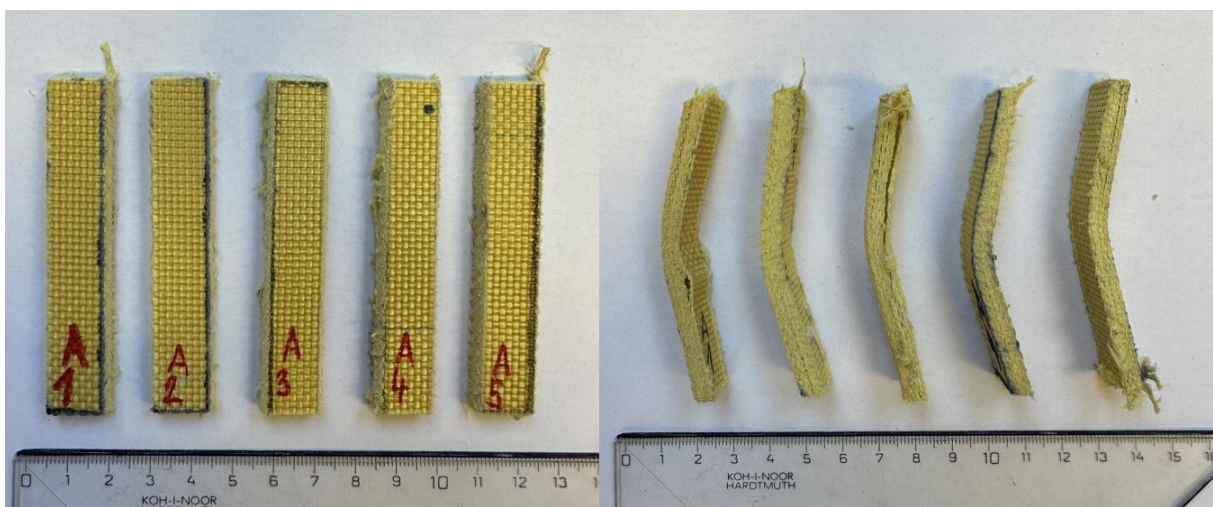
Obr. 59 Grafický průběh ohybové zkoušky vzorku B2.



Obr. 60 Grafický průběh ohybové zkoušky vzorku C1.



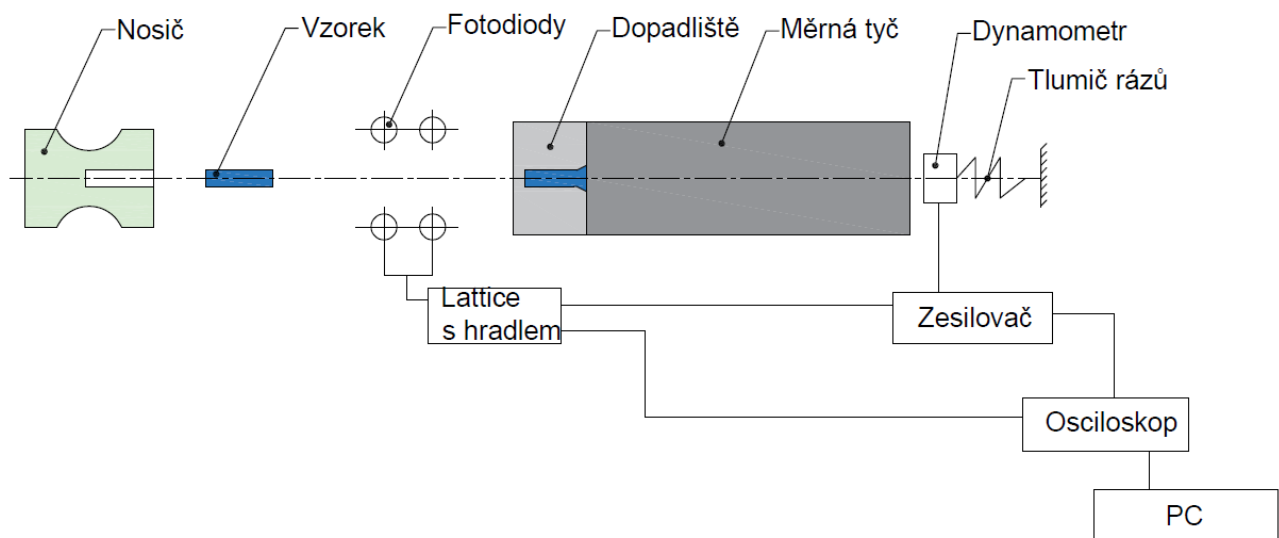
Obr. 61 Grafický průběh ohybové zkoušky vzorku D1.



Obr. 62 Twaronové vzorky s termoplastovou maticí před a po ohybové zkoušce.

### 5.3 Taylorův test pro vyhodnocení balistické ochrany

Taylorův test je jednou z metod zkoušek materiálu za vysokých rychlostí deformace. Test má charakter kompresní rázové zkoušky a je řazen mezi zkoušky dynamické. Princip spočívá v nastřelení impaktoru válcového tvaru proti tuhému tělesu. Nastřelení probíhá v pneumatickém kanonu, kdy je impaktor umístěn do nosiče (obvykle z polystyrenu) a stlačeným vzduchem urychlen směrem k dopadlišti (rychlost do  $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Během urychlení je impaktor oddělen od nosiče a následně narazí do měrné tyče, která je snímána tenzometry. Měrná tyč je z pevnostní oceli (13 240) a je nutné, aby se během nárazu tělesa chovala elasticky bez plastické deformace. Náraz vyvolá v tyči tlakový elastický impuls, který je zaznamenán tenzometry tyče. Výstupní napětí je přes zesilovač zaznamenáno do osciloskopu a data jsou dále vyhodnocována počítačem. Fotodiodami je také měřena dopadová rychlost impaktoru. Obecně je schéma Taylorova testu znázorněno na obr. 63. [96; 97]



Obr. 63 Schéma Taylorova testu [dle 96].

V rámci experimentu bylo použito zařízení pneumatického kanonu s konfigurací pro Taylorův test (obr. 64) ve školní laboratoři ÚST FSI VUT pro stanovení míry balistické odolnosti vyrobených kompozitních panelů. Nejednalo se tedy o klasický Taylorův test s měřením impulsů, nicméně vzhledem k tomu, že balistické materiály čelí nárazům munice ve vysokých rychlostech, je použití testovací metody z řady dynamických zkoušek vhodné. Cílem bylo ověřit, jak budou vzorky materiálu reagovat na balistický impakt, a výsledky vyhodnotit s ohledem na normu US Standard NIJ 0101.06. Na základě odezvy materiálu a uvedené normy lze stanovit mezní tloušťku materiálu, která bude vyhovovat kritériím, jelikož proces vývoje balistické ochrany hledá hmotnostně co nejlehčí vrstvu materiálu, která ještě bude splňovat požadavky. Jako impaktor byla zvolena munice ráže 7,62 x 51 mm typu M80 s celokovovým pláštěm o váze 9,55 g (obr. 65). Testovány byly vzorky ze všech tří materiálů, které byly použity v rámci experimentální části této diplomové práce k výrobě testovacích panelů, tedy Twaron CT 747 (matrice epoxidová pryskyřice LG 700), Twaron CT 747 TH 110 s prepregem a Endumax Shield XF33. Přehled testovaných vzorků je v tabulce č.11. Testování proběhlo začátkem roku 2022.



Obr. 64 Zařízení Taylorova testu.



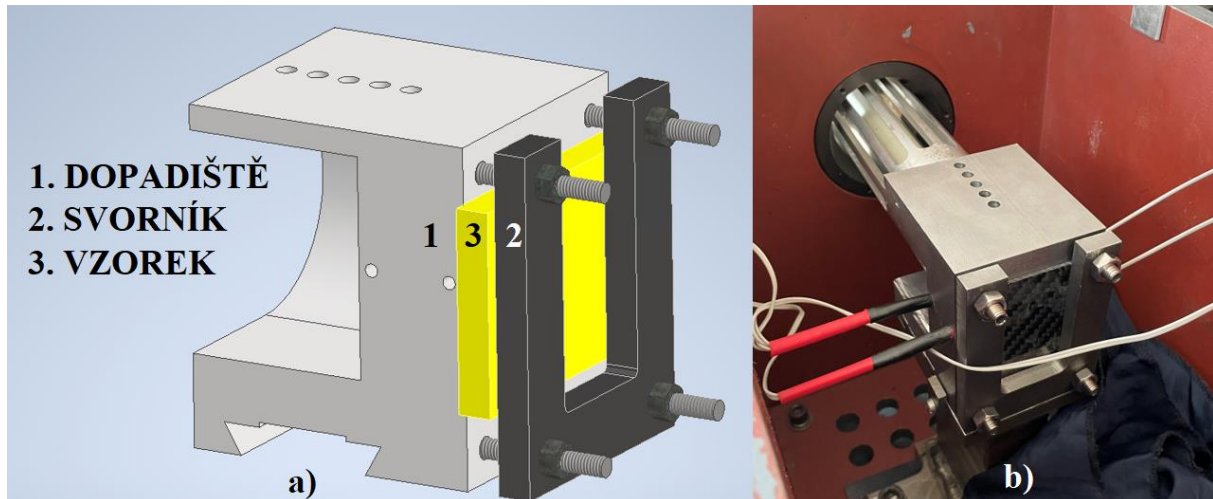
Obr. 65 Připravené impaktory v unašečích.

Tab. 11 Přehled testovaných vzorků Taylorovým testem.

Materiál	Označení vzorku	Rozměr vzorku [mm]	Počet vrstev	Tloušťka [mm]	Hmotnost [g]
Twaron CT 747 (LG 700)	A1	60 x 60	33	14,7	62,8
	A2	60 x 60	21	9,9	43,3
Twaron CT 747 (ER 68)	B1	60 x 60	38	15,2	70,9
	B2	60 x 60	25	10,4	44,7
Endumax Shield XF33	C1	60 x 60	95	15,1	51,4
	C2	60 x 60	65	10,3	33,1

Pro experiment bylo provedeno několik konstrukčních modifikací. Polystyrenový unašeč byl z důvodu jiného typu a velikosti impaktoru nahrazen unašečem vytisknutým na 3D tiskárně

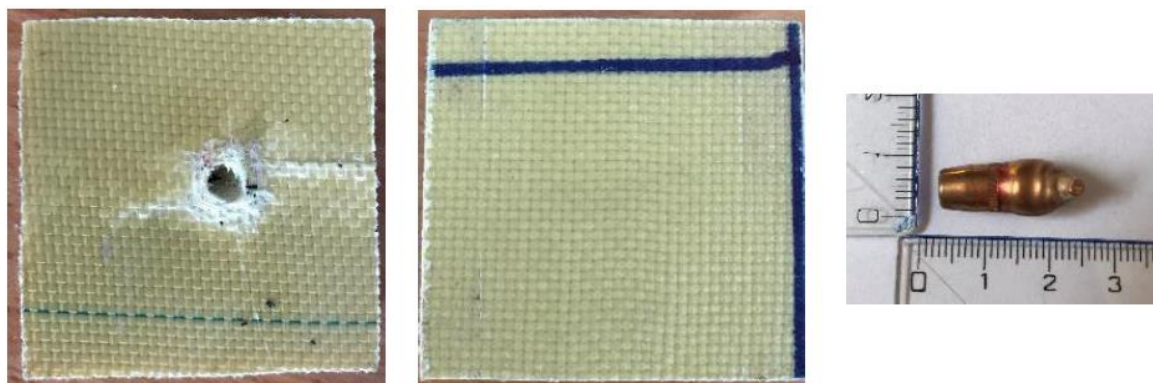
Creality Ender 5 ze standardního PLA filamentu. Drobné konstrukční úpravy byly provedeny na dopadišti – bylo nutno přidat otvory na bočních stranách pro zapojení snímačů a na přední straně přidat díry se závitem pro upevnění přípravku. K nově navrženému dopadišti byla na základě 3D modelu v programu Autodesk Inventor zhotovena výkresová dokumentace, podle které byla provedena výroba kombinovaně na frézce a CNC stroji. Konstrukčním materiálem byla ocel 11 600. Pro testované vzorky bylo nutno navrhnout přípravek pro upnutí v dané pozici a zároveň umožnit případné snímání vysokorychlostní kamerou při pohledu seshora. Upínací systém přípravku využíval pro spojení dopadiště a upínky závitové tyče, a jeho návrh byl opět proveden v programu Inventor. Upínka byla vyrobena na frézce na základě výkresové dokumentace (výkresy přiloženy v přílohách). 3D vizualizace dopadiště a přípravku je na obr. 66 a), stejně jako již zhotovené kusy umístěné na zařízení Taylorova testu – obr. 66 b).



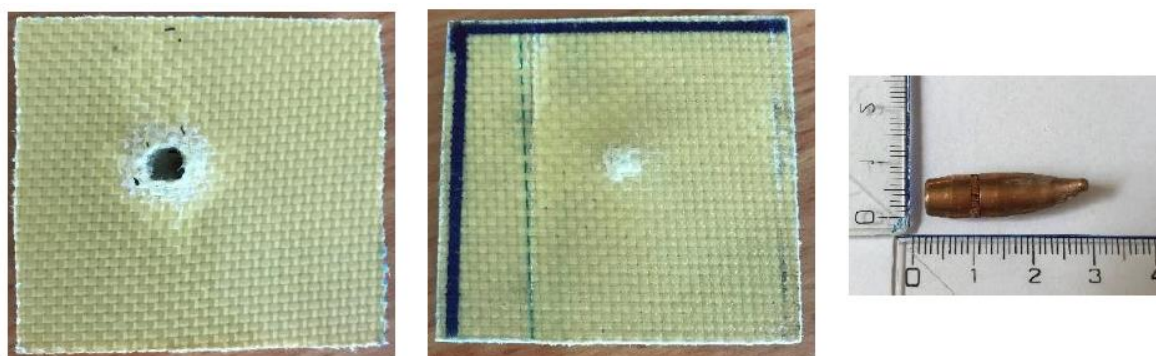
Obr. 66 3D model dopadiště a přípravku (a) a reálné umístění na zařízení Taylorova testu (b).

Naměřená dopadová rychlost náboje na vzorky se nacházela v rozmezích  $149\text{--}152\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zjištěné výsledky shrnuje tabulka č.8. Z ní je patrné, že kromě endumaxového vzorku C2, kdy došlo ke kompletní perforaci, všechny ostatní vzorky dokázaly projektil zastavit. Po výstřelu byla patrná deformace na zadní straně panelu (traumatický efekt), což je důsledek absorpce kinetické energie. Velikost tohoto vyboulení byla následně měřena, jelikož dle normy NIJ 0101.06 je to kritériem vyhodnocení, zda materiál je či není vyhovující vůči dané hrozbě (danému kalibru). Norma udává maximální přípustnou velikost traumatického efektu 44 mm, při překročení této hodnoty může dojít k fatálnímu poškození tkání a orgánů a materiál je vyhodnocen jako nevyhovující. Při pohledu na tabulku lze vidět, že tuto normu splnily všechny vzorky, avšak vzorek C2 byl prostřelen kompletně, tudíž je vyhodnocen negativně. Mechanismy poškození byly zejména delaminace, dále přetržení, natahování a vytažení vláken ze struktury kompozitu. Výsledky testů jsou shrnuty v tabulce č. 12.

Vzorky A1 a A2 z Twaronu s matricí epoxidové pryskyřice LG 700 při zkoušce obstály – nebyly prostřeleny kompletně a velikost traumatického efektu vyhověla normě NIJ 0101.06. U vzorku A1 byl traumatický efekt nulový, tudíž jeho parametry nelze považovat za mezní tloušťku (předimenzování). Vzorek A2 měl velikost traumatického efektu 12,7 mm a v rámci testovaných vzorků z tohoto materiálu tak lze říci, že tloušťka 9,9 mm panelu s 21 vrstvami je tloušťkou limitní. Foto přední a zadní strany vzorků po testu je na obr. 67, resp. 68. Přiloženo je také foto deformovaného projektilu.



Obr. 67 Přední a zadní strana vzorku A1 a projektil po testu.



Obr. 68 Přední a zadní strana vzorku A2 a projektil po testu.

Termoplastové vzorky B1 a B2 taktéž nebyly penetrovány skrze celou tloušťku a velikost jejich traumatického efektu vyhověla normě. U obou vzorků došlo k zachycení náboje ve struktuře (jak lze vidět na obr. 69 a 70). U vzorku B2 došlo k poškození zadní vrstvy materiálu (byla viditelná špička náboje, viz obr. 70). Vzhledem k tomu, že oba vzorky tohoto materiálu vyhověly velikostí traumatického efektu normě, ale vzorek B2 je o 4,8 mm tenčí, a o téměř 37 % lehčí, lze vzorek B2 s 25 vrstvami a tloušťkou 10,4 mm prohlásit za mezní vrstvu v rámci testovaných vzorků.



Obr. 69 Přední a zadní strana vzorku B1 po testu.



Obr. 70 Přední a zadní strana vzorku B2 po testu.

Jako poslední byly testovány vzorky z Endumaxu. Vzorek C1 o 95 vrstvách zachytil projektil ve struktuře a velikost traumatického efektu 9,4 mm (obr. 71) vyhověla normě NIJ 0101.06. Vzorek C2 s 65 vrstvami byl perforován skrz celou tloušťku, a tudíž byl vyhodnocen jako nevyhovující normě. Pro určení mezní tloušťky by bylo vhodné otestovat ještě další vzorky s počtem vrstev mezi 65 a 95, např. 80 vrstev. Vzorky z Endumaxu měly vyšší míru deformace zadní stěny, respektive deformace skrz celou tloušťkou ve smyslu vyboulení ve směru pohlcení kinetické energie. Vychází z deformační povahy UHMWPE materiálů a je zde patrná zejména výrazná delaminace. V rámci dimenzování tloušťky bylo vyrobeno a otestováno několik tenčích panelů, které byly prostřeleny skrz povětšinou bez výraznějšího traumatického efektu, a nebyly tak pro nízkou vypovídající hodnotu zahrnuty do výsledků. Jedním z nich je panel z Endumaxu o 30 vrstvách s tloušťkou 4,5 mm. Na obr. 72 je možno vidět, jak vypadal po testování. Je vidět velmi výrazná delaminace a přetržená vlákna vyvléknutá (vytržená) z celistvé struktury. Uveden je zde z důvodu dobré ilustrace mechanismu poškození panelů z Endumaxu. Vzorek C2 kvůli průstřelu vypadal prakticky totožně.



Obr. 71 Přední a zadní strana vzorku C1.



Obr. 72 Detail delaminace Endumaxu.

Tab. 12 Vyhodnocení vzorků po Taylorově testu.

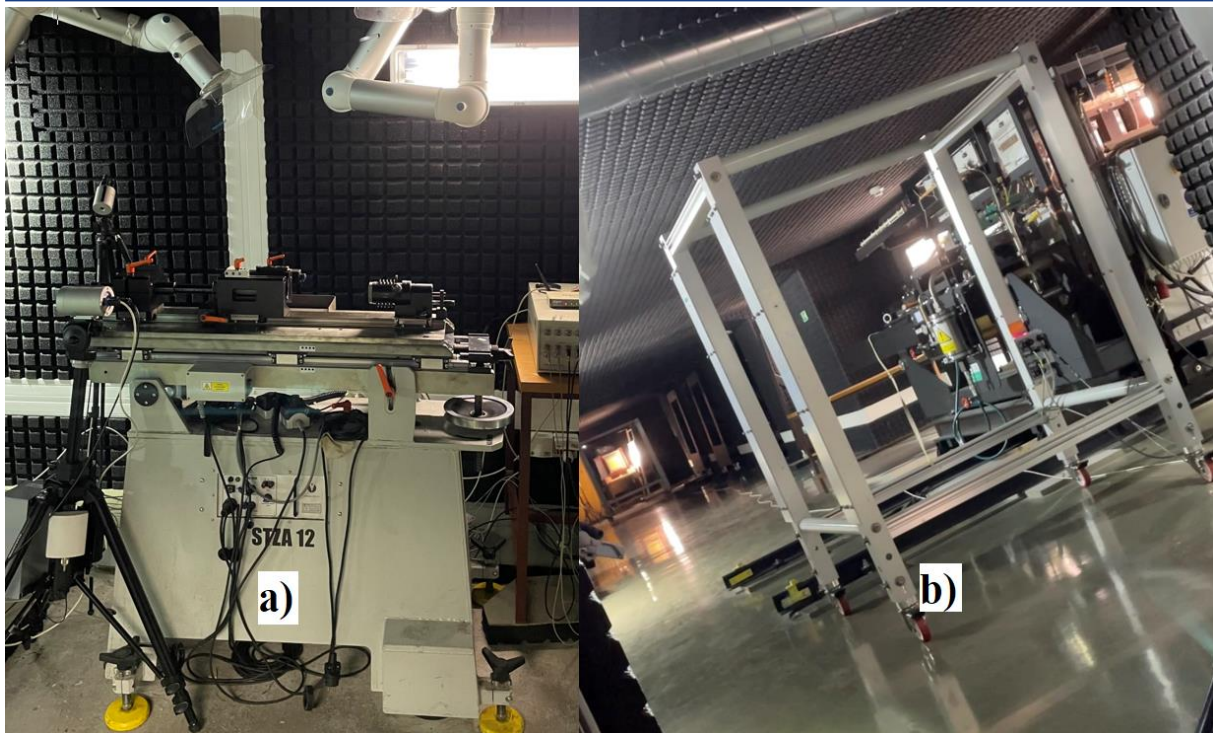
Materiál	Označení vzorku	Počet vrstev	Tloušťka [mm]	Dopadová rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Traumatický efekt [mm]	Splnění normy NIJ 0101.06
Twaron CT 747 (LG 700)	A1	33	14,7	149,5	0,0	ANO
	A2	21	9,9	149,8	12,7	ANO
Twaron CT 747 (ER 68)	B1	38	15,2	150,2	8,1	ANO
	B2	25	10,4	150,6	15,8	ANO
Endumax Shield XF33	C1	95	15,1	149,9	9,4	ANO
	C2	65	10,3	151,7	22,6	NE

#### 5.4 Zkoušky na balistické zkušebně

Vzhledem k tomu, že zamýšlená aplikace popisovaných materiálů je balistická ochrana, bylo v rámci testování a zkoušek nutné zkušební panely vystavit impaktu, který skutečně odpovídá reálné hrozbě střelných zbraní nejen podobou impaktového tělesa, ale také úst'ovou rychlostí. Takovou zkouškou byl test balistickou zbraní. Probíhal během roku 2021 v balistické zkušebně na Katedře zbraní a munice Univerzity obrany v Brně.

Testovány byly kompozitní panely z Twaronu vytvrzeného epoxidovou pryskyřicí LG 700, Twaron s prepregem termoplastu TH 110 a Twaron CT 747 ER 68 impregnovaný termosetem. Technologii vodního paprsku byly vyrobené panely o rozměru 350 x 350 mm oříznuty na rozměr 300 x 300 mm. Upevněny byly v kovovém rámu. Jako testovací munice byly zvoleny 3 různé typy střel. Střela M80 ráže 7,62 x 51 mm s celokovovým pláštěm a dva typy střel ráže 5,56 x 45 mm – M193 (celokovový plášť s olověným jádrem) a SS109 s ocelovým jádrem. Cílem bylo ověřit odolnost kompozitních panelů s ohledem na standard NATO AEP-55 STANAG 4569. Ta je zaměřena na ochranu posádky logistických a lehce pancéřovaných vozidel a má 5 úrovní (stupňů) ochrany. Prováděný experiment byl dimenzován na úroveň ochrany 1, tedy úroveň proti útočným puškám se standardní municí ráží 5,56 a 7,62 mm na vzdálenost 30 m (standard jmenovitě definuje tuto úroveň vůči třem výše jmenovaným typům projektilů). Norma zahrnuje také definici ochrany vůči střepinám dělostřeleckých granátů a výbušných zařízení (miny apod.). [46; 98]

Testovací zařízení se skládalo z mobilní střelecké stolice STZA 12M1 (obr. 73 a), na které byla připevněna balistická hlaveň se závěrem (univerzální typ UZ-2002), na jejíž úrovni byl umístěn balistický radar, měřící úst'ovou rychlost projektilu (systém DRS 01 na měření Dopplerova jevu). Balistická hlaveň (Prototypa-ZM) je vyměnitelná a umožňuje vystřelení vícero ráží munice. Ve vzdálenosti 2,5 m před hlavní a 2,5 m před panelem byly umístěn optoelektronické rámy Kistler 2521 A (obr. 73 b), které pomocí laseru měřily rychlost náboje. Vzdálenost mezi ústím hlavně a testovaných kompozitních panelů činila 25 m. Panely byly pro zachycení průběhu interakce s projektilem během impaktu snímány vysokorychlostní kamerou Photron SA-Z.



Obr. 73 Střelecká stolice STZA 12 M1 (a) a rám Kistler 2421 A (b).

Prvním testovaným materiálem byl panel Twaronu vyrobený vakuovou infuzí s matricí epoxidové pryskyřice LG 700. Testovaný panel měl poměrně velkou tloušťku 74,1 mm a skládal se ze 140 vrstev, přičemž jeho váha činila 8,5 kg. Panel byl uchycen do kovového rámu ve vzdálenosti 25 m od hlavně. Celkem do něj byly vystřeleny tři rány tří různých nábojů, aby byly otestovány všechny tři výše uvedené projektily, definované normou AEP-55 STANAG 4569. Tento panel obstál vůči všem třem výstřelům a nedošlo k jeho penetraci. Náboje prorazily pouze přední vrstvy, kde došlo k poškození struktury v místě nárazu (zejména delaminaci předních vrstev). Nebyla pozorována deformace zadní strany panelu, tudíž velikost traumatického efektu byla nulová. Z toho důvodu bylo přistoupeno k testování tenčího panelu z totožného materiálu, a sice k panelu z 90 vrstev o tloušťce 47,9 mm a váze 5,6 kg. Byly vystaveny dvěma střelám ráže 7,62 x 51 mm (M80). Zde již došlo k vytvoření traumatického efektu na zadní straně, který však byl mírný (v řádech jednotek mm) a vyhověl třetímu stupni normy NIJ 0101.06, kterou je definována maximální velikost traumatického efektu na 44 mm. Tuto vrstvu tak lze ze skupiny zkoušených tloušťek prohlásit za mezní a testování střelami ráže 5,56 mm nebylo vzhledem k jejich výrazně nižší kinetické energii nutné – kinetická energie střely ráže 7,62 mm typu FMJ M80 měla oproti střele 5,56 mm typu FMJ M193 kinetickou energii více než dvojnásobnou (3250 J versus 1567 J). Dobrých balistických výsledků bylo dosaženo díky vysoké tvrdosti matrice epoxidové pryskyřice, čímž docházelo k větší deformaci střely a rozložení sil. Přední strana panelu z 90 vrstev je na obr. 75, kde je zachycena po prvním výstřelu (na fotografii je místo vstupu střely do materiálu označeno číslem 1). Zadní strana panelu s lehce viditelným traumatickým efektem, jehož místo je šipkami označeno, je na obr. 76.

Díky měření rychlosti projektilu před nárazem do panelu bylo možno určit velikost kinetických energií střel. Ta byla určena standardním výpočtem pro kinetickou energii:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (5.3)$$

kde:  $m$  – hmotnost střely [kg],

$v$  – rychlost střely před nárazem [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ].

Pro ukázkový výpočet budou použity hodnoty pro první výstřel, který byl proveden střelou 5,56 x 45 mm M193. Její hmotnost činí 3,55 g a naměřená rychlost před nárazem činila 946,4 m·s<sup>-2</sup>. Po dosazení do vzorce:

$$E_{k1} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2$$

$$E_{k1} = \frac{1}{2} \cdot 3,55 \cdot 946,4^2$$

$$E_{k1} = 1589,8 J.$$

Obdobným způsobem byly určeny kinetické rychlosti všech ostatních střel během balistických zkoušek. Přehled testovaných panelů vyrobených technologií vakuové infuze a příslušných typů střel, jejich rychlostí před nárazem a kinetických rychlostí je uveden v tab. 13.

Tab. 13 Přehled zkušebních výstřelů do panelů s maticí LG 700.

Materiál	Počet vrstev	Typ střely	Hmotnost střely [g]	Rychlost střely [m·s <sup>-2</sup> ]	Kinetická energie střely [J]
Twaron CT 747 matrice epoxidová pryskyřice LG 700	140	5,56 mm M193	3,55	946,4	1589,8
	140	5,56 mm SS109	4,00	915,5	1676,2
	140	7,62 mm M80	9,55	825,1	3250,8
	90	7,62 mm M80	9,55	829,8	3287,9
	90	7,62 mm M80	9,55	839,1	3362,0

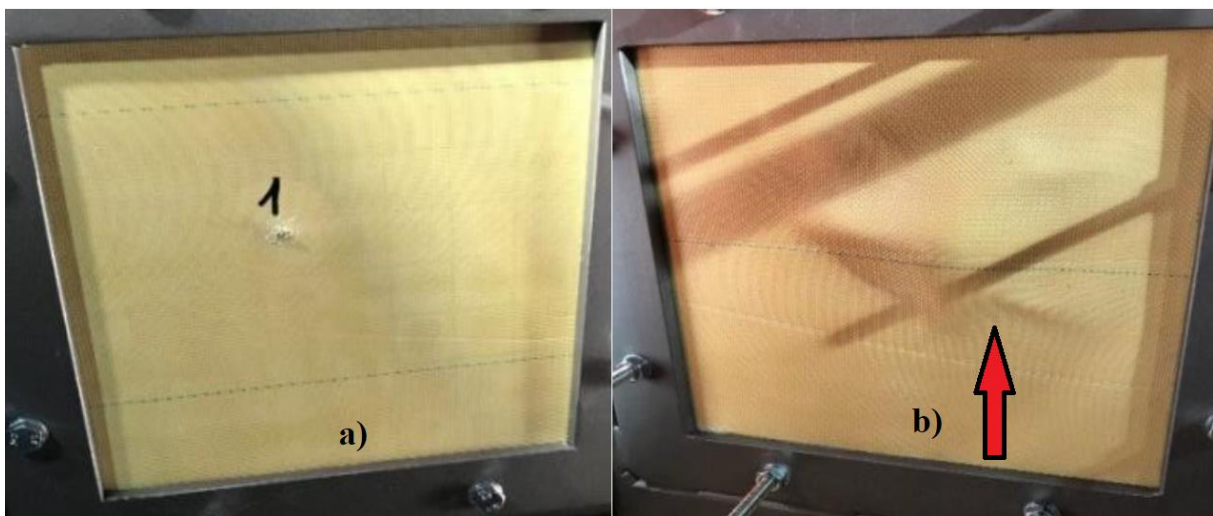


Obr. 74 Panel s maticí LG 700 (90 vrstev) po prvním výstřelu.

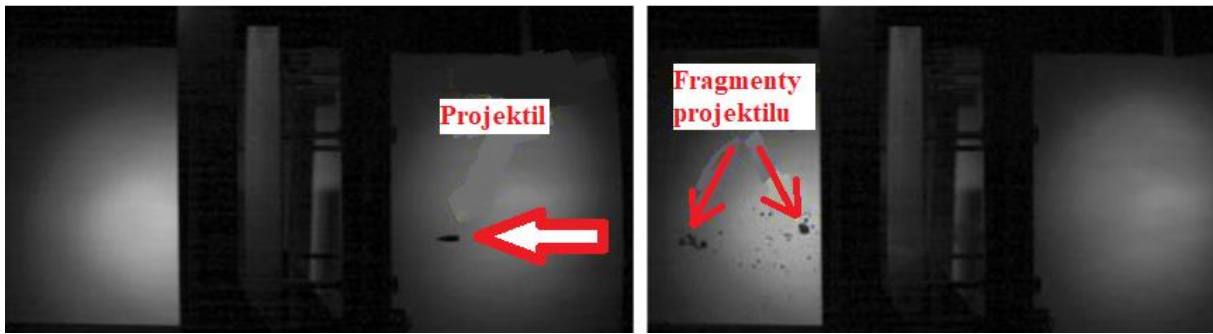


Obr. 75 Označení místa s vyboulením po balistické zkoušce.

Dalším testovaným materiálem byl panel vyrobený z Twaronu CT 747 TH 110 s termoplastickou matricí. Testované panely měly 60, resp. 30 vrstev a byly testovány jako jeden celek, kdy byly upnuty ve dvojitém rámu se šrouby, přiložené k sobě a celková zkoušená tloušťka 90 vrstev tak měla 41,2 mm o hmotnosti 4,14 kg. Do této struktury byl vystřelen jeden projektil ráže 7,62 mm (střela FMJ M80), který panel nedokázal penetrovat, ale vytvořil patrný traumatický efekt na zadní straně. Jeho velikost však nepřekročila hodnotu danou standardem NIJ 0101.06 a tudíž lze tuto vrstvu označit v rámci zkoušených panelů za mezní. Přední a zadní strana tohoto panelu po výstřelu s označením místa traumatického efektu na zadní straně je zachycena na obr. 77. Pro lepší ilustraci a informativnost zkoušky byl týmž nábojem otestován také panel o 60 vrstvách, nicméně zde došlo ke kompletní penetraci tloušťky materiálu. Průchod střelou tímto panelem byl zachycen vysokorychlostní kamerou, viz obr. 78. Výsledky testování těchto panelů s hodnotami vstupních a případně výstupních kinetických energií ( $E_{kin}$  a  $E_{kout}$ ) a rychlostí projektilů ( $v_{in}$  a  $v_{out}$ ) po penetraci jsou uvedeny v tabulce č. 14. Hodnoty rychlostí po prostřelení panelu byly zachyceny vysokorychlostní kamerou.



Obr. 76 Přední (a) a zadní (b) strana panelu s matricí TH 110 (90 vrstev) po testovacím výstřelu.

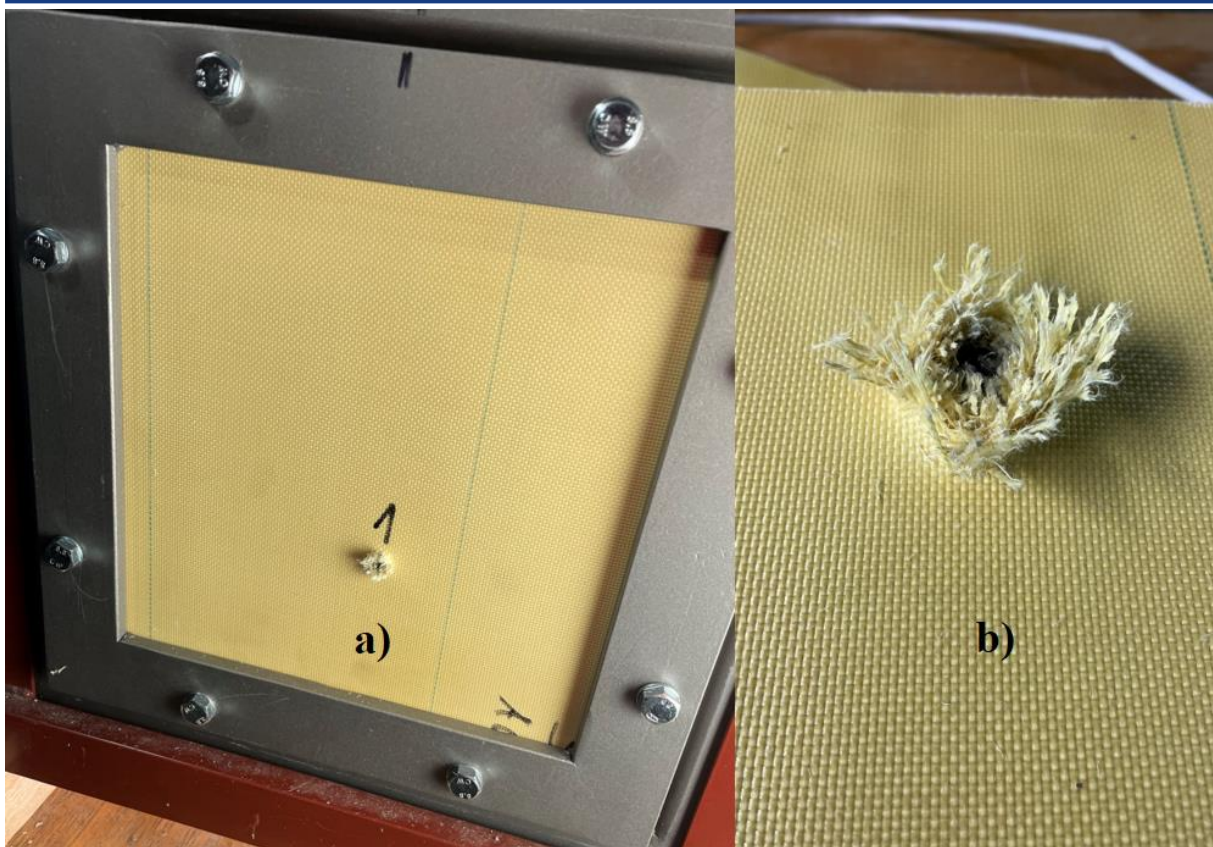


Obr. 77 Průchod a fragmentace projektílu panelem s termoplastickou maticí.

Posledním materiálem, jenž byl v balistické laboratoři testován, byl Twaron CT 747 ER 68, tedy s termosetovou maticí. Testovaná struktura měla 90 vrstev o tloušťce 38,3 mm a hmotnosti 4,04 kg. Skládala se ze tří panelů o 30 vrstvách, které byly opět upevněny do dvojitého rámu. Impaktem byla taktéž střela FMJ M80 ráže 7,62 mm. Tentokrát došlo k penetraci celé struktury, přičemž během penetrace došlo k fragmentaci střely, jejíž úlomky a střepiny prošly skrze testovaný panel. Vstupní a výstupní hodnoty kinetických energií a rychlostí projektílu jsou uvedeny v tabulce č. 10. Přední a zadní strana panelu po výstřelu je zachycena na obr. 79.

Tab. 14 Výsledky balistických zkoušek panelů s maticí TH 110 a ER 68.

Materiál	Počet vrstev	Typ střely	Hmotnost střely [g]	$v_{in}$ [ $m \cdot s^{-2}$ ]	$v_{out}$ [ $m \cdot s^{-2}$ ]	$E_{kin}$ [J]	$E_{kout}$ [J]
Twaron CT 747 TH 110	90	7,62 mm M 80	9,55	834,0	0,0	3321,3	0,0
Twaron CT 747 TH 110	60	7,62 mm M 80	9,55	832,7	680,9	3310,9	2213,8
Twaron CT 747 ER 68	90	7,62 mm M 80	9,55	830,5	233,4	3293,5	260,1



Obr. 78 Panel s matricí ER 68 po testovacím výstřelu.

Z výsledků je patrné, že typ matrice ovlivňuje schopnost kompozitního materiálu čelit impaktu a vstřebávat kinetickou energii, jelikož panely o stejném počtu 90 vrstev ze stejných výztuhových vláken Twaronu CT 747, avšak s jinými matricemi, dosáhly jiných výsledků vůči stejným parametrům balistického impaktu (střely M80 ráže 7,62 mm). Termosetová matrice dosáhla při testech horších výsledků (došlo ke kompletní penetraci), jelikož ve srovnání s matricí termoplastickou, která impaktu odolala, má sice vyšší pevnost, ale také nižší houževnatost a vyšší křehkost, čímž je značně snížen balistický ochranný potenciál této struktury. Co se týče mechanismu poškození, tak u všech testovaných panelů byl vzhledem ke stejnému materiálu vláknové výztuhy Twaronu pozorován obdobný typ porušení, který byl důsledkem absorpce kinetické energie projektilu – tedy delaminace, přetrhání a vyvlečení vláken ze struktury.

## ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala vláknovými kompozity s polymerní matricí pro balistické použití. V teoretické části byly popsány druhy vláken, jejich vlastnosti, struktura, využití a aplikace v balistice. Experimentální část byla zaměřena na výrobu kompozitních panelů pro účel balistické ochrany. Využity byly materiály z řady aramidů a UHMWPE – Twaron a Endumax. Panely byly vyráběny třemi technologiemi – vakuová infuze epoxidové pryskyřice pro tkaninu Twaronu, autokláv pro Twaron s prepregovou vrstvou termosetu ER 68 a lisování za tepla (140 °C) pro Twaron s termoplastovým prepregem TH 110 a Endumax, jehož film obsahoval termoplastovou pryskyřici.

Z vyrobených panelů byly technologií řezání vodním paprskem připraveny vzorky pro zkoušky a testování. Tahové zkoušky byly podrobeny vzorky z Twaronu s epoxidovou a termosetovou matricí. Nejvyšší naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu činily 531 MPa pro Twaron s epoxidem, 480 MPa pro Twaron s termosetem. V průměru dosahovala matrice s epoxidovou pryskyřicí o 9 % vyšších hodnot než matrice termosetová.

Zkouška tříbodovým ohybem byla provedena pro vzorky všech čtyř druhů vyrobených kompozitních materiálů. Měřenými hodnotami byly modul pružnosti a mez pevnosti v ohybu. Vzhledem k nepřesnému určení mezí pro výpočet softwarem jsou pro vyhodnocení modulu pružnosti uvažovány hodnoty vypočtené. Z důvodu problematického určení mezí zde byly vysoké hodnoty rozptylu. Nejvyšších hodnot meze pevnosti dosahovaly termosetové vzorky – v průměru 7246 MPa. Druhý nejlepší Endumax měl hodnoty průměrně o více než 50 % nižší, jednoznačně nejnižší hodnoty vykázaly termoplastové vzorky Twaronu (průměrná hodnota 180 MPa). Pozorovaným mechanismem porušení byla delaminace.

Využití zařízení Taylorova testu ověřilo rezistenci vyrobených vzorků vůči balistickému impaktu. Byl modifikován unašeč, dopadiště a impaktorem byla střela ráže 7,62 mm za dopadové rychlosti kolem 150 km·h<sup>-1</sup>. Sledováno bylo chování materiálu a velikost traumatického efektu pro stanovení mezní vrstvy, odpovídající normě NIJ 0101.06. Vzhledem k výsledkům mechanických zkoušek nebyl testován Twaron s termoplastovou matricí. Pro dané podmínky byly mezní vrstvy stanoveny na 21 vrstev pro Twaron s epoxidovou pryskyřicí, 25 pro Twaron s termoplastem. Ze dvou vzorků Endumaxu byl jeden kompletně perforován (65 vrstev) a jediný, který vyhověl normě byl panel s 95 vrstvami.

Pro ověření odolnosti materiálu proti reálnému balistickému ohrožení byly provedeny zkoušky v balistické zkušebně. Testy proběhly střelami ráže 5,56 mm a 7,62 mm a podmínky odpovídaly parametrům uvedeným v normě STANAG pro stupeň ochrany III. Testovány byly twaronové panely několika tloušťek. Nejhorší výsledky vykázala termosetová matrice, která jako jediná byla v tloušťce 90 vrstev prostřelena. Byly tak potvrzeny teoretické předpoklady nižší houževnatosti a vyšší křehkosti. Kompozity s epoxidovou a termoplastickou matricí dokázaly díky tvrdosti více deformovat střelu (zejména epoxid), lépe absorbují nárazovou energii a mají houževnatější strukturu. Mezní vrstvy testovaných vzorků Twaronu byly stanoveny na 90 pro oba typy matric. Pro přesnou mezní vrstvu by zde, podobně jako pro Endumax v Taylorově testu, bylo nutno testovat vzorky s nižším intervalem počtu vrstev, např. po 5 vrstvách.

Během balistických zkoušek byly pozorovány poruchy materiálu v podobě delaminace, přetrhání vláken a jejich vyvlékání, odpovídající teoretickému popisu chování kompozitů při nárazu. Bylo ověřeno, že pro mechanické a balistické vlastnosti má typ matrice zásadní vliv na pevnost, houževnatost struktury a přenos napětí. Cílem bylo určit, zda tyto balistické kompozity mohou být využity také pro strukturální aplikace. Z hlediska mechanických vlastností se nejlépe jeví Twaron s matricí termosetu ER 68, který dosahoval také obstojných balistických účinků. Naopak termoplastová matrice se prokázala jako nevhodná a pro strukturální díly ji nelze použít. Dobrých výsledků v ohybu i balistice dosahoval Endumax, který by však kvůli struktuře [0°, 90°] a nízkému obsahu matrice měl slabé tahové vlastnosti.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BHATNAGAR, Ashok. *Lightweight Ballistic Composites: Military and Law–Enforcement Applications*. Second edition. Duxford: Elsevier, 2016, 459 s. ISBN 978-0-08-100425-8.
2. The evolution of body armor. *Angelarmor* [online]. [cit. 2022-09-26]. Dostupné z: <https://angelarmor.com/the-evolution-of-body-armor/>
3. Mark 1 steel helmet 1916-1917. In: *Royal collection trust* [online]. [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://www.rct.uk/collection/68933/mark-1-steel-helmet>
4. REVISION MILITARY Complete Tactical Helmet Systém. In: *GRAINGER*. [online]. [cit. 2023-01-19]. Dostupné z: <https://www.grainger.com/product/REVISION-MILITARY-Complete-Tactical-Helmet-System-38RT44>
5. DODDAMANI, Saleemsab, Satyabodh KULKARNI, Sharnappa JOLADARASHI, Mohan KUMAR a Ashish Kumar GURJAR. Analysis of light weight natural fiber composites against ballistic impact: A Review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.01.003>
6. CROUCH, Ian. Body armour – New materials, new systems. *Defence Technology*. 2019, **15**(3). Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.02.002>
7. DRESCH, Alexander, Janio VENTURINI, Sabrina ARCARO, Oscar MONTEDO a Carlos BERGMANN. Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review. *Ceramics International*. 2020, **47**(7). Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2020.12.095
8. ZHANG, Wei. A review of tribological properties for boron carbide ceramics. *Progress in Materials Science*. 2021, (116). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100718>
9. LAUSUND, Kristian Blindheim. *Adhesion between ceramic and composite materials for use in lightweight ballistic armour*. Oslo, 2014. Diplomová práce. University of Oslo. Faculty of Mathematics and Natural Sciences.
10. PTÁČEK, Luděk a kol. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
11. MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity a uhlíkové materiály*. 3. rozšířené vydání. Brno: Tesydo, 2022, 100 s. ISBN 978-80-87102-34-3.
12. What are Composites? In: *Romeorim*. [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://romeorim.com/what-are-composites/>
13. CAMPBELL, F.C. *Structural Composite Materials*. 1. vyd. Ohio: ASM International, 2010, 612 s. ISBN 978-1-61503-037-8.
14. BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
15. Beginner's Guide to Woven Rovings In: *Invitex*. [online]. [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <http://www.nivitex.com/woven-roving.html>
16. JWEEG, Muhsin, AL-WAILY, Muhannad, RESAN, Kadhim Kamil. *Energy Methods and Finite Element Techniques: Stress and Vibration Applications*. 1st Edition. Philadelphia: Elsevier, 2021. 588 s. ISBN 0323886663.
17. Kevlar twill. In: *Playwithcarbon* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://playwithcarbon.com/kevlar-twill-1m-wide/>
18. HAMBIR, Sangeeta. Sintering of ultra high molecular weight polyethylene. *Bulletin of Material Science*. 2000, **23**(3).

19. MORAN, P.M., Xiu LIU a Choon Fong SHIH. KINK BAND FORMATION AND BAND BROADENING IN FIBER COMPOSITES UNDER COMPRESSIVE LOADING. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1995, **43**(8). Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/0956-7151\(95\)00001-C](https://doi.org/10.1016/0956-7151(95)00001-C)
20. TEIJIN. Ballistic materials handbook. Teijin, 2019. 13 s.
21. TEIJIN. Endumax – an ultra-strong thin film with a high modulus. Teijin, 2017. 12 s.
22. C45. *Steelnavigator* [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/c45/>
23. SRIRANGA, Bharat, Laabh KHIRTAN a Gajkaran ANANDA. The mechanical properties of hybrid laminates composites on epoxy resin with natural jute fiber and S-glass fibers. *Materialstoday: proceedings*. 2021, **46**(18). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.363>
24. What's fiberglass, and how does the delicate material reinforce thousands of products?. In: *Cen* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://cen.acs.org/materials/inorganic-chemistry/s-fiberglass-does-delicate-material/96/i38>
25. Carbon Fiber Tow. In: *Ctech-llc* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://ctech-llc.com/en/products/carbon-tow/>
26. BHAT, Aayush, Jabar NAVEEN, Mohammad JAWAID, Mohd Nor Faiz NORRHAIM, Ahmad RASHEDI a Anish KHAN. Advancement in fiber reinforced polymer, metal alloys and multi-layered armour systems for ballistic applications – A review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021, **15**. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.150>
27. KHALID, Muhammad Yasir, Ans Al RASHID, Zia Ullah ARIF, Waqas AHMED a Hassan ARSHAD. Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. *Results in Engineering*. 2021, **11**. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>
28. SISAL NATURAL FIBER. In: *Abc oriental rug* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.abc-oriental-rug.com/sisal-natural-fiber.html>
29. FARUK, Omar, Andrzej BLEDZKI, Hans-Peter FINK a Mohini SAIN. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*. 2012, **37**(11). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
30. SIENGCHIN, Suchart. A review on lightweight materials for defence applications: A present and future developments. *Defence Technology*. 2023. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.02.025>
31. Engineering applications of biofibers. In: SHARMA, Gagan, Bhargav Reddy ISANAKA a Vinod KUSHVAHA. *Advances in Bio-Based Fiber: Moving Towards a Green Society*. Duxford: Elsevier, 2022, s. 619–643. ISBN 978-0-12-824543-9.
32. Areka wet Spinner. In: *Arekagroup* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.arekagroup.com/en/products/arekanano/wetspinner.html>
33. PARK, Seung Koo a Richard FARRIS. Dry-jet wet spinning of aromatic polyamic acid fiber using chemical imidization. *Polymer*. 2001, **42**(26). Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00576-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00576-6)
34. ASMATULU, Ramazan a Waseem KHAN. *Synthesis and Applications of Electrospun Nanofibers*. Elsevier, 2019, 296 s. ISBN 978-0-12-813914-1.
35. KIRON, Mazharul Islam. What is Wet Spinning | Principle and Uses of Wet Spinning Method. *Textilelearner* [online]. January 30, 2022 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://textilelearner.net/principle-and-uses-of-wet-spinning/>

36. Manmade spinning process – dry-jet-wet spinning. *Dspattextile* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.dspattextile.com/2022/07/manmade-spinning-processes-dry-spinning.html>
37. Fiberglass Manufacturing. In: *Vetrotextiles* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.vetrotextiles.com/technologies/fiberglass-manufacturing>
38. Fiber forming - Bushing. In: *Glass-strand* [online]. [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.glass-strand.com/prod02.htm>
39. Production of Polyacrylonitrile (PAN) Precursor Fibers for Carbon Fibers. *Vaisala* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.vaisala.com/en/chemical-industry-solutions/chemicals-allied-products/production-polyacrylonitrile-pan-precursor-fibers-carbon-fibers>
40. GAO, Fengge. The future prospect of polymer nanocomposites in reinforcement application. *E-Polymers*. 2002.
41. BERMUDEZ, Victor a Amod OGALE. Adverse effect of mesophase pitch draw-down ratio on carbon fiber strength. *Carbon*. 2020, (168). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.06.062>
42. KNAUSS, Wolfgang a Luis GONZALEZ. *Global Failure Modes in Composite Structures*. 2001.
43. KING, J.E. Failure in composite materials. *Metals and Materials*. 1989, 5(12).
44. KAIK, Namish, Parthi SHRIRAO a Bhavin REDDY. Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation. *International Journal of Impact Engineering*. 2006, 32(9). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.01.004>
45. JAWAID, Mohammad, Mohamed THARIQ a Naheed SABA. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Woodhead Publishing, 2018, 478 s. ISBN 9780081023006.
46. *NATO AEP-55 STANAG 4569: Protection levels for occupants of logistic and light armored vehicles – Part 1-4: General – Annex A*. 2005, 65 s.
47. NIJ Standard-0101.06 Versus NIJ Standard-0101.07 | What's the Difference?. *Shotstop* [online]. September 28, 2020 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.shotstop.net/blogs/blog/nij-standard-0101-06-versus-nij-standard-0101-07-whats-the-difference>
48. Military Defense. *Bourqueindustries* [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://bourqueindustries.com/military-defense/>
49. SANDALOW, Brian. Looking to the Future of Carbon Nanotube Transistors. In: *Mccormick.northwestern* [online]. Nov 18, 2022 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.mccormick.northwestern.edu/news/articles/2022/11/looking-to-the-future-of-carbon-nanotube-transistors/>
50. MARTINI, Roberto a Francois BARTHELAT. Stability of hard plates on soft substrates and application to the design of bioinspired segmented armor. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2016, (92). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2016.04.009>
51. ÁVILA, Antonio, Almir Silva NETO a Hermano NASCIMENTO JUNIOR. Hybrid nanocomposites for mid-range ballistic protection. *International Journal of Impact Engineering*. 2011, 38(8-9), 669-676. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.03.002>
52. ZHANG, Zhuolei, Yao ZHAO, Haoqi LI, Simona PERCEC, Jie YIN a Fei REN. Nanoparticle-Infused UHMWPE Layer as Multifunctional Coating for High-performance

- PPTA single Fibers. *Scientific Reports*. 2019, **9**(1). Dostupné z: doi:10.1038/s41598-019-43629-1
53. HMPE/Dyneema® ropes stronger than steel. *Dynamica-ropes* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://dynamica-ropes.com/dyneema-ropes/>
  54. PRETORIUS, Louis. What Are F1 Tires Made Of. *Onestopracing* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://onestopracing.com/what-are-f1-tires-made-of/>
  55. What are the Applications of Composite Materials Today. *Addcomposites* [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.addcomposites.com/post/where-are-composites-used>
  56. Applied Fiber, WireCo WorldGroup, and DSM Dyneema join forces to deliver Synthetic Fiber Dragline & Rope Shovel Pendants. *Mining* [online]. November 28, 2017 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.mining.com/web/applied-fiber-wireco-worldgroup-dsm-dyneema-join-forces-deliver-synthetic-fiber-dragline-rope-shovel-pendants-global-mining-industry/>
  57. High strength tape articles from ultra-high molecular weight polyethylene. *Patents.justia* [online]. Feb 4, 2011 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://patents.justia.com/patent/8697220>
  58. OPS-CORE FAST SF Super High Cut Helmet. In: *Milbrookcanada* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://millbrookcanada.ca/product/ops-core-fast-sf-super-high-cut-helmet/>
  59. Kevlar helmet. In: *Cnd.shopify* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0052/4543/5976/products/94136\\_800x.jpg?v=1652367903](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0052/4543/5976/products/94136_800x.jpg?v=1652367903)
  60. Virtus Soldier System. In: *Bootcampmilitary* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://i0.wp.com/bootcampmilitaryfitnessinstitute.com/wp-content/uploads/2018/06/Virtus-Soldier-System-British-Army-2.png?ssl=1>
  61. Spall Liner. In: *Safestep* [online]. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://grp.safestep.se/en/spall-liner/>
  62. T-64 Tank. *Globalsecurity* [online]. [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://www.globalsecurity.org/military/world/russia/t-64-design.htm>
  63. Carbon Nanotube Fibers for Ballistic Armor. *Dexmat* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://blog.dexmat.com/carbon-nanotube-fibers-for-ballistic-armor>
  64. Advanced Composites Advance U.S. Air Force Aviation. *Nasampe* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.nasampe.org/page/MilitaryAircraft>
  65. LOUKIL, Mohamed Sahbi. *Experimental and Numeriacal Studies of Intralaminar Cracking in High Performance Composites*. 2013.
  66. KRIKANOV, Alexis. Composite pressure vessels with higher stiffness. *Composite Structures*. 2000, **48**(1-3). Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(99\)00083-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00083-5)
  67. Fibers for Composite Pressure Vessels. *Infinite composites* [online]. August 29, 2016 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.infinitecomposites.com/post/fibers-for-composite-pressure-vessels>
  68. Nomex® Aramid Paper. *Pronatindustries* [online]. [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://pronatindustries.com/product/nomex-aramid-paper-2/>
  69. Aramid honeycombs. *Teijinaramid* [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.teijinaramid.com/en/applications/aramid-honeycombs/index.html>

70. Aramid Honeycomb Core. *Acpcomposites* [online]. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://store.acpcomposites.com/aramid-honeycomb-core-standard-cell>
71. Nomex and Kevlar aramid paper honeycomb range. In: *Corex-honeycomb* [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://corex-honeycomb.com/products-and-services/nomex-and-kevlar-aramid-paper-honeycomb/>
72. 580-0241AQ. In: *Sommercable* [online]. [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://shop.sommercable.com/en/Cable/Power-Cable/Cat-6-SC-AQUA-MARINEX-CAT-6-PUR-SR-ARAMID-580-0241AQ.html>
73. ZHEN, Jimming, Yunxiang HAN, Lili ZHU, et al. MoS<sub>2</sub>/CF synergistic enhancement to improve the friction and wear properties of UHMWPE composites. *Tribology International*. 2023, **179**. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108097>
74. KANG, Xueqin, Xiauhoi ZONG, Peng ZHANG, et al. Effects of epigallocatechin gallate incorporation in UHMWPE on biological behavior, oxidative degradation, mechanical and tribological performance for biomedical applications. *Tribology International*. 2021, **158**. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106887>
75. SANBORN, Brett, Ann Mae DILEONARDI a Tusit WEERASOORIYA. Tensile Properties of Dyneema SK76 Single Fibers at Multiple Loading Rates Using a Direct Gripping Method. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*. 2015, **1**(4-14). Dostupné z: doi:DOI 10.1007/s40870-014-0001-3
76. Mining Industry Applications: Plastic Wear & Power Transmission Parts. *Plasticmachiningcompany* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://plasticmachiningcompany.com/mining-industry-applications-plastic-wear-power-transmission-parts/>
77. JEONG, Jin-Oh, Jong-Seok PARK, Young-Ah KIM, Su-Jin YANG, Sung-In JEONG, Jae-Young LEE a Youn-Mook. Gamma Ray-Induced Polymerization and Cross-Linking for Optimization of PPy/PVP Hydrogel as Biomaterial. *Polymers*. 2020.
78. OLIVEIRA, Moises, Eduardo Simas FILHO, Maria ALBUQUERQUE, Ygor SANTOS, Ivan DA SILVA a Claudia FARIAS. *Ultrasound-based identification of damage in wind turbine blades using novelty detection*. 2020.
79. Top 5 Important Uses of Carbon Fiber Sheets. *Smicomposites.com* [online]. 28-01-2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://smicomposites.com/top-5-important-uses-of-carbon-fiber-sheets/>
80. Weekender Dorcadion. *Vladimirprochazka.com* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.vladimirprochazka.com/products/weekender-dorcadion>
81. Endumax® Film TA23. *Knowde.com* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.knowde.com/stores/teijin-twaron-b-v/products/endumax-film-ta23>
82. WANG, Tongtong, Kai HUANG, Licheng GUO, Tao ZHENG a Fanlin ZENG. An automated vacuum infusion process for manufacturing high-quality fiber-reinforced composites. *Composite Structures*. 2023, (309). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116717>
83. OBANDE, Winifred, Conchur BRADAIGH a Dipa RAY. Continuous fibre-reinforced thermoplastic acrylic-matrix composites prepared by liquid resin infusion – A review. *Composites Part B: Engineering*. 2021, (215). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108771>
84. SYMINGTON, Marc, Opukuro WEST, William BANKS a Richard PETHRICK. *VACUUM INFUSION OF NATURAL FIBRE COMPOSITES FOR STRUCTURAL APPLICATIONS*.

85. HINDERSMAN, Arne. Confusion about infusion: An overview of infusion processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019, (126). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105583>
86. ZHANG, Timothy, Sikhanda SATAPATHY, Lionel VARGAZ-GONZALEZ a Shawn WALSH. Ballistic impact response of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE). *Composite Structures*. 2015, (133). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.081>
87. KELLY, Anthony. *Comprehensive Composite Materials*. London: Pergamon, 2000. ISBN 0080429939.
88. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
89. Water Jet Cutting Nozzles Made of Tungsten Carbide. *Eurobalt.net* [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://eurobalt.net/blog/2022/04/06/cutting-nozzles/>
90. Factors affecting precision & quality. *My.wardjet.com* [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://my.wardjet.com/waterjet/university/precision-quality>
91. NATARAJAN, Yuravaj, Pradeep Kumar MURUGESAN, Mugilvalavan MOHAN a Ahmed Ali KHAN. Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020, **49**. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.030>
92. Cut quality comparsion. In: *Aquajetservices.com* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.aquajetservices.com/wp-content/uploads/3f1-Cut-Quality-Comparison.jpg>
93. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 503 s. ISBN 80-7204-283-1.
94. Stress-strain relationships. *Optics.arizona.edu* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/OPTI\\_222\\_W4.pdf](https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/OPTI_222_W4.pdf)
95. DEL REY, Romina, Ramon SERRAT, Jesus ALBA, Idefonzo PEREZ, Pere MUTJE a Francesc ESPINACH. Effect of Sodium Hydroxide Treatments on the Tensile Strength and the Interphase Quality of Hemp Core Fiber-Reinforced Polypropylene Composites. *Polymers*. 2017.
96. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody – sylabus*. Brno: 2003. 84 s.
97. ŠLAIS, Miroslav. Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvaritelnost Ti slitin. Brno, 2012. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Milan Forejt, CSc.
98. Náboje pro ozbrojené složky. *Sellier-bellot.cz* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.sellier-bellot.cz/produkty/naboje-pro-ozbrojene-slozky/5-56x45/list/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
a	délka panelu	[mm]
b	šířka panelu	[mm]
c	výška panelu	[mm]
$E_{fn}$	modul pružnosti určený softwarem	[MPa]
$E_{fv}$	Vypočtený modul pružnosti	[MPa]
$E_k$	kinetická energie	[J]
$E_{kin}$	kinetická energie před nárazem	[J]
$E_{kout}$	kinetická energie po nárazu	[J]
m	hmotnost	[g]
v	rychlost	[ms <sup>-1</sup> ]
$v_{in}$	rychlost před nárazem	[ms <sup>-1</sup> ]
$v_{out}$	rychlost po nárazu	[ms <sup>-1</sup> ]
$S_x$	směrodatná odchylka	[-]
$S_x^2$	rozptyl	[-]
$\bar{x}$	aritmetický průměr	[-]
$\epsilon_m$	poměrné přetvoření	[-]
$\epsilon_{f1}$	přetvoření spodní meze	[-]
$\epsilon_{f2}$	přetvoření horní meze	[-]
$\epsilon_{fm}$	mezní přetvoření	[-]
$\sigma_{f1}$	napětí spodní meze	[MPa]
$\sigma_{f2}$	napětí horní meze	[MPa]
$\sigma_{fc}$	napětí při průhybu 1,5násobku tloušťky	[MPa]
$\sigma_{fm}$	napětí na mezi pevnosti	[MPa]

## Zkratky

Označení	Legenda
CAPRI	Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion
CL	Center Line
CNC	Computed Numerical Control
FAST	Future Assault Technology Helmet
FMJ	Full Metal Jacket
NIJ	National Institute of Justice
PAN	Polyakrylonitril
PLA	Polyactic acid
SEA	Specific Energy Absorption
UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding

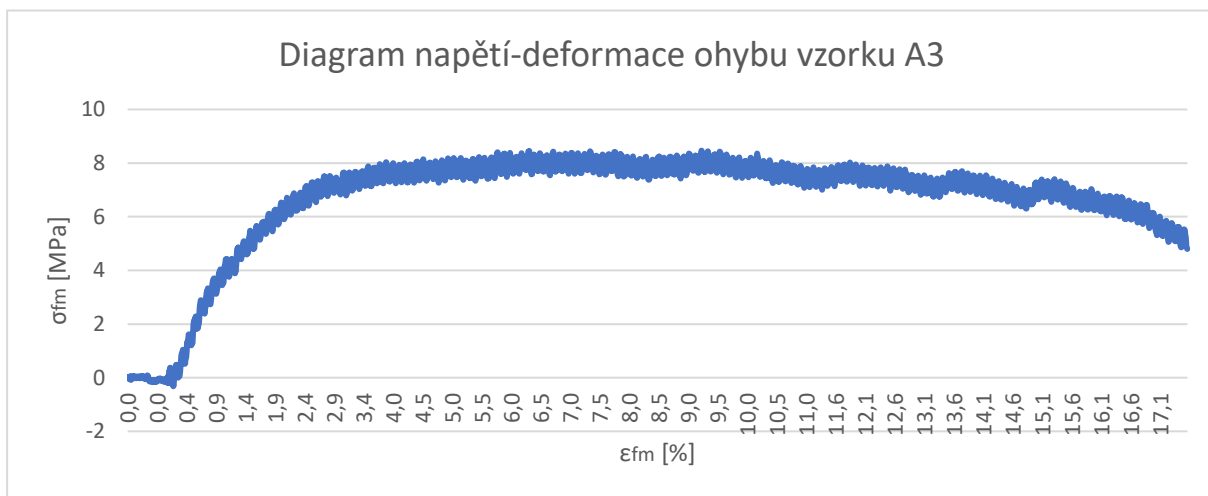
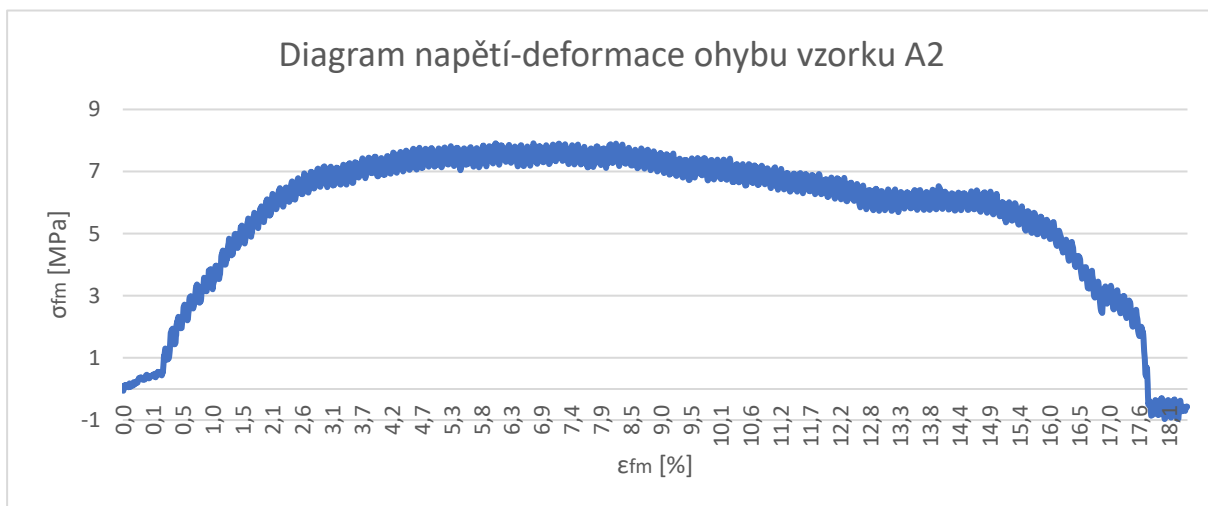
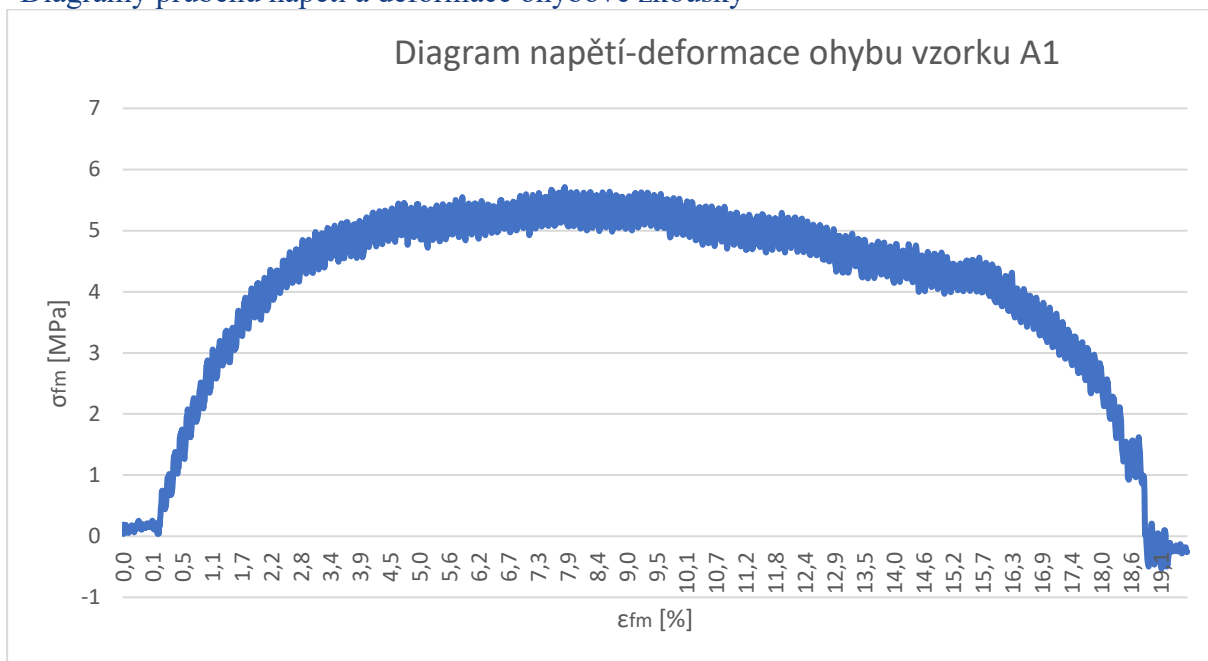
## SEZNAM PŘÍLOH

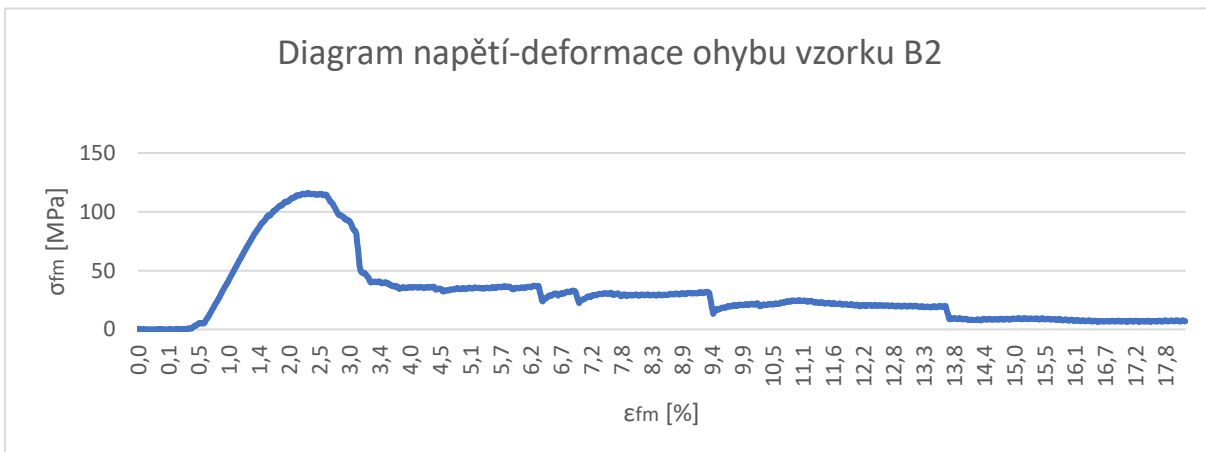
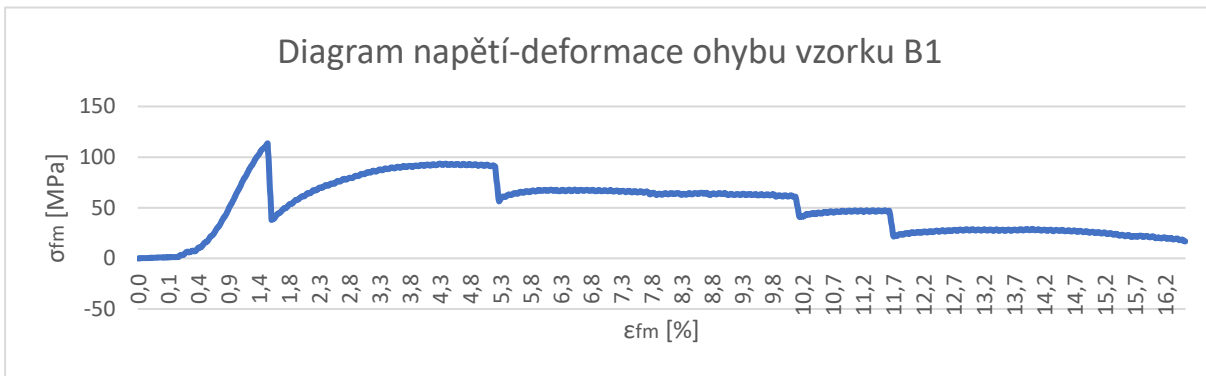
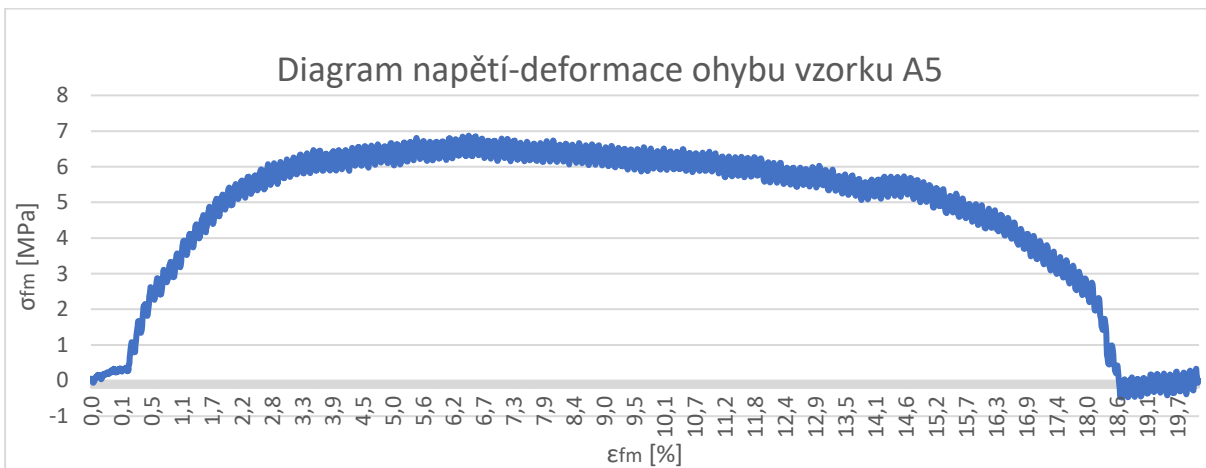
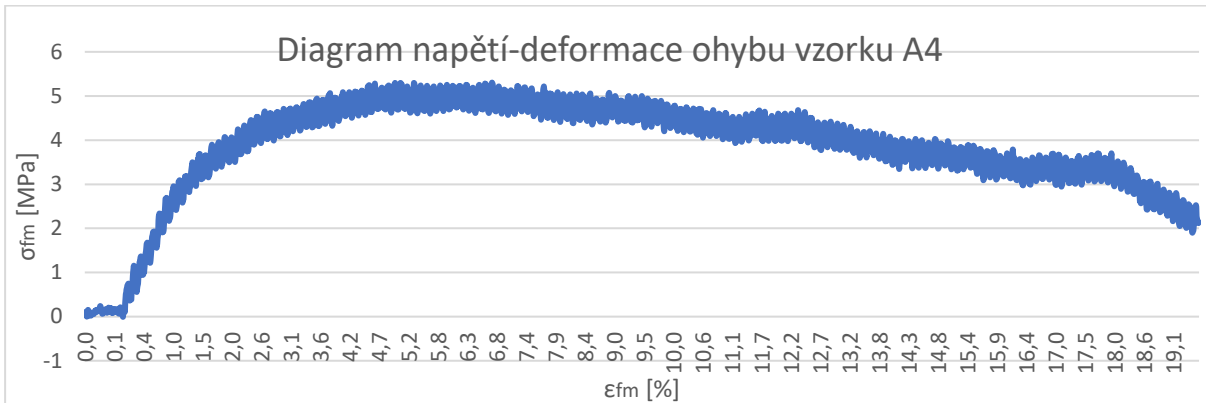
Příloha 1	Diagramy průběhů napětí a deformace ohybové zkoušky
Příloha 2	Technická specifikace lisu ZD 40
Příloha 3	Výrobní postup dopadiště
Příloha 4	Výrobní postup upínky

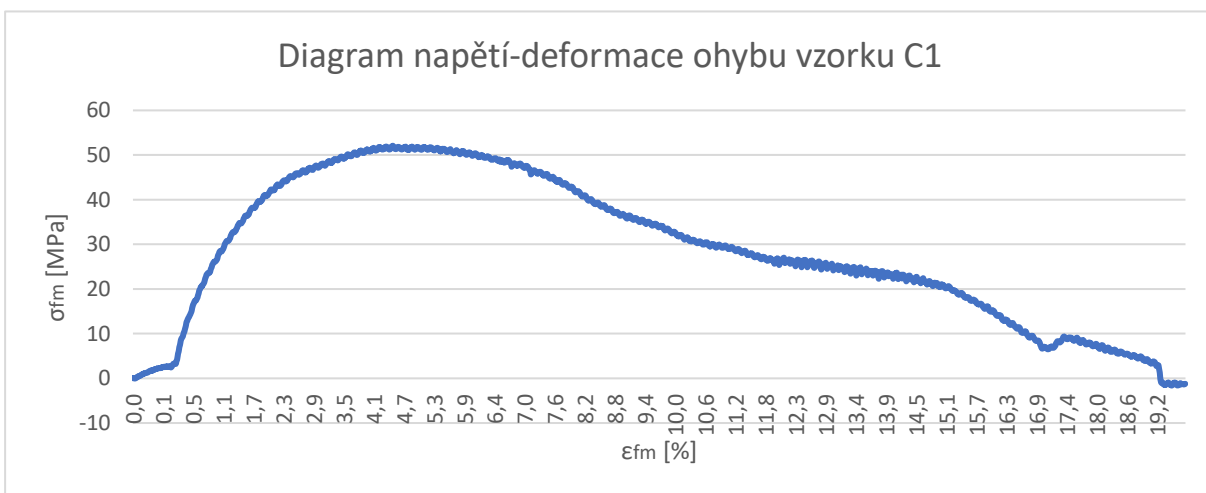
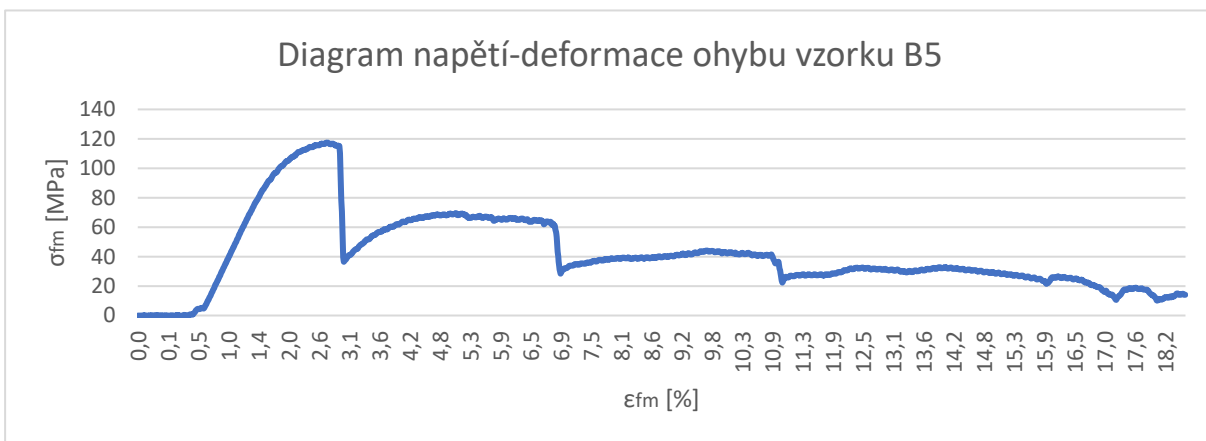
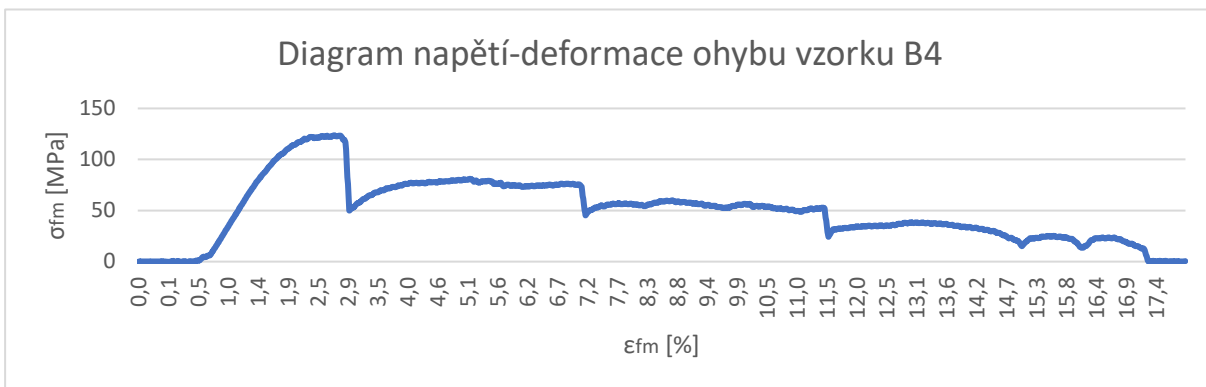
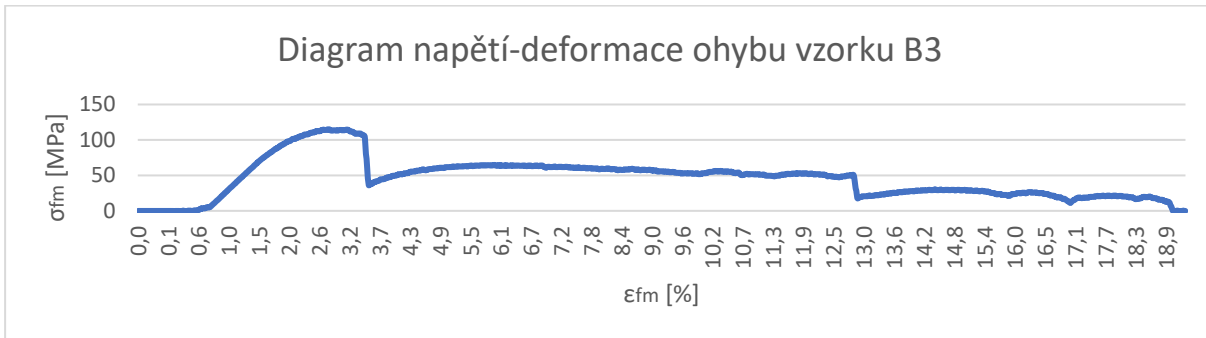
## SEZNAM VÝKRESŮ

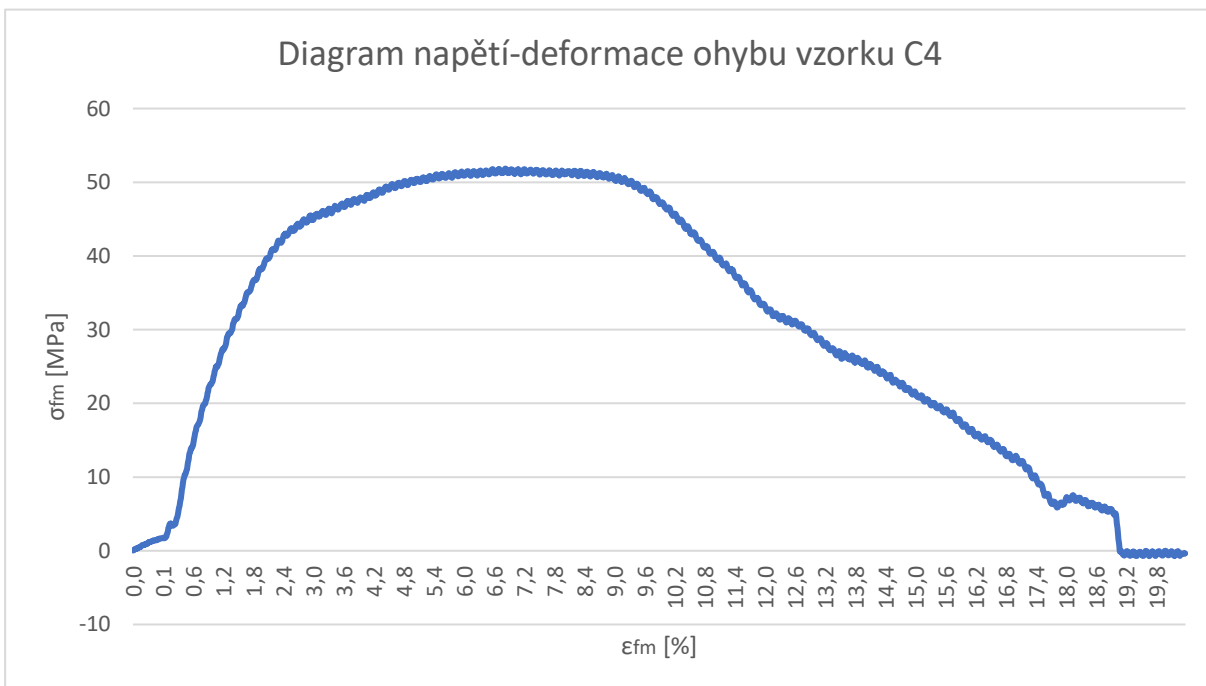
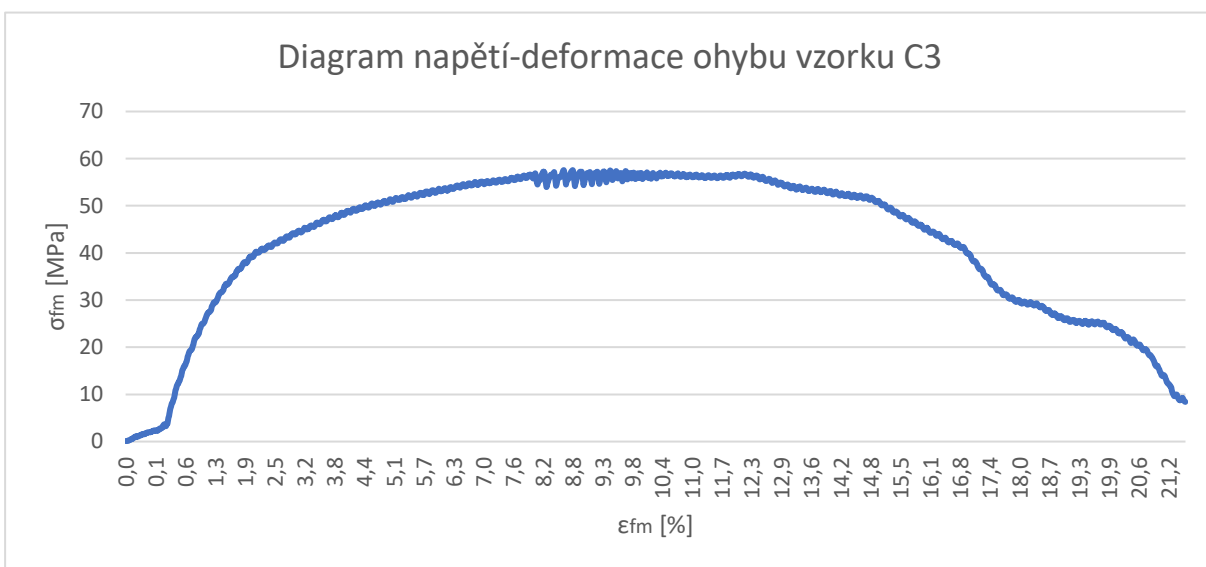
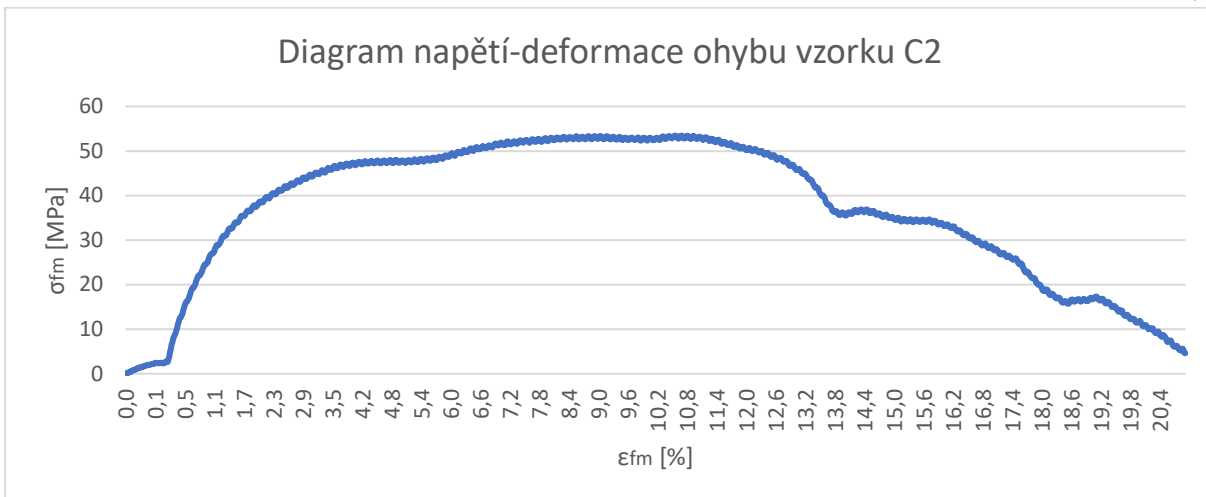
Dopadiště	2023-DP-200260-01
Upínka	2023-DP-200260-02

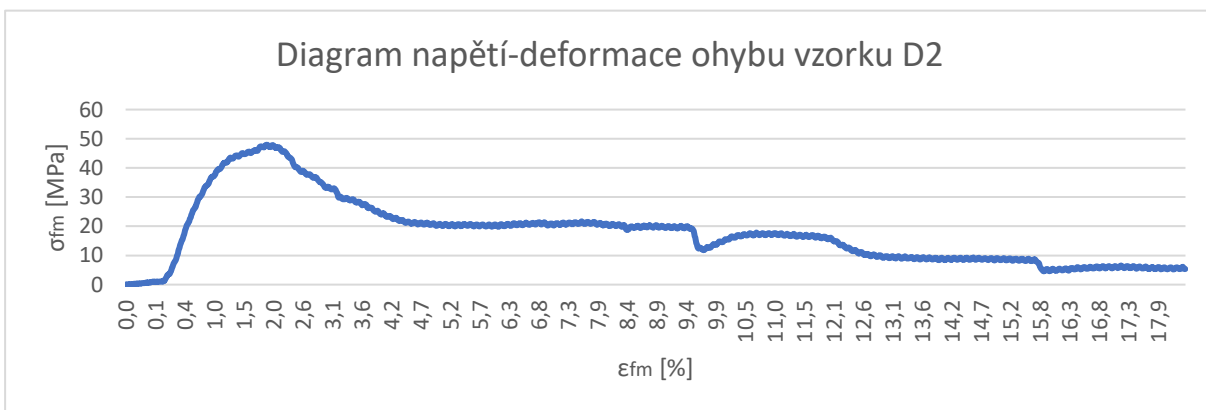
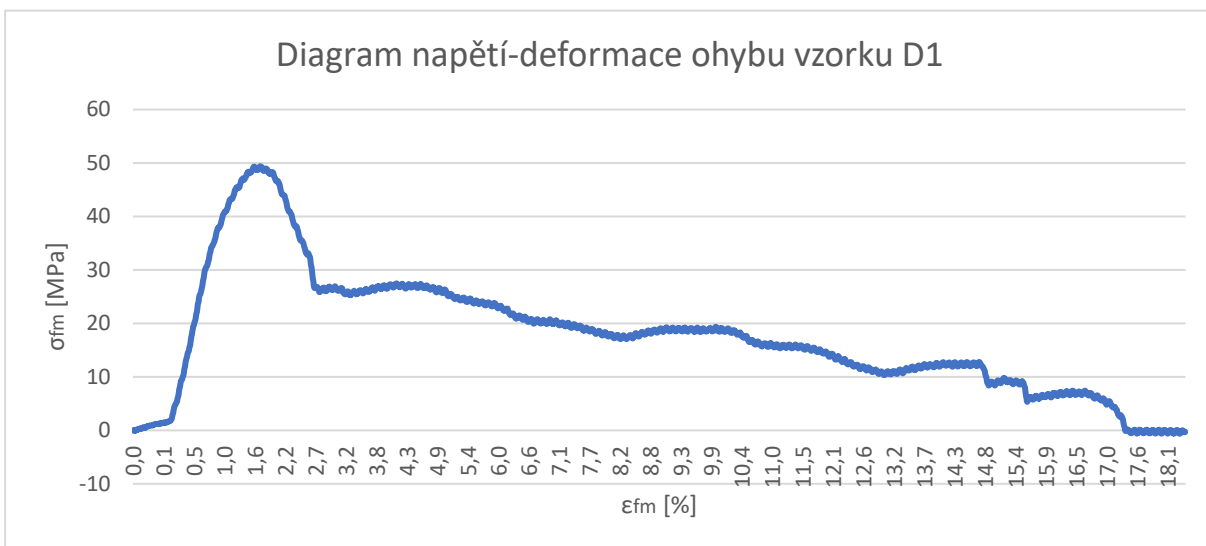
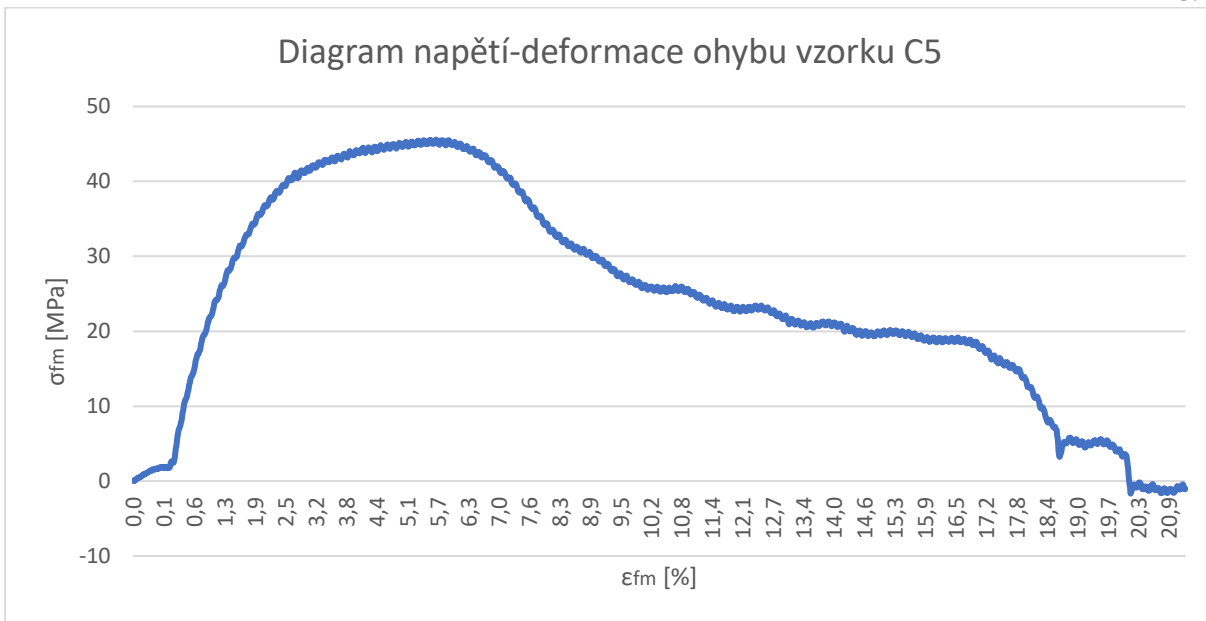
Diagramy průběhu napětí a deformace ohybové zkoušky

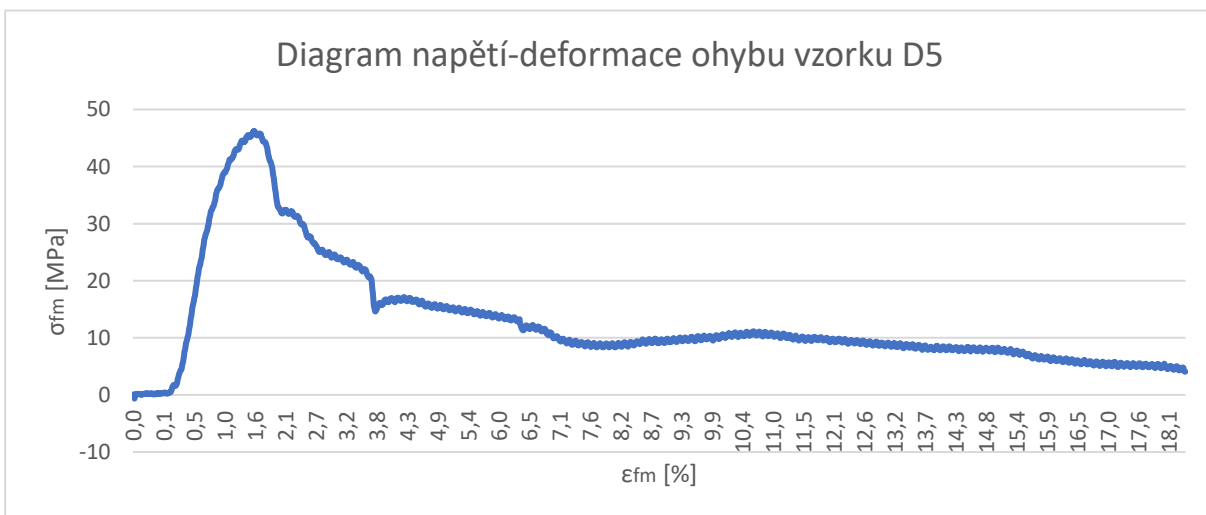
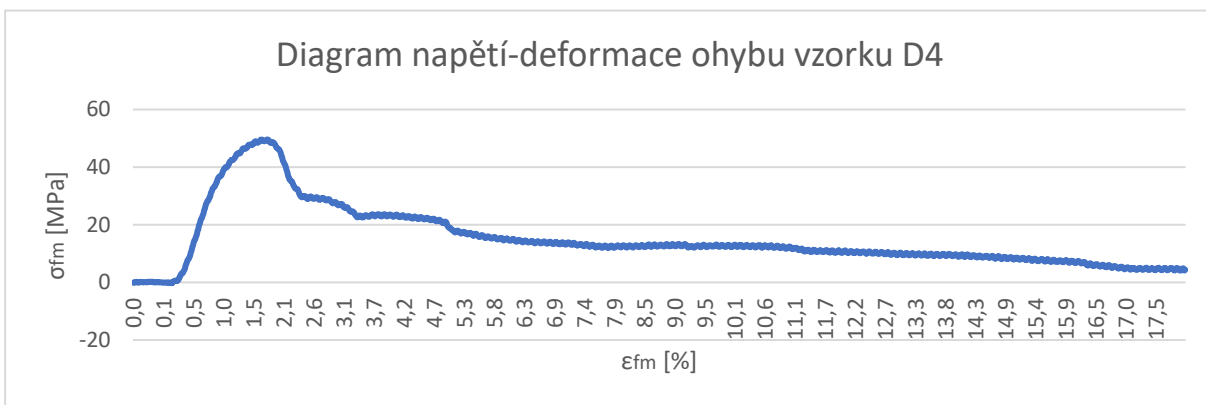
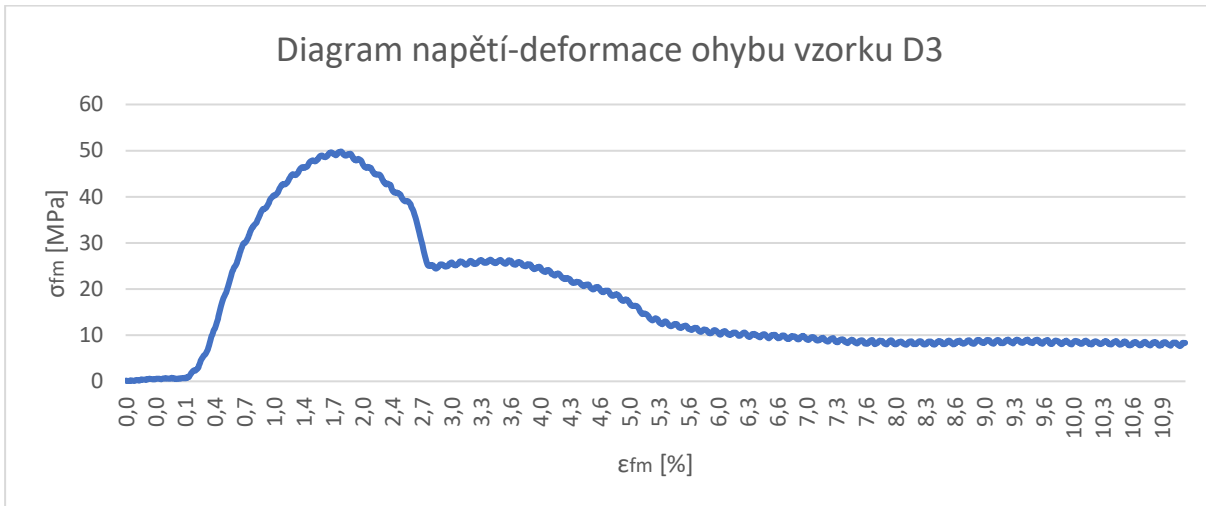












### Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčniku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj.  $\pm 1 \%$  odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy:  $\pm 0,01$  mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

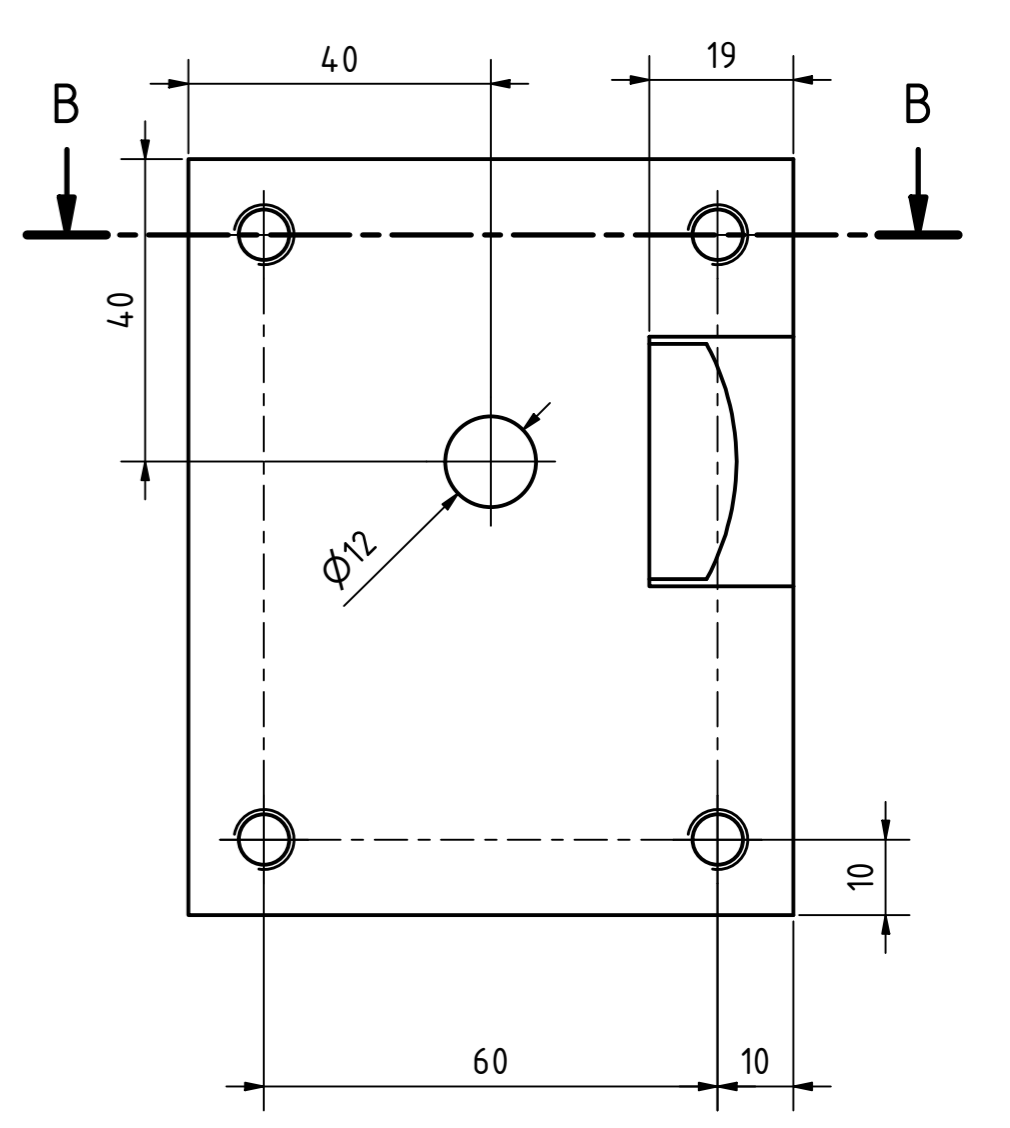
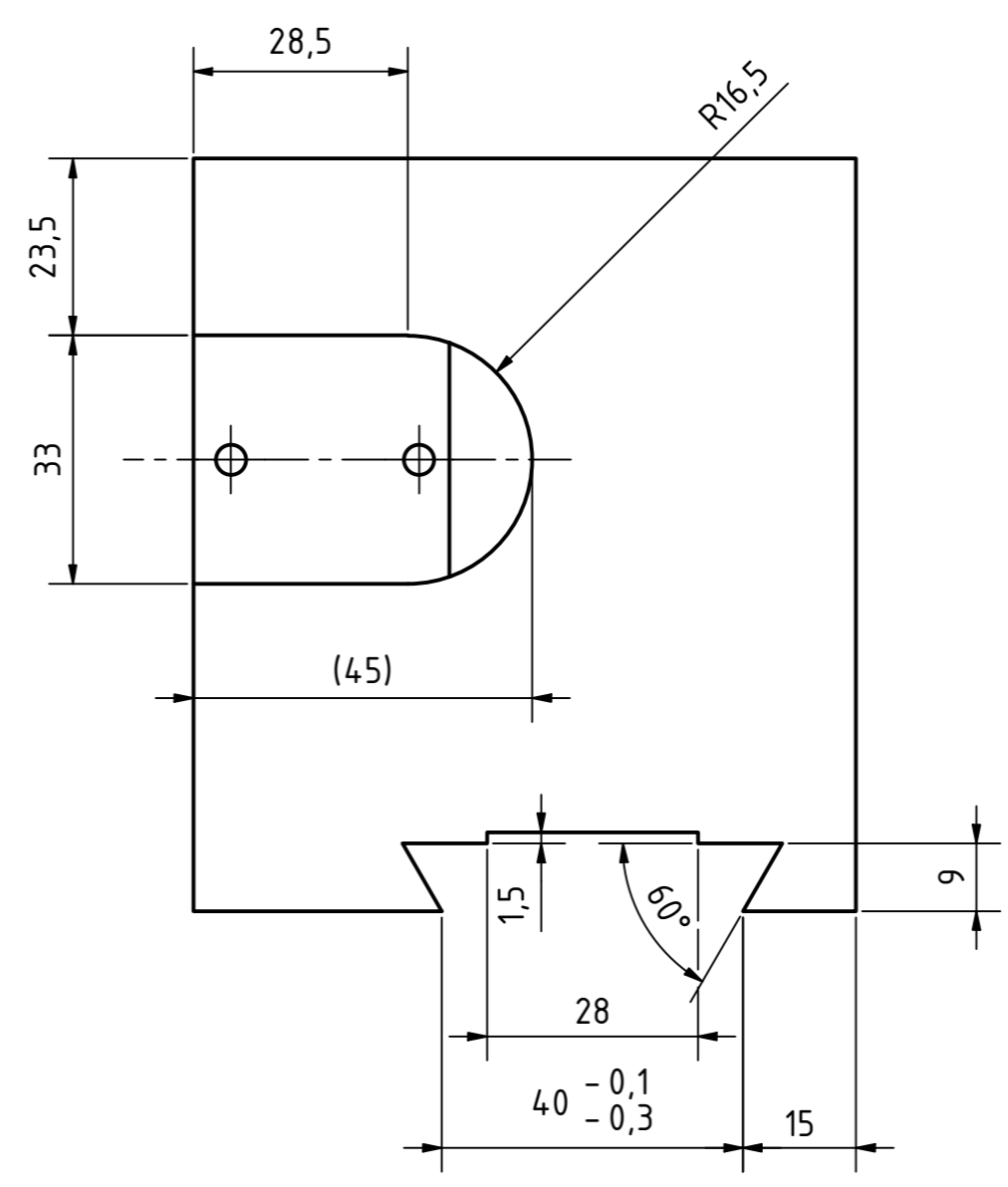
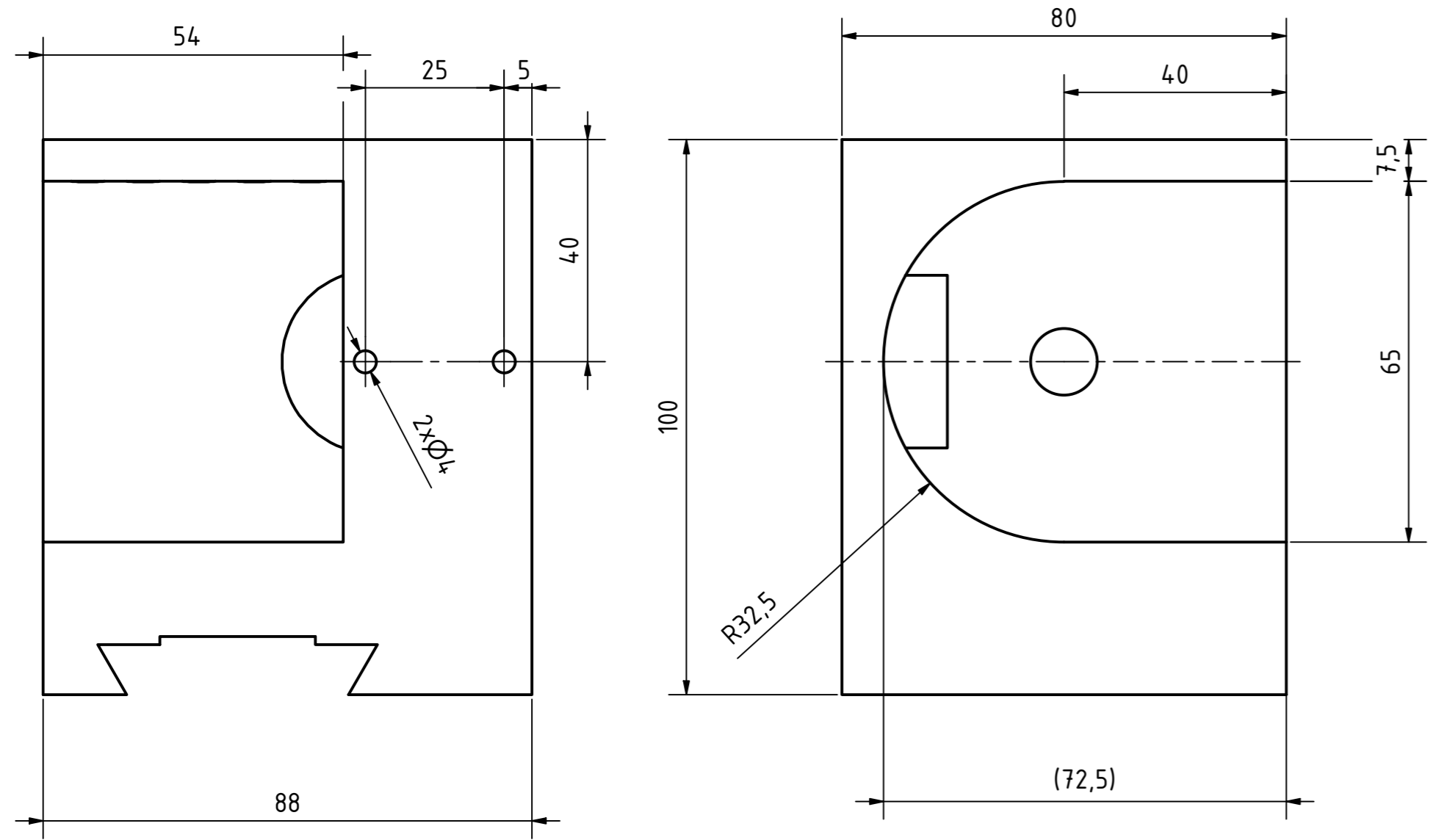
Počítač je vybaven programem TIRAtest v.2.1 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10 002 a EN ISO 6892 s vyhodnocením výsledků a grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

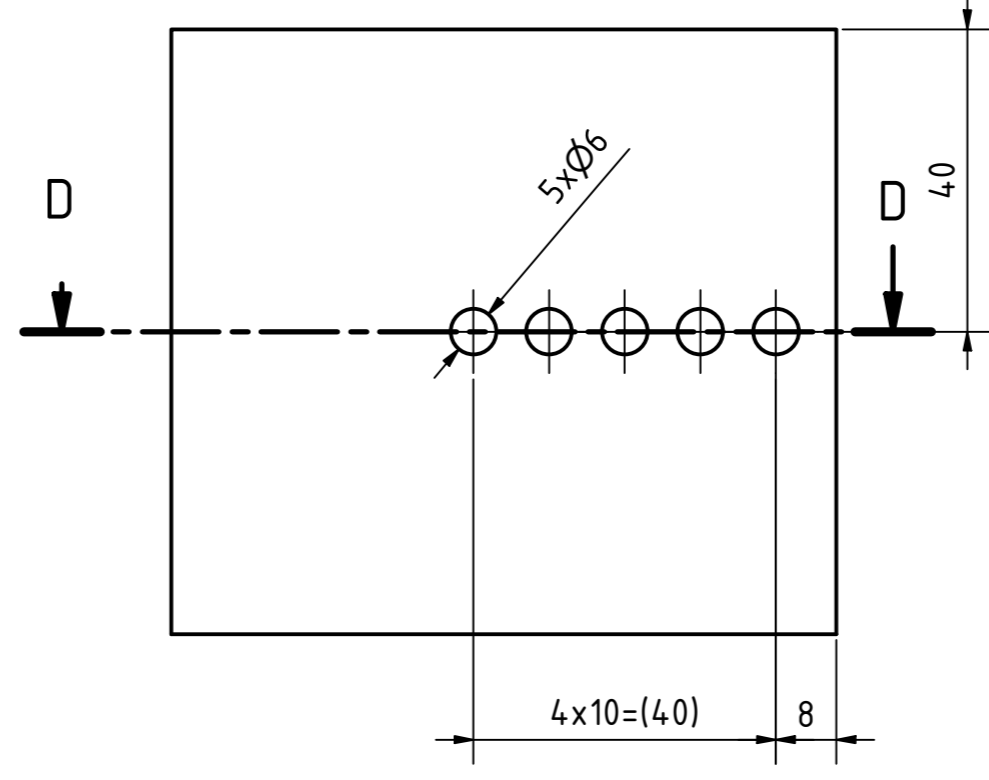
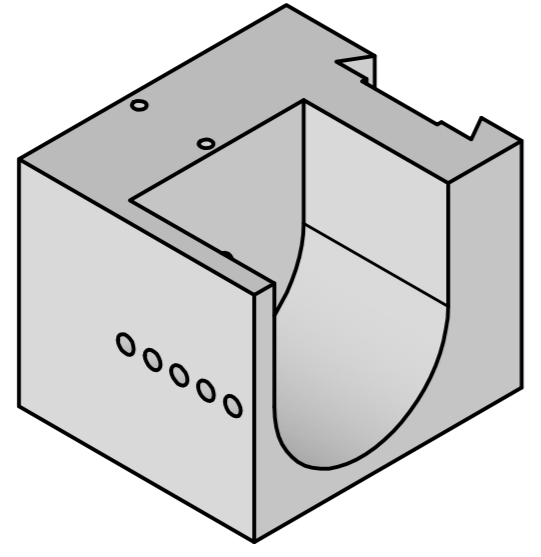
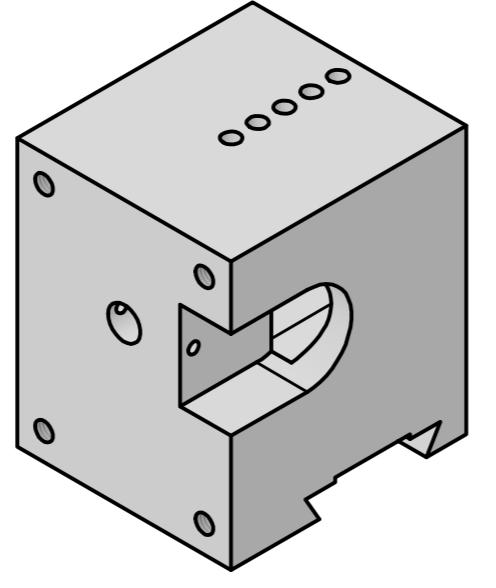
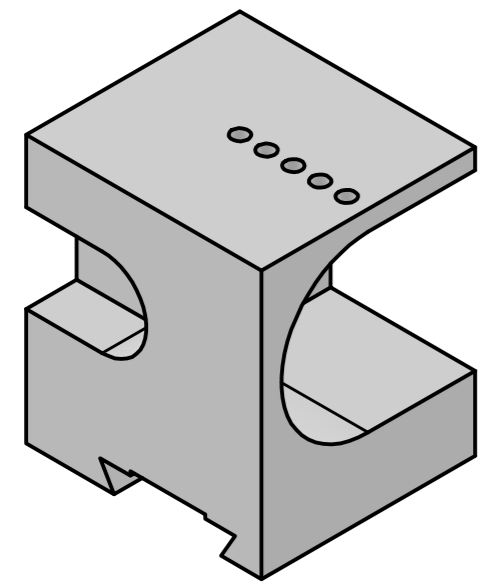
VUT FSI ÚST BRNO		VÝROBNÍ POSTUP		Název peřku :	PŘÍPRAVEK	Název součástky :	DOPADIŠTĚ
Dne : 07.12.2021		Vyhotořil : Majchrák		Kontroloval : Zouhar		Číslo výkresu součásti : 2023-DP-200260-02	
Číslo op. pořadové :		Název, označení stroje, zařizení, pracoviště :		Dílňa :		Popis práce v operaci :	
Orientační :		Třídící číslo :				Výrobní nástroje, přípravky, měřidla, pomůcky :	
01/01	PÁSOVÁ PILA	DĚLÍRNA MATERIÁLU		REZAT POLOTOVAR NA DELKU 105		PILOVÝ PÁS	
02/01 02/02	FRÉZKA	OBROBNA		UPNOUT ZA ROZMĚR 90x90 MM ZAROVNÁNÍ ČELA		ČELNÍ FRÉZA	
03/01 03/02	FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 90 x 105 MM HRUBOVÁNÍ NA ROZMĚR 88 MM		ČELNÍ FRÉZA	
04/01 04/02	FRÉZKA			OTOČIT OBROBEK 0 90° A UPNOUT HRUBOVÁNÍ NA ROZMĚR 80 MM		ČELNÍ FRÉZA	
05/01 05/02	FRÉZKA			UPNOUT OBROBEK ZA ROMER 88x80 MM HRUBOVÁNÍ NA ROZMĚR 100 MM		ČELNÍ FRÉZA	
06/01 06/02	FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 88x100 MM FINIŠOVÁNÍ NA ROZMĚR 80 MM		ČELNÍ FRÉZA	
07/01 07/02	FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 80x100 MM FINIŠOVÁNÍ NA ROZMĚR 88 MM		ČELNÍ FRÉZA	
08/01 08/02	FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 80x88 MM FINIŠOVÁNÍ NA ROZMĚR 100 MM		ČELNÍ FRÉZA	
09/01				MEZIOPERAČNÍ KONTROLA ROZMĚRŮ		POSUVNÉ MĚŘITKO	
10/01 10/02	CNC FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 88x100 MM HRUBOVÁNÍ VYBRÁNÍ R16,5 MM		ČELNÍ FRÉZA STOPKOVÁ	
11/01 11/02	CNC FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 80x100 MM HRUBOVÁNÍ VYBRÁNÍ R32,5 MM		ČELNÍ FRÉZA STOPKOVÁ	
12/01 12/02	CNC FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 88x100 MM FINIŠOVÁNÍ VYBRÁNÍ R16,5 MM		ČELNÍ FRÉZA STOPKOVÁ	
13/01 13/02	CNC FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 80x100 MM FINIŠOVÁNÍ VYBRÁNÍ R32,5 MM		ČELNÍ FRÉZA STOPKOVÁ	
14/01 14/02 14/03	FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 80x88 MM PŘEDFRÉZOVÁNÍ PRAVOUHLÉ DRÁŽKY FRÉZOVÁNÍ RYBINOVÉ DRÁŽKY		ČELNÍ FRÉZA ÚHLOVÁ FRÉZA 60°	
15/01 15/02	CNC FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 80x88 MM VYVRTÁNÍ DĚR 5x ø6 MM, H=7,5 MM		HSS VRTÁK ø6 MM	
16/01 16/02	CNC FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 80x100 MM VYVRTÁNÍ DÍRY ø12 MM, H=34 MM		HSS VRTÁK ø12 MM	
17/01	CNC FRÉZKA			VYVRTANÍ DER PRO ZAVITY 4xø7 MM, H=20 MM		HSS VRTÁK ø7 MM	
18/01	CNC FRÉZKA			ŘEZÁNÍ ZAVITU 4xM8, H=14 MM		ZÁVITNÍK M8	
19/01 19/02	CNC FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚR 88x100 MM VYVRTÁNÍ DĚR 2x ø4mm, H=61 MM		HSS VRTÁK ø4 MM ZVLÁŠT DLOUHÝ	
20/01				KONTROLA ROZMĚRŮ VYROBKU		POSUVNÉ MĚŘITKO	

VUT FSI ÚST BRNO		VÝROBNÍ POSTUP		Název celku :	PŘÍPRAVEK	Název součástky :	UPÍNKA
Dne : 07.12.2021		Vyhotoval : Majchrák		Kontroloval : Zouhar		Polotovár: EN 10058 – 85 x 12 x 105 ČSN 11 600	
Číslo op. pořadové :		Název, označení stroje, zařízení, pracoviště :		Dílna :		Popis práce v operaci :	
Orientační :		Třídící číslo :				Výrobní nástroje, přípravy, měřidla, pomůcky :	
01/01	PÁSOVÁ PILA	DĚLÍRNA MATERIÁLU		REZAT POLOTOVAR NA DÉLKU 105 MM		PILOVÝ PÁS	
02/01 02/02 02/03	FRÉZKA	OBROBNA		UPNOUT ZA ROZMĚRY 80 x 10 MM ZAROVNÁNÍ ČELA FRÉZOVÁNÍ NA DÉLKU 100 MM		ČELNÍ FRÉZA ČELNÍ FRÉZA	
03/01 03/02	FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚRY 100 x 10 MM FRÉZOVÁNÍ NA ROZMĚR 80 MM		ČELNÍ FRÉZA	
04/01 04/02	FRÉZKA			UPNOUT ZA ROZMĚRY 80 x 100 MM FRÉZOVÁNÍ NA VÝŠKU 10 MM		ČELNÍ FRÉZA	
05/01				MEZIOPERACNÍ KONTROLA ROZMĚRŮ		POSUVNÉ MĚŘITKO	
06/01 06/02	VRTAČKA			UPNOUT ZA ROZMĚRY 80 x 100 MM VYVRTÁVÁNÍ DĚR 4 x Ø9 MM, H=10 MM		HSS VRTÁK Ø9 MM	
07/01 07/02 07/03	CNC			UPNOUT ZA ROZMĚRY 80 x 100 MM HRUBOVÁNÍ VNITŘNÍHO VYBRÁNÍ FINISOVÁNÍ VNITŘNÍHO VYBRÁNÍ		ČELNÍ FRÉZA STOPKOVÁ ČELNÍ FRÉZA STOPKOVÁ	
08/01				KONTROLA ROZMĚRŮ VYROBKU		POSUVNÉ MĚŘITKO	

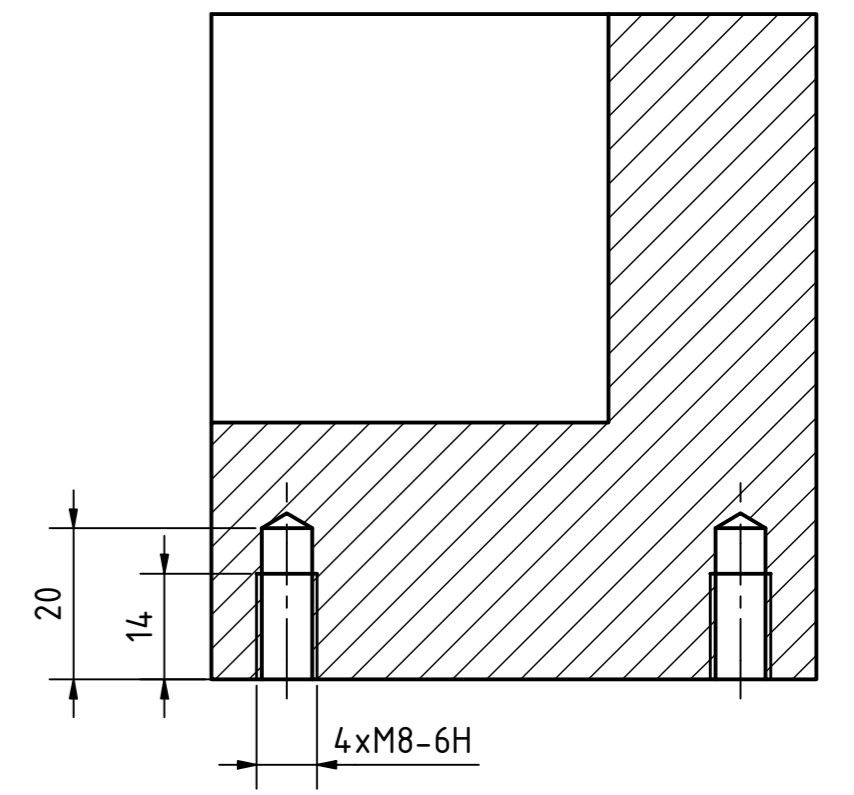


B-B ( 1 : 1 )

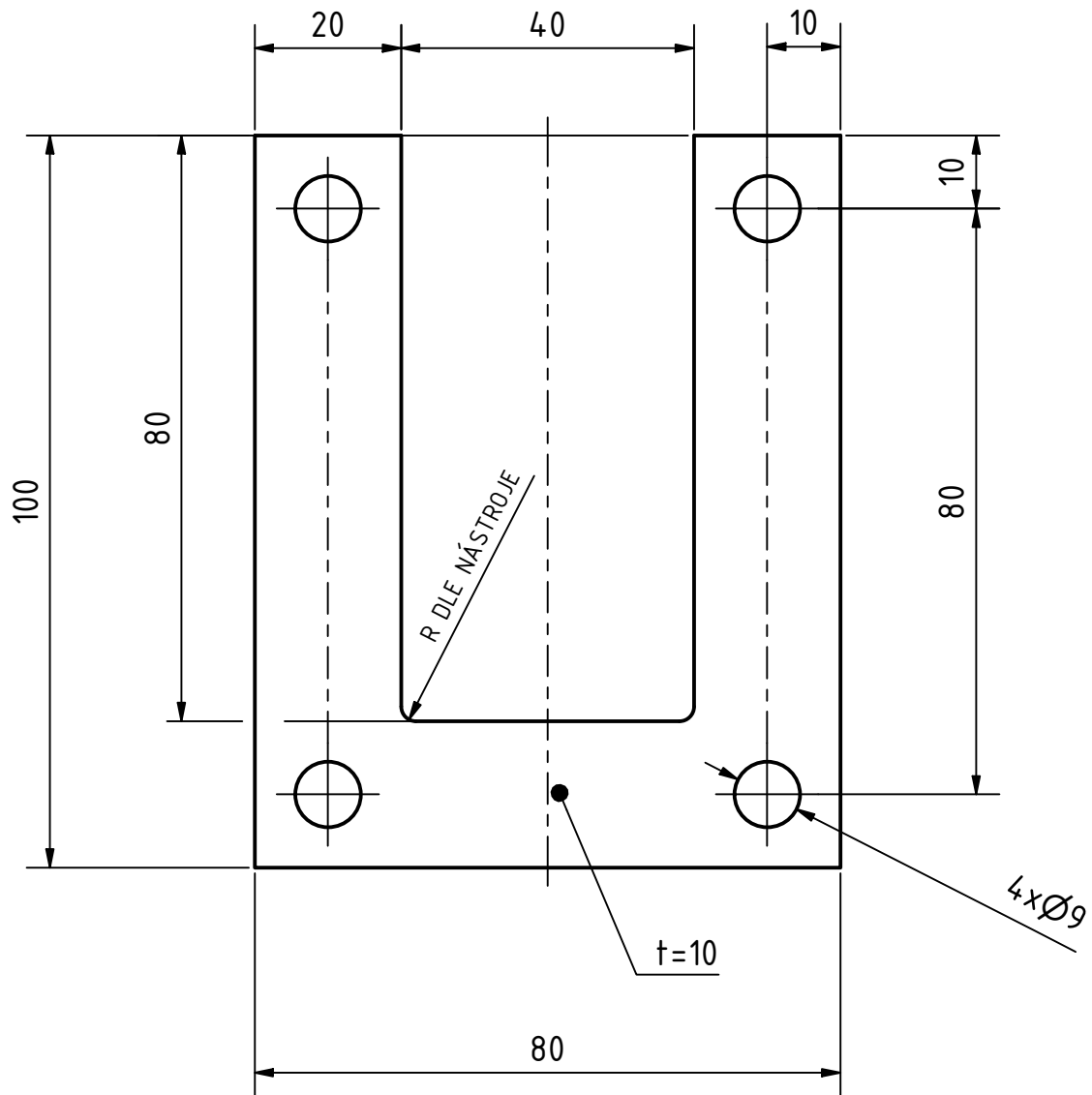
3D POHLEDY V MĚŘÍTKU 1:2



D-D ( 1 : 1 )



	11 600		Měřítko 1:1	Přesnost ISO2768-mH
	DOPADISTE			
	Datum	Jméno		
	Nakreslen	05.12.2021	Majchrák	
Kontrola	06.12.2021	VUT FSI UST		
Norma				
			2023-DP-200260-01	1 A2



SRAZIT HRANY 0,2x45°

Ra 3,2	11 600	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mH
		SVORNIK	
	Datum	Jméno	
Nakreslen	05.12.2021	Majchrák	
Kontrola	06.12.2021	VUT FSI UST	
Norma			
		2023-DP-200260-02	2
			A4