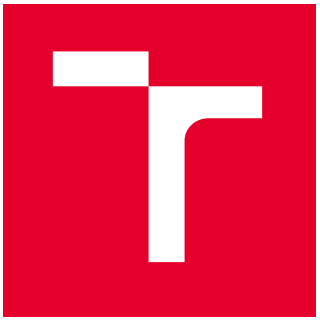


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA TERMOPLASTICKÝCH KOMPOZITŮ

MANUFACTURING OF THERMOPLASTIC COMPOSITES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štefan Makariv

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

BRNO 2023

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Štefan Makariv**
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	**Ing. Jan Zouhar, Ph.D.**
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 termoplastických kompozitů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba termoplastických kompozitů v posledních letech nabývá na intenzitě vzhledem k jejich jedinečným vlastnostem a zejména díky rychlému výrobnímu procesu. Tento proces je realizován ve většině aplikací pomocí lisování. Technologie lisování obsahuje mnoho parametrů, které je nutné dodržet a které ovlivňují výsledné vlastnosti výrobku. Práce se zaměřuje na vytvoření prototypového nástroje a sledování parametrů a jejich vlivů na výsledný díl.

Cíle diplomové práce:

1. Literární rešerše – materiály, technologie, využití.
2. Návrh prototypového lisovacího přípravku.
3. Výroba vzorků.
4. Vyhodnocení vlivu parametrů na vlastnosti vzorků.

Seznam doporučené literatury:

JONES, R. M. Mechanics of Composite Materials. 2. Boca Raton: CRC Press, 1999. ISBN 9781315272986.

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. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá skúmaním mechanických vlastností a aplikačných možnosti využitia vo výrobe funkčných dielov termoplastických kompozitných materiálov Endumax Shield XF33 a Twaron CT 747 TH110 určených pre balistické aplikácie. Pre skúmanie vlastností spomenutých materiálov bolo potrebné navrhnúť a vyrobiť lisovací prototypový prípravok s ohrevným a chladiacim systémom pre výrobu vzoriek z kompozitného materiálu metódou lisovania za tepla. V rámci práce boli popísané kroky počas návrhu lisovacieho prípravku a následnej výroby vzoriek. Vzorky boli podrobené mechanickým skúškam na ťah a ohyb. Výsledky mechanických skúšok boli porovnané s hodnotami reaktoplastického kompozitného materiálu Twaron CT 747 ER68 vyrobeným v autokláve a výsledkami výskumov materiálov s podobným zložením. Vyhodnotenie vlastností ukázalo, že skúmané termoplastické kompozitné materiály nemajú vlastnosti pre použitie pri výrobe funkčných dielov. Vlastnosti mohli ovplyvniť procesné podmienky. V rámci detailného skúmania procesných podmienok bola odporučená ďalšia odborná činnosť.

Kľúčové slova

Kompozitné materiály, Termoplastická matrica, Výroba kompozitov, Balistické kompozity

ABSTRACT

This thesis investigates the mechanical properties and application possibilities for use in the manufacture of functional parts of Endumax Shield XF33 and Twaron CT 747 TH110 thermoplastic composite materials intended for ballistic applications. To investigate the properties of the materials, it was necessary to design and fabricate a prototype pressing jig with a heating and cooling system for the production of composite material samples by the hot-pressing method. The steps during the design of the pressing jig and the subsequent production of the samples were described. The specimens were subjected to mechanical tensile and flexural tests. The results of the mechanical tests were compared with those of the autoclave produced Twaron CT 747 ER68 reactoplastic composite material and with the results of investigations of materials with similar compositions. The evaluation of the properties showed that the investigated thermoplastic composite materials do not have the properties for use in the manufacture of functional parts. The process conditions may have influenced the properties. Further technical work was recommended to investigate the process conditions in detail.

Keywords

Composite materials, Composite materials, Thermoplastic matrix, Composite manufacturing, Ballistic composites

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAKARIV, Štefan. Výroba termoplastických kompozitů [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145748. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Zouhar.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému Výroba termoplastických kompozitov vypracoval samostatne s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho práce.

Brno, 25.05.2023

Štefan Makariv

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval Ing. Janovi Zouharovi PhD. za odborné vedenie a cenné rady pri spracovávaní tejto diplomovej práce. Takisto by som rád vyjadril vďaku Ing. Jindřichovi Vilišovi za jeho cenné informácie a pripomienky. V neposlednom rade by som sa rád poďakoval svojej rodine za neustálu podporu pri štúdiu.

OBSAH

ÚVOD 9
1. ROZBOR ZADANIA DIPLOMOVEJ PRÁCE 10
2 TEORETICKÁ ČASŤ 10
2.1 Kompozitné materiály 10
2.2 História kompozitných materiálov a ich charakteristika 10
2.2.1 Matrice 11
2.2.2 Výstuž 14
2.2.3 Štruktúra vláknových kompozitných materiálov 17
2.2.4 Vrstvenie kompozitných materiálov 19
2.2.5 Prepregy 20
2.3 Výroba kompozitných materiálov 21
2.3.1 Základné prvky výroby kompozitných materiálov 22
2.3.2 Porovnanie spracovateľnosti termoplastických a reaktoplastických kompozitných materiálov 22
2.3.3 Technológie výroby termoplastických kompozitných materiálov 23
3 PRAKTICKÁ ČASŤ 32
3.1 Charakteristika použitého materiálu 32
3.2 Návrh lisovacieho prípravku 34
3.3 Výroba skúšobných vzoriek 37
3.4 Určenie mechanických vlastností 42
3.4.1 Skúška ťahových vlastností 43
3.4.2 Skúška ohybových vlastností 44
4 VYHODNOTENIE A DISKUSIA VÝSLEDKOV 47
4.1 Vyhodnotenie ťahových vlastností 47
4.2 Vyhodnotenie ohybových vlastností 53
4.3 Diskusia dosiahnutých poznatkov o skúmaných materiálov. 58
ZÁVER 59
Zoznam použitých zdrojov
Zoznam použitých symbolov a skratiek
Zoznam príloh
Zoznam výkresov

ÚVOD

Kompozitný materiál je dnes pojem, ktorý je známy širšej verejnosti. Najčastejšie je možné sa o nich dopočuť v súvislosti s leteckým, vesmírnym, ale aj automobilovým priemyslom, kde každému pri slove kompozit príde na um materiál karbón. No málokto vie, že pojem kompozit označuje materiál tvorený čiastkovými materiálmi, ktoré sú od seba rozličné štruktúrou. Najčastejším kompozitom s ktorým sa každodenne stretáva bežný človek je betón využívaný v stavebníctve. V rámci strojárskeho priemyslu sú najbližšie kompozitné materiály polymérne. Tie predstavujú materiály, ktoré majú nosnú mechanickú časť tvorenú výstuhou rôznych materiálov a spájajúcou časťou polymérneho typu.

Polymérne kompozitné materiály sa v strojníckom priemysle využívajú už zopár desiatok rokov, ale donedávna boli využívané polyméry označované ako reaktoplastické, ktoré majú veľa dobrých vlastností, ale v spojení s dobou, v ktorej sa začína dbať na ekológiu a s ňou spojenou recykláciu strácajú svoju dominanciu. Vďaka tomu sa pozornosť výskumu a spoločností zamerala na polymérne materiály označované ako termoplastické, ktoré všeobecne nedosahujú mechanických vlastností, ako reaktoplastické, ale majú možnosť byť recyklované a teda znovu použiteľné. Preto sa dá očakávať, že v budúcnosti sa na trhu bude objavovať čím ďalej tým viac a viac materiálov zo skupiny termoplastických kompozitných materiálov. Práve preto sa táto diplomová práca zaoberá materiálmi, kde môže byť zaujímavé zhodnotiť aktuálny stav vlastností niektorých materiálov z tejto skupiny keďže ich pozícia na trhu materiálov silnie s postupujúcim výskumom a objavovaním nových kombinácii termoplastickej matrice a rôznej výstuže, ktorá prináša zaujímavé mechanické vlastností pri nízkej hmotnosti a možnej následnej recyklácie.

Predmetom tejto diplomovej práce je uviesť do problematiky termoplastických kompozitov a ich výroby v porovnaní s výrobou reaktoplastických kompozitov. Ďalším zaujímavým krokom je skúmanie ťahových a ohybových mechanických vlastnosti termoplastických kompozitných materiálov určených na balistické účely, pri ktorých to nie je úplne bežné. Čím bude následne možné zhodnotiť využiteľnosť týchto materiálov mimo ich bežného účelu a objavovať možné prísľuby využitia týchto materiálov v budúcnosti. Zároveň bude možne zhodnotiť, ako na tom termoplastické kompozity materiály stoja v porovnaní s kompozitnými materiálmi termoplastickými.

1. ROZBOR ZADANIA DIPLOMOVEJ PRÁCE

Kompozitné materiály sa často spomínajú ako materiály budúcnosti. Napriek tomu, že kompozitné materiály sa na zemi využívajú v rôznych formách už stovky až tisícky rokov v rôznych formách, táto diplomová práca sa zaoberá kompozitnými materiálmi na polymérnej báze. Keďže sa poslednom období rozmáha využitie a aplikačné možnosti termoplastických kompozitov, je táto diplomová práca zameraná na túto skupinu materiálov. Medzi termoplastické kompozity patrí veľké množstvo materiálov vhodných pre balistické účely, ale ich aplikácia v bežných výrobkoch nebola dostatočne preskúmaná. Z tohoto dôvodu bude táto diplomová práca zameraná na preskúmanie ich vlastností a ďalšie možné aplikácie.

V zadaní tejto diplomovej práce sú zadané ciele: spracovanie teoretickej časti, návrh prototypového lisovacieho prípravku, výroba vzoriek, vyhodnotenie výrobného procesu a výsledných vlastnosti vzoriek.

V teoretickej časti budú definované kompozitné materiály z pohľadu ich zloženia vlastností a výroby, kde bude pozornosť zameraná na uvedenie do tematiky kompozitných materiálov a následne smerované k termoplastickým kompozitným materiálom v rámci ich vlastnosti, zloženia a výroby v porovnaní s kompozitnými materiálmi reaktoplastickými.

V praktickej časti bude potrebné popísať použité materiály, z ktorých budú vyrobené testovacie vzorky. Následne bude popísaný návrh prototypového lisovacieho prípravku, kde budú popísané faktory, ktoré ovplyvňujú návrh ako sú materiál, geometria, elektrický systém, ohrevný a chladiaci systém. Nakoniec bude v práci priložený výkres návrhu týchto lisovacích dosiek.

V rámci praktickej časti bude potrebné vyrobiť vzorky pomocou technológie lisovania za tepla. Celý prípravný a výrobný proces bude podrobne zadokumentovaný a popísaný.

Po výrobe bude potrebné vzorky otestovať na ich mechanické vlastnosti preto bude venovaná podkapitola mechanickým skúškam, kde budú popísané podmienky a priebeh testovania.

V závere bude potrebné výsledky testov zhodnotiť a porovnať materiály medzi sebou a dostupnými výsledkami podobných materiálov iných výskumov a ukázať vplyv výroby na výsledky. Následne na základe výsledkov budú zhodnotené aplikačné možností konkrétnych balistických materiálov z termoplastických kompozitov.

2 TEORETICKÁ ČASŤ

V úvode teoretickej časti tejto diplomovej práce sú definované kompozitné materiály, ich história, rozdelenie, vlastnosti, výroba a aplikácia. V nasledujúcej časti je pozornosť venovaná termoplastickým kompozitom, kde sú popísané materiály používane na ich výrobu a ich vlastnosti, technológie výroby a nakoniec aplikácie.

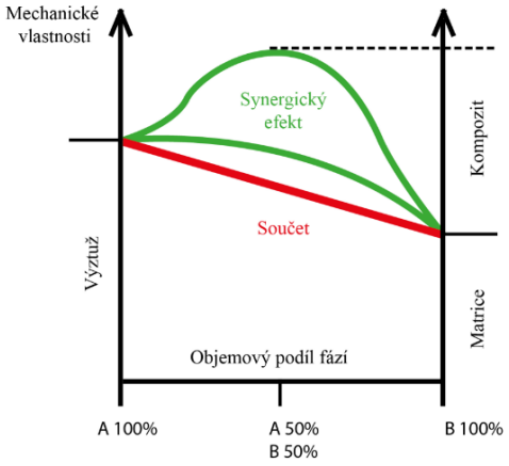
2.1 Kompozitné materiály

Pomenovanie kompozitný materiál vyjadruje spojenie dvoch alebo viacerých rôznych materiálov, kde ich správnou kombináciou dokážu docieliť výsledné vlastnosti, ktoré sú lepšie ako majú samostatné materiály, z ktorých je kompozit kombinovaný. Vzniká systém, ktorý nie je homogénny, ale fázy z ktorých je tvorený sú odlíšiteľné. Každá fázu plní svoji úlohu, kde sa jedna chová výstuž a druhá ako matrica. Materiály, ktoré tvoria kompozit by mali mať odlišné mechanické, chemické aj fyzikálne vlastnosti. Kompozitné materiály je možné vyrábať z rôznych materiálov, ako sú napríklad: drevo, polyméry, zliatiny kovov a aj minerály.[1; 2; 5]

2.2 História kompozitných materiálov a ich charakteristika

Kompozity svet pozná už dlhšiu dobu, keď sa používali už za čias Mezopotámie približne 3400 rokov pred našim letopočtom. V Mezopotámii lepili drevené pásiky v rôznych uhloch a tým dokázali vyrábať preglejku už v tej dobe [4]. Takisto už starovekí Egypťania namáčaním vrstiev papyrusu v sadre dokázali vyrábať posmrtné masky pre svojich zosnulých [3]. Skutočnú pozornosť začali dostávať až v 60. rokoch 20. storočia pri predstavení kompozitov na báze polymérov, kedy si priemysel začal reálne všímať potenciál kompozitných materiálov. Odvtedy je možné stretnúť sa s kompozitami v skoro všetkých odvetviach priemyslu, ako sú rôzne spotrebné tovary, športové potreby, vesmírny a automobilový priemysel a taktiež námorný a ropný priemysel.[1]

Vývoj kompozitov bol podporovaný pre ich možnosti kombinácie vlastností materiálov ním tvorených, kde je možné dosiahnuť veľmi dobrých mechanických vlastností pri zachovaní nízkej váhy. Vedia nahradiť konvenčné materiály, ktoré pri potrebe podobných vlastnosti majú oveľa väčšiu váhu ako je to u kompozitných materiálov. Pre porovnanie majú kompozity vysoký pomer tuhosti k hustote, kde pri porovnateľnej tuhosti ako má oceľ majú pri päťinovú váhu. Podobne je to aj pri mechanických vlastnostiach, ako sú pevnosť a únavová pevnosť. Ďalšími schopnosťami týchto materiálov sú dobrá odolnosť voči chemikáliám a korózii, flexibilita pri návrhu dizajnu a vyrobiteľnosť v požadovanom tvare.[1]

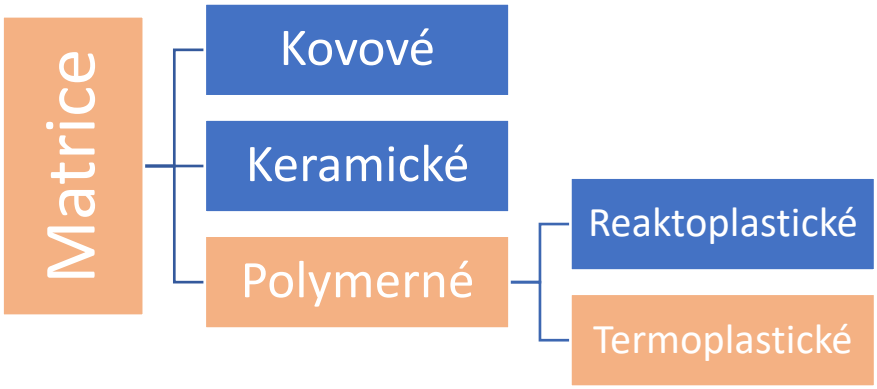


Obr. 1 Synergický efekt v kompozitoch [6].

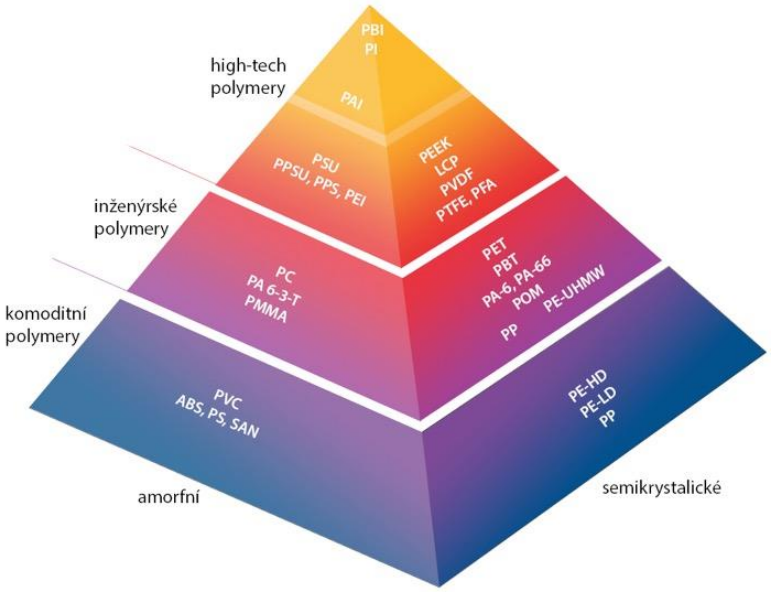
Ako bolo spomenuté v kapitole 2.1 kompozitné materiály sú tvorené viacerými fázami, ktoré majú svoje potrebné vlastnosti pre to aby kompozit dosiahol požadované vlastnosti. Jednou fázou je matrica, ktorá býva spojitá a má úlohu spojiva. Druhou fázou je výstuž, ktorá má lepšie mechanické vlastnosti ako matrica. Ďalším dôležitým pojmom je synergizmuz, ktorý vyjadruje ako spolu kooperujú matrica a vystuž. Synergický efekt je možne zobraziť grafom, kde je možné vidieť ako veľmi sa daná vlastnosť zlepšila oproti pôvodnému stavu vstupných materiálov viz obr. 1.[5]

2.2.1 Matrice

Hlavnou funkciou matrice ako spojitej fáze v kompozitoch je udržať výstuž pokope, ale zároveň má vplyv aj na iné vlastnosti. Dôležitým aspektom, ktorým matrica prispieva k výslednému efektu je aj to, že oddeľuje vlákna čim umožňuje vláknam správať sa individuálne. Zároveň matrica ovplyvňuje aj kvalitu povrchu a môže podporovať povrchovú ochranu pred mechanickým a chemickým opotrebením. Kompozitné materiály je možné rozdeliť na základe typu matrice do viacerých kategórii a to sú kovové, polymérne, keramické prípadne špeciálne typy matríc viz obr. 2.[1; 7]



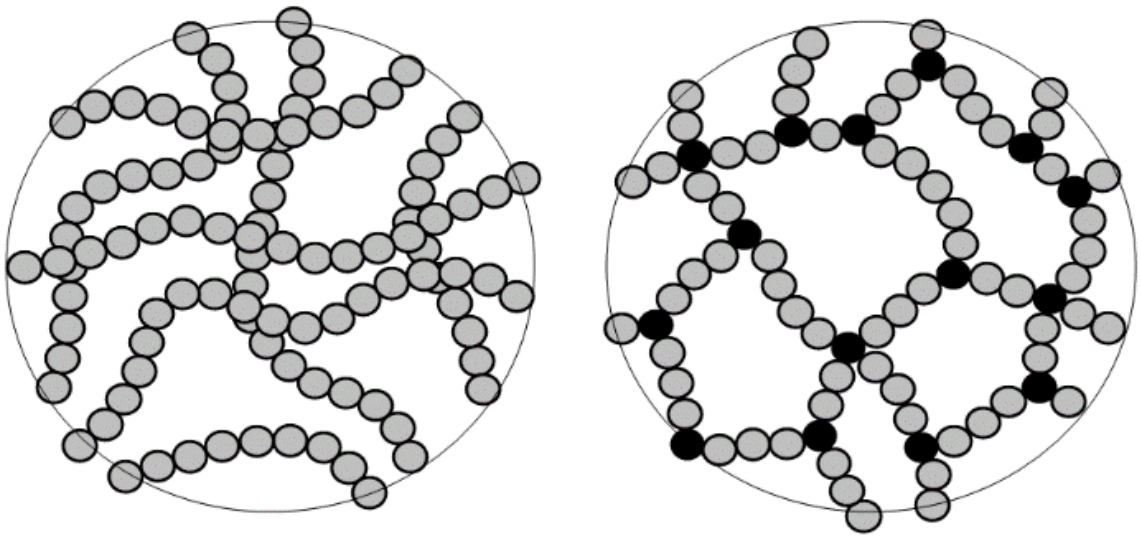
Obr. 2 Rozdelenie matríc kompozitných materiálov podľa druhu materiálu [1].



Obr. 3 Rozdelenie polymérov na základe postavenia na trhu [50].

Vzhľadom na tému tejto diplomovej práce bude pozornosť zameraná na matrice z polymérnych materiálov. Polyméry majú v dnešnej dobe široké uplatnenie a dajú sa triediť na základe viacerých parametrov. Delenie polymérov môže byť na základe postavenia na trhu viz obr. 3., takisto podľa chovania pri zahrievaní alebo na základe nadmolekulárnej štruktúry. Na základe chovania pri zahrievaní sa matrice z polymérov dajú rozdeliť do dvoch základných skupín, ktoré sú reaktoplasty a termoplasty.[50]

Reaktoplast je polymérny materiál, pri ktorom po vychladnutí a po tepelnom spracovaní dochádza k javu, ktorý sa volá vytvrdzovanie. To znamená, že po vychladnutí sa v reaktoplaste vytvorí trojrozmerná sieť viz obr. 4, ktorá už neumožní tento polymér roztaviť ani rozpustiť [8]. Zvyšujúcim sa číslom zosieťovaných väzieb siete sa zvyšuje tepelná stabilnosť a tuhosť zároveň. Výhodami reaktoplastov sú dobra odolnosť voči chemikáliám, elektrine a rozpúšťadlám, majú dobrú rozmerovú a tepelnú stabilitu. Niektoré druhy sa vyznačujú dobrou zmáčavosťou vlákien a nehorľavosťou. Nevýhodou môžu byť krehkosť, náročná automatizácia, potreba udržiavať materiál v chladnom prostredí a nie je možné ich recyklovať z dôvodu zosieťovania. Medzi najčastejšie reaktoplasty používané ako matrice v kompozitných materiáloch patria: fenoly, epoxidy, polyestery, kyanátové testery, polyamidy, vinylestery a polyuretány.[1; 10]



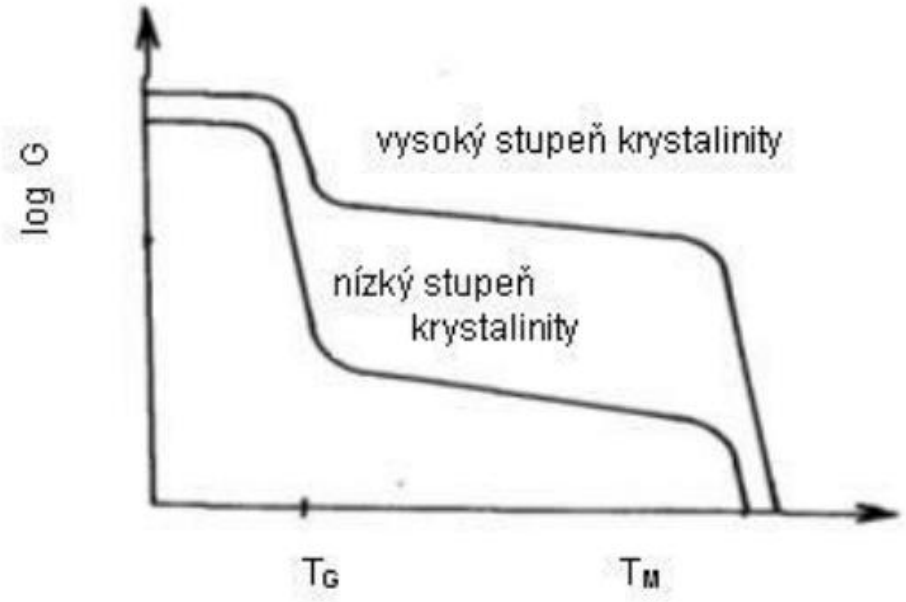
Obr. 4 Zosieťovanie reaktoplastov po vytvrdnutí [9].

Termoplasty sa na rozdiel od reaktoplastov nevytvrdzujú, čo znamená že sa dajú opakovane taviť a technologicky spracovať. Zvyčajne majú vyššiu pevnosť a húževnatosť ako reaktoplasty. Aj z dôvodu nevýhod, ktoré termoplasty oproti reaktoplastom majú sa pri výrobe kompozitných materiálov začínajú uplatňovať termoplasty. Medzi ich vhodné vlastnosti patria vysoké percento recyklovateľnosti, dobra odolnosť na rázy a jednoduchosť výroby. Nevýhodou môžu byť nižšia odolnosť proti tečeniu oproti reaktoplastom, nižšia odolnosť voči rozpúšťadlám, horšia zmáčavosť vlákien, potreba vyšších tlakov a teplôt pri spracovaní. Termoplasty sa na základe nadmolekulárnej štruktúry delia na amorfné a semikryštalické.[1; 8]

Amorfné termoplasty sa vyznačujú tým, že ich makromolekuly nemajú pravidelnú usporiadanosť. Čo ma za následok, že pri zvýšenej teplote dochádza k ich mäknutiu a pri dosiahnutí teploty vyššej ako je teplota skleneného prechodu T_g nastáva skoková zmena a pokles ich mechanických vlastností, ako je napríklad pevnosť. Ďalšou špecifickou teplotou amorfných polymérov je teplota viskózneho toku T_f, pri ktorej prekročení materiálu klesne modul pružnosti v podstate na hranicu nuly a nastáva prechod skupenstva z tuhého na taveninu. Práve nad teplotou viskózneho toku sa amorfné polyméry spracovávajú. Dôležitým faktorom pri výbere amorfného polyméru je, že teplota aplikácie v ktorej sa bude výrobok z tohto

materiálu používať, zvolená o 50 °C nižšia ako je teplota skleneného prechodu daného materiálu. Medzi amorfné termoplasty patria polykarbonát, polystyrén a polymetylakrilát.[1; 8]

Semikryštalické termoplasty sa vyznačujú hodnotou kryštalinity, ktorá určuje podiel kryštalickej štruktúry v polyméri a tá predstavuje usporiadanie makromolekulových reťazcov. Kryštalinita sa u semikryštalických polymérov pohybuje v rozmedzí 40 % až 90 % a má vplyv na mechanické vlastnosti. Zo zvyšujúcou sa kryštalinitou sa zvyšujú hodnoty pevnosti a modulu pružnosti. Na rozdiel od amorfných polymérov nie je až tak pre nich špecifická teplota skleného prechodu, ale iba teplota topenia T_m nad ktorou sa semikryštalické termoplasty spracovávajú. Medzi semikryštalické termoplasty sa radia napríklad polypropylén, polyetylén a polyamid.[1; 8; 11] Vplyv usporiadanosti molekúl na modul pružnosti pri zvyšujúcej sa teplote je možné vidieť v obr. 5.



Obr. 5 Závislosť kryštalinity na modul pružnosti v šmyku [12].

Vzhľadom na tému tejto diplomovej práce sú nižšie popísané len termoplastické matrice, ktoré sú často využívané v priemyselnej výrobe kompozitných materiálov. Medzi ne sa radia nylon, polypropylén, polyfenyl sulfid a polyetereterketón viz tab. 1.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti termoplastických matríc [34; 51; 52; 53].

Materiál	Pevnosť v ťahu [MPa]	Modul pružnosti v ťahu [GPa]	Predĺženie v ťahu [%]	Teplota skleneného prechodu [°C]
Nylon 6	86,2	2,8	25	50
PPS	69,9	3,3	4	97
PEEK	96,5	3,6	50	143
PP	35,5	1,7	400	-15

Nylon je polymér, inak označovaný ako polyamid. Na trhu je možné kúpiť mnoho druhov s označením Nylon 6, Nylon 66, Nylon 11 alebo Nylon 12, kde každý z nich má iné mechanické vlastnosti. Najčastejšie používané sú Nylon 6 a 66. Nylon je semikryštalický termoplast s nízkou hustotou približne 1,1 $g \cdot m^{-3}$. Ďalšími vlastnosťami, ktorými sa Nylon vyznačuje je dobrá kvalita povrchu a jej mazivosť. Naopak absorpcia vlhkosti, ktorá má vplyv na rozmerovú stabilitu, ale pridaním výstuže je možné dosiahnuť nie len tvarovú stabilitu, ale dobrú odolnosť voči nárazu porovnateľnú s hliníkom. Vo výrobe kompozitných materiálov si nylony našli svoje uplatnenie v technológii vstrekovania a pultrúzie, kde sa z nich vyrábajú potrubia alebo rôzne puzdrá.[1; 35]

Polypropylén označovaný PP, je semikryštalický termoplast. Polypropylén sa vyznačuje nízkou hustotou približne 0,9 $g \cdot m^{-3}$, dobrou chemickou a elektrickou odolnosťou, nízkou absorpciou vlhkosti, dobrou pevnosťou a únavovou odolnosťou. Svoje uplatnenie v priemysle si polypropylény našli najmä vďaka svojej univerzálnosti a dobrými vlastnosťami pri relatívne nízkej cene. Vo veľkom sú využívané v automobilovom priemysle, ale aj vo výrobkoch pre domácnosti.[1; 36]

Polyetereterketón označovaný skratkou PEEK je semikryštalický termoplast novej generácie s nadštandardnými vlastnosťami. Vyznačuje sa vysokou chemickou stálosťou, nízkou absorpciou vlhkosti a použiteľnosti pri vysokých teplotách. Teplota topenia sa pohybuje na úrovni 341 °C. Preto je možné kompozit z PEEK využívať v aplikáciách, kde je konštantná teplota až 260 °C. PEEK svoje uplatnenie našiel vo vesmírnom a leteckom priemysle, kde sa používa na výrobu trupov lietadiel. Obmedzením rozšírenia vo väčšom meradle v priemysle je vysoká cena, ktorá môže byť až 450 euro za 1 kilogram v závislosti na forme v akej sa predáva.[1; 37; 38]

Polyfenyl sulfid označovaný skratkou PPS je semikryštalický polymér s vysokou kryštalinitou na úrovni až 65 %. Podobne ako PEEK je možné ho využívať pri vysokých teplotách až do výšky 225 °C. Uplatnenie nachádza tam, kde je vyžadovaná vysoká pevnosť, chemická odolnosť, nízka absorpcia vlhkosti a tvarová stálosť pri vysokých teplotách.[1; 39]

2.2.2 Výstuž

Ďalšou dôležitou časťou kompozitných systémov je výstuž pretože podobne ako matrica, má svoj dôležitý podiel na vlastnostiach, ktoré kompozit bude mať. Úlohou výstuže je dodať tuhosť a pevnosť. Výstuž môže byť vo forme častíc alebo vlákien, ale vzhľadom na tému diplomovej práce bude pozornosť venovaná vláknovej výstuži. Medzi vláknové výstuže patria vlákna: sklenené, uhlíkové, aramidové a bórové.[1; 14]

Sklenené vlákna sú jedny z najuniverzálnejších vlákien pre priemyselné využitie. Ich výhodou je, že sa produkujú z prírodných surovín, ktoré sa vyskytujú v prírode bežne. Väčšina typov sklenených vlákien je vyrobená z oxidu kremičitého. Sklenené vlákno je možné vidieť na obr. 6.[1; 14]

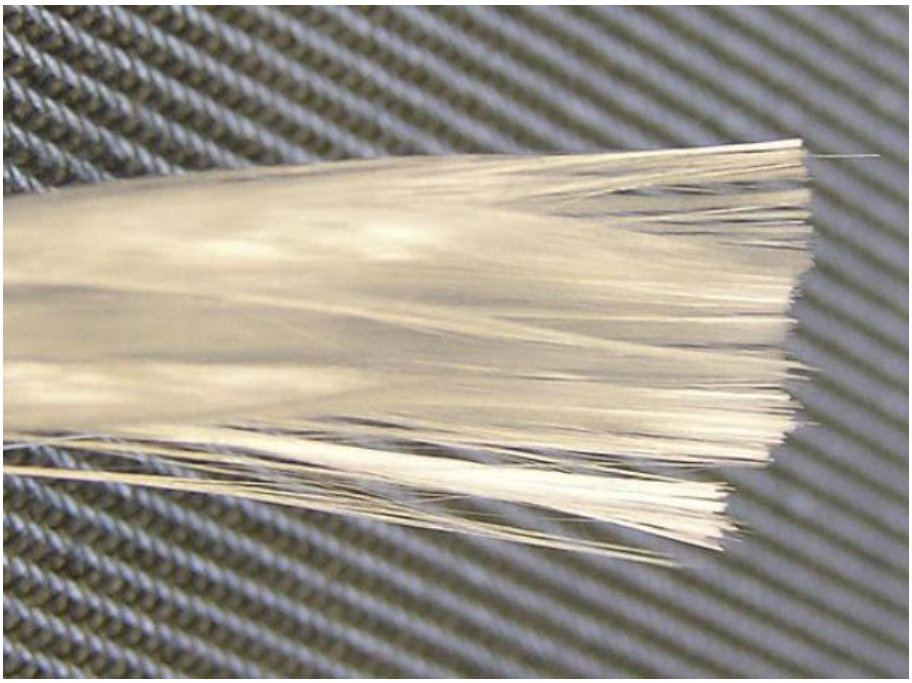
Výroba sklenených vlákien spočíva v roztavení oxidu kremičitého a ďalších minerálov, ktoré musia obsahovať oxidy potrebné pre vytvorenie zloženia. Následne je dôležité hmotu ochladiť rýchlo pre zabránenie kryštalizácie a tým nastáva formovanie do sklenených vlákien. V podstate väčšina sklenených vlákien je formovaná vytlačovaním roztaveného skla cez platinové puzdro, tvorené aj tisícami dier. Priemer vlákien sa zvyčajne pohybuje rozmedzí 5 až 25 μm. Vlákna sa môžu spájať do prameňov, ktoré sa navíjajú na rúrky, alebo tvárne obaly pomocou navíjačiek. Rýchlosť navíjania môže byť až 61 $m \cdot s^{-1}$.[1; 14]

Sklenené vlákna sú rozdelené do dvoch skupín. Prvá skupina sú nízkonákladové univerzálne vlákna označované, ako E-glass a druhá skupina sú prémiové vlákna pre špeciálne aplikácie. Tie sú prvým písmenom označované podľa špecifických vlastností, ktoré majú. Napríklad S-glass sú vlákna s vysokou pevnosťou, D-glass sú vlákna s nízkou dielektrickou konštantou a E-

glass sa vyznačujú nízkou elektrickou vodivosťou a sú cenovo lacné, čo sa odzrkadľuje aj na mechanických vlastnostiach, ktoré sú horšie ako je to pri sklenených vláknach typu S viz tab. 2. Všeobecne majú sklenené vlákna v závislosti na nízkej ceny veľmi dobré vlastnosti, ako je nízka teplotná rozťažnosť, relatívne vysoká pevnosť a nie sú horľavé. Nevýhodou sú krehkosť a nižší modul pružnosti.[1;14]

Tab. 2 Mechanické vlastnosti sklenených vlákien [5].

Materiál	Priemer [µm]	Hustota [g·m^{-3}]	Modul pružnosti v ťahu [GPa]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Ťažnosť [%]
E-glass	7	2,54	3,45	70	4,8
S-glass	15	2,50	4,50	86	5,7



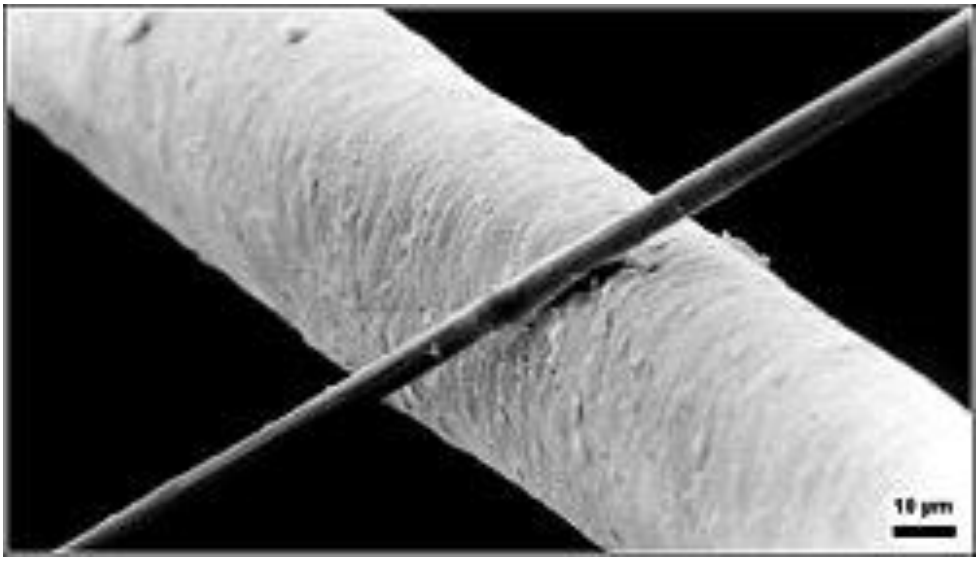
Obr. 6 Zväzok sklenených vlákien [13].

Uhlíkové vlákna existujú už desiatky rokov, ale pre ich cenu sa nepoužívali v priemysle vo väčšom množstve. Vývojom a znížením ceny sa postupne dostávajú do popredia aj z dôvodu ich mechanických vlastnosti a tlakom trhu na vývoj komponentov, ktoré budú pevné, ale zároveň veľmi ľahké. Sú vyrábané z polyakrylonitrilu alebo z prekurzorov založených na smole. Polyakrylonitrily sú textilné vlákna z polyméru, ktoré sa vyrába pradením ropnej alebo uhoľnej dechtovej smoly. Prekurzory musia prejsť úpravami, aby mali vhodné vlastnosti. Na začiatku sa prekurzory stabilizujú vysokými teplotami, kde nastáva ich oxidácia. Následne prejdú procesmi karbonizácie a grafitizácie na základe ktorých nastanú chemické zmeny v materiáli. Materiálu sa zvyšuje tuhosť v pomere ku hmotnosti. Na konci je potrebné ich povrchovo upraviť pre lepšiu spojitosť so živicami. Na základe parametrov týchto procesov môže vzniknúť viacero druhov uhlíkových vlákien. Napríklad ak teplota pri spracovaní neprekročí 1000 °C vlákno nebude mať tak vysokú pevnosť a modul pružnosti. Práve kompozity z uhlíkových vlákien dokážu mať niekoľko násobnú pevnosť ako oceľ pri násobne

nižšej hmotnosti. Zároveň pri kombinácii s vhodnou živicou sú to materiály, ktoré dokážu mať vysokú odolnosť voči korózii, tepelnú vodivosť aj elektrickú vodivosť. Práve po stabilizácii sa vlákna stávajú neroztopiteľné, čo im umožňuje širokú možnosť aplikácie pri rôznych tepelných podmienkach. Pre príklad vlákna grafitu HM (high modulus) sú vlákna s vysokým modulom pružnosti a nízkou ťažnosťou a vlákna grafitu HS (high strength) sú vlákna s vyššou pevnosťou viz. tab. 3. Pohľad na uhlíkové vlákne skrz mikroskop je vidieť na obr. 7.[1; 14]

Tab. 3 Mechanické vlastnosti sklenených vlákien [1].

Materiál	Priemer [µm]	Hustota [g·m^{-3}]	Modul pružnosti v ťahu [GPa]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Ťažnosť [%]
Grafit M	7,5	1,9	1,8	400	1,5
Grafit HS	7,5	1,7	2,6	240	0,8



Obr. 7 Uhlíkové vlákno v porovnaní s ľudským vlasom [15].

Aramidové vlákna sú aromatické polyamidy, ktoré majú vysoký pomer pevnosti k hustote. V dobe keď boli predstavené na trhu okolo roku 1970 sa im nemohol rovnať žiaden iný typ vlákien. Prvé aramidové vlákna označované aj ako Kevlar, vyrába spoločnosť Du Pont. Používali sa napríklad pri výrobe na spevnenie plastov alebo pneumatík. Ďalším známym producentom je spoločnosť Teijin, ktorá svoje vlákna označuje názvom Twaron. Aramidové vlákna sa vyznačujú vysokou pevnosťou pri zachovaní nízkej hmotnosti, relatívne vysokou húževnatosťou a záporným koeficientom tepelnej rozťažnosti.[1; 14]

V tab. 4 je vidieť Kevlar 29, ktorý je označovaný LM čo znamená, že má nižší modul pružnosti a je nehorľavý. Často sa používa pri výrobe nepriestrelnej ochrany vo forme viest alebo panelov. Kevlar 49 je označovaný HM, čo predstavuje vysoký modul pružnosti pri nízkej hmotnosti a preto si našiel uplatnenie v leteckom priemysle. Twaron si vďaka svojim vlastnostiam, ako sú vysoký modul pružnosti, dobrá tepelná stabilita, odolnosť voči rezaniu, odolnosť voči horeniu a chemikáliám, našiel uplatnenie napríklad pri výrobe ochranných rukavíc.[1; 14]

Tab. 4 Mechanické vlastnosti aramidových vlákien [14].

Materiál	Priemer [µm]	Hustota [g·m^{-3}]	Modul pružnosti v ťahu [GPa]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Ťažnosť [%]
Kevlar 29	12	1,44	3,6	83	4
Kevlar 49	12	1,44	3,6	131	2,8
Twaron	12	1,45	3,1	121	2

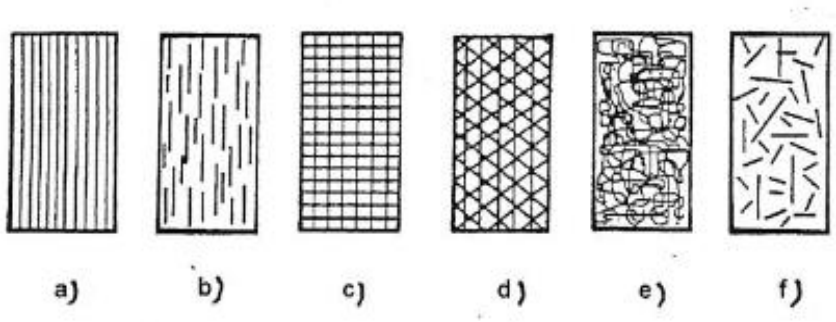
Bórové vlákna majú vysokú tuhosť a zároveň vysokú pevnosť v tlaku, ktorá je vyššia ako pevnosť v ťahu. Vlákna z bóru majú pomerne vysokú cenu aj z dôvodu nižšej produktivity výroby. Vyrábajú sa chemickým naparovaním na vlákna z uhlíku alebo volfrámu, ktoré majú priemer 12 µm. Výsledné vlákna sú citlivé na poškodenie povrchu a sú krehké. Priemer vlákien je pomerne veľký 100-200 µm. Modul pružnosti bórových vlákien je 3,5 GPa čo je porovnateľne s aramidovými vláknami, ale medza pevnosti je na úrovni 400 MPa, čo je násobne viac, ako majú aramidové vlákna. Bórové vlákna majú uplatnenie najmä vo vojenskom letectve.[1; 17; 18]

2.2.3 Štruktúra vláknových kompozitných materiálov

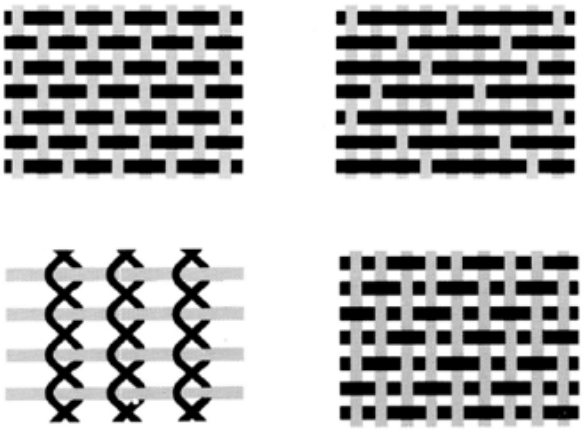
Vlastnosti kompozitných materiálov vo veľkej miere závisia na štruktúre, ktorú majú. Štruktúrou je myslená kombinácia výstuže a matrice, ktoré musia byť zvolené vhodne aby sa dosiahli čo najlepšie požadované vlastnosti. To sa určuje pri hodnotení synergického efektu viz. Obr. 1 v kapitole 2.3. Následne je potrebné brať do úvahy aj štruktúru samotnej vláknovej výstuže.[5]

Vláknová výstuž môže mať rôzne usporiadanie, dĺžku a aj priemer. Všeobecne platí, že zmenšením priemeru narastá pevnosť vlákna. Usporiadanie vlákien je možne deliť na jednosmerné a viacsmerné, prípadne môže byť usporiadanie aj náhodné. Usporiadanie vlákien je znázornené v obr. 8.[1; 19]

Často sa používajú vlákna orientované vo viacerých smeroch. Vlákna sú pootočene v uhle v rozmedzí 0 až 95 stupňov. Takáto kombinácia vlákien je označovaná ako tkanina. Tá je vyrábaná vzájomným prepletením vlákien do väzby. Medzi základné druhy väzieb patria: jednoduchá, saténová, keprová, perlinková a ďalšie. Pri tkanine sú definované pojmy: osnova – pozdĺžne vlákna, útok- priečne vlákna.[1; 19]



Obr. 8 Rovinné delenie usporiadania vláknových kompozitov: a) dlhé jednosmerné vlákna, b) krátke jednosmerné vlákna, c) dvojsmerná výstuha, d) viacsmerná výstuha, e) vlákna náhodne orientované, f) krátke vlákna náhodne orientované [19].



Obr. 9 Druhy väzieb: vľavo hore – plátnová, vpravo hore – saténová, vľavo dole- perlinková, vpravo dole – keprová [1].

Plátnová väzba – je väzba základného typu a je najjednoduchšia. Vyznačuje sa tým, že obe strany väzby sú identické, čím vzniká symetria. Osnovné a útkové vlákna sú striedavo pretkané z hora a zdola, čo ma za následok, že hustota priesečníkov vlákien je z pomedzi spomenutých väzieb najvyššia.[14]

Keprová väzba – nemá obe strany identické, čiže nie je symetrická. V závislosti na tom, ktoré väzné body prevládajú môže byť väzba označovaná osnovná alebo útková. Minimálny počet nití pri keprovej väzbe sú 3 osnovné a 3 útkové. Podľa smeru stúpania riadkov inak viditeľných ako sústavu riadkov, ktoré sú šikmé a súbežné, sa delia keprové väzby na ľavé a pravé resp. S a Z. Keprová väzba sa vyznačuje menšou pevnosťou ako je to pri plátnovej väzbe.[20; 21]

Saténová väzba – vznikla úpravou väzby keprovej, kde je oproti nej tvorené menším počtom priesečníkov útkov a osnovy. Nie je symetrická a vďaka menšiemu počtu uzlov má hladší profil.[14]

Hybridné tkaniny – predstavujú tkaniny tvorené viacerými druhmi vláken, ktoré sú medzi sebou prepletené. Často sa využívajú pri kompozitných materiáloch z uhlíkových vlákien, kde pridaním vysokopevnostného vlákna, ako je napríklad aramidové, je z časti možné eliminovať nevýhody uhlíkových vláken. Použitím hybridného vlákna je okrem flexibility pri dosahovaním dostatočných vlastnosti výhoda aj to, že nie je potrebne použiť 100 % aramidového vlákna, ktoré je drahšie, ale iba iste percento. Vplyv pomeru vlákien na výsledné vlastnosti 0°/90° laminátu je možné vidieť v tab. 5.[14]

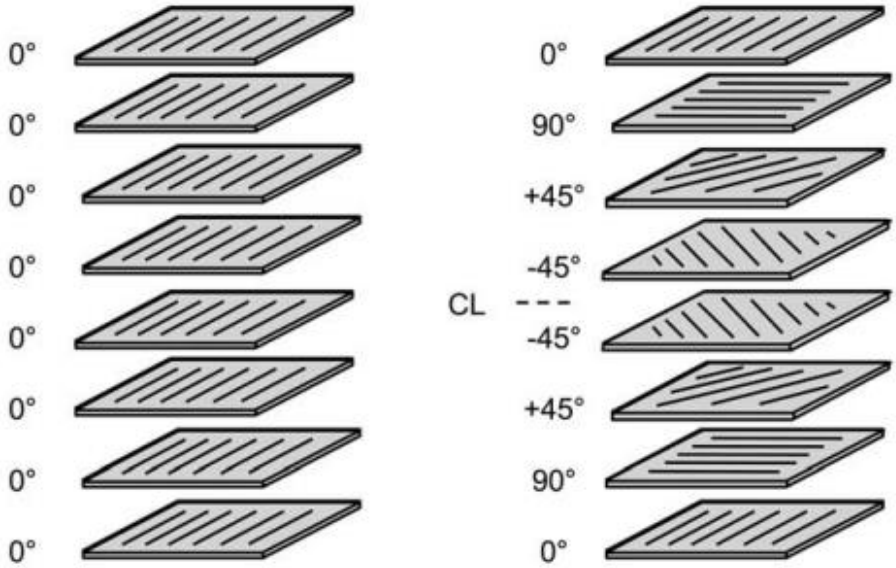
Tab. 5 Vlastnosti hybridného tkaniva v lamináte 0°/90° na báze aramidových a uhlíkových vláken [14].

Pomer aramidových a uhlíkových vláken [%]	Modul pružnosti v ťahu E_t [GPa]	Pevnosť v ťahu σ_m [MPa]	Nárazová pevnosť podľa Izoda [J/m]
100/0	36,5	579	2562
50/50	55,1	572	2349
25/75	69,6	661	1815
0/100	72,3	730	1495

2.2.4 Vrstvenie kompozitných materiálov

Pri kompozitoch sa využíva aj vrstvenie, čo je v podstate pokladanie jednotlivých plátov na seba čím sa okrem dosahovania potrebných vlastnosti určuje aj výsledná hrúbka výrobku. Navzájom sa môžu vrstviť pomocou rovnakých alebo rôznych materiálov čím vznikajú lamináty.[2]

Lamináty – sú tvorené vrstvením plátov kompozitných materiálov na seba. Pláty kompozitných materiálov môžu byť na seba kladené pod rovnakým uhlom, alebo pod rôznymi uhlami. V závislosti na uhle, podľa ktorého sú na seba pláty kladené, je možné lamináty rozdeliť na jednosmerné alebo viacsmerné. Práve uhol, pod ktorým sú jednotlivé vrstvy kladené má vplyv na výsledné vlastnosti laminátu. Vrstvy laminátu sú zvyčajne navzájom spojené matricou, akú majú v sebe jednotlivé pláty kompozitov.[2; 22]



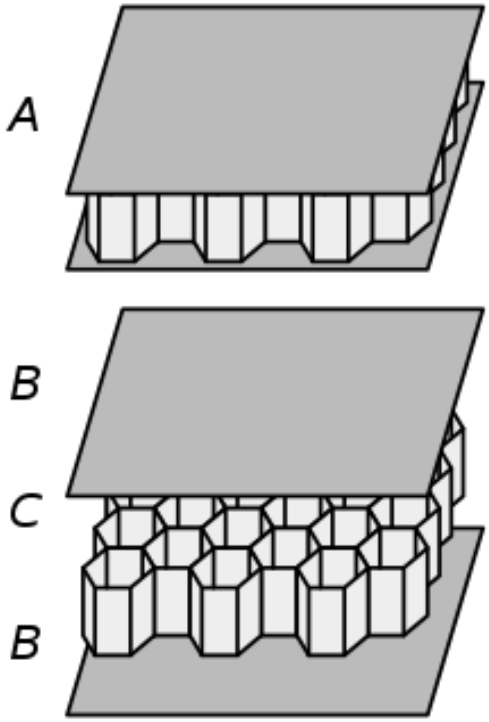
Obr. 10 Vľavo – jednosmerné vrstvenie, Vpravo – viacsmerné vrstvenie [22].

Jednosmerné vrstvenie – viz obr. 10 vľavo, sa vyznačujú veľmi dobrou pevnosťou a tuhosťou v smere, ktorým sú vlákna orientované. Na druhú stranu v smere kolmom na smerovanie vlákien sú vlastnosti jednosmerných laminátov oveľa slabšie. Pri porovnaní má vysokopevnostné vlákno pevnosť v ťahu približné 3500 MPa, čo je výhodou pri ťahu. No pri priečnom zaťažení je nosným prvkom matrica, ktorej pevnosť v ťahu dosahuje hodnoty len okolo 35 až 70 MPa. Preto je dôležite dbať na výber aplikácie jednosmerného laminátu, kde by sa malo dbať na smery, ktorými bude zaťažovaný.[2; 22]

Viacsmerné vrstvenie – viz obr. 10 vpravo, sa oproti jednosmerným laminátom vyznačuje nie len dobrou pevnosťou a tuhosťou v jednom smere, ale aj tým že vrstvy sú kladené pod navzájom inými uhlami. Dosahuje dobre vlastnosti vo viacerých smeroch. Takéto viacsmerné usporiadanie vrstvenie je možné vidieť na obr. 10 vpravo. Je tam možné sledovať, že jednotlivé vrstvy sú symetricky skladané od stredu pod uhlami -45°, 45°, 90° a 0°. Takýto laminát sa volá kvázi-izotropný pretože prenáša rovnaké zaťaženie vo všetkých smeroch.[22]

Sendviče sú ďalším druhom laminátu, ktorý pozostáva z dvoch tenkých vysokopevnostných plátov medzi ktorými je hrubé jadro nízkej hmotnosti. Pláty alebo jadro sú samostatne flexibilné alebo majú nízku tuhosť. Vzájomnou kombináciou sa sendviče stávajú ľahké, pevné a tuhé. Pláty sendviča môžu byť z uhlíku, prepregov, ocele, hliníku, kartónu alebo sklolaminátu. Štruktúra jadra býva v podobe včelích plástov, preglejky, peny alebo prípadne balzového dreva. V sendvičovom lamináte jednotlivé zložky majú svoj zmysel, kde pláty plnia úlohu odolnosti

voči ohybu a jadro odoláva šmykovému zaťaženiu. Predpokladá sa, že jadro má nulovú odolnosť voči ohybu, čo znamená že modul pružnosti v ohybe je nula. Na základe tohto predpokladu sa uvažuje, že šmykové napätie v jadre je v celej hrúbke rovnomerné. [1, 14]



Obr. 11 Sendvičový laminát so štruktúrou jadra v tvare včelích plástov [23].

Na obr. 11 je možné vidieť A sendvičový laminát, kde B sú pláty a C je jadro v tvare včelích plástov. Medzi plátom a jadrom je aplikovaná vrstva lepidla zabezpečujúca spojitosť vrstiev.[14]

2.2.5 Prepregy

Sú matricou pred-impregnované vlákna, tkanina alebo rohož vo forme plochy, ktoré sú pripravené na ich ďalšiu neskoršiu aplikáciu. Prepregy sú v podstate polotovar z kompozitného materiálu. Vyrábajú sa v rôznych formách, ako sú jednosmerné pásky, tkané textilné pásky alebo rovingy. Jednosmerné pásky sa používajú pri aplikáciách, kde je potreba flexibility pri možnosti prispôsobiť vlastnosti výsledného výrobku z kompozitu v požadovanom smere. Prepregy z tkaných textílii sú aplikované pri výrobe tvarových súčastí, kde je vyžadované flexibilita materiálu. Zároveň nachádzajú využitie aj pri výrobe sendvičových laminátov s jadrom vo forme včelích plástov. Rovingy nachádzajú svoje uplatnenie najmä v navíjaní vlákien.[1; 24]

Prepregy sa delia na základe použitej matrice na reaktoplastické a termoplastické. V prípade výstuže sa môžu použiť uhlíkové, aramidové a sklenené vlákna alebo môžu byť vo forme tkanín a textílii. Prepregy sa vyznačujú konzistenciou ich vlastností a kompletným zmáčaním vlákien. Ich výhodou je, že nie je potrebné vážiť a miešať matricu a katalyzátor. Pri prepregoch je možné stretnúť sa s pojmami, ako sú drape a tack. Drape vyjadruje schopnosť prepregu prispôsobiť sa tvaru tvarovaného povrchu. Tack označuje schopnosť lepkavosti nevytvrdených prepregových materiálov.[1; 24]

Reaktoplastické prepregy – sa zvyčajne musia skladovať pri nízkych teplotách a majú svoju trvanlivosť. Skladovanie v nízkych teplotách zabraňuje vytvrdzovaniu matrice, pretože reaktoplasty sú citlivé na teploty. Dĺžka spracovania reaktoplastických prepregov je pomerné dlhá. Je to v rozmedzí 1 až 8 hodín, čo majú za následok pomalé kinetické procesy, ale nárastom

ich využitia v priemysle sa neustále vyvíjajú aj prepregy, ktoré tvrdnú rýchlejšie. Využívanie reaktoplastických prepregov v priemysle je momentálne vo väčšom počte ako termoplastických. Ich výhodami sú lepšie drape a tack, v porovnaní s termoplastickými prepregami. Zvyčajné sa spracovávajú ručným kladením, kompresným tvarovaním, balením do roliek alebo automatickým kladením, kde pri použití tepla a tlaku vzniká finálny výrobok.[1]

Termoplastické prepregy – nie sú obmedzené trvanlivosťou a je možné ich skladovať pri izbovej teplote. Teplota spracovania termoplastických prepregov je pri teplote topenia živice. Často používané matrice sú polyéterketón (PEEK), polyfenylsuflid (PPS) a polyéterimid (PEI). Čas spracovania je značne kratší ako je to pri reaktoplastických prepregoch. Zvyčajne je to v rozmedzí niekoľkých minút. Termoplastické prepregy sú relatívne nové na trhu a prinášajú zo sebou určité výhody, ako napríklad: recyklovateľnosť, neobmedzenú trvanlivosť, dobrá chemická odolnosť, nižší čas spracovania, nie je potrebné ich špeciálne skladovať, ľahšia opraviteľnosť, lepšia spracovateľnosť tavným lepením. Ich nevýhodami sú potreba vyšších teplôt a tlakov pri spracovaní a majú nižšie drape a tack. Vyrábajú sa hlavne pomocou metód solvent impregnation a hot melt coating. Pri metóde solvent impregnation ide o impregnáciu pomocou rozpúšťadla, kde sa využívajú plasty ľahko náchylne na rozpúšťanie v určitých rozpúšťadlách. Vhodné sú pri výrobe prepregov s matricou z polyéterimidu. Princíp procesu je založený na namáčaní výstuže do zmesi rozpustenej matrice rozpúšťadlom, kde sa následne výstuha suší v peci, pri čom sa rozpúšťadlo teplom odparí. Metóda hot melt coating je v princípe podobná vytlačovaniu, kde sa výstuha a matrica vytláčajú vo forme listov.[1; 14]

2.3 Výroba kompozitných materiálov

Technológie pre výrobu kompozitných materiálov sú rozličné a je ich mnoho, ale pre efektívny výber vhodnej technológie je potrebné zvážiť viacero faktorov, na ktoré majú značný vplyv typ a vlastnosti spracovávaného materiálu, sériovosť výroby, rozmery a tvar daného výrobku, limitné hodnoty strojov, požadovaná povrchová kvalita a na koniec veľmi dôležitá cena, za ktorú je možne danú súčiastku vyrobiť. Preto je možné povedať, že výber správnej technológie je komplexným riešením konštruktérov a technológov, kde pri výbere vhodného spôsobu výroby musia zvážiť mnoho faktorov, aby bol na konci spokojný zákazník, ale aj firma, ktorá potrebuje vyčísliť zisk. Hlavné faktory, ktoré ovplyvňujú výber vhodnej technológie sú spomenuté a viac špecifikované nižšie [1; 14]:

Sériovosť výroby - je v rôznych odvetviach výroby iná, napríklad v automobilovom priemysle sa hovorí o stovkách tisíc až miliónov kusov za rok, pri leteckom priemysle sú to desiatky kusov ročne. Preto na základe potrebného množstva za určité obdobie je potrebné vhodne vybrať technológiu. Pri ručnom a mokrom kladení je proces zdĺhavý, preto sú vhodné pre kusovú výrobu. Na druhú stranu sa lisovanie metódou SMC alebo vstrekovanie používa pri veľkosériovej výrobe, pretože rýchlosť výroby v kusoch je násobne vyššia.[1]

Cena – je azda najdôležitejším faktorom pri výbere. Cena, za ktorú je možné súčiastky vyrobiť často rozhoduje u zákazníka o tom, či si ich objedná u vás alebo nie. Samozrejme na výslednú cenu nemá len vplyv výrobný proces, ale aj vstupné materiály, ako sú náklady na materiál, polotovary, počet ľudí pri výrobe, energie. Preto je vhodné určiť, či práve daný proces výroby pre konkrétnu súčiastku je nákladný a zároveň efektívny.[1; 14]

Veľkosť a tvar výrobku – sú ďalším faktorom, ktorý môže ovplyvniť výber, pretože v istých druhoch priemyslu je potreba menších súčasti a niekde sú potrebné väčšie. Napríklad pri výrobe leteckých komponentov, ktoré sú značné väčšie je potrebné zvážiť konštrukčnú veľkosť stroja a formy. Pri menších a stredne veľkých súčiastkach z kompozitných materiálov sú používané uzavreté tvarovacie systémy a pri väčších dieloch sú to systémy otvorené. Tvar výrobku je takisto faktorom, ktorý má vplyv, kde napríklad pri výrobe tlakových nádob je vhodné použiť

technológiu navíjania vlákien a pri výrobe dlhších dielov a konštantným prierezom je vhodná a efektívna pultrúzia.[1; 14]

2.3.1 Základné prvky výroby kompozitných materiálov

Pri výrobe súčastí z kompozitných materiálov je možné stretnúť sa s pojmami, ako sú impregnácia, vrstvenie, konsolidácia a tuhnutie. Každá z technológii obsahuje tieto fázy, ale môžu byť vykonávané rôzne.

Impregnácia – je proces namočenia vlákna do tekutej matrice. Tým vzniká prepojenie výstuhy a matrice. Pri rôznych technológiách výroby je tento proces iný. Pri procese navíjania vláken, vlákna prechádzajú nádržkou, kde sa vlákna namáčajú do tekutej matrice. Ak sa používa metóda ručného kladenia, tak sú už vlákna dopredu pred-impregnované od výrobcu. Vyrábaním dielov mokrým kladením sa musí každá vrstva tkaniny namočiť a následne prejsť stláčacím valcom. Výsledkom impregnácie je to, že výstuha kompozitného materiálu je kompletne obalená matricou. Reaktoplastické matrice lepšie namáčajú výstuhu, ako je tu pri termoplastickej matrici, kde je potreba použiť väčšie tlaky aby sa dosiahla úplná impregnácia. Je to z dôvodu nižšej viskozity termoplastov. Väčšinou je možne znížiť viskozitu zvýšením teploty, ale pri prekonaní istej hranice môže dôjsť k rozkladu. V istých prípadoch sú niektoré termoplasty rozpustné v organických rozpúšťadlách, ako je to v prípade polyéterimidov. Pri ďalších metódach impregnácie termoplastami je nutné kombinovať teplo a mechanické zaťaženie.[1; 14]

Vrstvenie – je proces spájania vrstiev do požadovanej hrúbky. Informácie o vrstvení sú detailnejšie rozpísané v kapitole 2.2.4.

Konsolidácia – je proces, pri ktorom nastáva prepojenie jednotlivých vrstiev medzi sebou pomocou tepla a tlaku. Dôležitým faktorom je zbaviť sa vzduchových bublín z pomedzi vrstiev, pretože by neskôr ovplyvňovali výsledné vlastnosti kompozitného dielu. Pri niektorých technológiách konsolidácia zvyčajne nastáva až po vrstvení, ale pri metódach ako je pultrúzia a navíjane vláken sa deje už pri vrstvení. Pri konsolidácii diel dosahuje svoj tvar s požadovanými rozmerovými toleranciami.[1; 25]

Tuhnutie – je finálny proces, pri ktorom výrobok kompozitného materiálu chladne a zároveň tuhne. Dôležitým prvkom tuhnutia je to, že sa udržiava vákuum a tlak, aby výsledný kompozitný diel dosiahol požadovaný tvar aj vlastnosti. V podstate platí, že čím kratšie diel tuhne, tým sa zvyšuje výrobná rýchlosť. Pri kompozitných materiáloch s reaktoplastickou matricou platí, že sa tento proces deje dlhšie, pretože pri dodaní tepla do reaktoplastov nastáva chemická zmena vo forme vytvrdzovania, čím sa zosieťujú. Všeobecne platí, že čím vyššia je dodaná teplota pri spracovaní reaktoplastických matríc, tým rýchlejšie nastáva chemická zmena. Pri termoplastických matriciach žiadne zosieťovanie nenastáva a preto je proces tuhnutia kratší.[1; 2]

2.3.2 Porovnanie spracovateľnosti termoplastických a reaktoplastických kompozitných materiálov

Oba druhy kompozitných materiálov majú svoje špecifiká pri výrobe. Pri výrobe z reaktoplastických kompozitných materiálov sú výhodami: použitie nízko nákladových jednoduchých systémov, nižšie energetické náklady pretože nároky na tlak a teplotu pri procese sú nižšie, matrica je často pri izbovej teplote v kvapalnom stave, čo ma za následok lepšiu namáčavosť vláken, nižšiu pórovitosť a menej dutín. Nevýhodami sú dlhší čas chladnutia, nemožnosť zmeny tvaru po vytvrdnutí, problémová recyklácia. Pri výrobe termoplastických kompozitných materiálov sú výhodami: možnosť recyklácie a možnosť zmeny tvaru pretože sa nevytvrdzujú, rýchlejší proces výroby pre nižší čas chladnutia, je vhodná pre veľkosériovú

výrobu. Nevýhodami sú náročnosť na technické špecifikácie strojov, kde je potrebné dosiahnuť vyššie hodnoty teplôt a tlakov pri výrobe s čím súvisia aj náklady na stroje a nástroje.[1]

2.3.3 Technológie výroby termoplastických kompozitných materiálov

Vzhľadom na tému tejto diplomovej práce budú spomenuté iba technológie termoplastických kompozitných materiálov.

Napriek tomu, že v roku 1998 tvorila produkcia termoplastických kompozitov len 25 %, vývojom materiálov a technológii sa v dnešnej dobe stávajú populárnejšie a častejšie používané ako to bolo v minulosti. Vo výrobnom priemysle nachádzajú uplatnenie v automobilovom, leteckom, ale aj pri výrobe bežných produktov. Medzi výrobne technológie dielov patria lisovanie, vstrekovanie, ale aj autokláv a vrstvenie prepregov. Ďalšie z technológii pôvodne určených pre výrobu reaktoplastických kompozitov, ktoré sa určitou úpravou procesu prispôsobili pre možné spracovanie termoplastických kompozitov. Napríklad navíjanie vláken alebo pultrúzia. V tab. 6 sú technológie rozdelené v závislosti na forme vstupného materiálu a ich využívania v komerčnom priemysle.[1; 14]

Tab. 6 Rozdelenie technológií výroby termoplastických kompozitov [1].

Vstupný materiál	Technológia	Využitie v komerčnej výrobe
Matrica/Výstuž	Pultrúzia	Vysoké
	Navíjanie pásky	Nízke
	Vytlačovanie	Nízke
Prepregy, Páska	Autokláv	Nízke
	Lisovanie za tepla	Vysoké
	Lisovanie GMT	Vysoké
	Navíjanie pásky	Nízke
Tvarovacia zmes	Vstrekovanie	Vysoké

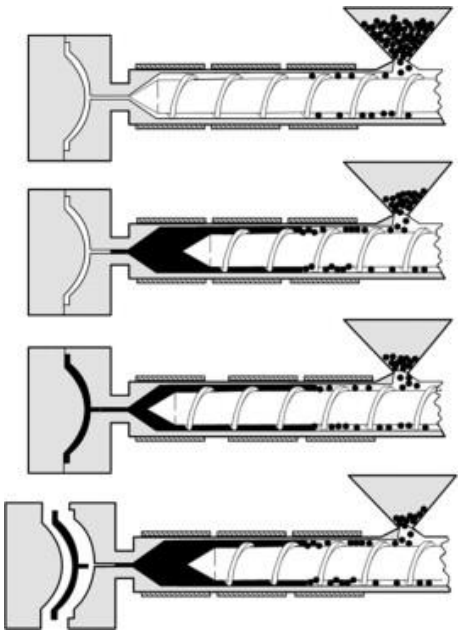
Výrobne procesy, ktoré budú v tejto kapitole predstavené sú: vstrekovanie, pultrúzia, lisovanie za tepla, tlakové lisovanie, autokláv, tvarovanie membránou, navíjanie pásky.[1; 14]

Vstrekovanie

Patrí medzi najpoužívanejšie technológie výroby termoplastov, kde pridaním výstuže do formy získava násobne väčšiu využiteľnosť. Táto technológia umožňuje výrobu dielov, rôznych tvarov, veľkostí a hmotností. Všeobecne je možné vyrábať diela s váhou od 5 gramov do 85 kilogramov. Proces vstrekovania kompozitných materiálov sa veľmi nelíši od vstrekovania klasických termoplastov do foriem. Automatizácia výroby je na vysokej úrovni, kde sa výrobný cyklus udeje v niekoľko desiatok sekundách. Jediným rozdielom je využitie výstuže, ktorá zvyšuje mechanické vlastnosti výsledného výrobku.[1; 14]

Polotovary sú vo forme peliet alebo granuliek, ktoré môžu ale nemusia byť vystužené krátkymi vláknami [1].

Formy používane pri výrobe vstrekovaním môžu byť jedno alebo viac dutinové. Materiálom formy zvyčajne býva nástrojová oceľ. Je dôležité dbať na kvalitu materiálov foriem z dôvodu vyššej životnosti. Viac dutinové formy sú využívané kvôli vyššej efektivite procesu.[1]



Obr. 12 Proces vstrekovania termoplastických kompozitov [26].

Výrobný proces viz obr. 12, spočíva z niekoľkých krokov. V prvom kroku je potrebne doplniť polotovar vo forme granuliek alebo peliet do zásobníka. Tie sú následne podľa potrebného množstva privedené do závitovky, ktorá má za úlohu polotovar dostať do viskózneho stavu. Po dosiahnutí rovnomerného roztavenia dávky a dosiahnutí požadovanej teploty sa môže dávka vstrekovať do zatvorenej formy pod potrebným tlakom. Forma je vyhrievaná na teplotu 50 až 100 stupňov Celzia aby tuhnutie materiálu nebolo šokové, ale postupné. Tlak je určený tak aby sa tekutý materiál dostal do všetkých častí dutín formy a správne ju vyplnil. Po vstreknutí dávky sa stále udržiava tlak, ktorý zabraňuje spätnému vytekaniu tekutého materiálu. Následne nastáva proces chladnutia, ktorý je najdlhšou časťou celého procesu a závisí na type materiálu, veľkostí a hrúbke výsledného výrobku. Po ochladnutí na požadovanú teplotu je forma otvorená a polotovar odobraný z formy vyhadzovacím mechanizmom. Potom sa forma zavrie a je pripravená pre ďalší výrobný cyklus.[1]

Výhody sú sériovosť výroby, rýchlosť výrobného cyklu, vysoký stupeň automatizácie, možnosť výroby komplikovaných tvarov na jeden cyklus, dobrá presnosť výroby, dobrá kvalita povrchu výrobku a malé množstvo odpadu pri výrobe.[1]

Nevýhody sú počiatočné náklady na technológiu, nevhodnosť pre výrobu malých sérii ani prototypov, dlhšia časová náročnosť pred nastavením procesu výroby, pretože je ťažko odhadnúť potrebné parametre ako sú tlaky a teploty pri výrobe.[1]

Aplikačné možnosti pre nevystužené termoplasty sú výroba hračiek, obalov, krytov a mnoho ďalších. Pri vystužených termoplastoch je uplatnenie takisto široké a to napríklad vo výrobe automobilových dielov, ozubených kolies, počítačových súčastí a ďalšie iné viz obr. 13.[1]

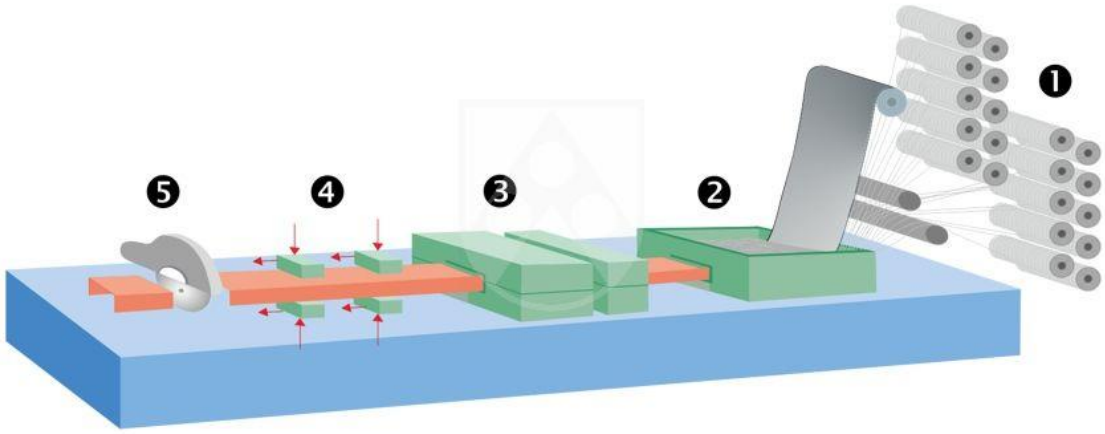
Obr. 13 Napínacie koleso luku vyrobené z termoplastického kompozitu s krátkymi vláknami. Pomocou vstrekovania umožnilo ušetriť 50 % hmotnosti oproti originálu z hliníka [27].

Pultrúzia

Princípom je preťahovanie vlákien cez lisovací stroj, kde je proces podobný ako pri výrobe reaktoplastických kompozitov, ale je nutné použitie väčších ťahových síl z dôvodu vyššej viskozity termoplastickej matrice. Výsledkom pultrúzie je výrobok s konštantným prierezom a nie úplne perfektnou povrchovou kvalitou.[1; 14]

Vstupným materiálom môže byť väčšina druhov matríc, ako sú napríklad PEEK, sulfid polyfenylu a polypropylén. Ako výstuž sa najčastejšie používajú uhlíkové a sklenené vlákna. Je možné aj využitie prepregov, práškovo impregnovaných vláken a zmiešaných vláken.[1; 14]

Forma je v tvare vyhrievanej oceľovej matrice, ktorá je na vstupe zúžená z dôvodu potreby stlačenia materiálu. Pri výbere materiálu pre oceľové matrice je potrebné zohľadniť vyššiu teplotu spracovania termoplastických matríc, aby sa dosiahla požadovaná životnosť. Lisovacia matrica pre výrobu pultrúziou je tvorená dvomi časťami. Prvá je určená na ohrev a druhá na chladenie. Práve druhá časť ma konštantný prierez, ktorý určuje výsledný tvar profilu výrobku.[1; 14]



Obr. 14 Výrobný proces pultrúziou: 1. Stojan s navinutou priadzou, 2. Nádrž s matricou, 3. Lisovacia matrica, 4. Ťahací mechanizmus, 5. Rezacia časť [28].

Proces spočíva z viacerých krokov. Na začiatku je potrebné uložiť valce s navinutými vláknami resp. priadzami na stojan. Následne je potrebné pretiahnuť priadze cez vyhrievanú nádrž, v ktorej je zmiešaná matrica s tvrdidlom vo viskóznom stave. Naimpregnovaná priadza potom smeruje do lisovacej matrice, kde je stlačená a vytvarovaná podľa tvaru lisovacej matrice. Z matrice vychádza výrobok s konštantným profilom a na konci linky je rezaná na požadovanú dĺžku.[1; 14]

Obr. 15 Profily vyrobené pultrúziou [29].

Výhody sú: možnosť recyklácie výrobkov, ekologickosť pri výrobe, možnosť výroby opraviteľnosti dielov, väčší výber termoplastických matríc pre pultrúziu, ako je to pri reaktoplastických kompozitoch.[1; 14]

Nevýhody sú zvýšené nároky na parametre stroja, pre potrebu vyšších teplôt a tlakov, nižšia kvalita povrchu výrobkov, vysoké náklady na kúpu stroja, komplikovaná výroba tvarovo zložitých profilov.[1; 14]

Aplikačné možnosti sú vo výrobnom priemysle obmedzené z dôvodu nižšej akosti povrchu. Pomocou pultrúzie termoplastov je možné vyrábať tyče alebo trubky rôznych prierezov najmä v oblasti, kde je potrebná opraviteľnosť dielu viz obr. 15.[1; 14]

Lisovanie za tepla

Je obdobou procesu lisovania plechov. Pracuje s prepregami, ktoré sú uložené z vrstiev medzi formy, ktoré sú vyhrievané. Používajú sa prepregy tvorene jednosmernými kontinuálnymi vláknami, ktoré tvoria približne 60 % objemu výsledných kompozitných dielov. Tento proces je často využívaný pri výskumných aktivitách. Je najmä vhodný pre výroby skúšobných vzoriek.[1]

Vstupné suroviny pri tomto procese výrobe dielov sú termoplastické prepregy s jednosmernou výstužou. Môžu byť využité mnohé kombinácie výstuží a matríc.[1]

Formy pre proces lisovania za tepla sú vyrábané z hliníka alebo ocele. Tvarovo sú formy jednoduché z dôvodu výroby jednoduchých plochých dielov. Pre návrh formy je potrebné zohľadniť tepelné zväčšovanie a zmršťovanie dielu aj formy. V porovnaní s ostatnými technológiami odpadá nutnosť vtokového kanálika, čo takisto uľahčuje návrh formy.[1]

Obr. 16 Stroj Masterform pre lisovanie za tepla [54].

Proces začína prípravou prepregov a stroja. Na začiatku je potrebné nastaviť teplotu vyhrievaných lisovacích dosiek na požadovanú teplotu. Následne je potrebné očistenie formy a jej impregnácia. Lisovaný materiál je narezaný a navrstvený podľa požiadavku a vloží sa do formy, ktorá sa uzavrie a vloží do lisu. Stroj viz obr. 16, vyvinie na formu potrebný tlak na požadovaný čas, pričom je teplota vo forme blízka teplote tavenia termoplastov. Po uplynutí potrebného času nastáva fáza chladnutia. Rýchlosť chladenia je v závislosti na materiáli 2 až 10 °C za minútu. Po ochladení sa uvoľní tlak a forma sa vyberie z lisovacieho stroja. Na záver sa otvorí formy a vyberie sa hotový diel.[1]

Výhody sú recyklovateľnosť dielov, možnosť vyrábať rôzne veľkosti dielov, vyšší podiel výstuže vo výslednom výrobku, vhodnosť výroby vzoriek pre výskum a testovanie.[1]

Nevýhody sú komplikovanosť výroby hrubších súčastí, tvárových dielov a dielov bez deformácie.[1]

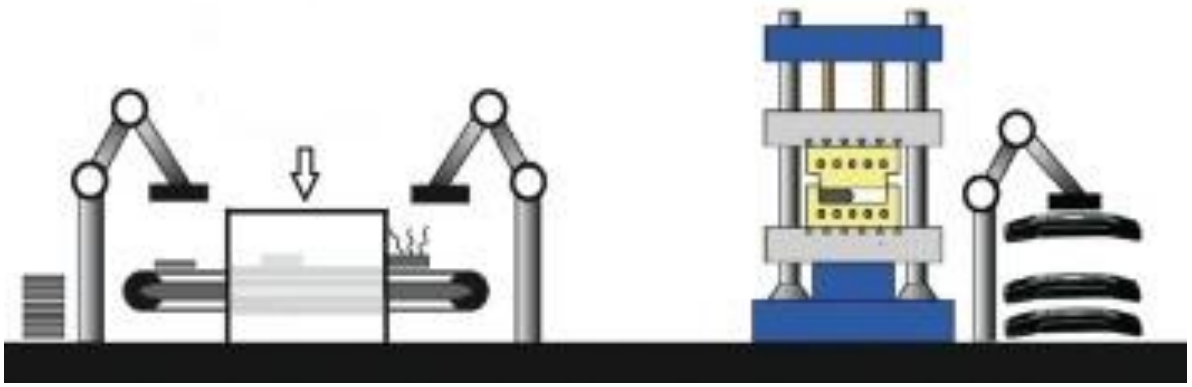
Aplikačné možnosti sú pri výrobe tvarovo jednoduchých dielov, ktoré sú zvyčajne plošné s konštantnou hrúbkou. Z tohto dôvodu si táto technológia výroby nezískala veľké komerčné využitie, ale má svoje uplatnenie pri výskumných a testovacích aktivitách.[1]

Lisovanie GMT – Glass mat thermoplastics

Je proces lisovania ktorý je význačný materiálom, ktorý je lisovaný. GMT označuje Glass mat thermoplastics, čiže kompozity vystužene sklenenými vláknami. Lisovanie GMT nachádza svoje uplatnenie pri veľkosériovej výrobe dielov. Je to v podstate jediná technológia na výrobu termoplastických kompozitov, ktorá sa využíva komerčne v automobilovom priemysle. Proces sa vyznačuje nízkym časovým cyklu výroby.[1]

Vstupné suroviny pri procese lisovania GMT sú termoplasty so sklenenou výstužou. Vlákna sú kontinuálne, ale náhodne orientované. GMT môžu byť impregnované taveninou alebo práškom. Je možné kúpiť polotovary GMT, ktoré sú narezané na isté rozmery a odvážené.[1]

Forma používaná pri tejto technológii je vyrábaná z nástrojovej oceli. Forma má kalené strižné hrany a je v nej zabudovaný vyhadzovací, chladiaci a vodiaci systém.[1]



Obr. 17 Výrobný proces lisovania GMT [30].

Proces viz obr. 17, spočíva v uložení dielu na dopravník, ktorý po ceste smerom k lisovaciemu zariadeniu prechádza pecou alebo ohrievacím zariadením, a to zabezpečí ohriatie polotovaru nad teplotu tavenia matrice. Následne je predhriaty diel uložený do formy pomocou robota. Po uložení polotovaru do formy sa forma zatvorí a je vyvinutý tlak. Tlak je udržovaný do momentu, kedy je diel stuhnutý. Nakoniec je diel vybraný z formy za pomoci robota. Proces je automatizovaný a časy výrobného cyklu trvajú menej ako 1 minútu. Polotovar musí byť vhodne navrhnutý, aby sa docielila efektivita výroby a dobré výsledne vlastnosti dielu.[1]

Výhody sú automatizácia výroby a nízky čas výrobného cyklu.[1]

Nevýhody sú vhodnosť len pre sériovú výrobu, nižší podiel výstuže vo výslednom diely, nižšia úroveň povrchovej kvality výrobku, vysoké vstupné investície.[1]

Aplikačné možnosti sú pri výrobe vystuží nárazníkov so schopnosťou absorbovať nárazy, prístrojových dosiek a mnoho ďalších automobilových dielov.[1]

Výroba v autokláve

Je výrobná technológia, kde sa polotovar naskladá do vrstiev a následne vákuovo uzavrie. Jednotlivé vrstvy môžu byť bodovo zvarené aby sa zamedzilo posunutiu vrstiev kým sa odsaje vzduch.[1]

Polotovarom sú termoplastické prepregy tvorené jednosmernými vláknami a podobne ako pri lisovaní za tepla je možné použiť rôzne kombinácie matríc a vystuží.[1]

Formy pre túto technológiu sú vyrábané z uhlíka alebo oceli. Tvar formy môže byť trň alebo akýkoľvek otvorený typ formy. Pri navrhovaní formy je potrebné zhodnotiť tepelné rozťahovanie a zmršťovanie formy a tepelnú rozťažnosť dielu.[1]

Proces začína v prípravnej fáze, kde sa prepregy nastrihajú do požadovanej veľkosti a tvaru. Manipulácia s termoplastickými prepregami je jednoduchšia ako s reaktoplastickými pre vyššiu teplotu tavenia. Preto ich nie je potrebne chladiť. Následne sa vrstvy prepregov ukladajú na seba v potrebnej orientácii vláken. Vrstvy sa bodovo zvaria aby nedošlo k posunu. Pri ukladaní je takisto potrebné odstrániť vzduchové bubliny spomedzi vrstiev aby neskôr pri výrobe neostali vzduchové bubliny, ktoré majú vplyv na vzhľadové aj mechanické vlastnosti. Naskladané prepregy sú aj s nástrojom vložené do vákuového vreca a je odsatý vzduch. Následne sa celá pripravená zostava vloží do autoklávu viz obr. 18. V autokláve sa dosiahne požadovaný tlak a teplota. Po procese je diel ochladený rýchlosťou, ktorou sa dosiahne vyžadovaná úroveň kryštalinity. Po ochladení sa diel vyberie z vákuového vrecúška.[1]

Výhody sú výroba dielov s vyšším podielom výstuže, vhodnosť na výrobu prototypov, jednoduchosť konštrukcie nástroja.[1]

Nevýhody sú vysoké vstupné investície pri kúpe autoklávu, použitie vyšších tlakov a teplôt oproti reaktoplastickým kompozitom, prácnosť vákuovania.[1]

Aplikačné možnosti sú v leteckom a vesmírnom priemysle. Pre príklad spoločnosť FRE Composites vyrobila touto metódou robotické rameno, ktoré je na ISS (Medzinárodnej vesmírnej stanici).[1]

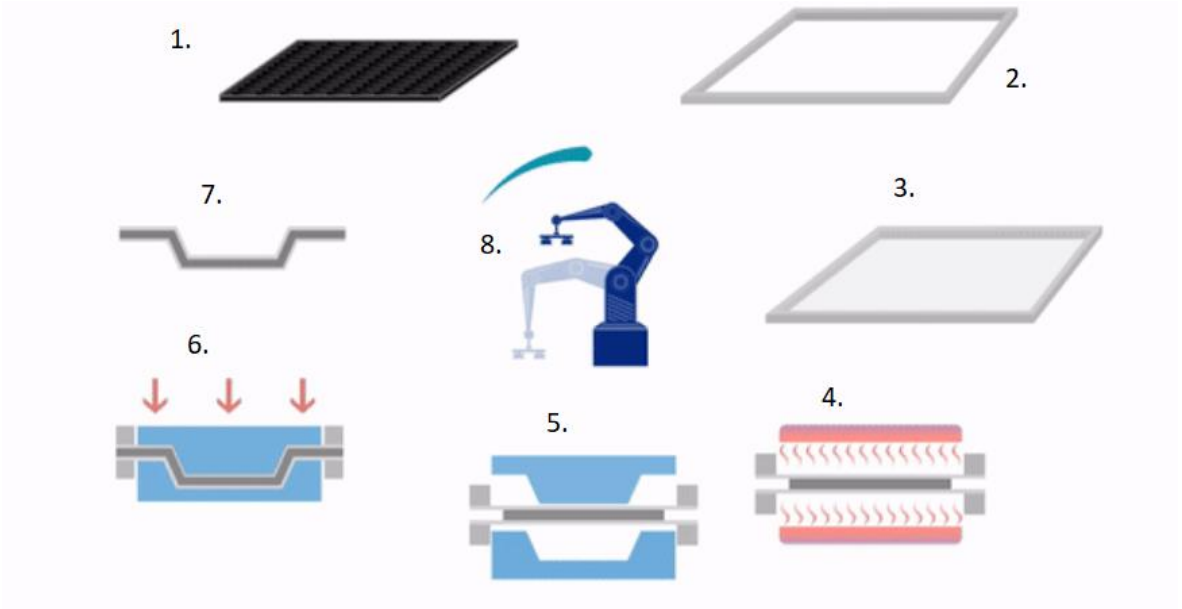
Obr. 18 Výroba v autokláve [31].

Tvarovanie membránou

Je technológia špeciálne navrhnutá pre spracovanie termoplastických kompozitných materiálov. V princípe sa jedná o tvarovanie fólie z kompozitného materiálu, ktorá je umiestnená medzi dvoma membránami a následne tvarovaná tlakom a teplom do požadovaného tvaru. Táto technológia naberá na záujme pretože umožňuje výrobu tvarovo zložitejších dielov a zároveň dosahuje vyššiu produkciu výroby.[1;14]

Polotovarom sú termoplastické kompozitné pláty tvorené vrstvami prepregov z jednosmerných vláken v požadovanej orientácii a poradí. Vrstvy sa zvyknú bodovo privariť po obvode aby sa zamedzil vzájomný pohyb vrstiev. Pre výrobu sa používajú rôzne kombinácie výstuže a matrice napríklad: uhlíkové vlákna a matrica z PEEK alebo uhlíkové vlákna s PPS matricou.[1]

Forma je zvyčajne tvorená jednou časťou, na ktorú bude kompozitný plat tlačený pomocou membrány. Materiál formy zvykne byť nástrojová oceľ a membrány sa zvyčajne vyrábajú z gumy alebo superplastickej hliníkovej zliatiny. Pomocou membrány je definovaný proces tvárenia pretože jej vlastnosti majú vplyv na výslednú kvalitu dielu. Preto podľa potreby výroby je dôležité dbať na správny výber materiálu membrány. V prípade jednoduchších tvarov dielu je postačujúce použiť mäkšie materiály, ale v prípade tvarovo komplikovanejších dielov je vhodné použiť tuhší materiál membrány.[1; 14]



Obr. 19 Tvárenie dvoma membránami [32].

Proces technológie začína prípravnou časťou, kde sa vrstvy termoplastických prepregov poukladajú do vrstiev v požadovanej orientácii a zvaria po obvode. Následne je potrebné kompozitný laminát predhriať na teplotu blízku teplote tavenia. Po dosiahnutí požadovanej teploty je možné kompozit umiestniť do formy medzi dve pružné membrány, ktoré zovrú polotovar po obvode. Pre odvod vzduchu je využité vákuum. Je viacero možností aplikácie tepla a tlaku na polotovar. Jedna z možností je polotovar vložiť medzi membrány a celú sústavu vložiť do pece, kde sa predhreje viz obr. 19. Následne je vložená do pece a na vrchnú membránu je aplikovaný tlak, ktorý ho prenáša na polotovar. Počas tlakovej fázy je v kompozite vyvinuté dvojosové napätie, ktoré pomáha tomu aby sa laminát nekrčil. Forma nemá vlastný ohrev, čo znamená, že už pri tlakovej fáze nastáva zároveň ochladzovacia fáza a diel postupne tuhne. Preto je potrebné zaistiť krátke prestoje medzi vybratím polotovaru z pece a vložením do formy.[1; 14]

Výhodami sú možnosť výroby tvarovo zložitejších dielov pri relatívne dobrej výrobnej efektivite a veľmi dobre vlastnosti štruktúry výsledného dielu pretože je možné použitie dlhých vlákien.[1]

Nevýhodami sú možnosť výroby iba dielov s konštantnou hrúbkou a limitujúcim faktorom, je takisto náročnosť zachovania orientácie vlákien z dôvodu deformácie pri tvarovaní membránou.[1]

Aplikačné možnosti sú obmedzené pretože technológia zatiaľ nemá veľké komerčné využitie, ale je možné vyrábať rôzne tvarové diely, ako sú napríklad prilby alebo vlnité diely.[1]

Navíjanie pásky

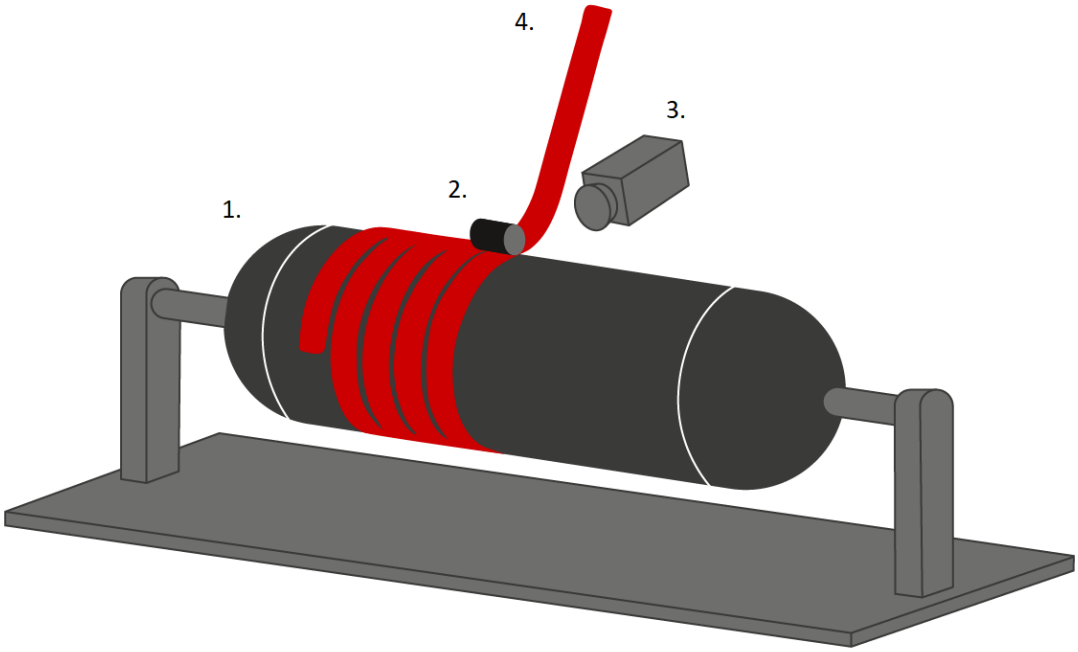
Je v princípe navíjanie pásky z termoplastického prepregu na tŕň. Kde sa pomocou tepla a tlaku pri navíjaní dosahuje proces bez tuhnúcej fázy. Celý proces je jednokrokový na rozdiel od

reaktoplastických kompozitov, kde je potrebné dbať na tuhnutie. Na druhú stranu navíjanie termoplastických pások je technický náročnejšie a nedosahuje takú kvalitu.[1; 14]

Polotovarom je páska tvorená rôznou kombináciou vláken a matríc. Použité vlákna môžu byť uhlíkové, sklenené alebo aramidové a matricou môžu byť PEEK, PPS, PEI, PP, PMMA a ďalšie. Bežne sa používajú pásky s kombináciou uhlíkových vláken a matrice PEEK alebo PSS. Páska je impregnovaná dopredu. Zvyčajné rozmery sú hrúbka 127 µm a šírka 6,35 až 50 milimetrov.[1; 14]

Navíjací trň je veľmi podobný aj pre navíjanie reaktoplastických pások. Z dôvodu dôležitosti kontroly proces tuhnutia môže byť tŕň vyhrievaný. Tvar je určený podľa potreby zákazníka.[1]

Proces spočíva v navíjaní pásky na tŕň viz. obr. 20, kde je dôležité zaistiť lokálny ohrev a prítlačný valec. Proces sa môže nazývať aj online konsolidácia z dôvodu, že páska nalepovaná na tŕň konsoliduje v mieste dotyku a zároveň prítlačný valec aplikuje tlak v bode konsolidácie. Pri tejto technológii dochádza k náhlemu ohrevu aj chladeniu preto je potrebné k podmienkam spracovania pristupovať rozdielne ako je to pri ostatných technológiách. Ich určovanie je komplexné.[1]



Obr. 20 Navíjanie pásky na tŕň [33].

Výhodami sú možná variabilita hrúbky výrobku, čistý proces výroby, vhodné pre výrobu konkávnych povrchov. Je možné vyrábať veľké diely bez prerušenia, nie je potrebná ďalšia operácia na tuhnutie, pretože páska konsoliduje v mieste kladenia.[1; 14]

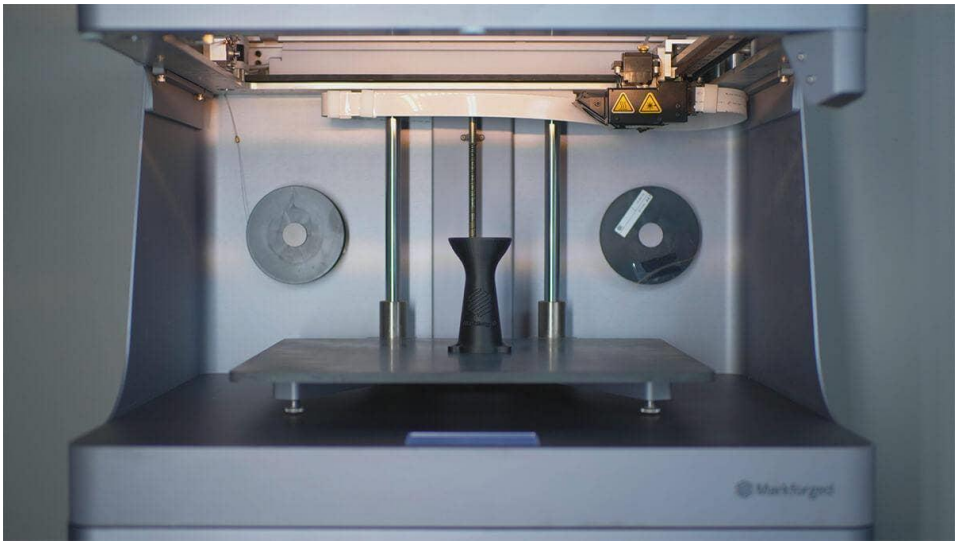
Nevýhodami sú nutnosť lokálneho zdroja tepla a prítlačného valca, vysoké vstupné investície, nižšia kvalita oproti reaktoplastickým kompozitom, vyššia cena polotovaru oproti navíjaniu mokrých vláken.[1; 14]

Aplikačné možnosti sú obmedzené pretože komerčné využitie tejto technológie nie je vysoké. Využiteľnosť je vo výrobe trubkových tvarov, ako je bicyklový rám [1].

3D tlač

Medzi technológie, ktoré sa začínajú častejšie používať pri spracovaní termoplastov a aj termoplastických polymérov patrí 3D tlač. Výroba termoplastických kompozitov pomocou 3D tlače nachádza svoje uplatnenie pri výrobe dielov, na ktoré už sú už kladené nároky na dostatočné vlastnosti. 3D tlačiarne dokážu vyrábať čeľusti, ale aj funkčne produkty využiteľne

v priemysle. Jedna zo spoločností, ktorá sa venuje 3D tlačiarňam so schopnosťou tlačiť kompozitné materiály je Markforged viz obr. 21. Tlačiarne využívajú odolné matrice, ako sú Nylon a Onyx s vystužením pomocou uhlíkových, sklenených alebo kevlarových vláken.[56]



Obr. 21 3D tlačiareň Markforged rady X [55].

Výhody 3D tlače sú variabilita výrobkov, ktoré sú 3D tlačiarne schopné vyrobiť, pevné výrobky s dobrými mechanickými vlastnosťami, presnosť výroby, prototypová výroba.[56]

Nevýhody sú časová náročnosť výroby, ktorá trvá v závislosti na produkte relatívne dlhšie, ako pri iných technológiách výroby.[56]

3 PRAKTICKÁ ČASŤ

Nasledujúca kapitola tejto diplomovej práce sa zaoberá praktickou časťou, kde je pozornosť postupne venovaná použitým materiálom, návrhu lisovacieho prípravku, príprave a procesu výroby skúšobných teliesok a nakoniec získanie mechanických vlastnosti pomocou normovaných mechanických skúšok. Zisťovanie mechanických vlastností termoplastických kompozitných materiálov určených pre balistické účely je jedným z prvých výskumov tohto typu na Univerzite.

3.1 Charakteristika použitého materiálu

Materiály, z ktorých boli robené skúšobné vzorky pre mechanické skúšky je potrebné popísať a zadefinovať. Bolo dôležité získať informácie a vlastnosti, ktoré udávajú výrobcovia týchto materiálov. Ďalším zdrojom boli obdobné materiály a ich vlastnosti, pretože v diskusii výsledkov bude dôležité porovnať aký vplyv mal nami navrhnutý výrobný proces a lisovací prípravok na výsledné vlastnosti. Medzi materiály, ktoré budú v tomto odseku popísané sú Endumax Shield XF 33 a kombinácia výstuže TWARON CT 747 s matricou plastom TH110.

Endumax viz obr. 22**,** je materiál z UHMWPE, čo predstavuje polyetylén s ultravysokou molekulovou hmotnosťou. Endumax bol vyvinutý spoločnosťou Teijin a vyznačuje sa nadštandardnými fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami. Vďaka nim má Endumax 11x vyššiu pevnosť ako oceľ, ale aj dobrú odolnosť voči nárazom, chemikáliám, vysokým teplotám a oderu. Pôvodne v roku 2012 bol účel Endumaxu mienený na balistickú ochranu, ale časom sa vyvíjal pre rôzne aplikácie aby získal svoju všestrannosť.[40]

Obr. 22 Film Endumax [58].

Medzi kľúčové vlastnosti materiálu Endumax patria: vysoká odolnosť voči UV, chemikáliám, abrázii, vysoký modul pružnosti a výborný pomer pevnosti k hmotnosti.[40]

Vyššie spomenuté vlastnosti sú definované okrem materiálu UHMWPE aj výrobným procesom, kde sa na začiatku zhutňuje do tuhej fólie a následne valcuje do požadovanej hrúbky vrstvy. Týmito krokmi sú zarovnané polymérne reťazce a vznikajú unikátne vlastnosti. Následne je možné materiál rezať na filmy a vytvárať z nich lamináty. Spoločnosť takisto udáva, že výroba je šetrná k životnému prostrediu keďže sa pri procese nepoužívajú rozpúšťadlá.[40]

V prípade tejto diplomovej práce bol použitý Endumax SHIELD XF33, ktorý je vo forme prepregu pripravený na konsolidáciu pre rôzne aplikácie, ako sú dosky alebo iné tvarové diely. Dodáva sa zvyčajne navinutý na roli o šírke 1,6 metra a navinutej dĺžke 200 metrov.[40] Vlastnosti je možné vidieť v tab. 7.

Tab. 7 Porovnanie vlastností materiálu Endumax s inými materiálmi [40].

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Hustota [g·m^{-3}]
Endumax film	170	0,97
Konvenčný UHMWPE	113	0,97
Uhlík	230 - 540	1,78
Para-amid	60 - 120	1,44

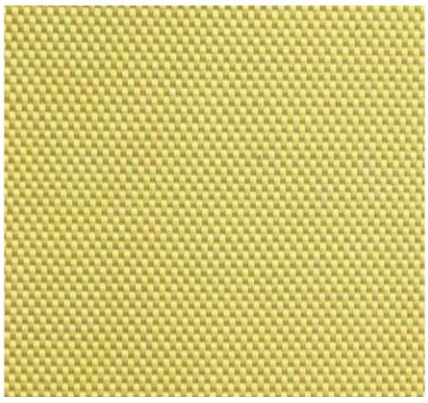
Aplikácie, pre ktoré sa tento materiál komerčne využíva sú rôzne viz obr. 23. V dnešnej dobe to je balistická ochrana, letecké prepravné kontajnery, laminované plachty pre lode alebo reproduktory.[40]

Obr. 23 Aplikácie materiálu Endumax [40].

Druhým materiálom použitým pre výrobu a testovanie vzoriek bol **TWARON CT 747 s matricou TH110.** Twaron je produkt z paraamidu vyrábaný spoločnosťou Teijin, ktorá sa zhotovuje v rôznych formách, ako sú prášok, tkaniny, priadza, vlákna alebo prepregy pre lamináty viz obr. 24. V prípade tejto diplomovej práce boli použité prepregy Twaronu s označením CT 747 s matricou TH110. TH110 predstavuje materiál polyfenylsuflid. Tento materiál sa vyznačuje vysokou pevnosťou, modulom pružnosti, vysokou tvarovou stálosťou, dobrou tepelnou odolnosťou a nehorľavosťou. Aplikačné možnosti Twaronu sú balistická ochrana, ochranné prostriedky, ochrana káblov. Twaron 747 bol navrhnutý najmä pre výrobu heliem a má dobru kompatibilitu s rôznymi matricami.[42] Vlastnosti je možné vidieť v tab. 8.

Tab. 8 Vlastnosti výstuhy Twaron CT 747 [42].

Materiál	Modul pevnosti v ťahu [GPa]	Hustota [kg·m^{-3}]	Hrúbka [mm]
Twaron CT 747	115	1450	0,62

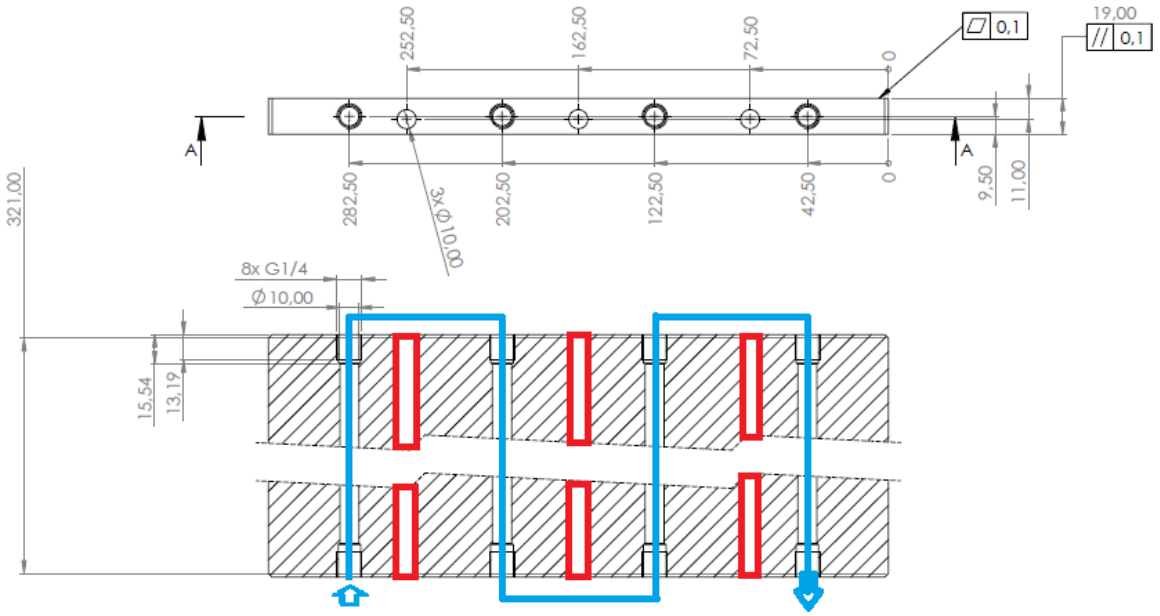


Obr. 24 Twaron [43].

3.2 Návrh lisovacieho prípravku

Pre hodnotenie vlastností termoplastických kompozitov bolo najprv potrebné vyrobiť vzorky. Metóda, navrhnutá pre výrobu vzoriek, bola lisovanie za tepla. Keďže takáto metóda vyžaduje lisovacie dosky so zabudovaným vyhrievaním a chladením a na Univerzite takéto zariadenie nebolo dostupné, bolo navrhnuté aby sa použili samostatné vyhrievané dosky použité s lisom, ktorý Univerzita vlastní. Práve preto aby bolo zisťovanie vlastností kompozitov uskutočniteľné, bol lisovací prípravok navrhnutý a vyrobený. Návrh je možné vidieť na obr. 25 a výkrese DOSKA_PROTOTYP.

Pri návrhu lisovacieho prípravku bolo potrebné zvážiť viacero parametrov. Medzi parametre, ktoré bolo potrebné zohľadniť, bol materiál a geometria prípravku. Následne bolo potrebné navrhnúť elektrický, ohrevný a chladiaci systém lisovacieho prípravku. V nasledujúcich odsekoch budú definované vplyvy jednotlivých faktorov na návrh lisovacieho prípravku použitého pri vykonávaní experimentálnej časti tejto diplomovej práce.



Obr. 25 Výstrižok z návrhu lisovacieho prípravku. Modrá – chladiaci systém, Červená – ohrevný systém.

Geometria prototypového lisovacieho prípravku bola navrhnutá tak, aby bolo možné lisovať laminát s rozmermi (300 x 300 mm). Z tohto dôvodu boli rozmery dosky prípravku určené (321 x 325 x 19 mm). Hrúbka bola navrhnutá v rozmere 19 mm z dôvodu prenosu veľkých síl od lisu. V prípade menšej hrúbky lisovacej dosky by mohlo pod tlakom lisovacieho stroja nastať prehnutie dosky alebo v horšom prípade jej prasknutie. Čo by malo negatívny vplyv na proces výroby kompozitného materiálu pretože by bola oneskorená výroba v prípade opravy alebo nutnosti vyrobiť nový lisovací prípravok. Celý návrh lisovacieho prípravku je možné vidieť vo výkrese DOSKA_PROTOTYP a reálny prípravok je možné vidieť na obr. 29.

Materiál, z ktorého boli lisovacie dosky vyrobené bola zliatina hliníka AlMgSiO0,5 označovanou aj EN AW-6060. Tento materiál bol vybraný z dôvodu dobrého vedenia tepla, ktoré je potrebné pri lisovaní za tepla. Zároveň musí mať materiál dostatočnú pevnosť aby sa pod tlakom vyvíjaným od lisovacieho stroja nedeformoval.

Ohrevný systém bol navrhnutý tak aby topné telesá ohriali celú lisovaciu dosku rovnomerne. Preto bolo navrhnuté použiť 6 topných telies viz obr. 26. Boli zvolené topné telieska od spoločnosti Easytherm. Použité topné telesa mali priemer 10 mm a dĺžku 100 mm. Výkon

topného telieska je 160 W. Z jednej strany lisovacích dosiek boli vložené 3 topné telieska. Rozvrhnutie ohrevného systému v lisovacej doske je možné vidieť na obr. č. 25.

Obr. 26 Vyhrievací termočlánok.

Pre návrh ohrevného systému bolo potrebné spočítať či navrhnuté topné telesá dokážu vyhriať lisovací prípravok na požadovanú teplotu. Zároveň bolo potrebné overiť čas, aby ohrievanie netrvalo príliš dlho. Na začiatku sa spočítalo koľko tepla je potrebné dodať na ohriatie lisovacej dosky na 140 °C. Rovnica pre výpočet tepla je [49]:

$$Q = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1) \tag{3.1}$$

Q ..... Teplo [J]

m ……. Hmotnosť [kg]

t_2 ..... Teplota na konci deja [°C]

t_1 ..... Teplota na začiatku deja [°C]

c ..... Merná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

Hmotnosť jednej dosky lisovacieho prípravku bola odvážená a je 5,35 kg. Počiatočná teplota bola 20 °C a teplota, na ktorú sa mala doska ohrievať je 140 °C. Merná tepelná kapacita dosky je 898 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

$$Q = 898 \cdot 5{,}35 \cdot (140 - 20) = 571{,}92\ kJ$$

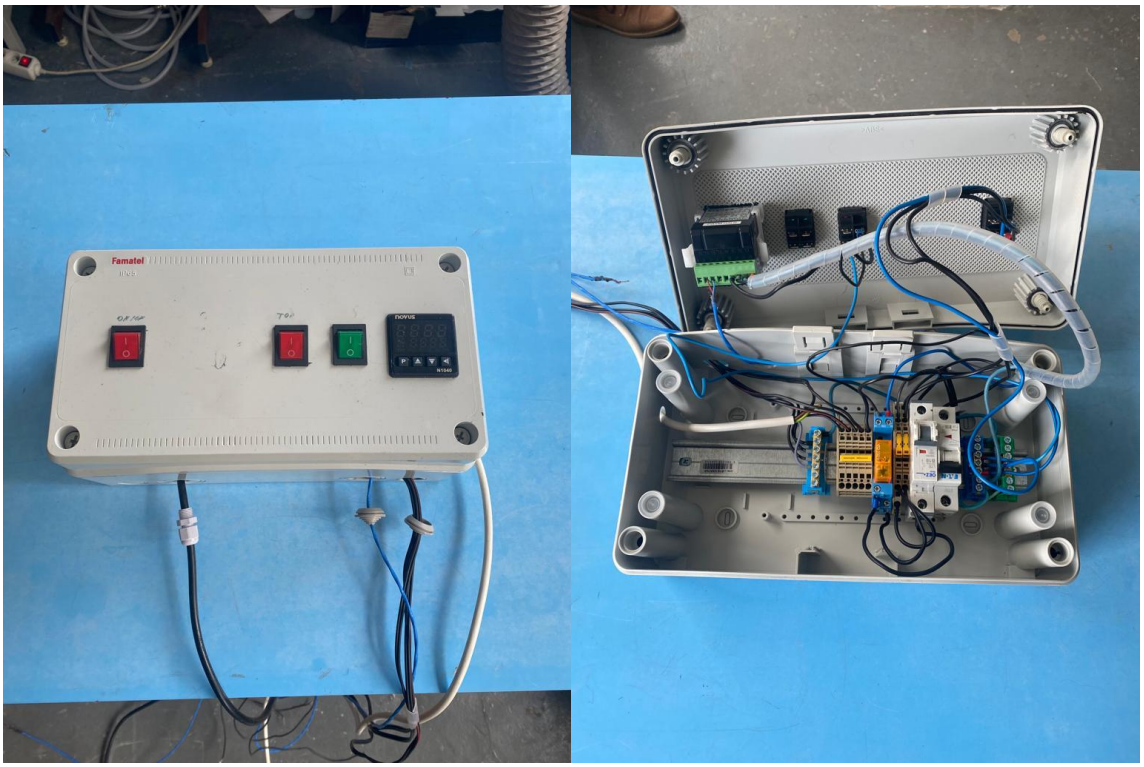
Po dosadení do vzorca vyšiel výsledok Q = 571,92 kJ. To je teplo, ktoré je potrebné dodať na ohriatie dosky na 140 °C. Následne bolo potrebné overiť za aký čas dokáže navrhnutý systém takéto teplo do dosky dodať. Kombinovaný výkon topných telies v jednej doske je 960 Wattov za hodinu. Všeobecne sa pri prevode výkonu na tepelnú prácu používa pomer 1000 Wattov za hodinu a to sa rovná odvedenej tepelnej práci 3600 kJ. Prevodom výkonu topných telies bola vypočítaná tepelná práca 3456 kJ za hodinu. Keďže na ohriatie dosky je potrebných 571,92 kJ a ohrevná sústava dokáže dodať 3456 kJ za hodinu, doska by sa podľa teoretického výpočtu mala ohriať za 9,93 minúty.

Keďže bolo potrebné ohrevný systém regulovať a kontrolovať teplotu v doskách, bola navrhnutá spínacia krabica, v ktorej boli zabudované viaceré prvky, ako sú poistky, regulátor a termočlánok. Prototypová spínacia krabica a jej zapojenie je možné vidieť na obr. 27.

Poistky zabezpečujú bezpečnosť v prípade nejakej chyby. Pretože bolo v lisovacom prípravku zabudované chladenie, kde chladiace médium bola voda, mohlo by dôjsť k skratu, čo by malo neblahé následky.

Regulátor N1040-PR od spoločnosti NOVUS je vhodný pre pripojenie termočlánkov typu J,T a K alebo snímačov typu Pt100. Vstupy sú merané pomocou termočlánkov, ale pri výstupe pomocou reléových alebo impulzných výstupov vie byť nakonfigurovaný pre rôzne operácie. Regulátor má na vrchu displej, ktorým je možné nastaviť hraničnú teplotu, po ktorú bude ohrev prebiehať a zároveň ukazuje hodnotu teploty meranú termočlánkami.[44]

Termočlánok použitý pre meranie teploty v lisovacom prípravku je typu K. Je tvorený dvoma drôtmi rôznych materiálov, ktoré sú na jednom konci pripojené k termočlankovému meraču a na druhom sú spojené. Termočlánok funguje na princípe merania napätia medzi drôtmi, ktoré je závislé na teplote. Napätie je následne prepočítané na teplotu. Termočlánok je tvorený drôtmi zo zliatiny nikel-hliník a nikel-chróm. Tepelný rozsah termočlánku typu K je -200 °C až 1260 °C, preto bol vhodný pre meranie teploty navrhnutého lisovacieho prípravku. Pracovná teplota procesu bola v rozmedzí izbovej teploty až 140 °C.[45; 46]



Obr. 27 Fotky prototypovej spínacej skrine, kde sú vidieť jednotlivé elektrické súčiastky.

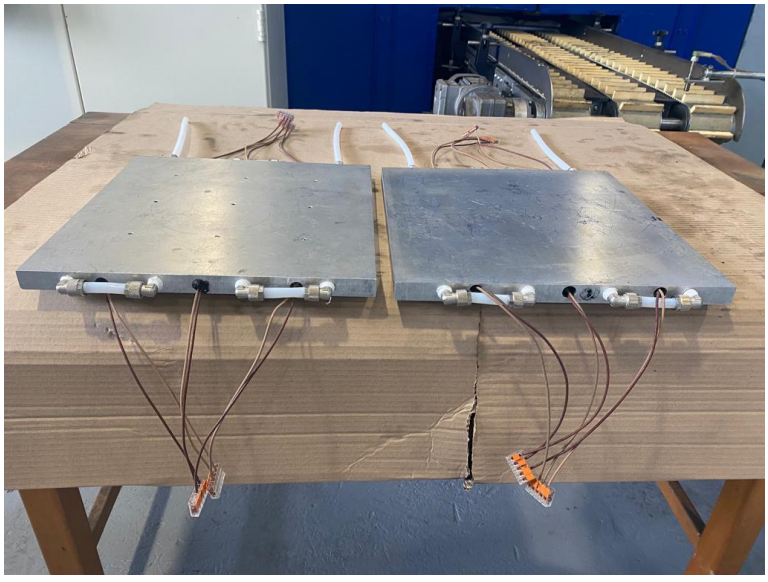
Chladiaci systém bol navrhnutý tak, aby zabezpečil postupné ochladenie lisovacích dosiek. Chladenie zabezpečujú 4 prietokové kanály cez ktoré po zapnutí preteká voda. Kanály boli navzájom prepojené, aby mohla voda jedným prietokom odtekať do odtoku. Prepojenie kanálov bolo robené pomocou rýchlo-spojok so závitom a teflonových hadičiek, ktoré sú odolné voči vyšším teplotám. Rozvrhnutie chladiacich kanálov v lisovacej doske je možné vidieť na obr. 25.

Výroba prototypového lisovacieho prípravku prebehala na univerzitnej pôde. Výrobný postup pre lisový prototypový prípravok je možný vidieť na obr. 28. a takisto v prílohe 1.

VUT FSI ÚST BRNO	VÝROBNÝ POSTUP			Názov celku :	Lis. Prot. Prípravok	Názov súčiastky :	Deska vyhrev
Dňa : 18.5.2023	Vyhotovil : Makariv		Kontroloval : -	Polotovar:	Doska 650x350x20 AlMgSiO0,5		
Číslo op. poradové : / Orientačné:	Název, označení stroje, zařízení, pracoviště : / Triediace číslo :	Dílna :	Popis práce v operacií :			Výrobné nástroje, prípravky, meradlá, pomôcky :	
01/01	Pásová píla	Deliareň materiálu	Upnúť polotovar Rezať na dĺžku 321			Pílový pás	
02/02	Frézka	Obrobňa	Upnúť polotovar Frézovať čelo na 19 ± 0,1			Čelná fréza	
03/03	Vrtačka	Obrobňa	Upnúť polotovar 7x Vrtať dieru Ø10			HSS vrták, extra dlhý	
04/04	Vrtačka	Obrobná	8x Vrtať závit G1/4 do hĺbky 15,54			Závitník G1/4	
05/05	OTK	OTK	Kontrola rozmerov výrobku 19 ± 0,1 321 325 8xØ10			Posuvné meradlo	

Obr. 28 Výrobný postup.

Po vyrobení dosiek bolo možné začať s montovaním ohrievacieho a chladiaceho systému. Diery so závitom boli určené pre chladiaci systém. Prepojenie chladiaceho systému viz návrh na obr. 25 bolo zabezpečené pomocou spojok so závitom a teflonových hadičiek. Prilepené boli pomocou silikónu, ktorý takisto zaisťuje tesnosť spoja. Následne bolo možné pripraviť ohrievací systém. Tento proces pozostával s vloženia topných telies do dier, ktoré nemali závit. Zároveň sa do jednej z dier vložil kábel termočlánku. Celý proces bol urobený dvakrát pre obe lisovacie dosky. Následne bolo možné pripojiť ohrievací systém a termočlánok k spínacej krabici, ktorej zloženie je popísané vyššie. Chladiaci systém sa pripája k zdroju vody až pred výrobnou fázou. Pripravené prototypové lisovacie dosky je vidieť na obr. 29.

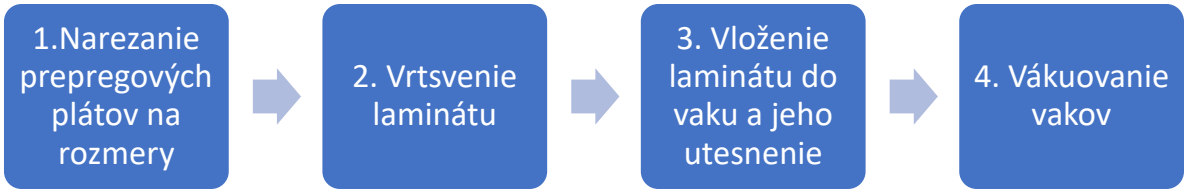


Obr. 29 Dosky lisovacieho prototypového prípravku.

3.3 Výroba skúšobných vzoriek

Výroba skúšobných vzoriek môže byť rozdelená do dvoch častí, kde prvá časť spočíva z fáze prípravnej a druhá časť fáze výrobnej. Počas prípravnej fáze bolo potrebné pripraviť všetko tak aby čas strávený výrobou bol čo najefektívnejší. Pretože lisovací stroj v univerzitných

laboratóriách je časovo vyťažený, preto bolo potrebné proces pripraviť čo najefektívnejšie. Obom fázam bude venovaná pozornosť v nasledujúcich odsekoch tejto kapitoly.



Obr. 30 Plán prípravnej fázy výroby.

Prípravná fáza viz obr. 30 spočívala v narezaní prepregových plátov z polotovaru do potrebného rozmeru 30 x 30 centimetrov. Potom bolo potrebné napočítať počet plátov pre vrstvenie. Následne sa vrstvili jednotlivé lamináty. Tak ako bolo spomenuté v úvode, vyrábané boli nielen rozdielne kompozitné materiály, ale aj vzorky o rôznych hrúbkach. Preto sa pripravené pláty navrstvili v rôznych počtoch aby bola dosiahnutá rôzna hrúbka výsledných výliskov. Konkrétne sa pripravili lamináty s 10, 20 a 30 vrstvami a pripravilo sa približne 20 vzoriek na lisovanie za tepla. Následne sa z teplovzdornej fólie vytvoril vak zalepený gumovou páskou, do ktorého boli vložené lamináty viz obr. 31. Použitie teplovzdornej fólie bolo z dôvodu eliminácie prilepenia laminátu na dosky lisu.

Obr. 31 Príprava vaku pre vákuovane polotovaru.

Pri lepení vakov bolo potrebné dbať na správne utesnenie pretože nasledovalo vákuovanie. Vákuovaním vakov z teplovzdornej fólie bolo dosiahnuté odsatie vzduchu. To bolo potrebné pre zaistenie správneho procesu lisovania. Jedným z dôvodov vákuovania bola konsolidácia materiálu a elimináciu vzduchu z medzivrstiev. Pripravené vaky s navrstvenými polotovarmi je možné vidieť na obr. 32.

Zároveň bolo potrebné pripraviť lisovací prípravok, kde museli byť nainštalované topné telieska a urobená elektrikárska práca tak, aby všetko fungovalo. Podobne bolo potrebné pripraviť chladiaci systém. Keďže chladiace médium bola voda, bolo potrebné zaistiť tesnenie

systému keďže únik vody by mal negatívny vplyv z pohľadu prítomnej kabeláže ohrevného systému a tým by mal vplyv na bezpečnosť ľudí pri procese lisovania.

Obr. 32 Pripravené za vákuované vaky pred lisovaním.

Po príprave vzoriek na lisovanie a lisovacieho prípravku bolo potrebné všetko aj s pecou presunúť do laboratória, kde sa nachádzal lisovací stroj. Následne bol umiestnený lisovací prípravok do lisovacieho stroja a chladiaci systém bol pripojený na zdroj vody.

Výrobná fáza

V rámci výrobnej fázy bol pre lisovanie laminátov použitý hydraulický stroj ZD40 viz obr. 33. Stroj je primárne určený pre mechanické skúšky na ťah, tlak a ohyb. Maximálny tlak, ktorý stroj dokáže vyvinúť je 400kN, preto bol vhodný pre použitie na lisovanie laminátov pre túto diplomovú prácu. Stroj má riadiacu jednotku EDC60, ktorá je vysoko precízna pre riadenie servo-hydraulických strojov, a tá sa používa na hydraulických strojoch vyšších tried.

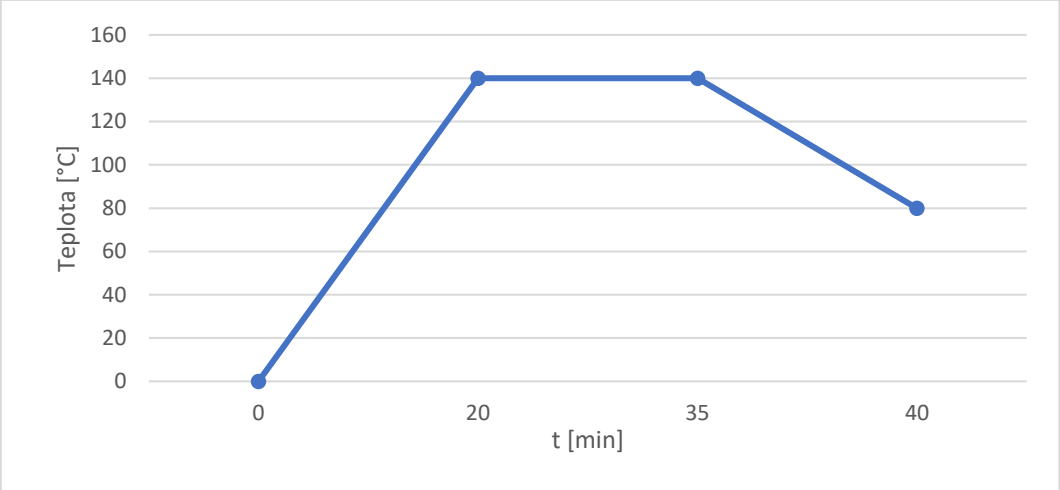
Obr. 33 Stroj ZD40.

Plán výrobného procesu pozostáva z viacero krokov:

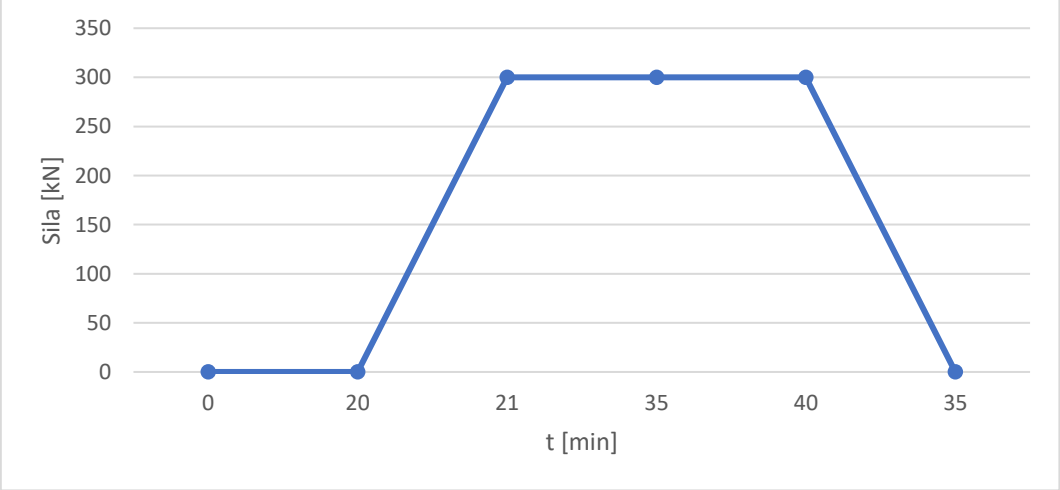
1. Zapnutie ohrevu
2. Predohrev laminátu v peci
3. Vloženie laminátu do lisovacieho stroja
4. Lisovanie laminátu
5. Ochladzovanie laminátu pod záťažou
6. Odťaženie laminátu
7. Dochladzovanie laminátu

Vyššie spomenuté kroky budú popísané s priloženou dokumentáciou nižšie v tejto v kapitole.

Na obr. 34 a obr. 35 sú grafy priebehu procesných parametrov v podobe teploty na lisovacom prípravku a sily vyvinutej od lisu. Fyzický graf priebehu lisovacieho stroja pri výrobe nebolo možné urobiť, z dôvodu obmedzenia softwaru, pretože zaťažovanie trvalo dlhšie, ako program dokázal zaznamenať.



Obr. 34 Priebeh teploty lisovacieho prípravku T [°C].



Obr. 35 Priebeh sily vyvíjanej lisom na laminát F [kN].

Po prípravnej fáze mohol začať výrobný proces. Na začiatku bolo potrebné predhriať lisovací prípravok na 140 °C pomocou ohrevného systému topných telies. Ohriatie na požadovanú teplotu trvalo 20 minút. Pre zlepšenie procesu lisovania boli niektoré lamináty vložené do pece na predohrev, kde bola nastavená teplota na 120 °C. Konkrétne bol predohrev potrebný pri

laminátoch s počtom vrstiev 20 a 30. Aramidové lamináty boli predhrievane po dobu 20 minúť a ostatné po dobu 15 minút. Po predhriatí laminátov a ohriatí lisovacieho prípravku bolo možné zahájiť proces výroby.

Obr. 36 Lisovanie laminátu z termoplastického kompozitného materiálu.

Do prípravku bol vložený vak s laminátom, na ktorý bol položený plát z textílie materiálu a následne zaťažený kovovým blokom. Následne bol vyvinutý tlak od lisovacieho stroja silou 30 kN. Výrobný proces je možné vidieť na obr. 36.

Vrstva textílie bola použitá pre zamedzenie tepelnej výmeny medzi lisovacím prípravkom a kovovým blokom. Použitie kovového bloku bolo potrebné z dôvodu prenosu veľkej sily od lisovacieho nástroja na lisovací prípravok. Ak by bola táto sila prenesená priamo na lisovací prípravok mohlo by dôjsť k jeho poškodeniu. Celý proces vloženia laminátu musel byť veľmi rýchly a presný z dôvodu straty tepla z prípravku a predhriatého laminátu. Laminát bol zaťažený tlakom po dobu 15 až 20 minút v závislosti na počte vrstiev laminátu. Po ubehnutí tejto doby nastal proces chladenia za stáleho tlaku 30 kN, kde bola pustená voda do chladiaceho systému. Po ochladení na 80 °C , čo trvalo približne 5 minút, bol kompozit odťažený a vybratý z lisovacieho prípravku.

Prípravok bol po vybratí kompozitu opäť vložený na svoje miesto a zakrytý textíliou aby sa ohrial na potrebných 140 °C pred ďalším procesom lisovania. Tento proces prebiehal podobne pre všetky pripravené lamináty. Lisovaný polotovar bol po lisovaní obalený do textílie a zaťažený na 15 minút, aby bolo zabezpečené pomalé chladnutie za mierneho tlaku viz obr. 37.

Obr. 37 Výlisok počas chladnutia pri zaťažení.

Po ochladnutí mohol byť výlisok odľahčený od záťaže a vybraný z vaku. Následne bola skontrolovaná kvalita a tuhosť celého výlisku. Po dokončení lisovania všetkých pripravených laminátov boli výlisky kompozitného materiálu poslané na orezanie vodným paprskom v externej spoločnosti, kde boli z dosiek vyrezané skúšobné telieska, ktoré majú svoje normované rozmery a tvar. Na obr. 38 je možné vidieť výlisky po vybratí z vaku.

Obr. 38 Výlisky po vybratí z vaku.

3.4 Určenie mechanických vlastností

Skúšobné telieska boli následne pripravené na mechanické skúšky. V rámci tejto diplomovej práci boli skúšobne telieska podrobené testom na ťahové a ohybové vlastnosti, ktoré budú popísané v nasledujúcich kapitolách 3.4.1 Skúška ťahových vlastností a 3.4.2 Skúška ohybových vlastností.

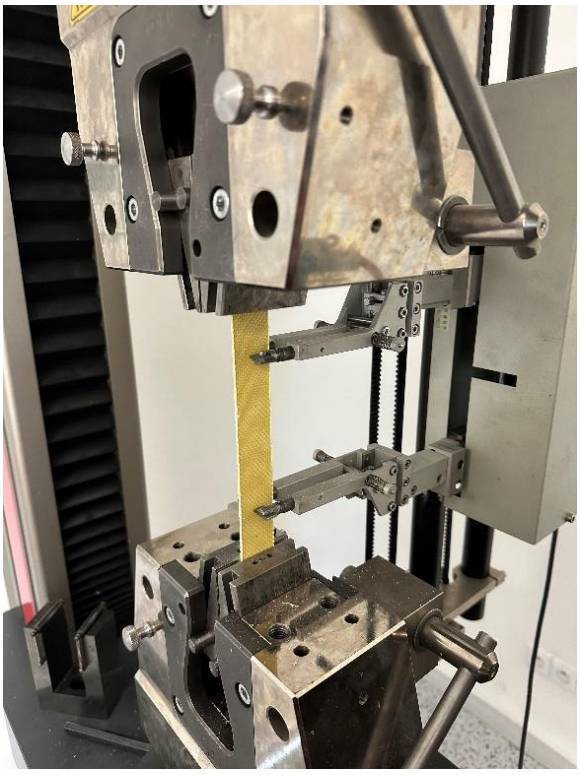
3.4.1 Skúška ťahových vlastností

Testovanie ťahových vlastností pripravených skúšobných teliesok bolo robené na stroji Zwick Z100 viz obr. 39, ktorým boli merané parametre, ako pevnosť v ťahu, modul pružnosti v ťahu a menovité pomerné predĺženie v ťahu. Skúšobné telieska mali rozmer (250 x 25 x 2 mm). Zwick Z100 je stroj určený na rôzne druhy ťahových skúšok a má zabudovaný prieťahomer, ktorý zabezpečuje presné meranie. Stanovovanie ťahových vlastností bolo robené v súlade s normou EN ISO 527 - 1. Postup merania spočíval v upevnení skúšobného vzorku do čeľustí, kde bolo potrebné upnutie vzorku v zvislom smere aby sa zabezpečil jednoosí ťah. Následne stroj vyvinul ťahovú silu na skúšobné teliesko. Rýchlosť skúšky bola 5 mm/min pre meranie modulu pružnosti v ťahu (E_t) a 5 mm/min pre meranie pevnosti v ťahu (σ_m) a pomerného predĺženia (ε_{tb}). Menovité pomerné predĺženie bolo určované tak, že čeľuste boli na začiatku vzdialené 130e mm a na konci bola odčítaná ich hodnota pred porušením. Skúška ťahom prebiehala až do porušenia skúšobného telieska. V rámci skúšania ťahových vlastností nastali viaceré okolnosti, ktoré mali vplyv na výsledky. Termoplastické kompozitné materiály, ktoré boli testované nie sú vyrobené a prispôsobené na zaťažovanie v pozdĺžnom smere. Kvôli tomu sa pri skúšaní vzoriek z materiálov Twaron CT 747 TH110 a Endumax Shield XF33 nepodarilo získať relevantné výsledky. Skutočnosti, ktoré nastali počas testovania ťahových vlastností boli zhodnotené v kapitole 4.1. V rámci porovnania mechanických vlastností, boli otestované dostupné vzorky materiálu Twaron CT ER68 s reaktoplastickou matricou, vyrábane v autokláve viz. tab. 10.

Po uskutočnení testov na stroji Zwick Z100 zvýšili 3 vzorky materiálu Endumax Shield XF33, ktoré sa neskôr skúsili otestovať na stroji LabTest 6.500 viz obr. 41, pri rovnakej rýchlosti merania 5 mm/min a norme EN ISO 527 – 1. V rámci testov sa skúšalo rôzne upnutie a podarilo sa získať výsledky, ktoré je možné vidieť na tab. 11.

Priebehy skúšok, výsledky a zistené informácie sú diskutované v kapitole 4.1 Vyhodnotenie ťahových vlastností.

Obr. 39 Stroj Zwick Z100.



Obr. 40 Detail ťahovej skúšky.

Tab. 10 Výsledky ťahovej skúšky pre materiál Twaron CT 747 ER68.

Vzorka	σ_M [MPa]	ε_{tB} [-]	b [mm]	h [mm]
1	438,400	0,18	24,97	2,15
2	462,656	3,82	24,96	2,11
3	470,964	0,00	25,03	2,17
4	474,886	0,40	25,37	2,24
5	480,742	6,44	24,86	2,12
Priemer	465,53 ± 16,53	2,67 ± 1,85		

Tab. 11 Výsledky ťahovej skúšky pre materiál Endumax Shield XF33.

Vzorka	σ_M [MPa]	ε_{tB} [-]	E_t [GPa]	b [mm]	h [mm]
1	78,16	8,52	11,67	25,2	2,1
2	137,05	7,79	10,62	25,2	2,1
3	149,32	6,16	10,51	25,2	2,1

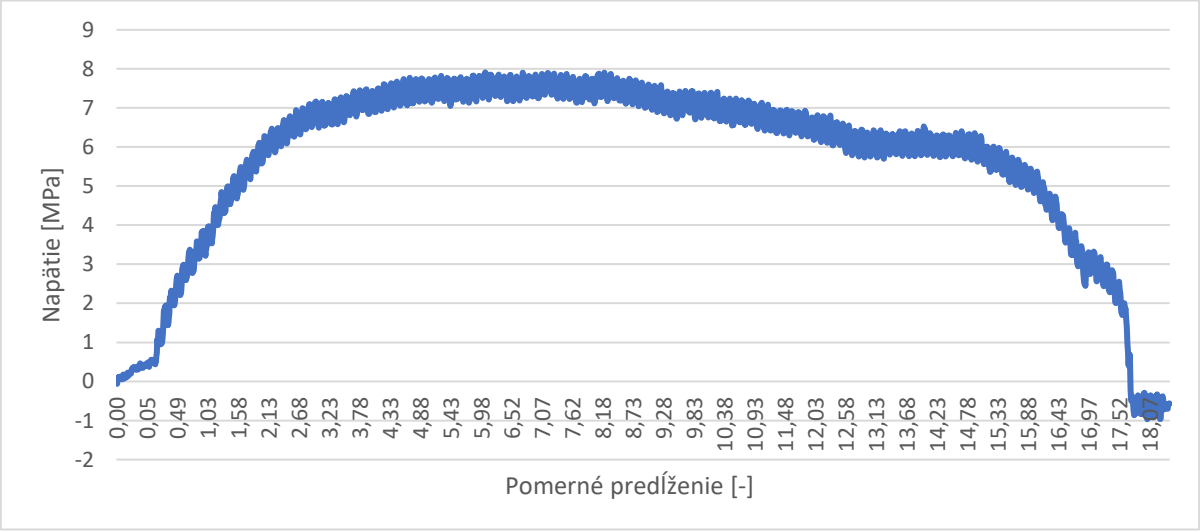
Obr. 41 Detail ťahovej skúšky materiálu Endumax Shield XF33 na stroji LabTest 6.500.

3.4.2 Skúška ohybových vlastností

Testovanie ohybových vlastností pripravených skúšobných teliesok podliehalo norme EN ISO 178 bolo robené na stroji Zwick Z100 viz obr. 39. Skúšobné telieska mali rozmer (100 x 10 x 4 mm). Ohybové vlastnosti sa zisťovali na základe princípu trojbodového ohybu, kde sa skúšobné teliesko položí na podpory, ktoré sú od seba vzdialené 64 mm a následne je pomocou tŕňa aplikovaná sila od stroja viz obr. 42. Postup merania spočíval v pomalom zatlačovaní tŕňa do vzorku, kde vznikalo ohybové napätie. Rýchlosť skúšky bola 2 mm/min. Hodnoty získané z ohybovej skúšky sú modul pružnosti v ohybe (E_f), medza pevnosti v ohybe (σ_{fM}) a hodnota napätia pri veľkosti priehybu, ktorý sa rovná 1,5 násobku hrúbky vzorku označovaný (σ_{fC}).

Obr. 42 Ohybová skúška - Trojbodový ohyb.

Skúška ohybom prebiehala až do úplného porušenia vrstiev skúšobného telesa, kde došlo k strate vlastností. Z dôvodu povoľovania medzivrstiev kolísala aktuálna hodnota napätia viz. obr. 43 a preto program, ktorý vypočítaval hodnotu modulu pružnosti v ohybe bol ovplyvnený. Z tohto dôvodu, bolo potrebné urobiť výpočet pre presnejšie zistenie hodnoty modulu pružnosti v ohybe.



Obr. 43 Graf ohybovej skúšky materiálu Twaron CT 747 s TH110.

Pre výpočet modulu pružnosti bolo potrebné určiť vhodný interval, kde prebieha nárast napätia v podobnom tempe. Po určení intervalu bolo odčítať hodnoty pomerného predlženia a napätia na začiatku intervalu a na jeho konci. Následne sa čísla dosadili do vzorca nižšie.

$$E_f = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot 100 \qquad (3.2)$$

E_f ..... modul pružnosti v ohybe [MPa]

σ_2 ……napätie v hodnote pomerného predĺženia ε_2 [MPa]

σ_1 ……napätie v hodnote pomerného predĺženia ε_1 [MPa]

ε_2 …… pomerné predĺženie na konci intervalu [%]

ε_1 …… pomerné predĺženie na začiatku intervalu [%]

Výsledky ohybových skúšok, kde je možné vidieť hodnoty zistené pri mechanickej skúške a takisto hodnoty zistené výpočtom v tabuľkách tab. 12 a tab. 14.

V rámci porovnania mechanických vlastností, boli otestované dostupné vzorky materiálu Twaron CT ER68 s reaktoplastickou matricou vyrábane v autokláve viz tab. 13. Tie boli pridané z dôvodu možného porovnania mechanických vlastností s materiálmi z termoplastických kompozitov, tým bolo možné zhodnotiť úroveň vlastností v porovnaním s reaktoplastickými kompozitnými materiálmi, ktoré majú väčšie uplatnenie v komerčnom priemysle.

Tab. 12 Výsledky ohybovej skúšky pre materiál Twaron CT 747 TH110.

Vzorka	E_f [MPa]	σ_{fC} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	*E_f [MPa]
1	370,95	5,34	5,71	129,23
2	461,43	7,22	7,91	201,25
3	415,22	7,71	8,47	283,85
4	-243,88	5,22	5,30	118,23
5	147,39	6,63	6,87	140,11
Priemer	230,22 ± 291,17	6,43 ± 1,11	6,86 ± 1,36	174,5 ± 69,0

Tab. 13 Výsledky ohybovej skúšky pre materiál Twaron CT 747 ER68.

Vzorka	E_f [MPa]	σ_{fC} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	*E_f [MPa]
1	1813,43	88,99	113,57	9884,20
2	455,01	35,89	116,10	6652,40
3	360,37	60,09	114,88	5543,28
4	-1422,99	76,79	123,58	7697,49
5	-546,92	66,93	117,45	6443,77
Priemer	131,78 ± 1230,65	65,74 ± 19,92	117,12 ± 3,89	7244,23 ± 1662,76

Tab. 14 Výsledky ohybovej skúšky pre materiál Endumax Shield XF33.

Vzorka	E_f [MPa]	σ_{fC} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	*E_f [MPa]
1	2034,87	26,77	49,38	3106,07
2	1073,33	21,45	47,96	2954,51
3	-127,14	22,37	49,81	3345,61
4	-1425,64	22,42	49,60	3329,83
5	869,37	16,29	46,26	3365,51
Priemer	484,96 ± 1315,41	21,861 ± 3,74	48,60 ± 1,45	3220,31 ± 1315,41

*E_f [MPa] – prepočítaná hodnota modulu pružnosti v ohybe.

4 VYHODNOTENIE A DISKUSIA VÝSLEDKOV

V tejto kapitole sú zhodnotené výsledky meraní mechanických skúšok, ktoré boli urobené. Pozornosť bude zameraná na samotné vlastnosti skúmaných termoplastických materiálov, ktoré sú prevažne určené pre balistické účely. Zvyčajne sa pri týchto materiáloch netestujú mechanické vlastnosti, ako je modul pružnosti alebo medza pevnosti pri rôznom zaťažení. Práve pre zhodnotenie vlastnosti bolo potrebné ich urobiť a následne zhodnotiť ich využiteľnosť v inom, ako balistickom smere. V prvom rade boli vyhodnotené priebehy mechanických skúšok, kde je možné zhodnotiť, ako sa materiál chová pod záťažou v ťahu a ohybe. Následne boli zvážené hodnoty, ako modul pružnosti alebo medza pevnosti a porovnané medzi materiálmi, ktoré boli použité pri testovaní. Pre ďalšie porovnanie boli vyhľadané mechanické vlastnosti podobných materiálov k tým, ktoré boli testované. Podobné materiály bolo potrebné dohľadať z dôvodu, že výrobca testovaných materiálov v tejto diplomovej práci uvádza len vlastnosti zaoberajúce sa balistikou, ako sú plošná hustota alebo balistický výkon. Tým, že výrobca utajuje presné zloženie použitých prepregov, bolo možné dohľadať iba podobné materiály, s ktorých mechanickými vlastnosťami boli porovnané výsledky testovaných vzoriek. Na záver boli zhodnotené skúmané materiály a ich možnosti využitia v porovnaní s reaktoplastickými kompozitnými materiálmi a takisto ich využiteľnosť mimo odboru balistiky. V nasledujúcich kapitolách sú najprv zhodnotené v kapitole 4.1 ťahové vlastnosti testovaných vzoriek a v kapitole 4.2 sú zhodnotené ohybové vlastnosti testovaných vzoriek. Na záver boli zosumarizované poznatky z hodnotenia mechanických vlastnosti s prepojením na budúce možnosti aplikácie skúmaných termoplastických kompozitných materiálov určených pre balistické účely.

4.1 Vyhodnotenie ťahových vlastností

Diskusia výsledkov ťahovej skúšky testovaných materiálov sa zaoberá hodnotením podmienok a priebehu skúšky, kde nastali isté skutočnosti a grafy priebehu skúšky. Následne sa pozornosť upriamila na porovnanie hodnôt ťahových parametrov medzi materiálmi Twaron CT 747 ER68 a Endumax Shield XF33. Výsledky ťahovej skúšky sú v tab. 15.

Pri vyhodnocovaní materiálu Endumax Shield XF33 nevyhodnocovala smerodajná odchýlka z dôvodu malého počtu testovaných vzoriek.

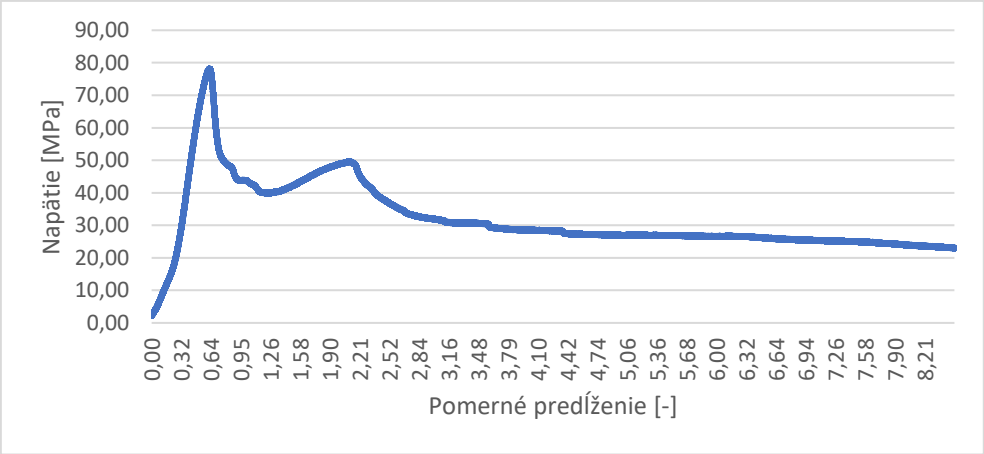
Tab. 15 Ťahové vlastnosti testovaných materiálov.

Materiál	E_f [GPa]	ε_{tB} [-]	σ_M [MPa]
Endumax Shield XF33 s príložkou	11,67	6,82	78,16
Endumax Shield XF33 bez príložky	10,57	5,55	143,19
Twaron CT 747 ER68	10,22 ± 0,45	2,67 ± 1,85	465,53 ± 16,53

Ako bolo popísané v podkapitole 3.4.1, skúšanie ohybových vlastností sa stretlo s neblahými faktormi, ktoré ovplyvnili výsledky. Pri skúšaní vzoriek termoplastického kompozitného materiálu tvoreného výstuhou Twaron CT 747 a matricou TH110 nastali problémy, ktoré súviseli s vyšmykovaním vzoriek z čeľustí testovacieho stroja. Preto boli pri ďalších vzorkách nalepené príložky, ktoré mali zabezpečiť lepšie upnutie do čeľustí. V prípade skúšok s príložkami nastalo odtrhávanie vrchných vonkajších vrstiev kompozitu, čo znemožnilo získať akékoľvek výsledky, kde všetky vzorky boli zničené. Pre tento materiál tým pádom nie sú žiadne diskutabilné hodnoty ťahových vlastností.

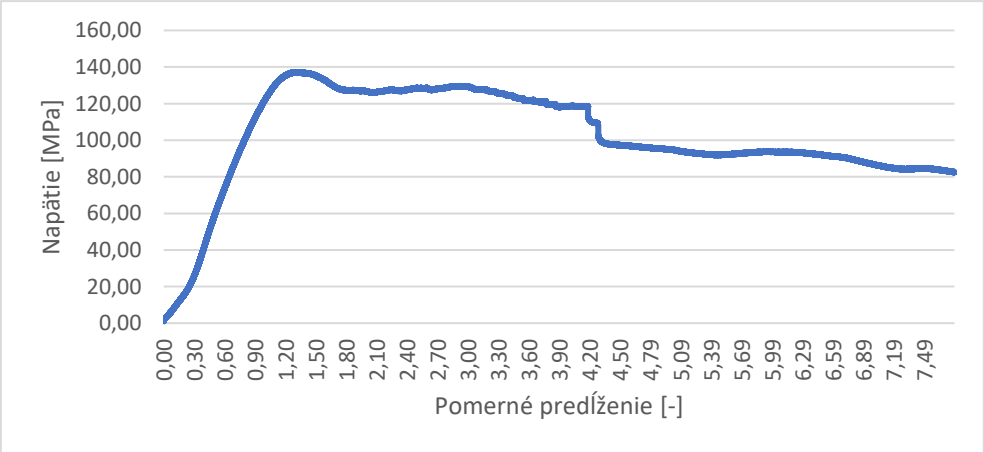
Podobná situácia nastala pri materiáli Endumax Shield XF33, kde zostali 3 použiteľné vzorky. Tieto vzorky boli následne otestované na stroji LabTest 6.500, pri ktorom bolo možné nastaviť väčšiu silu zovretia čeľustí. Jedna zo vzoriek bola osadená príložkou a ďalšie dve boli bez príložky.

Priebeh ťahovej skúšky prvého vzorku materiálu Endumax Shield XF33 je možné vidieť na obr. 44. Táto vzorka bola osadená príložkou. Hodnota napätia na začiatku skúšky rástla pri malom náraste predĺženia až do momentu, kedy hodnota napätia náhle klesla. To bol moment, keď sa príložka odtrhla. Veľká sila zovretia čeľustí síce spád napätia ubrzdila, ale vzorka už bola poškodená. Z priebehu je vidieť, že materiál Endumax Shield XF33 má vysoký modul pružnosti a výstuha dobre zamedzila predĺženiu v pozdĺžnom smere. Maximálna hodnota medze pevnosti sa zastavila na hodnote 78,16 MPa. Túto hodnotu ovplyvnilo odtrhnutie príložiek, kde je predpoklad, že tento materiál má vyšší potenciál medze pevnosti. Tento predpoklad bol overený pri vzorkách č. 2 a č. 3.



Obr. 44 Priebeh ťahovej skúšky Endumax Shield XF33 s príložkou.

Vzorky materiálu Endumax Shield XF33 č. 2 a č. 3 boli testované bez príložiek. Graf priebehu ťahovej skúšky oboch vzoriek bol podobný. Priebeh skúšky ťahových vlastností je možné vidieť na obr. 45. Z priebehu je vidieť, že na začiatku skúšky napätie rástlo strmo pri malom predĺžení veľmi podobne, ako pri vzorku s príložkou. Následne vzorka dosiahla medzu pevnosti, kde nasledoval pokles. Na rozdiel od vzorku s príložkou, pokles predstavuje povoľovanie medzivrstiev, ktoré už neustáli tlak a začali sa medzi sebou kĺzať. Veľké prekĺznutie materiálu je možné sledovať v grafe na úrovni pomerného predĺženia 4,20 %. Napriek tomu, že balistické materiály nie sú vhodné pre skúšky takéhoto typu, podarilo sa dosiahnuť solídne výsledky.

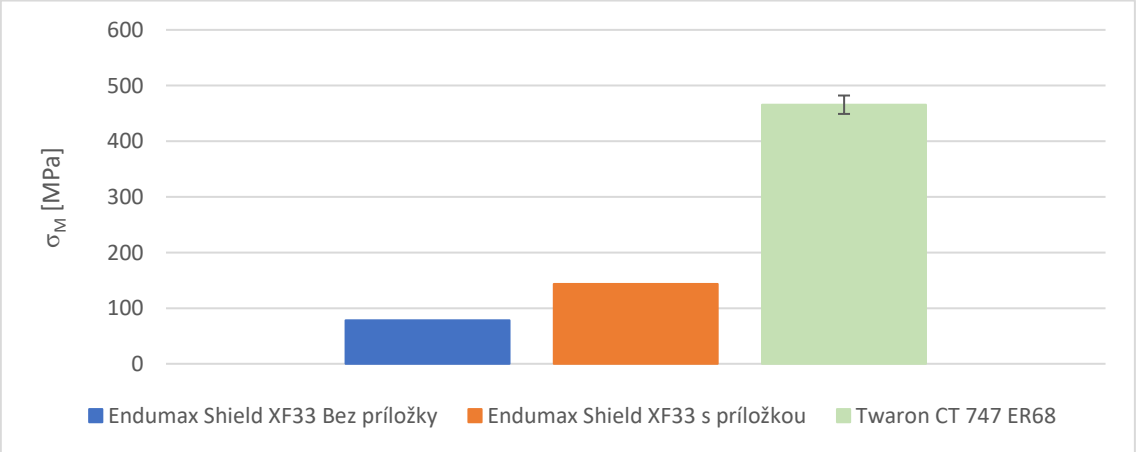


Obr. 45 Priebeh ťahovej skúšky Endumax Shield XF33 bez príložky.

Na obr. 46 sú fotky vzoriek po ťahovej skúške materiálu Endumax Shield XF33. Na obrázku vpravo sú všetky testované vzorky na stroji LabTest 6.500, kde vzorka vľavo bol osadená príložkami, ktoré sa počas testu utrhli. Napravo sú vzorky testované bez príložiek. Na obrázku vľavo je detailnejšia fotka jednej zo vzoriek bez príložiek, kde je vidieť, ako sa po dosiahnutí medze pevnosti začali vrstvy delaminovať a kĺzať medzi sebou. Pre lepšie uchytenie vzorky pri ťahovej skúške by bolo vhodné použiť prípravok s čapom, ktorý by zabezpečil rovnomerné zaťaženie vrstiev v celom priereze oproti klasickému upnutiu, ktoré zaťažuje najmä povrchové vrstvy vzorky.

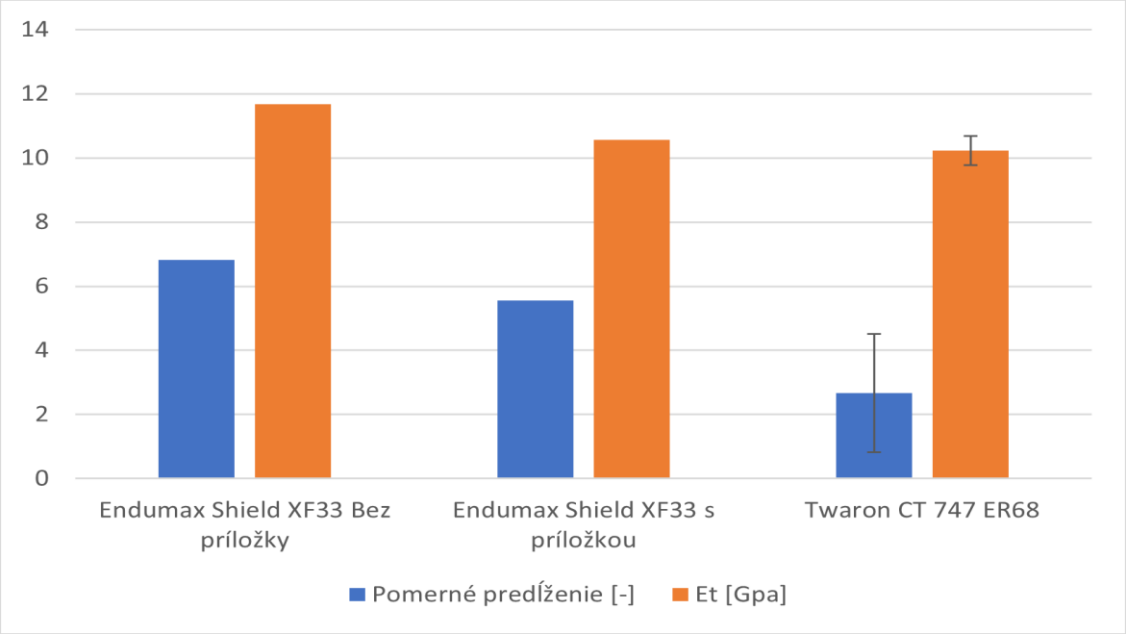
Obr. 46 Vzorky Endumax Shield XF33 po ťahovej skúške.

V nasledujúcej časti sú porovnané vlastnosti ťahových vlastností materiálu Endumax Shield XF33 s materiálom Twaron CT 747 ER68. Na obr. 47 je znázornené porovnanie hodnôt medze pevnosti, kde je materiál Endumax Shield XF33 rozdelený na vlastnosti vzoriek s príložku a bez príložky, pretože pri vytváraní priemernej hodnoty by vzorka bez príložky výrazne ovplyvnila priemernú hodnotu. Rovnako rozdelené výsledky sú aj na obr. 48, kde je porovnanie modulu pružnosti a pomerného predĺženia. Z obr. 47 je možné vidieť, že medza pevnosti Endumax Shield XF33 bez príložky je 3,25 krát menšia, ako Twaron CT 747 ER68. Vzorka s príložkou mala 5,96 krát menšiu medzu pevnosti, ako Twaron CT 747 ER68. Ako už bolo vysvetlené vyššie, rozdiel je väčší kvôli odtrhnutiu príložiek počas ťahovej skúšky.



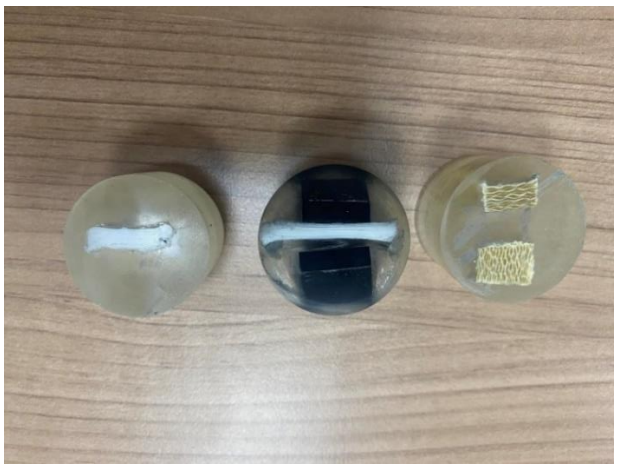
Obr. 47 Porovnanie hodnôt medze pevnosti.

Z obr. 48 je vidieť, že hodnota modulu pružnosti materiálu Endumax Shield XF33 s príložkou bola o 10,5 % vyššia, ako mali vzorky bez príložky a o 14,1 % vyššia, ako mal reaktoplastický kompozitný materiál Twaron CT 747 ER68. Zároveň sa dá pozorovať vyššia hodnota pomerného predĺženia materiálu Endumax Shield XF33 bez príložiek v porovnaní reaktoplastickým kompozitom, ktorý mal 2,07 krát vyššiu ťažnosť.

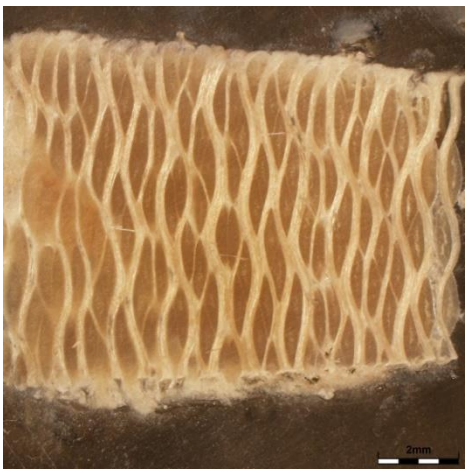


Obr. 48 Porovnanie hodnôt modulu pružnosti a pomerného predĺženia.

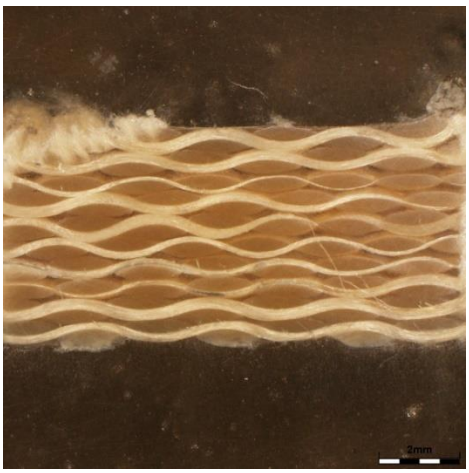
Zo vzoriek boli dodatočne urobené detailné fotky na mikroskope, kde sa analyzovalo prepojenie vrstiev s matricou, podiel matrice a výstuhy v kompozitnom materiáli a boli sledované prípadné defekty. Na obr. 49. Vzorky vľavo sú materiálu Endumax Shield XF33 a vzorka vpravo dole je z materiálu Twaron CT 747 ER68 a vpravo hore Twaron CT 747 TH110.



Obr. 49 Vzorky na sledovanie mikroskopom.

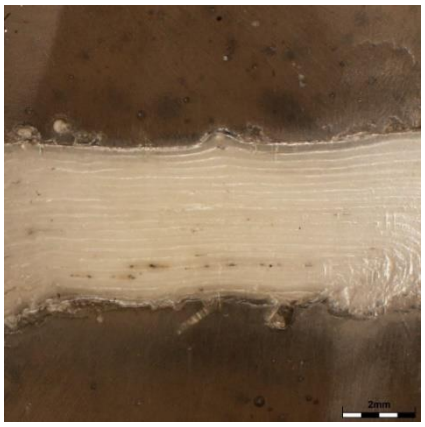


Obr. 50 Twaron CT 747 ER68.



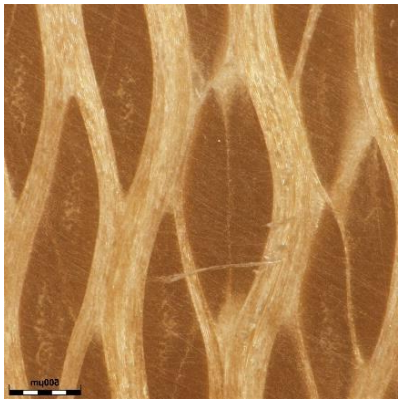
Obr. 51 Twaron CT 747 TH110.

Na obr. 50 a obr. 54 je Twaron CT 747 ER68, ktorý má reaktoplastickú matricu. Z fotiek je vidieť dobré prepojenie matrice a výstuhy, vhodný pomer matrice a výstuhy. To dodáva materiálu dobré vlastnosti, ktoré boli potvrdené mechanickými skúškami. Na obr. 51 a obr. 55 sú fotky materiálu Twaron CT 747 TH110 je vidieť, že prepojenie je na dobrej úrovni. Na fotke sú vidieť zhluky živice z dôvodu vyššieho podielu matrice v kompozite. V porovnaní s materiálom, ktorý má reaktoplastickú matricu je vidieť rozdiel v spracovateľnosti, kde sa potvrdzuje, že termoplastické materiály sú náročnejšie na potrebné teploty a tlaky pri technológii spracovania. Takisto mal vyšší podiel matrice vplyv na výsledné mechanické vlastnosti. Na obr. 52, obr. 53 a obr. 56 sú detailné fotky materiálu Endumax Shield XF33 urobené na mikroskope. Na obrázkoch je vidieť dobre prepojenie matrice výstuhy s minimom vzduchových bublín. Na rozdiel od materiálu s reaktoplastickou matricou je vidieť nižší podiel matrice v kompozite, čo mohlo viesť k nižšej súdržnosti medzivrstiev a následnej delaminácii, ktorá ovplyvnila výsledok mechanických skúšok.



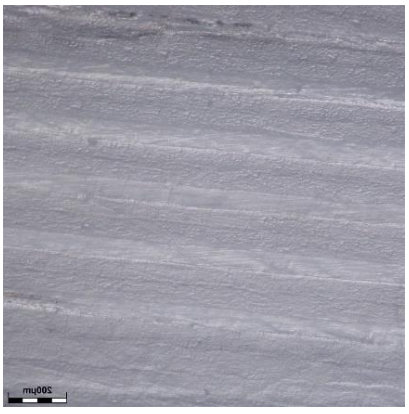
Obr. 52 Endumax Shield XF33.

Obr. 53 Endumax Shield XF33.



Obr. 54 Twaron CT 747 ER68.

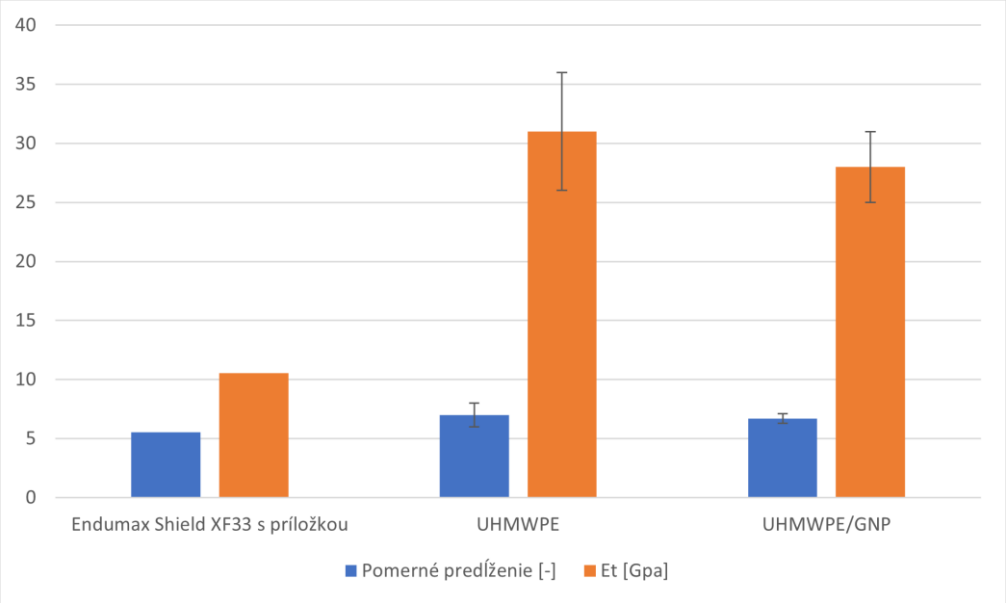
Obr. 55 Twaron CT 747 TH110.



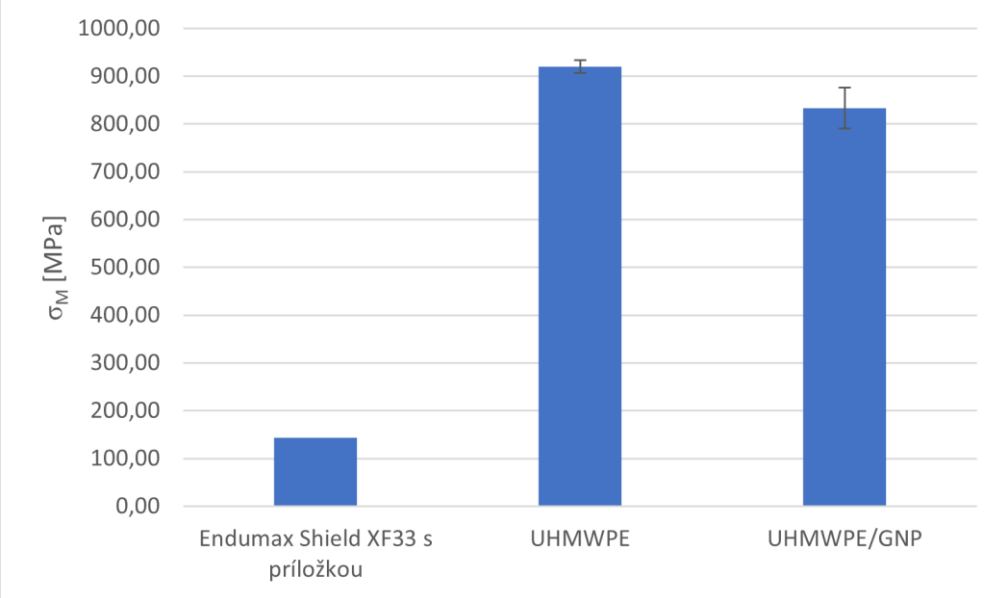
Obr. 56 Endumax Shield XF33.

Výsledky ťahovej skúšky je pre overenie relevantnosti dosiahnutých výsledkov vhodné porovnať aj s hodnotami od výrobcu. Tie výrobca neudáva, keďže tento materiál nie je určený pre skúšanie mechanických vlastností. Preto boli dohľadané výskumy materiálov podobného zloženia, aby bolo možné porovnať získané ťahové vlastnosti s hodnotami, ktoré materiál z UHMWPE dokáže dosiahnuť. Medzi ne patrí aj výskum Tareka Dayyouba [57], ktorý skúmal štruktúru a mechanických vlastností kompozitných materiálov z filmov UHMWPE modifikovaných nanovrstvami z grafénu s polyanilínom viz. zdroj 57. Z tohto výskumu boli použité hodnoty mechanických skúšok s označením UHMWPE a UHMWPE/GNP, ktorý má naviac podiel grafénových nanovrstiev.[57]

Na obr. 57 je vidieť porovnanie modulu pružnosti a pomerného predĺženia s materiálom Endumax Shield XF33 bez príložiek. Hodnotu pomerného predĺženia mal o 20,7 % nižšiu ako čistý materiál UHMWPE a o 17,2 % nižšiu, ako materiál UHMWPE s podielom grafénových vrstiev. Pri porovnaní modulu pružnosti bol rozdiel enormný, kde mal materiál Endumax Shield XF33 2,94 krát nižšiu hodnotu, ako UHMWPE a 2,65 krát nižšiu, ako UHMWPE/GNP.



Obr. 57 Porovnanie Endumax Shield XF33 s výskumom z materiálu UHMWPE [57].



Obr. 58 Porovnanie medze pevnosti Endumax Shield XF33 s UHMWPE [57].

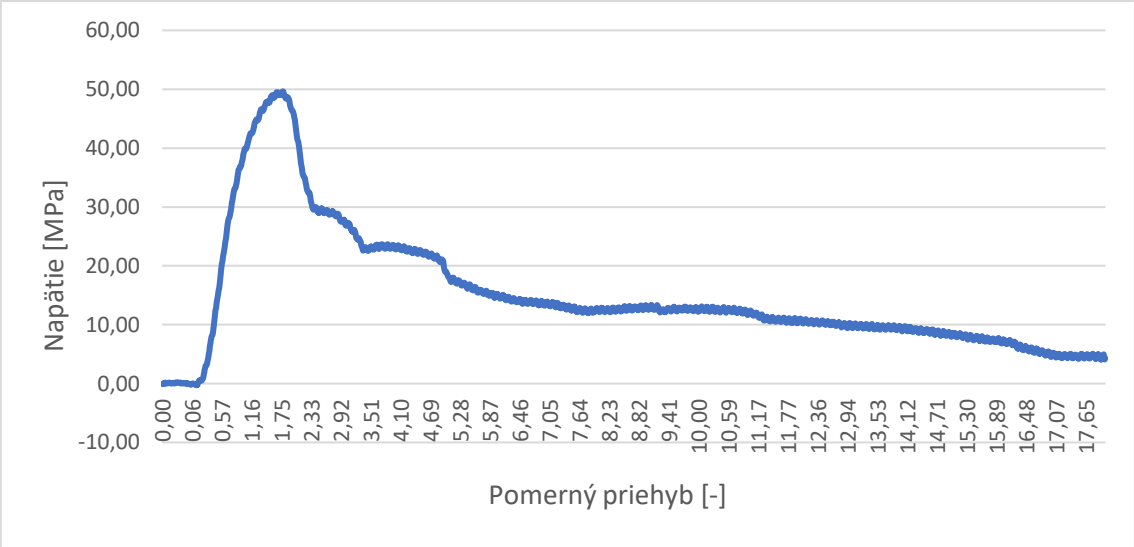
Na obr. 58 je znázornené porovnanie medze pevnosti. Materiál Endumax Shield XF33 mal 6,43 krát nižšiu hodnotu medze pevnosti, ako UHMWPE a 5,82 krát nižšiu medzu pevnosti, ako UHMWPE/GNP. Po porovnaní výsledkov mechanickej skúšky na ťah materiálu Endumax Shield XF33 je možné tvrdiť, že hodnoty nedosahujú výsledky ako výsledky výskumu, z ktorým bol porovnávaný. Medzi dôvody, ktoré mohli mat vplyv na výsledky patrí nízky podiel matrice, ktorá zabezpečuje kompaktnosť vrstiev medzi sebou. Ďalším dôvodom je nevhodnosť tohoto materiálu pre takýto typ mechanických skúšok, čo sa ukázala pri priebehu mechanickej skúšky, kde nastali problémy s upnutím a zaťažením vzorku v celom priereze. Pretože, ako bolo vysvetlené vyššie v tejto kapitole, pri ťahovej skúške, pod napätím nastala delaminácia vrstiev a následne preklz vrstiev medzi sebou.

4.2 Vyhodnotenie ohybových vlastností

Vyhodnotenie ohybových vlastností testovaných materiálov, bolo rozdelené do viacerých častí. V prvej časti boli analyzované grafy priebehu ohybových skúšok materiálu Endumax Shield XF33 a Twaron CT 747 TH110.

V rámci ohybovej skúšky je materiál zaťažovaný ohybom, pričom v materiáli vzniká tlakové a ťahové napätie, ktoré je rozdelené hladinou a ta je označovaná ako neutrálna. V neutrálnej hladine sa napätie ťahové aj tlakové rovná. Pri ohybových vlastnostiach je dôležitá oblasť v smere von od polomeru ohybu, kde prebieha ťahové napätie pretože je to oblasť, ktorá je v tomto prípade nosná.

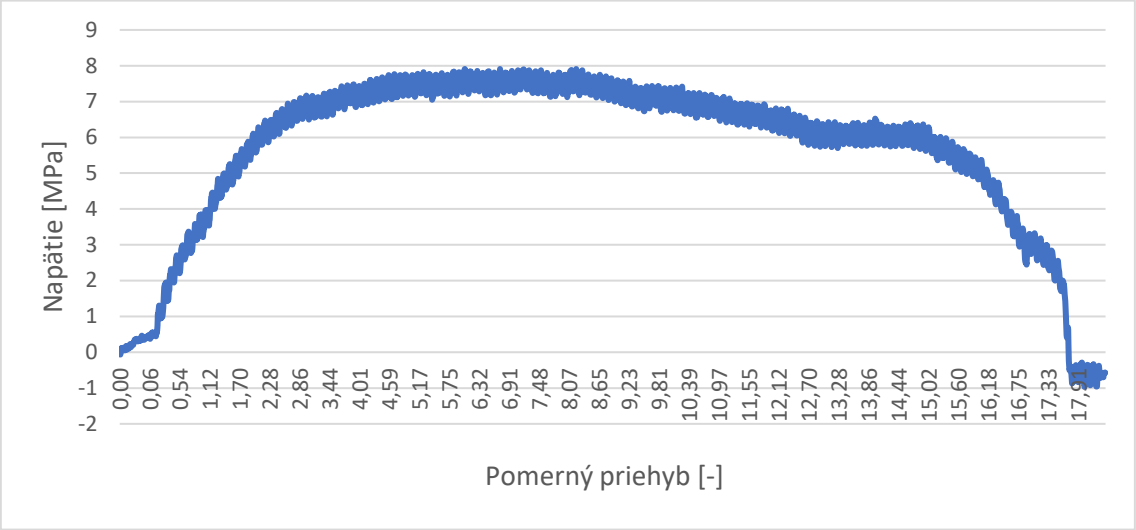
Na obr. 59 je možné vidieť graf priebehu ohybovej skúšky materiálu Endumax Shield XF33. Ako je možné vidieť, má výrazne vyššiu medzu pevnosti oproti materiálu Twaron CT 747 TH110. Z grafu je možne povedať, že po dosiahnutí medzi pevnosti nastál postupný pokles napätia smerom k 0. Tento jav predstavuje praskanie jednotlivých vrstiev výstuže, kde postupne dochádzalo k vyčerpaniu jej plastických vlastností. Zároveň je možné vidieť, že materiál nemá medzu klzu, čo je pri kompozitných materiáloch normálne vďaka ich pevnej výstuhe. Výstuha materiálu Endumax Shield XF33 sa na základe priebehu ohybovej skúšky vyznačuje nižšou húževnatosťou, ale dobrou pevnosťou. Preto je v priebehu vidieť strmý nárast napätia pri nižšom pomernom priehybe, no po dosiahnutí medze pevnosti výstuhy najviac namáhanej ťahovým napätím a prasknutím svoju úlohy prebrali vrstvy bližšie k neutrálnej hladine.



Obr. 59 Priebeh ohybovej skúšky materiálu Endumax Shield XF33.

Na obr. 60 je možné vidieť graf priebehu ohybovej skúšky materiálu Twaron CT 747 TH110. Z priebehu je jasne vidieť, že hodnota pevnosti je násobne nižšia, ako má Endumax Shield XF33. Zároveň je možné tvrdiť, že materiál ma vyššiu húževnatosť, keďže po dosiahnutí medze

pevnosti nenastal prepad napätia, ako to bolo pri obr. 59, ale naopak hodnota napätia so zvyšujúcim sa priehybom klesala veľmi pomaly. Tento jav predstavuje vyššiu plastickosť výstuhy a matrice, kde jednotlivé vrstvy nepraskali postupne, ale po vyčerpaní plastických vlastnosti povolili všetky v relatívne krátkej dobe.

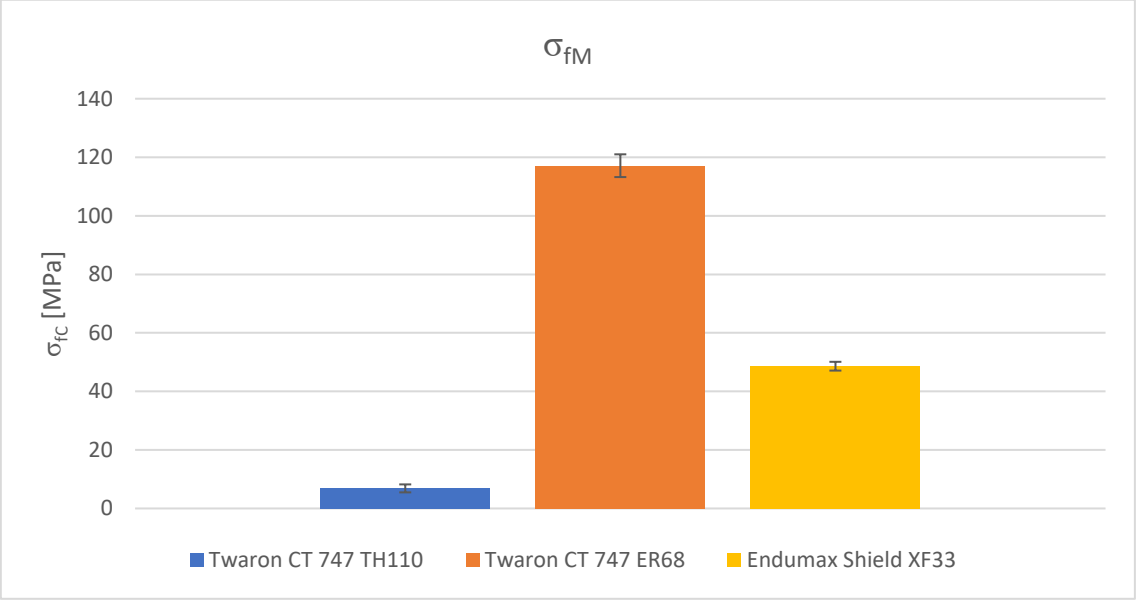


Obr. 60 Priebeh ohybovej skúšky materiálu Twaron CT 747 TH110.

Tab. 16 Ohybové vlastnosti testovaných materiálov.

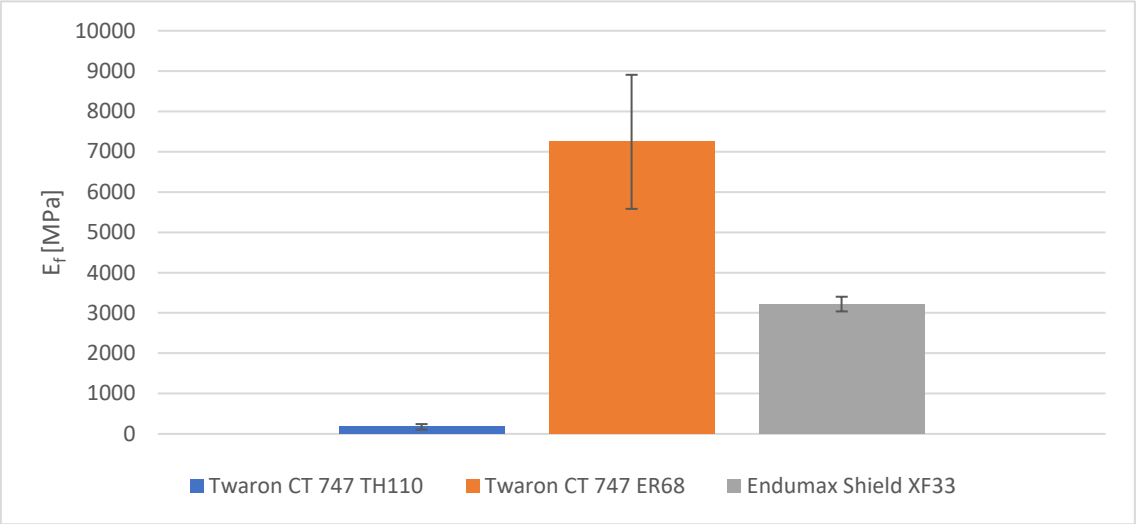
Materiál	E_f [MPa]	σ_{fC} [MPa]	σ_{fM} [MPa]
Twaron CT 747 TH110	174,5 ± 69,0	6,4 ± 1,1	6,9 ± 1,4
Twaron CT 747 ER68	7244,2 ± 1662,8	65,7 ± 19,9	117,1 ± 3,9
Endumax Shield XF33	3220,3 ± 182,0	21,9 ± 3,7	48,6 ± 1,5

V tab. 16 sú hodnoty ohybových vlastností skúmaných materiálov. Pre ich získanie bolo potrebné spočítať priemerné hodnoty so smerodajnými odchýlkami modulu pružnosti, medze pevnosti aj medze pevnosti pri priehybe 1,5 hrúbky vzorku.



Obr. 61 Medza pevnosti v ohybe skúmaných materiálov.

Na obr. 61 sú znázornené hodnoty medze pevnosti v závislosti na materiále. Najväčší rozdiel je možné vidieť pri medzi materiálom Twaron CT 747 ER68 a Twaron CT 747 TH110, kde má materiál z reaktoplastickou matricou 17,05 krát vyššiu hodnotu medze pevnosti, ako materiál s termoplastickou matricou. Dôvodom tohto rozdielu nemôže byť výstuž pretože je z rovnakého materiálu.



Obr. 62 Modul pružnosti v ohybe skúmaných materiálov.

Dôvodom rozdielnych vlastnosti termoplastu TH110 a reaktoplastu ER68, okrem rôznej technológie výroby, kde reaktoplastický materiál bol vyrábaný v autokláve. Ďalšími dôvodmi sú náročnosť termoplastických kompozitov na procesné podmienky a vyšší podiel matrice. Ďalším materiálom bol Endumax Shield XF33, ktorý mal 7 krát vyššiu medzu pevnosti ako materiál Twaron CT 747 TH110 a 2,4 krát menšiu, ako Twaron CT 747 ER68. Dôvodom rozdielu medzi materiálmi Endumax Shield XF33 a Twaron CT 747 TH110 je štruktúra vrstvenia prepregu, kde Endumax je zložený z vrstiev fólií navzájom prepletených čím získava dobre prepojenie vrstiev čím a lepšiu pevnosť, ako má Twaron CT 747 TH110, ktorý je tvorený impregnovanou výstužou aramidových vláken.

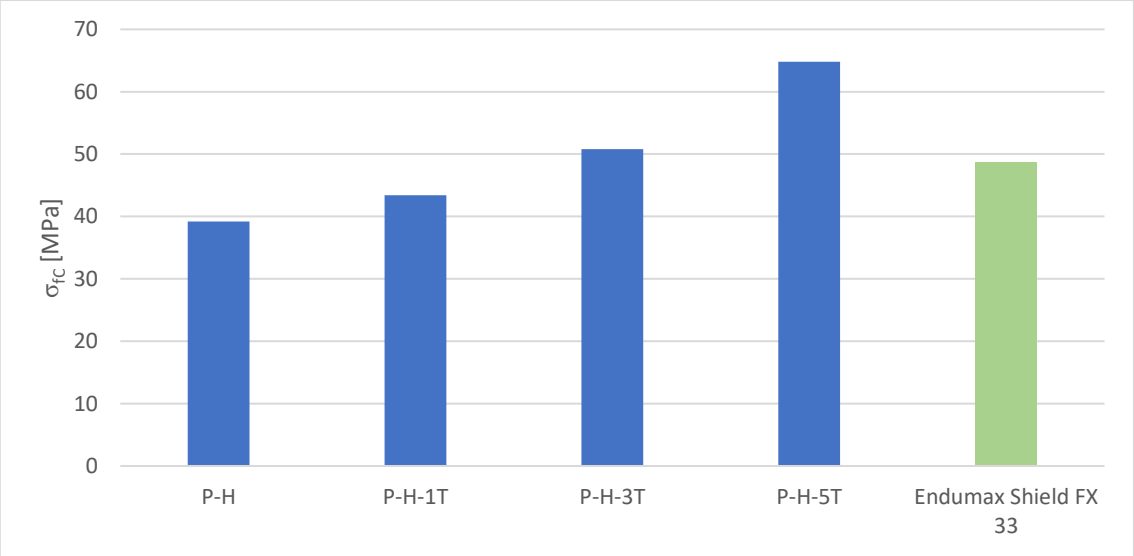
Ďalšou sledovanou hodnotou bol modul pružnosti. Jeho hodnoty sú znázornené na obr. 62. Z grafu podobne, ako pri medzi pevnosti možné vyčítať, že materiál Twaron CT 747 TH110 mal 41,5 krát nižšiu hodnotu modulu pružnosti, ako materiál Twaron CT 747 ER68. Endumax Shield XF33 mal o 55 % nižšiu hodnotu E_f v porovnaní s Twaron CT 747 ER68 a 18,5 krát väčšiu, ako materiál Twaron CT 747 TH110.

Dôsledky procesných parametrov na výsledne vlastnosti týchto materiálov bolo zložité hodnotiť kvôli rovnakým procesným podmienkam výroby, kde bol ohrev lisovacích dosiek 140 °C a zaťažovacia sila od lisu na úrovni 300 kN. Pre detailnejšie skúmanie procesu a vlastnosti by bolo potrebné zistiť výšku kryštalinity materiálu matríc, ktoré sa overujú pomocou metódy diferenčnej snímacej kalorimetrie. Zistenie úrovne kryštalinity by vedelo vysvetliť, rozdiely a možné vplyvy procesu na výsledné vlastnosti. Pretože zvyšujúcou sa úrovňou kryštalinity sa zlepšujú mechanické vlastnosti polymérnych materiálov a teda aj matríc, ktoré boli použité pri skúmaných balistických materiáloch. Práve na základe toho by sa vedeli lepšie analyzovať nastavenia procesných podmienok, ako sú teplota ohrevu dosiek a podmienky pri ochladzovaní, ktoré majú vplyv pri tvorení kryštalickej štruktúry v polyméroch. V prípade, že by rýchlosť ochladzovania bola príliš vysoká mohlo nastať k náhlemu schladeniu polymérnych reťazcov v matrici, čím vzniká zvyškové napätie v materiáli, ktoré následne ovplyvňuje výsledky mechanických skúšok. Vzhľadom nato, že riešenie takéhoto rozmeru by bolo príliš komplexné na jednu diplomovú prácu, bolo by vhodné takto komplexný problém riešiť v rámci ďalšej diplomovej práce. V takejto práci by sa lisovali vzorky rovnakého materiálu pri rôznych

procesných podmienkach, ako sú predohrev materiálu, lisovací tlak, teplota dosiek, doba záťaže lisu a rýchlosť chladnutia materiálu. Vzorky by boli okrem mechanických skúšok boli otestované práve aj metódou diferenčnej snímacej kalorimetrie.

V nasledujúcej časti hodnotenia výsledkov mechanickej skúšky zaťažujúcou vzorky na ohyb, budú porovnané s výsledkami podobných materiálov z iných výskumných činností. V prípade testovania konvenčných materiálov by bolo možné porovnať výsledky z hodnotami materiálových listov, alebo hodnotami uvádzanými od výrobcu, ale keďže tieto materiály sa bežne netestujú mechanickými skúškami, tak boli dohľadané podobné výskumné činnosti materiálom skúmaným v tejto diplomovej práci. Výsledky mechanickej skúšky na ohyb materiálu Endumax Shield XF33 boli porovnávané s výskumom od Ahmeda Salama [47], ktorý skúmal mechanické vlastnosti kompozitných materiálov UHMWPE s rôznymi podielmi oxidu titaničitého a hydroxiapatitu [47]. Výsledky mechanickej skúšky na ohyb materiálu Twaron CT 747 TH110 boli porovnávané s výskumom K. Bilisika [48], ktorý skúmal správanie ohybových vlastnosti aramidové/fenolické/nano (MWCNT) kompozitné materiály, kde bol rámci výskumu materiál Twaron CT 747 s fenolovou matricou označený Twaron CT 747 TPU [48].

V obr. 63 a obr. 64 sú hodnoty modulu pružnosti a medze pevnosti porovnané s výsledkami práce, kde boli skúmané kompozitné materiály s výstužou z materiálu UHMPWE, ktorý je podobný výstuži v materiáli Endumax Shield XF33. Hodnoty zo zdroja sú označené P-H-1T, kde hodnota P znamená UHMWPE, H znamená podiel 20 % hydroxiapatitu a 1T znamená podiel oxidu titaničitého v hodnote 1 % z celkového objemu kompozitu. Výroba vzoriek P-H-T bola podobná ako pri vzorkách vyrábaných pre túto diplomovú prácu, kde sa použila technológia lisovania za tepla. Hodnoty prevzaté z výskumu nemajú smerodajné odchýlky preto nie sú znázornené na grafoch.

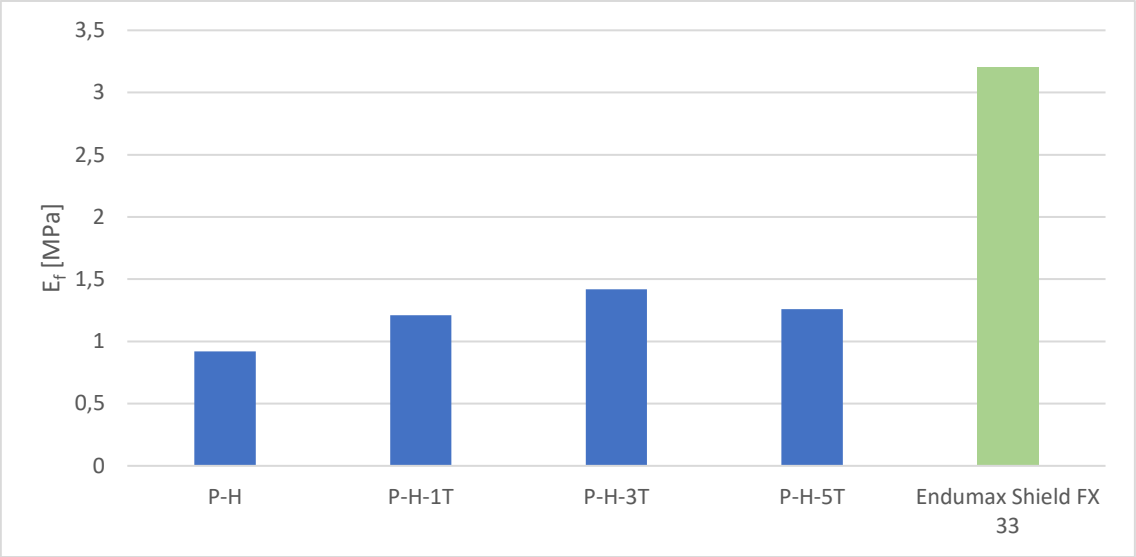


Obr. 63 Porovnanie medze pevnosti materiálu Endumax Shield XF33 [47].

Z obr. 63 je možné zistiť, že výsledná hodnota medze pevnosti je v rozmedzí, kde sa približne vyskytujú materiály vystužené UHMWPE. Konkrétne je hodnota medze pevnosti nižšia o 4,3 % nižšia, ako je to pri materiáli P-H-3T a o 11,9 % vyššia, ako pri P-H-1T. V podstate je možné tvrdiť, že hodnota medze pevnosti zistená skúšaním materiálu Endumax Shield XF33 je v intervale, kde sa podobné materiály pohybujú.

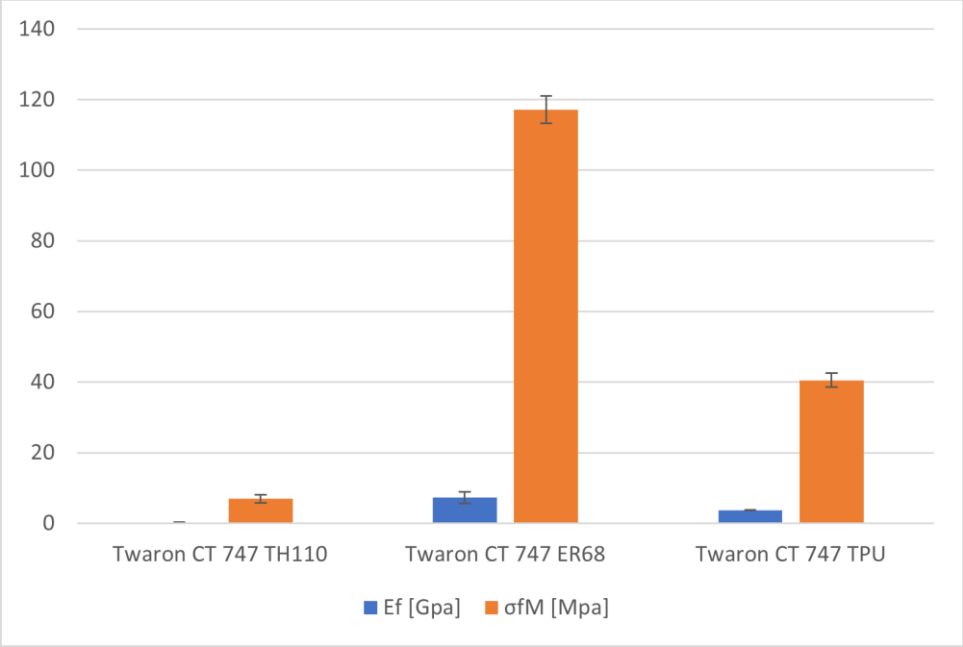
V prípade porovnania modulu pružnosti, ktorý je znázornený na obr. 64, je možné vidieť markantný rozdiel medzi materiálom Endumax Shield XF33 a ostatnými materiálmi. Konkrétne má Endumax Shield XF33 2,3 krát vyšší modul pružnosti, ako má P-H-3T. Dôvodom je pravdepodobne rozdiel v štruktúre, kde Endumax Shield XF33 je tvorený vrstvami fólie z UHMWPE plátovaný v rôznych smeroch, čo mu udáva vyšší modul pružnosti na rozdiel od

P-H-3T, kde sú kompozitné aditíva pridané v podobe granúl a následne kompaundované a vytlačené do dosák, ktoré boli následne lisované, ako laminát [47].



Obr. 64 Porovnanie modul pružnosti materiálu Endumax Shield XF33 [47].

V prípade materiálov Twaron CT 747 s matricou TH110 alebo ER68 boli takisto vyhľadávané podobné výskumné práce, ktoré by mohli byť porovnané s nameranými hodnotami v tejto diplomovej práci. Na obr. 65 je znázornené porovnanie s dohľadaným výsledkom meraní podobného materiálu Twaron CT 747 TPU. Ako je možné vidieť Materiál Twaron CT 747 s matricou TH110 má násobne nižšie hodnoty medze pevnosti a modulu pružnosti ako Twaron CT 747 TPU, kde sa dôvod nedá vysvetliť bez ďalších testov, ako je metóda diferenčnej snímacej kalorimetrie, ktorá by objasnila rekryštalizačné procesy v matrici, keďže výstuha bola vo všetkých troch príkladoch rovnaká. Z pohľadu výrobného procesu obstál materiál Twaron CT 747 ER68, ktorý mal násobne vyššie hodnoty, ako Twaron CT 747 TPU, kde by rovnako mohlo dôjsť k vysvetleniu pri skúmaní štrukturálnych vlastností reaktoplastickej matrice.



Obr. 65 Porovnanie materiálov Twaron CT 747 s podobnými materiálmi [48].

4.3 Diskusia dosiahnutých poznatkov o skúmaných materiálov.

Na základe dosiahnutých výsledkov mechanických skúšok a porovnaní skúmaných materiálov medzi sebou a zároveň s výsledkami výskumov podobných materiálov je možné tvrdiť, že termoplastické materiály, ktoré boli testované v rámci tejto diplomovej práce, nedosahujú vlastnosti reaktoplastického kompozitu Twaron CT 747 ER68. Potvrdilo sa, že termoplastické kompozitné materiály sú náročnejšie na procesné parametre v podobe dodaného tepla a tlaku na laminát. Priame porovnanie je možné vidieť medzi materiálmi Twaron CT 747 s reaktoplastickou matricou ER68 a termoplastickou matricou TH110, kde je výstuž rovnaká, ale použitá matrica sa líši. Na druhú stranu materiál Endumax Shield XF33 sa vlastnosťami priblížil reaktoplastickému kompozitu. Z dosiahnutých výsledkov je možné tvrdiť, že skúmané balistické materiály z termoplastických kompozitných materiálov nedosahujú vlastnosti, ktoré by postačovali na použitie vo funkčných štrukturálnych dieloch, pri ktorých sú potrebné určite mechanické vlastnosti. Testovanie materiálu sprevádzali problémy pri skúšaní. Bol problém s upínaním vzoriek pri skúške a delamináciou vzoriek pri zaťažení, čím sa nedosiahli dostatočné mechanické vlastnosti. Zároveň si tieto materiály uchovávajú schopnosť recyklácie a vhodnej aplikácii, kde nie sú potrebné vysoké hodnoty mechanických vlastností, môže nastať ich uprednostnenie pred reaktoplastickými kompozitnými materiálmi. Ďalším faktorom pri zhodnocovaní využiteľnosti termoplastických kompozitov je určite náročnosť výroby, ktorá vyžaduje vyššie teploty a tlaky a komplikovaná automatizácia výroby. Preto, ako bolo hodnotené v teoretickej časti je väčšina technológii pre výrobu termoplastických kompozitných materiálov schopná vyrábať prototypové produkty alebo nižšiu kusovosť ako majú reaktoplastické kompozitné materiály. Napriek tomu si skúmané materiály našli svoje uplatnenie pri výrobe prepravných kontajnerov pre logistické účely, v audiosystémoch alebo plachtových systémov a dokonca pri výrobe lán.

ZÁVER

V rámci tejto diplomovej práce, ktorej princípom bolo overiť či skúmané termoplastické kompozitné materiály typu Endumax Shield XF33 a Twaron CT 747 TH110 určené na balistické účely, majú mechanické vlastnosti, ktoré by im dovolili získať ďalšie aplikácie mimo balistiky. Keďže takýto výskum bol prvým svojho druhu v rámci Univerzity. Preto bolo potrebné navrhnúť prototypový lisovací prípravok s ohrevom a chladiacim systémom, ktorého výroba prebehla na Univerzite. Nasledovalo lisovanie vzoriek, z ktorých vznikli dosky z kompozitného materiálu a tie boli poslané na orezanie vodným paprskom aby boli narazené na rozmer skúšobných teliesok.

Po vyrobení vzoriek prišlo na rad skúmanie mechanických vlastností pomocou štandardných mechanických skúšok na ťah a ohyb podľa noriem EN ISO 527-1 a EN ISO 178. V priebehu ťahovej skúšky došlo k nežiadaným incidentom, ktoré súviseli s upnutím vzoriek. Pri zaťažovaní materiálov Endumax Shield XF33 a Twaron CT 747 TH110 na skúšobnom stroji ZWICK dochádzalo k vyšmykovaniu vzoriek z čeľustí a zničení vzoriek. V prípade materiálu Twaron CT 747 TH110 došlo k zničeniu všetkých vzoriek určených na ťahovú skúšku**.** Pri materiáli Endumax Shield XF33 sa podarilo otestovať zvýšili 3 vzorky, ktoré boli dodatočné testované na stroji LabTest 6.500 s pneumatickými čeľusťami. Priebeh skúšky sprevádzala delaminácia vrstiev a ich vzájomné kĺzanie medzi sebou. Výsledky skúšky boli porovnané s materiálom Twaron CT 747 ER68 s reaktoplastickou matricou, ktorej výskum takisto prebiehal na Univerzite v rámci výskumnej činnosti.

Z porovnania ťahových vlastností bolo zistené, že materiál Endumax Shield XF33 nedosahoval úrovne reaktoplastického kompozitného materiálu, kde mal 3,25 krát nižšiu medzu pevnosti ako Twaron CT 747 ER68. V porovnaní s výskumom podobného materiálu na báze UHMWPE došlo taktiež k záveru, že hodnoty materiálu Endumax Shield XF33 nedosiahli úrovne ťahových vlastností. V hodnotenia materiálov boli urobené detailné fotky prierezu testovacích vzoriek. Pri materiáli Twaron CT 747 TH110 sa ukázal vyšší podiel matrice a zhluky živice, ktoré ovplyvnili výsledky mechanických skúšok. Materiál Endumax Shield XF33 ukázal nižší podiel matrice v lamináte. Ten mohol byť jedným z dôvodov delaminácie vrstiev v priebehu ťahovej skúšky.

V rámci výsledkov mechanickej skúšky na ohyb sa podarilo získať hodnoty oboch skúmaných materiálov a teda bolo možné ich porovnať ich s reaktoplastickým kompozitným materiálov aj s výskumami obdobných materiálov. Z porovnania skúmaných materiálov s reaktoplastickým kompozitným materiálov Twaron CT 747 ER68 bolo zistené, že materiál Twaron CT 747 TH110 mal 17,05 krát nižšiu medzu pevnosti ako Twaron CT 747 ER68. To sa dá čiastočne vysvetliť vyšším podielom matrice oproti výstuhe a zhlukmi živice medzi vrstvami laminátu. Twaron CT 747 TH110 nedosahoval úrovne výskumu podobného materiálu, kde mal nižšie hodnoty modulu pružnosti a medze pevnosti. Pri materiále Endumax Shield XF33 sa takisto dospelo k záveru, že nedosahoval hodnoty ohybových vlastností reaktoplastického kompozitného materiálu Twaron CT 747 ER68, ale na druhú zároveň mal vyššie hodnoty modulu pružnosti a medze pevnosti ako Twaron CT 747 TH110 s termoplastickou matricou. V porovnaní s výskumom obdobných materiálov dohľadaným z relevantných zdrojov dosahoval podobnej úrovne medze pevnosti a v prípade modulu pružnosti dosahoval lepších hodnôt.

Vplyv procesných materiálov bol sledovaný pomocou detailných fotiek prierezu vzoriek. Všetky materiály vykazovali dobré prepojenie vrstiev. Na druhú stranu problémy delaminácie pri mechanickom testovaní materiálu by bolo potrebné overiť metódou diferenčnej snímacej kalorimetrie DSC pomocou ktorej by bolo možné zistiť úroveň kryštalinity matríc. Vzhľadom nato, že riešenie takéhoto rozmeru by bolo príliš komplexné v rámci jednej diplomovej práci, bolo by vhodné v rámci ďalšej diplomovej práce vyrábať vzorky z jedného druhu materiálu pri

rôznych procesných podmienkach. Vzorky by sa následne skúšali na mechanické vlastnosti a podrobili by sa skúške diferenčnej snímacej kalorimetrie, kde by bol zhodnotený vplyv procesných parametrov na vlastnosti materiálu.

Z dosiahnutých výsledkov mechanických skúšok materiálov Twaron CT 747 TH110 a Endumax Shield XF33 je možné tvrdiť, že nedosahujú mechanických vlastnosti pre použitie pri výrobe funkčných štrukturálnych dielov. Tieto materiály, ktoré sú určené pre balistickú ochranu napriek tomu nachádzajú uplatnenie mimo tieto účely. Využívajú sa na výrobu lán, audiosystémov, plachtových systémov a pri výrobe prepravných kontajnerov v leteckej doprave.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. MAZUMDAR, Sanjay K. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0585-3
2. JONES, R. M. *Mechanics of Composite Materials. 2*. Boca Raton: CRC Press, 1999. ISBN 978-1-315-27298-6.
3. History of Composite Materials [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: https://www.marbal.com/language/en/applications/history-of-composites/
4. History of Composites - Composites 101 [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: https://compositeslab.com/composites-101/history-of-composites/
5. KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
6. DAĎOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
7. Kompozitní materiály. KMT TU Liberec [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
8. Rozdělení a charakteristika polymerů. ePubli webová knihovna [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/04.html
9. Thermosetting polymer - Wikipedia. [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermosetting_polymer
10. CHAWLA, Krishan K. *Composites Materials: Science and Engineering. Third*. London: Springer, 2012. ISBN 978-0-387-74364-6.
11. LENFELD, Petr. *Technologie II. 3. vyd*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-305-8.
12. Úvod - Katedra strojírenské technologie [online]. [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01-plasty%20uvod/07.JPG
13. Glass fiber - Wikipedia. [online]. [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Glass_fiber
14. *ASM HANBOOK: Composites VOLUME 21*. 2001. ASM International. ISBN 0-87170-703-9.
15. Uhlíkové vlákno – Wikipedie. [online]. [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno
16. Twaron® – FibrXL. FibrXL – Smart Performance Fibers [online]. [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: https://fibrxl.com/fibrxlperformance/fibers/twaron/
17. VASILIEV, Valery V. a Evgeny V. MOROZOV. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures: Fourth Edition.* Elsevier, 2018. ISBN 978-00-8102-209-2.
18. ZEAID HASAN, Hasan. Tooling for Composite Aerospace Structures: Manufacturing and Applications. June 18, 2020. Butterworth-Heinemann, 2020. ISBN 978-0-12-819957-2.
19. VRBKA, Jan. MECHANIKA KOMPOZITŮ [online]. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: https://docplayer.cz/19075854-Mechanika-kompozitu-prof-rndr-ing-jan-vrbka-drsc-ustav-mechaniky-teles-mechatroniky-a-biomechaniky-fakulta-strojniho-inzenyrstvi-vut-v-brne.html

20. Keprová vazba (K). e-LTex [online]. [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: http://www.skolatextilu.cz/elearning/440/textilni-terminologie-zboziznalstvi/tkaniny/Keprova-vazba-K.html
21. Vazby tkanin - KRINOLÍNA.CZ. KRINOLÍNA.CZ - Sdílená šicí dílna [online]. [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: http://www.krinolina.cz/vazby-tkanin/
22. ASM International the Materials Information Society - ASM International [online]. [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05287G_Sample_Chapter.pdf
23. Sandwich-structured composite - Wikipedia. [online]. [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Sandwich-structured_composite
24. KAW, Autar K. *Mechanics of Composite Materials: Second Edition*. 2006. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-8493-1343-0.
25. ROYCHOWDHURY, Suranjan a Suresh G. ADVANI. An experimental investigation of consolidation in thermoplastic filament winding. [online]. [cit. 2023-01-20]. University of Delaware, Newark, DE 19716, USA. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/0956-7143(91)90186-K
26. LIU, S.-J. 2 - Injection molding in polymer matrix composites. [online]. [cit. 2023-01-20]. Chang Gung University, Taiwan, 2014, 46. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1533/9780857096258.1.13
27. Short carbon fiber compounds expand reach of thermoplastic composites | Composites World . Delivering the Global Composites Market | CompositesWorld [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: https://www.compositesworld.com/articles/short-carbon-fiber-compounds-expand-reach-of-thermoplastic-composites-
28. Pultrusion process, Röchling EN. Röchling EN [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: https://www.roechling.com/industrial/technology/pultrusion
29. Pultrusion Applications, Advantages of Pultrusions - Ashirvad Industry. Pultrusion Machine Equipment Manufacturer and Exporter, Manufacturer and Exporter of Pultrusion Machine, Ahemedabad, India [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: https://ashirvadind.com/products/pultrasion-applications/
30. Compresion Molding [online]. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z:https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/compression-molding
31. Autokláv | PLASTIC. PLASTIC - Carbon Composite Technology [online]. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: http://www.plastic.cz/technologie-autoklav-cz
32. Double Diaphgram Forming, Solvay [online]. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://www.solvay.com/en/chemical-categories/our-composite-materials-solutions/ddf
33. Thermoplastic Composite Material Systems. MaruHachi – Thermoplastic Composite Material Systems [online]. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: https://maruhachi.eu/
34. Plasty- mechanické vlastnosti - Portál pro strojní konstruktéry. Portál pro strojní konstruktéry [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/plasty-mechanicke-vlastnosti
35. PA (polyamide) matrix in UD-tape - Alformet. Engineered tube - Thermoplastic composite tube - TPC - CFRP - GFRP - ATP - AFP - Alformet [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://www.alformet.com/composite/tp/pa

36. PP (Polyproylene) matrix in UD-tape - Alformet. Engineered tube - Thermoplastic composite, Alformet [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://www.alformet.com/composite/tp/pp
37. PEEK (polyetheretherketone) - PAEK - PEKK matrix in UD-tape - Alformet. Engineered tube - Thermoplastic composite, Alformet [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://www.alformet.com/composite/tp/peek
38. High-performance polymers for AM: How much does it cost?. Aniwaa - The additive manufacturing marketplace [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://www.aniwaa.com/insight/am-materials/high-performance-polymers-cost-am/
39. PPS (Polyphenylene Sulfide) matrix in UD-tape - Alformet. Engineered tube - Thermoplastic composite, Alformet [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://www.alformet.com/composite/tp/pps
40. Teijin, Endumax SHIELD. An ultra strong performance film [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2018/12/18033TEI-Prod-broch-Endumax_LR.pdf
41. Endumax from Teijin Aramid - An Exciting New Speaker Cone Material [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://audioxpress.com/article/Endumax-from-Teijin-Aramid-An-Exciting-New-Speaker-Cone-Material
42. Teijin Aramid, Techtextile Middle East Symposium [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://www.intersecexpo.com/uploads/editor_images/file/Rene%20Lohmann-Dubai%20TTS%202014_SHOW-locked.pdf
43. TEIJIN TWARON® Aramidová tkanina - plátno. Laminovací fólie – Heureka.cz [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://laminovaci-folie.heureka.cz/teijin-twaron-aramidova-tkanina-platno-281_1210-dtex-6_7x6_7-ok-cm-173-g-m2-s-100-cm-plocha-10-m2/#prehled/
44. Temperature controller NOVUS N1040-PR-24V - 8104210014 | Automation24. Automation24 – Your online-shop for automation technology! [online]. Copyright © 2012 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: https://www.automation24.biz/temperature-controller-novus-n1040-pr-24v-8104210014
45. Co je to termočlánek "K"?. JAKAR Electronics, OMEGA Engineering Česká Republika [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: https://www.jakar.cz/advisor/co-je-to-termoclanek-typu-k
46. Co je termočlánek a jak funguje?. JAKAR Electronics | OMEGA Engineering Česká Republika [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: https://www.jakar.cz/advisor/co-je-termoclanek
47. SALAMA, Ahmed. Investigation of mechanical properties of UHMWPE composites reinforced with HAP+TiO2 fabricated by solvent dispersing technique [online]. Department of Production Engineering and Manufacturing Technology, Modern Academy for Engineering and Technology in Maadi, Cairo, Egypt, 2022 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.038
48. BILISIK, K., G. ERDOGAN a E. SAPANCI. Flexural behavior of 3D para-aramid/phenolic/nano (MWCNT) composites [online]. Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Erciyes University, 38039, Kayseri, Turkey, 2018 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2018/ra/c7ra13437a

49. PAVELEK, Milan. TERMOMECHANIKA PRO STUDENTY STROJNÍCH FAKULT [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Mauder/files/V%C3%BDukov%C3%A1_prezentace_termomechanika_Pavelek.pdf
50. Rozdělení a charakteristika polymerů. ePubli webová knihovna [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/04.html
51. Vysokovýkonné plasty,| Ensinger. High performance plastic solutions, Ensinger [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/vysokovykonne-plasty
52. Specialista v plastech a Váš partner pro dodávky plastových polotovarů a výrobků, AK Plast s.r.o. [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: http://www.akplast.cz/admin/files/ck/files/TechData/PPS_mat_list.pdf
53. Přechodové teploty polymerů. ePubli webová knihovna [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/06.html
54. Tepelné tvarování, lisování kompozitu, stroj MASTERFORM. [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://nabidky.edb.cz/Nabidka-41671-Tepelne-tvarovani-lisovani-kompozitu-stroj-MASTERFORM
55. Getting the Most Out of Your Markforged Composite 3D Printer. Hawk Ridge Systems - Better Engineering Starts Here [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://hawkridgesys.com/blog/getting-the-most-out-of-your-markforged-composite-3d-printer
56. Materiály a technologie. UPrint 3D – 3D tisk, aditivní výroba, 3D skenování [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: http://www.uprint3d.cz/materialy-a-technologie/
57. DAYYOUB, Tarek, Aleksey V. MAKSIMKIN, Sergey KALOSHKIN, Evgeniy KOLESNIKOV, Dilus CHUKOV, Taťyana P. DYACHKOVA a Irina GUTNIK. The Structure and Mechanical Properties of the UHMWPE Films Modified by the Mixture of Graphene Nanoplates with Polyaniline [online]. National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow 119049, Russia; Tambov State Technical University, Tambov 392000, Russia, 2018, 14 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/5efb/174bb9a6afdbf48a76aaf3e623d4ef97efba.pdf
58. Endumax from Teijin Aramid - An Exciting New Speaker Cone Material, audioXpress. AudioXpress, audioXpress Magazine. Advancing the Evolution of Audio Technology - Since 1970 [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://audioxpress.com/article/Endumax-from-Teijin-Aramid-An-Exciting-New-Speaker-Cone-Material

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symboly

Označenie	Legenda	Jednotka
t	čas	[min]
F	sila	[N]
σ_{fM}	medza pevnosti v ohybe	[MPa]
σ_{fC}	napätie pri priehybe 1,5 násobku hrúbky vzorku	[MPa]
E_f	modul pružnosti v ohybe	[MPa]
E_t	modul pružnosti v ťahu	[MPa]
ε_{tb}	pomerné predĺženie v ťahu	[-]
σ_M	medza pevnosti v tahu	[MPa]
Q	teplo	[J]
m	hmotnosť	[kg]
t_2	teplota na konci deja	[°C]
t_1	teplota na začiatku deja	[°C]
c	merná tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

Skratky

Označení	Legenda
PPS	polyfenyl sulfid
PEEK	polyetereterketón
PP	polypropylén

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1 Výrobný postup lisovacieho prototypového prípravku

ZOZNAM VÝKRESOV

DOSKA_PROTOTYP 2023-DP-193190-01

Príloha 1

VUT FSI ÚST BRNO	VÝROBNÝ POSTUP	Názov celku : Lis. Prot. Prípravok	Názov súčiastky :	Deska vyhrev
Dňa : 18.5.2023	Vyhotovil : Makariv	Kontroloval : -	Polotova	Doska 650x350x20 AlMgSiO0,5

Číslo op. poradové : / Orientačné:	Název, označení stroje, zařízení, pracoviště : / Triediace číslo :	Dílna :	Popis práce v operacií :	Výrobné nástroje, prípravky, meradlá, pomôcky :
01/01	**Pásová píla**	**Deliareň materiálu**	**Upnúť polotovar** **Rezať na dĺžku 321**	**Pílový pás**
02/02	**Frézka**	**Obrobňa**	**Upnúť polotovar** **Frézovať čelo na 19 ± 0,1**	**Čelná fréza**
03/03	**Vrtačka**	**Obrobňa**	**Upnúť polotovar** **7x Vrtať dieru Ø10**	**HSS vrták, extra dlhý**
04/04	**Vrtačka**	**Obrobná**	**8x Vrtať závit G1/4 do hĺbky 15,54**	**Závitník G1/4**
05/05	**OTK**	**OTK**	**Kontrola rozmerov výrobku** **19 ± 0,1** **321** **325** **8xØ10**	**Posuvné meradlo**