

Konstrukčně-technologický návrh dílu bojového vozidla vyráběného autoklávovým lisováním

Radek Světlík

Bakalářská práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Radek Světlík
Osobní číslo:	T19172
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Konstrukčně-technologický návrh dílu pro aplikaci ve vojenském průmyslu vyráběného autoklávovým lisováním

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku zpracování kompozitních materiálů, rozdělení, výroba a využití ve vojenském průmyslu
2. Popis aktuální situace využití kompozitů při výrobě součástí pro aplikaci ve vojenském průmyslu.
3. Zrealizujte experimentální výrobu zvolené kompozitní aplikace, návrh materiálové skladby, volba technologických podmínek.
4. Testování mechanických vlastností.
5. Experimentálně vyhodnotte dosažené výsledky.
6. Závěr.

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

Seznam doporučené literatury:

BARBERO, E. J.: Introduction to composite materials design, Third edition, 2018, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1138196803.

ŠUBA, O.: Mechanika polymerů a kompozitů, Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, ISBN 978-80-7454-015-8.

ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s., ISBN 978-80-7318-948-8.

EHRENSTEIN G. W.: Polymerní kompozitní materiály, Praha, SCIENTIA v Praze, 351s, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6.

LIPTÁKOVÁ, T.: Polymérne konštrukčné materiály. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012, ISBN 978-80-554-0505-6.

SRINIVASAN, K.: Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications, Alpha Science International Limited, 2009, ISBN 1842654918, 9781842654910.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 24. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem dílu bojového vozidla vyráběného autoklávovým lisováním a obsahuje část teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou popsány kompozitní materiály, druhy vyztužujících vláken, druhy matric, prepregy, technologie výroby a využití kompozitních materiálů ve vojenském průmyslu. Praktická část se zaměřuje na výběr materiálového složení zkušebních tělísek, samotnou výrobu a testování mechanických vlastností. Tělíska byla podrobena statickou zkouškou tříbodovým ohybem a rázovou zkouškou v ohybu. Posledním krokem praktické části byl návrh vytvrzovacího přípravku, výroba prototypového dílu a určení technologického postupu.

Klíčová slova: kompozitní materiály, autokláv, vojenský průmysl, prepreg, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the design of a part of a combat vehicle produced by autoclave pressing and contains a theoretical and practical part. The theoretical part describes composite materials, types of reinforcing fibres, types of matrices, prepregs, production technology and the use of composite materials in the military industry. The practical part focuses on the selection of the material composition of the test bodies, the actual production and testing of mechanical properties. The test bodies were subjected to static three-point bending and impact bending tests. The last step of the practical part was the design of the curing jig, production of the prototype part and determination of the technological procedure.

Keywords: composite materials, autoclave, military industry, prepreg, mechanical properties

Rád bych touto cestou poděkoval své vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D., za odborné vedení, ochotný přístup, poskytnuté rady a za čas, který věnovala mé bakalářské práci. Dále děkuji panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při měření mechanických vlastností kompozitních materiálů. Rád bych také poděkoval mé rodině za podporu, kterou mi poskytovali během bakalářského studia.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ÚVOD DO KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	11
1.1 ROZDĚLENÍ PODLE ORIENTACE A GEOMETRIE VÝZTUŽE	11
1.1.1 Kompozity vláknové	12
1.1.2 Kompozity částicové	12
1.2 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA	12
1.2.1 Skleněná vlákna	12
1.2.2 Uhlíková vlákna	13
1.2.3 Aramidová vlákna	13
1.2.4 Polyethylenová vlákna	14
1.2.5 Přírodní vlákna	14
1.3 MATRICE	15
1.3.1 Polymerní matrice	15
1.3.2 Kovová matrice	16
1.3.3 Keramická matrice	16
2 PREPREGY	17
2.1 ROZDĚLENÍ.....	17
2.1.1 Jednosměrné prepregy	18
2.1.2 Tkaninové prepregy	18
2.2 METODY VÝROBY	19
2.2.1 Tavení za tepla (Hot melt proces)	19
2.2.2 Impregnace pomocí rozpouštědla (Solvent impregnation)	20
3 ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ.....	22
3.1 RUČNÍ KLADENÍ.....	22
3.2 VAKUOVÁ INFUZE	23
3.3 LISOVÁNÍ SE VSTŘIKEM MATRICE (RTM).....	24
3.3.1 Light-RTM	25
3.4 AUTOKLÁVOVÉ LISOVÁNÍ	25
3.4.1 Vytvrzovací cyklus.....	26
3.5 NAVÍJENÍ.....	28
4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY VE VOJENSKÉM PRŮMYSLU.....	29
4.1 LETECTVÍ	29
4.2 KOMPOZITNÍ PANCÉŘOVÁNÍ	33
4.3 NÁMOŘNICTVÍ.....	34
4.4 NEPRŮSTŘELNÉ VESTY	36

4.5	BALISTICKÉ PŘILBY	36
5	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	38
5.1	STATICKÁ ZKOUŠKA OHYBEM	38
5.2	RÁZOVÁ ZKOUŠKA HOUŽEVNATOSTI	40
II	PRAKTICKÁ ČÁST	42
6	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	43
7	NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	44
7.1	NÁVRH SKLADBY ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	44
7.2	ZJIŠTĚNÍ POČTU VRSTEV PREPREGŮ	45
7.3	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	45
7.3.1	Příprava formy	45
7.3.2	Stříhání a kladení prepregů	46
7.3.3	Zavakuování formy	47
7.3.4	Vytvrzení v autoklávu	48
8	PROVEDENÍ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK.....	50
8.1	ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM (ČSN EN ISO 178)	50
8.1.1	Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem.....	51
8.2	RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU (ČSN EN ISO 179-1)	55
8.2.1	Výsledky rázové zkoušky v ohybu	56
9	POROVNÁNÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ	57
9.1	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY TŘÍBODOVÝM OHYBEM	57
9.2	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ RÁZOVÉ ZKOUŠKY V OHYBU	59
9.3	DISKUZE VÝSLEDKŮ	59
10	VÝROBA PROTOTYPU KRYTKY	61
10.1	NÁVRH VYTVRZOVACÍHO PŘÍPRAVKU	61
10.2	RÁMCOVÝ TECHNOLOGICKÝ POSTUP	61
	ZÁVĚR	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	64
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK.....	71
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

ÚVOD

Kompozity jsou materiály, které se skládají ze dvou a více složek, přitom každá jejich složka vykazuje jiné vlastnosti. V poslední době nastal výrazný pokrok v aplikaci těchto materiálů. Mezi hlavní důvody můžeme zařadit snížení hmotnosti, vyšší tuhost, pevnost, odolnost proti korozi a chemickému prostředí. Největší uplatnění nacházejí v leteckém, kosmickém, automobilovém, sportovním a vojenském průmyslu.

Výroba komponentů pro vojenskou techniku je do jisté míry balancováním, protože její návrh a výrobní proces je definován výzvou najít dokonalou rovnováhu mezi faktory bezpečnosti, odolnosti, trvanlivosti a lehké konstrukce. Kovy jako ocel a hliníkové slitiny byly dlouho považovány za odpověď na požadavky obranné techniky, ale nakonec nebyly schopny vyřešit protichůdné cíle, které představují výše uvedené faktory, protože bezpečnost, odolnost a pevnost se obvykle dosahovala na úkor hmotnosti. Dnes je však snížení hmotnosti jedním z klíčových požadavků moderního vývoje obranné techniky, a tak se použití pokročilých kompozitních komponentů a sestav stává přirozenou volbou. Kompozitní materiály poskytují možnost přizpůsobit vlastnosti materiálů pro každou aplikaci, což zajišťuje snadné dosažení požadavků, jako je balistická ochrana, pohlcení radarových vln, eliminace koroze atd.

V teoretické části bakalářské práce jsou obecně popsány kompozity a jejich využití ve vojenském průmyslu. Dále je zaměřena na předimpregnované výztuže (prepregy) a zpracovatelské technologie.

Praktická část se zaměřuje na výrobu zkušebních tělísek pro zkoušení mechanických vlastností, návrh vytvrzovacího přípravku, výrobu prototypového dílu a stanovení technologického postupu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

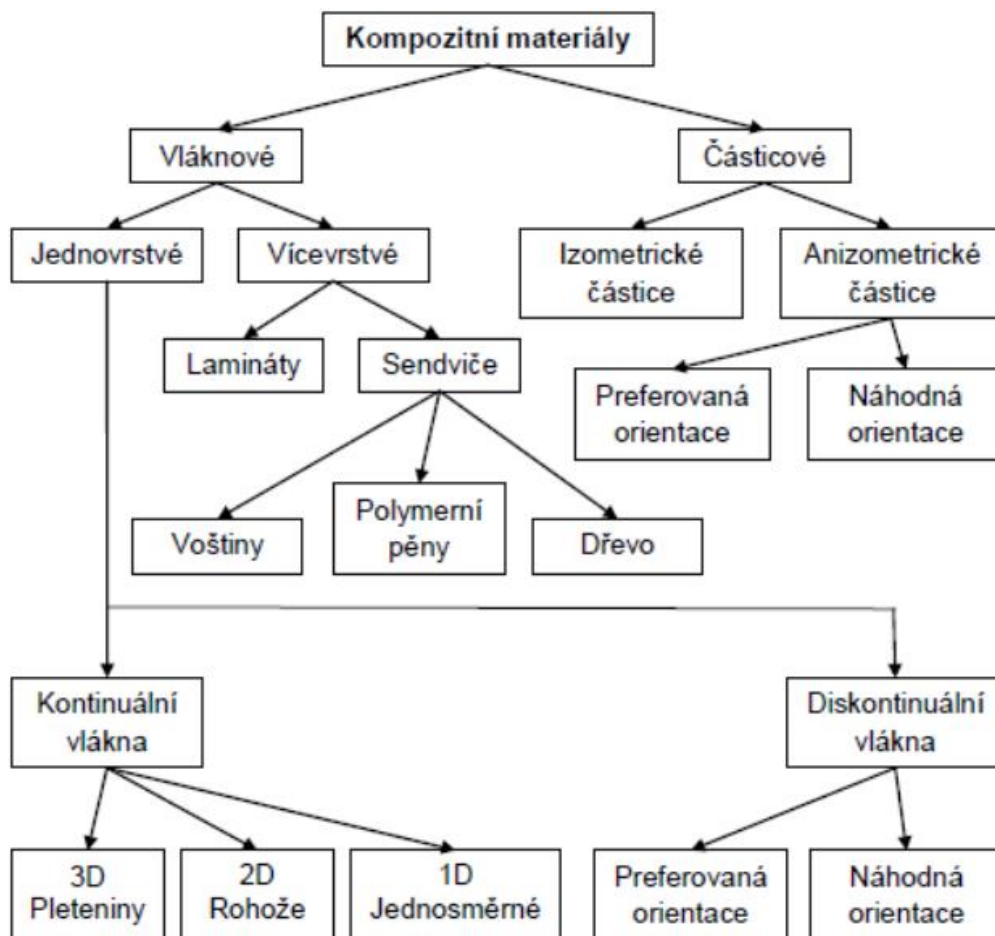
1 ÚVOD DO KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitem je nazýván materiál, který je složen ze dvou nebo více složek o výrazně se lišících fyzikálních a chemických vlastnostech. Na rozdíl od kovových slitin si každá složka zachovává své samostatné vlastnosti. Dvěma složkami jsou výztuž a matrice. Výztuž zajišťuje pevnost a tuhost materiálu. Její podíl vzhledem k matrici musí být vyšší než 5 %. Matrice slouží jako pojivo. [1,2]

Kompozitní materiály jsou dnes v průmyslu velmi často používány. Je to hlavně z důvodu možnosti navrhovat lehké konstrukce o vysokých mechanických vlastnostech, které jsou obdobné jako u titanu nebo slitin hliníku. Jedná se především o hodnoty pevnosti, modulu pružnosti a odolnosti proti únavě. [3]

1.1 Rozdělení podle orientace a geometrie výztuže

Rozdělení kompozitních materiálů dle orientace a geometrie výztuže je patrné z následujícího schématu: [4]



Obrázek 1 Rozdělení dle orientace a geometrie výztuže [4]

1.1.1 Kompozity vláknové

U vláknových kompozitů jsou útvary výztuže (vlákna) v jednom směru výrazně rozměrnější než ve směrech ostatních. Můžeme je dělit na kompozity s kontinuálními (dlouhými) vlákny, které mají délku srovnatelnou s velikostí výrobku, a na kompozity s krátkými vlákny, u kterých je délka vláken výrazně menší v porovnání s velikostí výrobku. Vláknový kompozit má podstatně vyšší pevnost než pevná látka ze stejného materiálu. [5,11]

1.1.2 Kompozity částicové

Za částicové kompozity lze považovat všechny materiály, jejichž struktura je tvořena maticí zpevněnou jemnými částicemi (běžně o rozměrech menších než 1 μm). Částice musí být rovnoměrně rozptýleny v matici, protože jinak dojde k poklesu pevnosti kompozitu oproti pevnosti samotné matrice. Vyztužující částice mohou mít prakticky jakýkoli tvar a velikost. Příklady dobře známých částicových kompozitů jsou beton a dřevotřískové desky. [3,5]



Obrázek 2 Vláknové a částicové kompozity [11]

1.2 Vyztužující vlákna

Samotné vyztužující vlákna se jako konstrukční prvky používají jen výjimečně. Zajímavou třídou materiálů se stávají až v celistvé formě, jako tomu bývá u kompozitních materiálů. Většina vyráběných vláken má kruhový průřez o průměru 5 až 20 μm . Všeobecně platí, že se zmenšujícím se průměrem vláken se pevnost zvyšuje, avšak mnohdy za cenu vyšších výdajů při výrobě. Vlákna s menším průměrem bývají také pružnější a snáze se ve formě formují. [2,6]

1.2.1 Skleněná vlákna

Světově nejpoužívanější skleněná vlákna se vyrábějí ze skloviny označované jako E-sklovina. Tato skleněná vlákna postupně obsadila téměř 90 % trhu. Jsou vynikajícím elektrickým izolantem a také se vyznačují vysokou propustností pro záření.

Dalším typem skloviny je R-sklovina, v USA označována jako S-sklovina. Oproti E-sklovině má o 33 % vyšší pevnost v tahu a o 12 % vyšší modul pružnosti. Používají se v leteckém a kosmickém průmyslu. Nejvýznamnější aplikací je konstrukce listů rotorů pro helikoptéry.

Další typy sklovin:

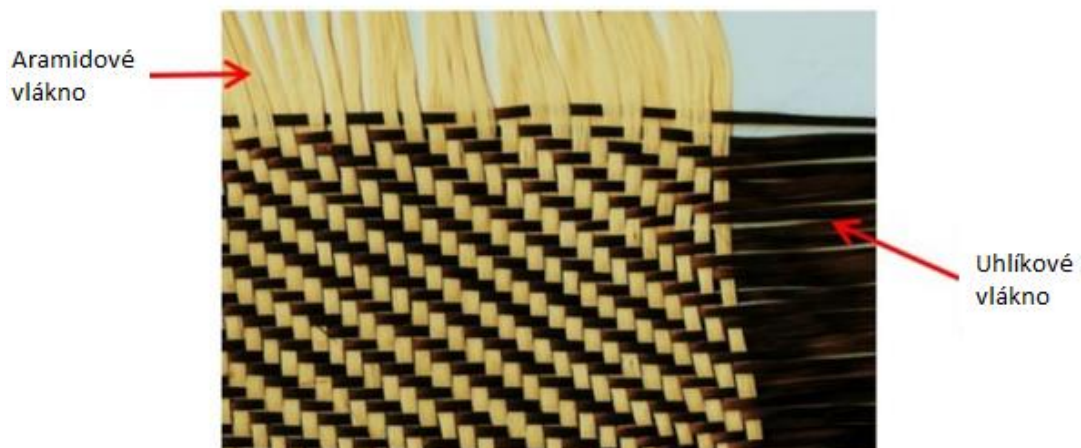
- D-sklovina – Využívá se především v elektrotechnice a energetice pro svoji nízkou relativní permitivitu. Ve srovnání s E-sklovinou má horší mechanické vlastnosti.
- C-sklovina – Ve srovnání s E-sklovinou vykazuje vysokou odolnost proti kyselinám, má však horší mechanické vlastnosti.
- L-sklovina – Má vysoký obsah olova, který zvyšuje zejména nepropustnost materiálu rentgenovému záření. Využití nachází v lékařství, vědeckých přístrojích a vojenském průmyslu [1,4,6]

1.2.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují velmi vysokou pevností, modulem pružnosti a tepelnou odolností s nízkou měrnou hmotností. Mají průměr 5 až 10 μm . Jsou silně anizotropní (tzn. ve směru kolmém k ose vlákna mají modul pružnosti výrazně menší). Dále se vyznačují křehkostí a při zpracování se snadno lámou. Proto mají menší prodloužení při přetržení než skleněná vlákna, minimální poloměr při ohýbání je proto větší. [4,6]

1.2.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů. Kovalentní vazby mají orientovány podle osy vlákna. Díky kombinaci vysoké pevnosti a nízké hustoty mají velmi vysokou měrnou pevnost. Jsou silně anizotropní. Další vlastností je odolnost vůči oděru. Hlavní nevýhodou aramidových vláken je, že obecně nejsou vhodná pro použití při velmi vysokých teplotách a některá z nich jsou také náchylná k degradaci způsobené vlhkostí. Při výrobě jsou také obtížně barvitelné. Mezi nejpoužívanější aramidová vlákna patří Kevlar (firma DuPont) a Twaron (firma Teijin). [4,6,7]



Obrázek 3 Aramid-uhlíková hybridní tkanina [14]

1.2.4 Polyethylenová vlákna

Ultra high oriented polyethylene fibre (UHMWPE) jsou ultra vysoce orientovaná polyethylenová vlákna. Jsou desetkrát pevnější než ocel a o 50 % lehčí než aramidová vlákna. Kromě malé hustoty je velkou výhodou velká korozní odolnost. Na rozdíl od aramidů UHMWPE vlákna nepřijímají vlhkost a jsou více odolná proti světelnému UV záření. Hlavní nevýhodou je jejich malá tepelná odolnost a špatná přilnavost s matricí. Používají se zejména v protibalistických aplikacích (např. neprůstřelné vesty). [4,8]

1.2.5 Přírodní vlákna

Pro vyztužování plastů jsou nejvhodnější rostlinná vlákna, která mají jako základ celulózu. Mezi ně spadá například len, juta, konopí, sisal a bavlna. Výhodou přírodních vláken je jejich odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při klimatických změnách. Dále se vyznačují nízkou hustotou a pozoruhodnou pevností v tahu. Mezi nevýhody patří zejména citlivost proti vlhkosti, omezený výběr matrice a délka vláken. Nejrozšířenějším přírodním vláknem je len a juta. [6]

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [1]

Vlákno	Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Deformace do lomu [%]
Sklo E	2,54	73,5	3500	4,8
Sklo S	2,49	86,8	4650	5,4
Uhlík	1,86	300-800	2700	0,7
Kevlar 29	1,45	60	2700	5
Kevlar 49	1,45	130	2900	2,5
Twaron	1,44	70-110	2400-3600	2,2-4,4
PE Spectra	0,97	172	3000	1,7
Len	1,3	180	2600	3,1

1.3 Matrice

Hlavní úlohou matrice je zaručit celistvost výrobku, zcela spojit vlákna a vytvořit vnější tvar, který musí zajistit řádnou funkci tělesa. Další úlohou je ochrana vláken před vlivy okolního prostředí a přenos zatížení na jednotlivá vlákna. Po matrici je vyžadována dobrá adheze k výztuži a mezní tažnost. [6,9]

1.3.1 Polymerní matrice

Polymerní matrice se využívají zejména pro kompozitní materiály s kontinuálními vlákny. Dělí se na termosety a termoplasty.

Termosety se vyznačují tím, že i po zahřátí zůstávají v tuhé fázi, což zvyšuje jejich odolnost vůči creepu a vyšším teplotám. Nevýhodou je jejich omezená recyklovatelnost a vyšší křehkost. Během vytvrzování vzniká tuhá prostorová polymerní síť. Termosety s vysokou teplotou tvarové stálosti se vzhledem ke své ceně používají především ve vojenském průmyslu.

Termoplasty jsou po vytvrzení tuhé látky, které tají při zvýšení teploty nad teplotu kritickou. Po ochlazení opět tuhnou. Při zpracování má o 2-4 řády vyšší viskozitu než u termosetů. To přispívá ke vzniku vad. Termoplasty jsou houževnatější než termosety. Výhodou je také vysoká tažnost a chemická odolnost. [1,4,9]

1.3.2 Kovová matrice

Kovová matrice má oproti nejčastěji používané polymerní matici velkou výhodu v provozní teplotě, která se pohybuje až kolem 1250 °C. Dalšími výhodami jsou vyšší pevnost, tuhost, tažnost, elektrická a teplotní vodivost, nehořlavost. Nevýhodou je však vyšší hustota a vyšší výrobní výdaje. Mezi významné představitele patří lehké slitiny hliníku, hořčíku a titanu. Kovová matrice může být vytvářena z prášku, fólie nebo taveniny. [7,10]

1.3.3 Keramická matrice

Do skupiny keramických matic jsou obvykle zařazovány také matrice skleněné a uhlíkové. Keramické matrice jsou buď oxidické povahy (Al_2O_3 , ZrO_2 , oxidická skla) nebo neoxidické povahy (SiC , Si_3N_4 , C). Jsou používány z důvodu vysoké pevnosti při vysokých teplotách, malé hustoty a odolnosti proti oxidaci. Mají však vysokou křehkost. Pro jejich často slabé spojení s vlákny je nelze použít pro všechny druhy vláken. [10,11]

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti vybraných matic [1,7]

Druh matrice		Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Termosety	Epoxidy	1,1-1,4	2,1-6	35-90
	Polyestery	1,1-1,5	1,3-4,5	45,85
Termoplasty	PP	0,9	1,1-1,5	28-41
	PA	1,42	2,8-3,4	76-83
Kovy	Hliník 6061	2,71	69	310
	Titan 6AL4V	4,43	114	880

2 PREPREGY

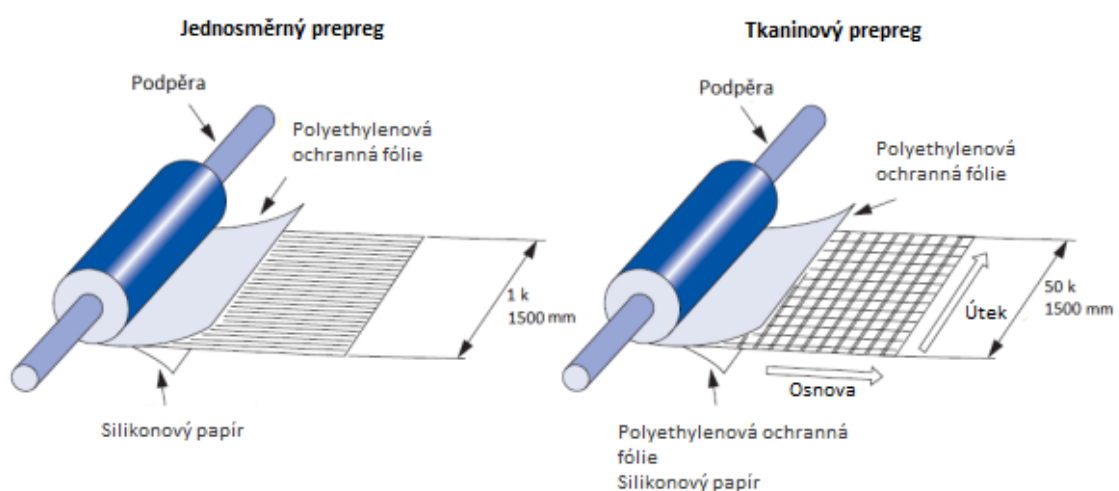
Předimpregnovaná výztuž tzv. prepreg je nejrozšířenější formou produktu používanou v pokročilé výrobě kompozitů. Obsahuje přesný poměr matrice a výztuže. Obvykle se skládá z jedné vrstvy vláken. Výhodami prepregu jsou velmi dobré a izotropní vlastnosti z důvodu přesného a předem definovaného uložení výztuže. Dále není třeba se zabývat neustálou kontrolou poměru mezi matricí a výztuží. Mezi nevýhody lze zařadit především vyšší cenu ve srovnání se samotnou matricí a výztuží, poměrně veliký odpad a nutnost skladovat prepregy při nízkých teplotách. [1,2]

2.1 Rozdělení

Prepregy se mohou dělit, stejně jako kompozitní materiály, podle druhu výztuže, druhu matrice nebo orientace vláken. Dále se dělí podle plošné hmotnosti vlákna, která se obvykle uvádí v g/m^2 . Prepregy se mohou také definovat podle obsahu matrice v hmotnostních procentech.

Prepreg je polotovár sestávající se z vysoce viskózní matrice a kontinuálních výztužných vláken. Materiál je nejčastěji navinutý na rolích a dodává se ve dvou variantách:

- jednosměrný prepreg (vláknová výztuž pouze v jednom směru)
- tkaninový prepreg (ortogonální vláknová výztuž) [2,12]



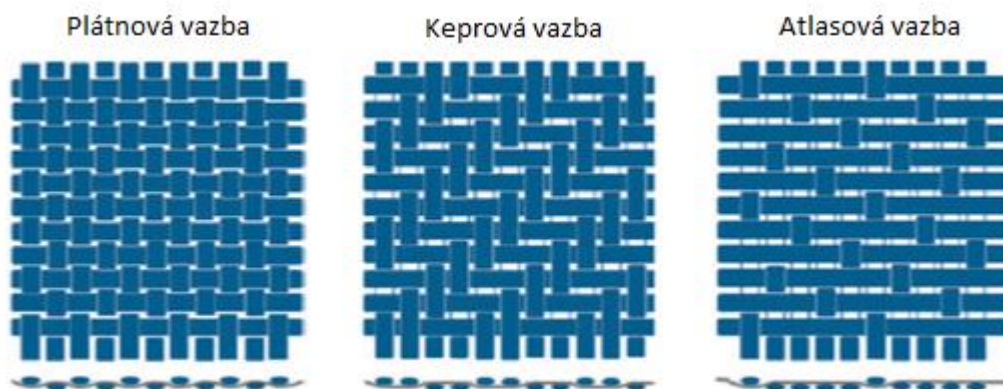
Obrázek 4 Jednosměrný a tkaninový prepreg [12]

2.1.1 Jednosměrné prepregy

Jednosměrný prepreg je kombinací několika paralelně zarovnaných rovingů, které jsou impregnovány matricí. Plošná hmotnost vlákna se nejčastěji pohybuje od 30 g/m² do 300 g/m². Šířky se pohybují od 15 cm až 1,5 m. Automatizované stroje na kladení obvykle používají menší šířky, zatímco širší se strojově řezají do požadovaných tvarů a používají se pro ruční kladení. Jednosměrné prepregy se vyrábějí také ve formě prepregových rovingů, tzv. towpregs, které se používají primárně pro navíjení nebo automatické pokládání vláken.

2.1.2 Tkaninové prepregy

Tkaninové prepregy se skládají z tkané látky impregnované v matrici. Protože se tkaninové prepregy primárně používají pro ruční kladení, dodávají se jako široké role (až do šířky 1,5 m), aby se co nejvíce minimalizoval počet spojů v dílu. Oproti jednosměrným prepregům mají obvykle vyšší plošnou hmotnost vlákna a silnější tloušťku vrstvy. [2,12]



Obrázek 5 Vzory tkanin [12]

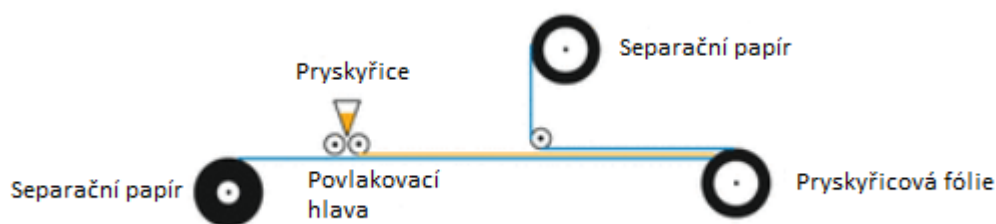
V tkaných látkách jsou výztužná vlákna vyráběna do rovinných polotovarů pomocí konvenčních technik tkaní. Na obrázku 5 lze vidět běžné vzory vazby. Volba vzoru má velký význam na následné zpracování a konečné mechanické vlastnosti součásti. Například nejpevnější je vazba plátnová, ale je také nejméně ohebná při tvarování ve formě. Keprová vazba s měkkými vlákny po povrchové úpravě je ohebnější než plátnová vazba. Atlasová vazba patří mezi nejméně pevnou textilní vazbu. Povoluje však získat velký objemový podíl vláken v kompozitu z důvodu hladkého a lesklého povrchu. [4,12]

2.2 Metody výroby

Mezi nejrozšířenější metody výroby prepregů patří Tavení za tepla (Hot melt proces) a Impregnace pomocí rozpouštědla (Solvent impregnation). Dále existuje například Prášková metoda (Powder scattering), která byla původně vyvinuta pro termoplastické matrice. Tato metoda však nenašla využití pro průmyslovou výrobu. [12]

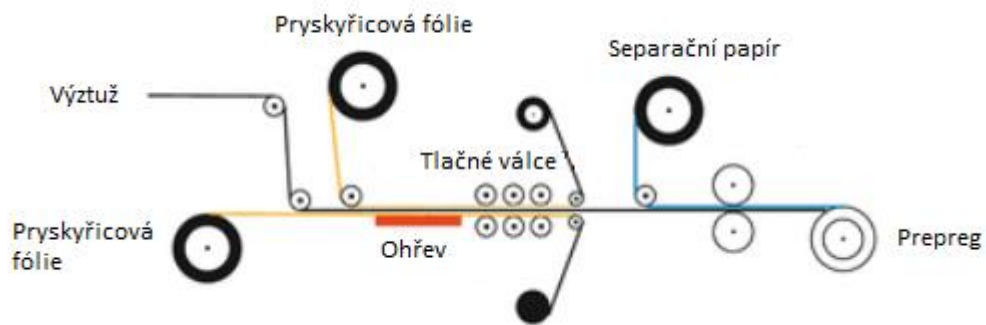
2.2.1 Tavení za tepla (Hot melt proces)

Proces tavení za tepla se skládá ze dvou operací. V první operaci je předmíchaná pryskyřice extrudována a poté nanášena na silikonem potažený papír pomocí vyhřívaných válců kalandru. Následně se materiál navíjí na jádra a chladí, aby se zpomalila vytvrzovací reakce. Navinutou fólii pak lze vzít přímo do druhé operace, nebo ji zmrazit pro budoucí použití.



Obrázek 6 Schéma výroby pryskyřicové fólie [12]

Druhá operace spočívá v impregnaci výztuže pryskyřičnou fólií, vyrobenou v první operaci. Výztuž je tažena mezi pryskyřičné fólie a následně impregnována teplem a tlakem pomocí topných těles a tlačných válců. Poté se materiál ochladí, aby se zvýšila viskozita pryskyřice a vytvořil se polotuhý prepreg. Nosný papír pryskyřičné fólie se odstraní a nahradí novým, silikonem potaženým papírem nebo polyethylenovou fólií. Na výstupu se okraje oříznou řezacími břity a hotový prepreg se navine na cívku. Tento proces probíhá rychlostí 2,5 až 6 m/min. Mnoho prepregů se v současnosti vyrábí touto metodou, protože umožňuje lepší kontrolu obsahu pryskyřice a plošné hmotnosti vlákna. [2,12]

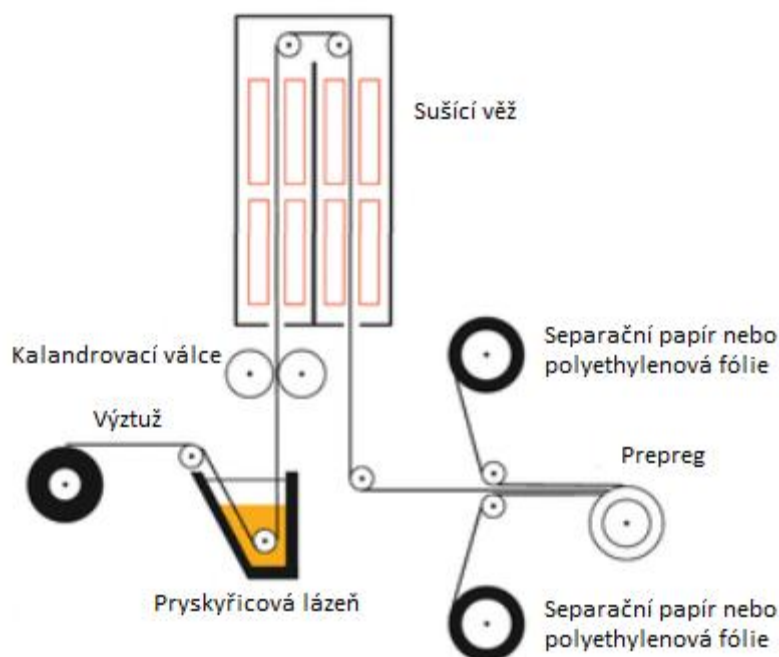


Obrázek 7 Schéma impregnace výztuže [12]

2.2.2 Impregnace pomocí rozpouštědla (Solvent impregnation)

Proces Impregnace pomocí rozpouštědla se používá téměř výhradně pro tkaniny a vysokoteplotní pryskyřice (např. polyimidy), které nejsou vhodné pro předimpregnování metodou Tavení za tepla a musí být rozpuštěny v rozpouštědlech.

Role tkaniny se odvíjí a prochází pryskyřicovou lázní (proces máčení). Tkanina je napínána, aby se zabránilo tvorbě vrásek a deformaci. Viskozita roztoku pryskyřice je řízena teplotou lázně a obsahem rozpouštědla. Přebytečná pryskyřice na povrchu je odstraněna stěrkou a sbírána. Pro nastavení obsahu pryskyřice a tloušťky prepregu se používají kalandrovací válce. Těkavý obsah v impregnovaném materiálu je většinou odpařován teplem a cirkulujícím vzduchem v sušící věži, aby byly splněny požadavky na náklady a životní prostředí. Během tohoto kroku se testuje tloušťka impregnovaného materiálu. Jakmile obsah těkavých látek dosáhne požadované úrovně, prepreg se ochladí chladicími válci, takže tok pryskyřice a vytvrzovací reakce se zastaví. Po průchodu přes věž je materiál podroben optickému testování (světelný stůl) na možné vady. Prepreg je poté nanesen na fólie nebo silikonem potažený papír, aby byl chráněn před lepením a kontaminací, navíjen na cívkách a zabalen do fóliových sáčků. Na rozdíl od prepregů vyráběných metodou Tavení za tepla nejsou prepregy ořezávány, jejich šířka je určena šířkou výztuže. [2,12]



Obrázek 8 Schéma impregnace pomocí rozpouštědla [12]

Impregnace pomocí rozpouštědla nabízí určité výhody ve srovnání s metodou Tavení za tepla. Například se zde dají poměrně snadno zpracovat velmi viskózní prskyřice. Smáčení tkaniny je velmi dobré, protože prskyřice téměř úplně proniká vlákny a vyplňuje mezery. Prepregy také často vykazují vyšší lepivost než prepregy vyrobené Tavením za tepla.

Nevýhodou Impregnace pomocí rozpouštědla je skutečnost, že ji nelze použít pro kontinuální impregnaci jednosměrných vláken. Jednosměrná vlákna bez fixace útkem by byla zničena v prskyřicové lázni, kde by se svazky vláken rozpadly, čímž by vznikly mezery mezi vlákny. Nevýhodou může být i to, že zbytkové rozpouštědlo může zůstat v prepregu a způsobit problém uvolňování těkavých látek během vytvrzování. I z tohoto důvodu je nedávným trendem používat metodu Tavení za tepla. [12]

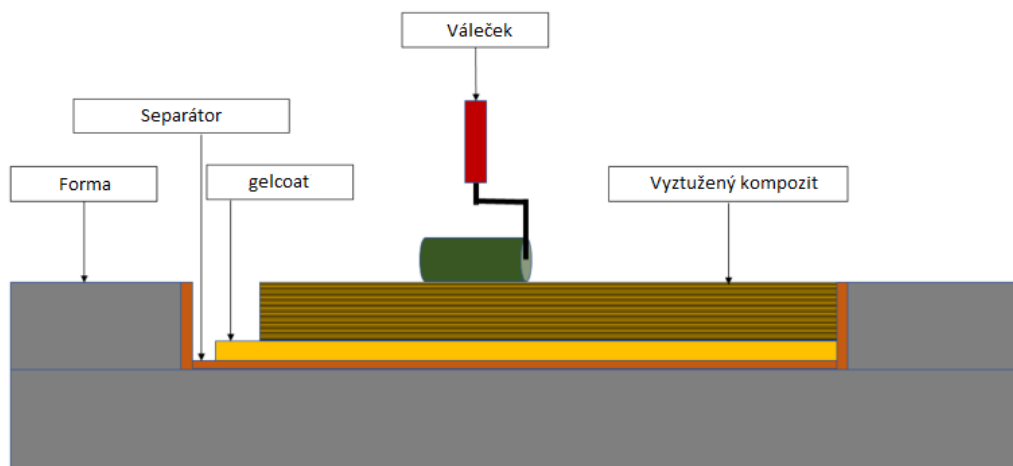
3 ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ

Kompozity je možné vyrobit mnoha rozdílnými metodami. Zpracovatelské technologie určují jak výsledné vlastnosti výrobku, tak i náklady pro výrobu, a proto je nutné její volbě věnovat velkou pozornost. Často nelze vyhovět všem požadavkům, a tak je nutné mezi nimi volit jistý kompromis. Mezi faktory ovlivňující volbu zpracovatelské technologie patří sériovost výrobku, rozměr výrobku, tvar výrobku, jakost povrchu, požadované vlastnosti a limit nákladů. [15]

3.1 Ruční kladení

Postup ručního kladení spočívá v ručním nanášení výztuže a pryskyřice na povrch formy. Kvalita povrchu vytvrzeného výrobku je závislá na kvalitě povrchu formy. Jakost výrobku závisí také na vědomostech a schopnosti pracovníka. Ruční kladení je vhodné pro kusovou výrobu, prototypovou výrobu i velkoplošné díly. [1,6]

Nejprve se na povrch formy nanáší vrstva separátoru, která zajišťuje snadné vyjímání vytvrzeného výrobku z formy. Dále se na vrstvu separátoru nanese vrstva pryskyřice (gelcoat), která zabraňuje proniknutí výztuže na povrch výrobku. Následně se postupně kladou výztuže, které se pomocí válečků prosycují pryskyřicí. Je nutné co nejvíce zamezit vzniku vzduchových bublin, které zhoršují mechanické vlastnosti výrobku. [6]



Obrázek 9 Schéma ručního kladení [13]

Výhody:

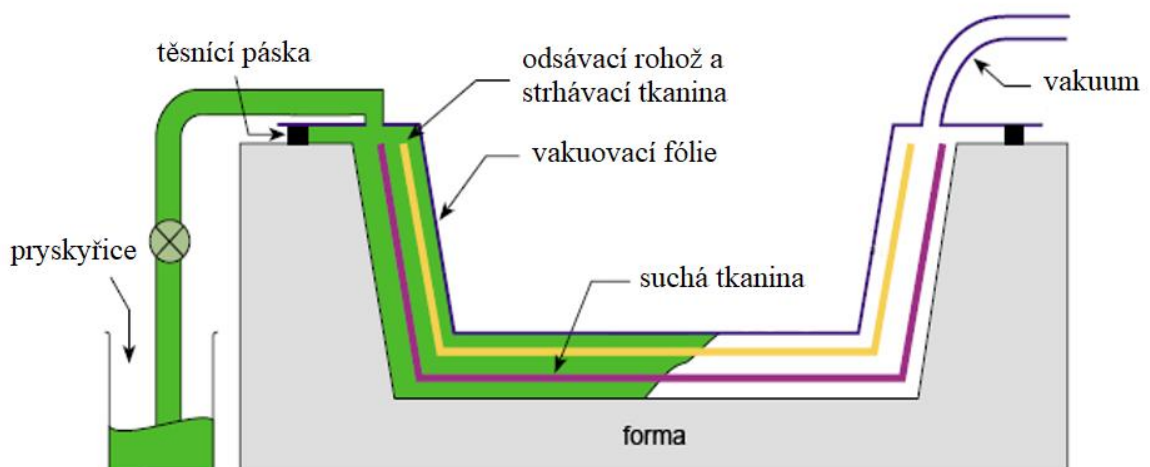
- Jednoduchost technologie
- Minimální náklady na nástroje
- Neomezené tvary a velikosti výrobku

Nevýhody:

- Náročnost na lidskou práci
- Pouze jeden kvalitní povrch
- Kvalita závislá na schopnostech pracovníka [1]

3.2 Vakuová infuze

Tato technologie rozšiřuje proces ručního kladení a využívá podtlak k prosycení výztuží pryskyřicí. Výztuže, nejčastěji ve formě tkanin, se kladou do dutiny formy. Na výztuže se následně položí strhávací tkanina a odsávací rohož. Forma se zakryje vakuovou fólií a pomocí těsnicí pásky utěsní. Prostřednictvím vakuové pumpy se vytvoří ve formě podtlak. Pomocí podtlaku je pryskyřice postupně distribuována ze zásobníku do dutiny formy, kde prosycuje suchou výztuž. Vakuum odstraňuje vzduchové bubliny z laminátu a přebytečná pryskyřice je odváděna z odsávací rohože do přepadové nádoby. Laminát se vytvrzuje při standardních atmosférických podmínkách. [6,15]



Obrázek 10 Schéma vakuové infuze [17]

Výhody:

- Minimalizace vzduchových bublin
- Vyšší podíl vláken (až 60 %)
- Menší emise těkavých látek
- Lepší mechanické vlastnosti

Nevýhody:

- Náklady na pomocné materiály
- Velký odpad
- Technologicky složitý proces [18]

3.3 Lisování se vstřikem matrice (RTM)

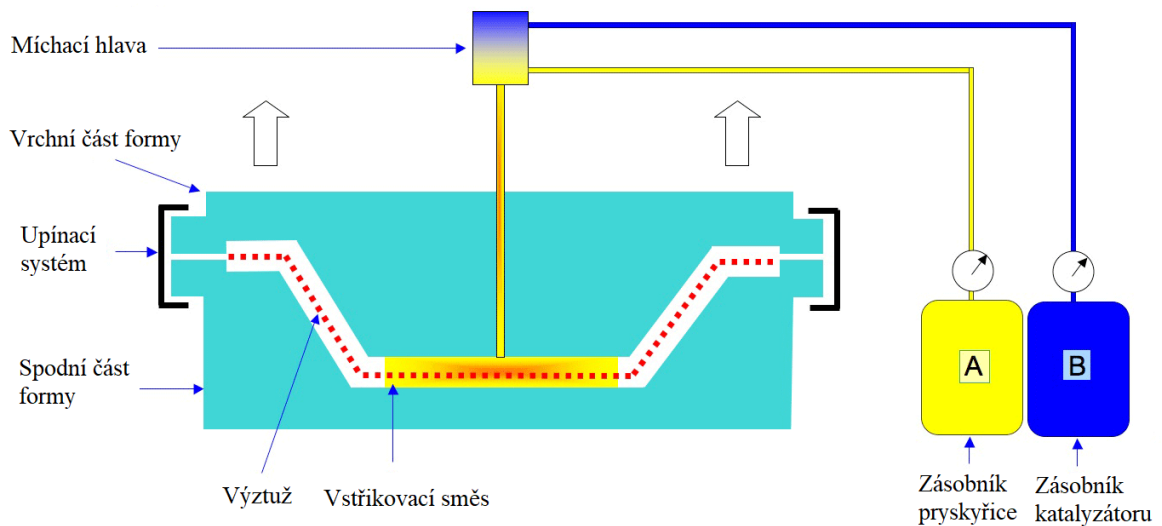
Technologie RTM (Resin Transfer Molding), se dnes používá k výrobě široké škály výrobků, od malých područek pro autobusy až po velké součásti čistíren odpadních vod. Nařezaná suchá výztuž se umístí do připravené dutiny formy, při velkosériové výrobě se používají tzv. předlisky z vyztuženého materiálu. Aby se forma řádně uzavřela a utěsnila, nesmí předliska přesahovat požadovanou oblast těsnění nebo stlačení ve formě. Po uzavření formy se do dutiny vstříkuje pryskyřice pod tlakem 0,2 až 0,35 MPa, která impregnuje výztuž a vytlačuje vzduch z dutiny formy. Když začne přebytečná pryskyřice vytékat z odvzdušňovacích otvorů, tok pryskyřice se zastaví a lisovaná součást začne vytvrzovat. Po ukončení vytvrzování, které může trvat několik minut až hodin, se z formy součást vyjme a proces se může opakovat. [1,19]

Výhody:

- Jakost povrchu na obou stranách výrobku
- Přesnost výroby
- Možnost výroby velkých plošných výrobků
- Snadné zalisování přírub a jiných součástí

Nevýhody:

- Nutnost těžkých a drahých kovových forem
- Není možné dosáhnout vysokého obsahu skla [1]



Obrázek 11 Technologie RTM [20]

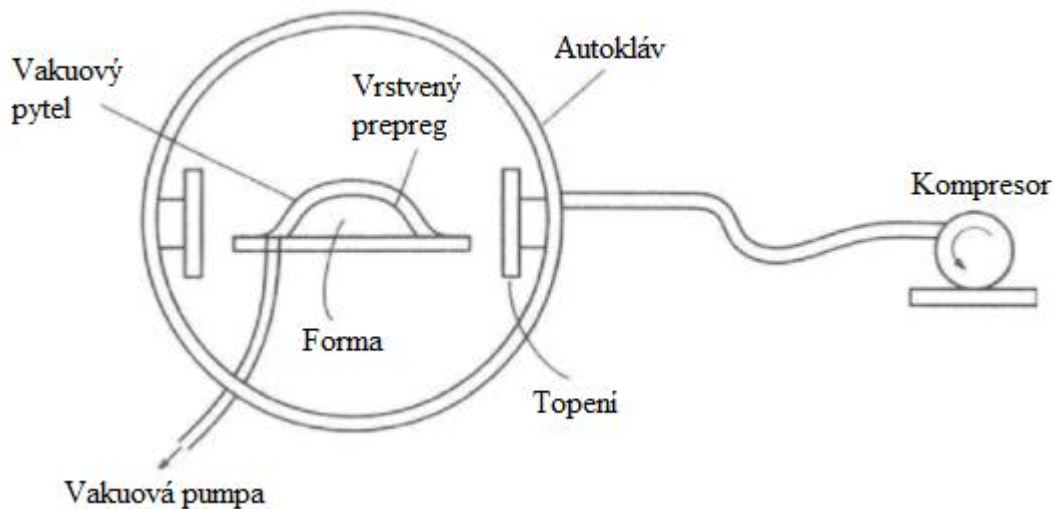
3.3.1 Light-RTM

Jedná se o modifikaci technologie RTM. Vrchní část formy je nahrazena fólií a k prosycení výztuže se využívá vakuum. Z důvodu menším tlakům (0,4 až 1 bar) není nutné konstruovat tak robustní formy jako u RTM, což umožňuje výrobu větších dílců. [15]

3.4 Autoklávové lisování

Jedná se o vytvrzení kompozitu pomocí tepla a tlaku v uzavřené nádobě (autoklávu) s přesně říditelnými parametry. Výchozím materiálem jsou vždy prepregy, vyžadující vytvrzování za zvýšených teplot. Prepregy se stříhají na potřebné rozměry a pokládají do naseparované formy. Následně se přidávají přídatné materiály, jako odtrhová tkanina, separační fólie, odsávací rohož. Forma se vloží do vakuového pytle, utěsní pomocí těsnicí pásky. Připravená forma se vloží do autoklávu a napojí na vakuovací soustavu pro vytvoření vakua a odvádění těkavých plynů během vytvrzování. Autokláv se zavře a za pomoci zvýšeného tepla a tlaku se prepreg začne vytvrzovat. Nejprve se provádí evakuace pod tlakem (přibližně 0,8 bar) a poté se autoklávu vytvoří tlak až 15 bar. Vytvrzování v autoklávu se využívá pro

nejnáročnější velkorozměrové struktury pro letecký průmysl, kosmický průmysl a závodní automobily. [7,15]



Obrázek 12 Schéma autoklávového lisování [7]

Výhody:

- Zvýšení obsahu výztuže
- Možnost vytvrzení více výrobků v jednom autoklávu
- Výroba rozměrných a velmi složitých výrobků
- Možná výroba sendvičových kompozitů

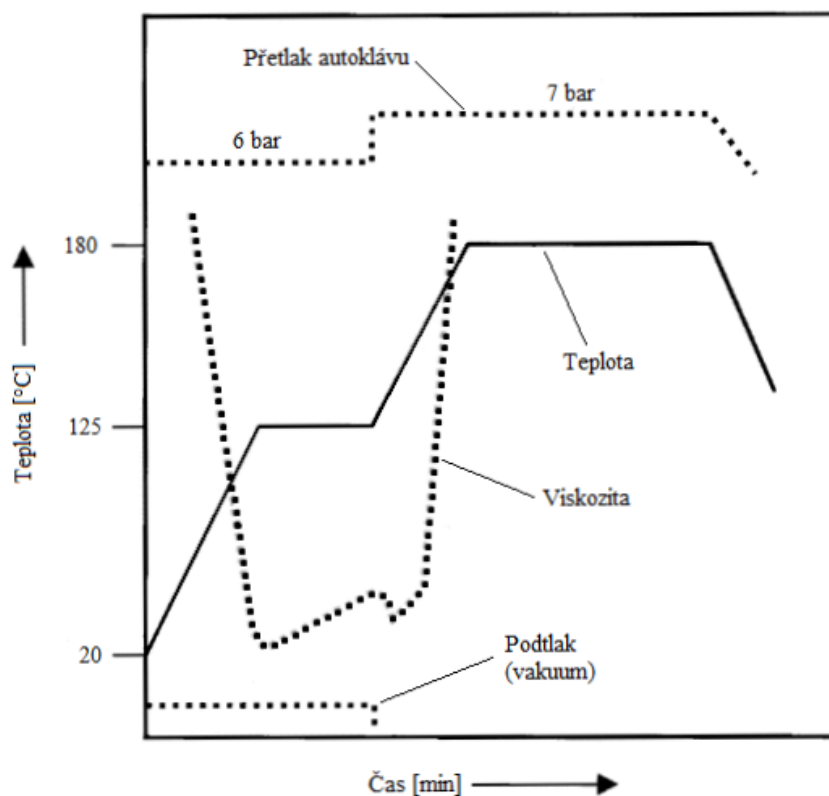
Nevýhody:

- Vysoká cena autoklávu
- Pracná metoda a velikost výrobku omezena velikostí autoklávu
- Poměrně hodně odpadu [1,15]

3.4.1 Vytvrzovací cyklus

Klasický vytvrzovací cyklus pro epoxidové kompozity obsahuje dva ohřevy a dvě izotermické fáze. První ohřev a izotermická fáze, obvykle v rozmezí 115 až 140 °C, slouží k tomu, aby pryskyřice mohla téci (vytékat) a těkavé látky unikat ze struktury. Vložená viskozitní křivka (viz. *Obrázek 13*) ukazuje dramatický pokles viskozity pryskyřice při prvním zahřívání. Druhý ohřev a izotermická fáze představuje polymerační část

vytvrzovacího cyklu. Během této části viskozita pryskyřice zpočátku mírně klesá vlivem navýšení teploty a poté dramaticky stoupá, jak kinetika pryskyřice zahajuje proces síťování. Pryskyřice želatinuje do pevné látky a proces zesíťování pokračuje během druhé izotermické fáze, obvykle při teplotě 170 až 190 °C. Pryskyřice se při této teplotě vytvrzování udržuje obvykle 4 až 6 hodin, což poskytuje čas na dokončení procesu síťování. U standartních epoxidových systémů bývá aplikováno plné vakuum a tlak (60 až 80 % maximálního tlaku) během první izotermické fáze. Pak se vakuum přeruší a aplikuje se maximální tlak v autoklávu před zvýšením na konečnou vytvrzovací teplotu.

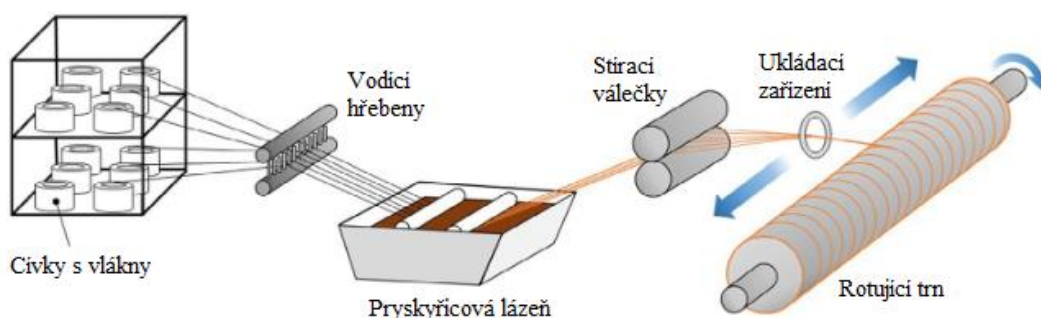


Obrázek 13 Schéma vytvrzovacího cyklu [16]

Nutno poznamenat, že s přechodem průmyslu na systémy s čistým obsahem pryskyřice bylo u mnoha výrobců zrušeno používání první izotermické fáze, která poskytuje čas na vyprchání pryskyřice, což vede k přímému náběhu na vytvrzovací teplotu. [16]

3.5 Navíjení

Navíjení se obvykle chápe jako proces, při kterém se svazek vláken či jinak upravených výztuží nejprve naimpregnuje v pryskyřicové lázni a poté se rovnoměrně a pravidelně navíjí na rotující trn. Hotový vzor se vytvrdí a trn se odstraní. Typickými materiály jsou skleněná, uhlíková nebo aramidová vlákna spojená s polyesterovou, vinylesterovou nebo epoxidovou pryskyřicí. Nejviditelnějšími oblastmi použití hromadně vyráběných dílů s navinutými vlákny jsou potrubí, tlakové nádoby, odpalovací trubky raket a skříně motorů. [19]



Obrázek 14 Schéma navíjení [21]

Výhody:

- Použití nejlevnější formy výztuže (rovingu)
- Dobrá produktivita a možnost vysoké automatizace
- Výroba dutých těles

Nevýhody:

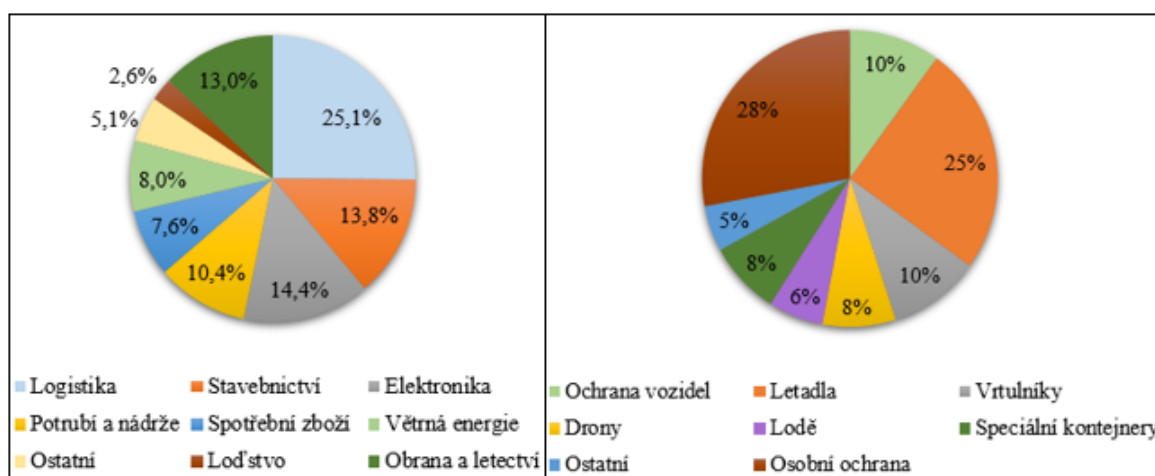
- Vysoká cena navíjecích strojů
- V některých případech obtížné odstraňování trnů [1]

4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY VE VOJENSKÉM PRŮMYSLU

Ve vojenském průmyslu se kompozitní materiály využívají v aplikacích, jako jsou pozemní systémy, vojenská letadla, drony (UAV), námořní plavidla, ochranné oděvy a zbraně

Vlastnosti, díky kterým jsou kompozity vhodné pro použití ve vojenských aplikacích, jsou:

- Nízká hmotnost – vynikající pro ochranné oděvy a součásti vozidel
- Odolnost proti nárazu
- Lze spojit s jinými materiály (např. kovy a keramikou) pro zvýšení ochranných vlastností
- Odolné proti korozi – vyžadují méně údržby v terénu
- Konstrukce pro výrobu – například celé tvary lze navrhnout a vytvarovat jako jeden kus
- Vestavěné funkce – monitorovací systémy mohou být integrovány do materiálu [22]



Obrázek 15 Světový trh kompozitů z hlediska hodnoty v roce 2016 (vlevo) a rozdělení aplikací ve vojenském průmyslu (vpravo) [23,24]

4.1 Letectví

Od 70. let 20. století se používání kompozitů v leteckém průmyslu výrazně zvýšilo. V dřívějších dobách se pro konstrukci letadel používaly materiály jako hliník, ocel a titan. Kompozity byly hojně využívány při nahrazování kovových dílů používaných ve starších letadlech. Hlavní a nejdůležitější výhodou použití kompozitů je snížení hmotnosti a zjednodušení montáže. Díky snížené hmotnosti se zlepšila výroba letadel a roste poptávka po vývoji kompozitů pro vojenské letectví. Dalším důležitým faktorem, který zvyšuje

poptávku po použití kompozitů, je to, že mají vysoký potenciál pro snížení nákladů na výrobu a údržbu. [25]

V konstrukcích letadel se nejčastěji používají vlákna vyztužené polymerní kompozity se skleněnými, uhlíkovými a aramidovými vlákny, hybridní kompozity (vlákno-kovové lamináty, lamináty s kovovou a keramickou maticí). Procentuální hmotnosti draků letadel se často blíží 20 až 40 %. Již desítky let se do vrtulníků vkládají rotorové listy vyztužené skleněnými vlákny pro zvýšení odolnosti proti únavě a jejich draky jsou stavěny převážně z uhlíkových kompozitů. Vojenské letouny, které jako první začaly používat vysoce výkonné kontinuální kompozity z uhlíkových vláken, stály u zrodu velké části technologií, kterou nyní využívají i další průmyslová odvětví. [2,26]

Hlavní aplikace kompozitů v letectví:

- Konstrukční díly letadel, jako jsou řídicí plochy, části křídel, panely trupu, radomy, interiérové díly, kryty ventilátorů, kapotáže, křídélka
- Vrtulníky – řídicí plochy, podlahové panely, kabiny, rotorové listy
- Lisované kevlarové díly pro motory [23]

Tabulka 3 Použití kompozitů v leteckém průmyslu [27]

Kategorie	Příklady	Použití kompozitů
Stíhací letouny (USA)	F-16, F-14, F-18, YF-23, F-22, F-15	2 % kompozitů v letounu F-15 19 % v letounu F-18 a 24 % v letounu F-22
Stíhací letouny (Evropa)	JAS-39 Gripen, Rafael, Eurofighter	40 % hmotnosti letounu Eurofighter tvoří uhlíkový kompozit, 26 % Rafael a 25 % Gripen
Bombardér (USA)	B-2	Kompozity pro pohlcování radiových vln
Doprava (USA)	B-777, B-787, MD-11	20 % kompozitů v Boeingu 777 50 % kompozitů v Boeingu 787
Doprava (Evropa)	A-320, A-340, A-380, Falcon 900	28 % kompozitů v A320, 20 až 22 % kompozitů v A380 (úspora hmotnosti je až 30 %)

Eurofighter Typhoon

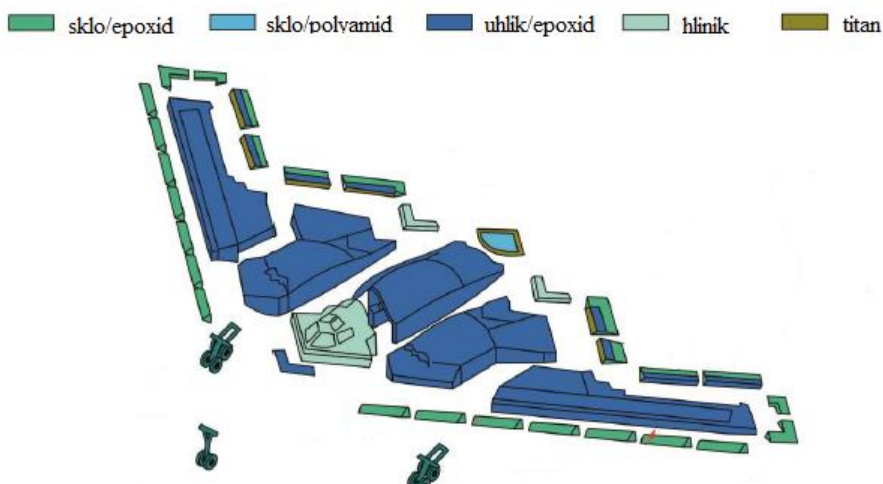
Eurofighter Typhoon je nejpokročilejší víceúčelový bojový letoun na trhu. Klíčem ke konstrukci letounu byly pevné a lehké kompozitní materiály. Po jejich použití je hmotnost draku o 30 % nižší než u tradičních materiálů, což zvyšuje dolet a výkon. Povrch letounu tvoří ze 70 % uhlíkový kompozit, 12 % skelný kompozit a pouze 15 % kov, což zajišťuje „stealth“ provoz a ochranu před radarovými systémy. [28]



Obrázek 16 Eurofighter Typhoon [28]

Northrop B-2 Spirit

Northrop B-2 Spirit je americký víceúčelový strategický bombardér. Skládá se z téměř 18000 až 23000 kilo pokročilých kompozitních materiálů. Z literatury vyplývá, že pro toto letadlo bylo vyvinuto téměř 900 nových kompozitních materiálů. Díky tomu B-2 získává velkou část svých „stealth“ vlastností právě z těchto kompozitů a má schopnost být tvarován do složitých struktur. [25]



Obrázek 17 Materiály použité v bombardéru B-2 [29]

Boeing CH-47 Chinook

Chinook je americký střední transportní vrtulník. Listy hlavních rotorů s omezenou životností raných vrtulníku Chinook byly kovové a vyžadovaly časté kontroly, aby byla zachována letová způsobilost. Když byly kompozity začleněny do těchto vrtulníku v 80. letech 20. století, zákazníci se těšili nejen z vyššího výkonu, ale také ze snížených nákladů na údržbu hlavních rotorů. Další výhodou kompozitních (většinou sklolaminátových) listů rotorů byla výrazně zlepšená tolerance poškození s ohledem na různé balistické hrozby. [30]



Obrázek 18 Boeing CH-47 Chinook [30]

Bezpilotní letouny (Drony)

Základním požadavkem na všechny draky bezpilotních letadel je vysoká pevnost při minimální možné hmotnosti, velká nosnost, vynikající manévrovatelnost a vysoká účinnost vznášení. U vojenských bezpilotních letounů se vyžaduje dlouhá doba operačního provozu bez nutnosti doplnění paliva. Snížení hmotnosti je proto kriticky důležité a ke konstrukci draků dnes výrobci používají kompozitní materiály, které snižují hmotnost bezpilotních letounů, aniž by to bylo na úkor jejich pevnosti. [31]

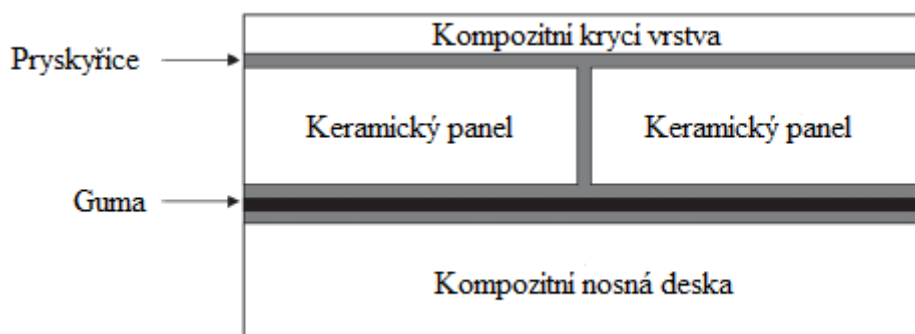
Například ocas, motorová gondola a zadní část trupu vojenského bezpilotního letounu MQ-4C Triton jsou vyrobeny z kompozitních materiálů. Hlavní trup má hliníkovou konstrukci. Systém byl vyvíjen korporací Northrop Grumman pro námořnictvo Spojených států amerických. Letoun dokáže operovat ve velkých výškách na dlouhé vzdálenosti. [32]



Obrázek 19 Bezpilotní letoun MQ-4C Triton [32]

4.2 Kompozitní pancéřování

Použití kompozitních materiálů vyztužených vlákny v ochraně vozidel je běžné již několik desetiletí. Nejčastěji se používají v kombinaci s kovovými a keramickými materiály. Typický keramicko-kompozitní pancíř je znázorněn na obrázku 21. Funkce keramických panelů je absorbovat energii nárazu, rozdrtit střelu a změnit její směr. Kompozitní deska slouží především jako nosný prvek. V ideálním případě by se poškození na ni nemělo rozšířit, ale pokud by k tomu došlo, dokáže zbylou energii absorbovat. Gumová vrstva mezi keramikou a kompozitem opožďuje proces penetrace a také zabraňuje sloučení poškození v keramice a kompozitu. Přední kompozitní krycí vrstva zabraňuje mikropoškození keramiky. [33]



Obrázek 20 Keramicko-kompozitní pancíř [33]

Obrněné vozidlo Foxhound

Využívají se i pancíře, kde jsou jediným typem materiálu kompozity vyztužené vlákny. Příkladem tohoto typu pancéřování je britské vozidlo Foxhound, které je prvním vojenským vozidlem plně využívajícím pancéřování vyztuženého vlákny. Skelný kompozit tvoří nosnou část korby, na kterou je aplikována kompozitní střešinová vložka, aby bylo dosaženo požadované úrovně ochrany. [34]



Obrázek 21 Obrněné vozidlo Foxhound [34]

4.3 Námořnictví

Kompozity byly poprvé použity hned po druhé světové válce při stavbě malých osobních člunů pro americké námořnictvo. Čluny se ukázaly jako tuhé, pevné, odolné a snadno opravitelné. Tyto vlastnosti vedly k rychlému rozšíření použití kompozitů v dalších typech amerických námořních plavidel od poloviny 40. do 60. let 20. století. V padesátých letech začala kompozitní konstrukce instalovat na své lodě a ponorky i další námořnictva. Královské námořnictvo a francouzské námořnictvo začaly používat kompozity místo oceli v předových sonarových kopulích, aby zajistily lepší akustickou průhlednost, a podobné použití bylo u radomů k ochraně komunikačních a průzkumných antén na hladinových lodích. V 70. letech 20. století se z kompozitů začaly stavět minolovné lodě, pilotní čluny a vyloďovací plavidla. Toto období znamenalo počátek použití kompozitů pro velké námořní konstrukce.

Hlavní aplikace kompozitů v námořnictví:

- Nosné konstrukce – lodní paluby, Stěžně a trupy
- Pohonné systémy – lodní šrouby, pohony, hřídele
- Sekundární konstrukce a příslušenství – komíny, kormidla, poklopy, potrubí, ventilační systémy

Hlídkové plavidlo třídy Skjold

Největším celokompozitovým hlídkovým člunem je plavidlo třídy skjold, které provozuje Norské královské námořnictvo. Skjold je postaven výhradně ze sendvičového kompozitu sestávajícího z laminátových potahů ze skleněných a uhlíkových vláken s pěnovým polyvinylchloridovým jádrem. První hlídkové plavidlo bylo uvedeno do provozu v roce 1999. Stavitelé použili sendvičový kompozit místo oceli nebo hliníkové slitiny, protože zjistili, že zjednodušuje konstrukci trupu a nástavby. Kompozit také poskytuje vysoký poměr pevnosti a hmotnosti, dobré nárazové vlastnosti a nízkou infračervenou, magnetickou a radarovou signaturu průřezu.



Obrázek 22 Hlídkové plavidlo třídy Skjold [36]

Korveta třídy Visby

Nejdelšími námořními loděmi, které se v současnosti staví z kompozitních materiálů, jsou korvety. Visby je třída korvet švédského námořnictva, která je se svou délkou 72 m, šířkou 10,4 m a výtlakem 620 tun nejdelší a téměř nejtěžší celokompozitovou námořní lodí. První byla spuštěna na vodu v roce 2000. Třída Visby je navržena jako víceúčelové plavidlo se schopnostmi pro pozorování, boj, kladení min, protiminové operace a protiponorkový boj. Aby mohla plnit tyto role, musí být plavidlo lehké, odolné vůči nárazovému zatížení pod

vodou a „stealth“. Visby je první námořní lodí, která v trupu významně využívá kompozit z uhlíkových vláken. [35]



Obrázek 23 Korveta třídy Visby [36]

4.4 Neprůstřelné vesty

Výroba účinných lehkých neprůstřelných vest, které by nahradily těžké kovové štíty pro aplikace na ochranu života, byla kritickým problémem, dokud v 70. letech minulého století nevznikla technologie silných syntetických vláken. Aramidová vlákna jako Kevlar a Twaron byla použita pro balistickou odolnost díky jejich vysokému modulu, absorpci energie a poměru pevnosti k hmotnosti. Později se začala používat polyethylenová vlákna (např. Dyneema a Spectra), která jsou lehčí, tenčí a odolnější než vlákna aramidová. Z těchto vláken se poté vyrábějí kompozitní neprůstřelné pláty, které jsou nejčastěji vsity uvnitř neprůstřelných vest nebo vloženy do kapes. Moderní neprůstřelné vesty z polyamidových tkanin se používají již od 90. let minulého století. Do té doby většina těchto vest používala několik vrstev nevyztužené látky. [8]

4.5 Balistické přilby

I u vojenských přileb hrají velkou roli kompozity, které od 80. let minulého století postupně vytlačovaly tradiční materiály. Již dávno nahradili ocelové přilby z druhé světové války a poválečné éry lehké kompozitní konstrukce vyztužené aramidem, polyethylenem a dalšími typy vláken, často v hybridních kombinacích. Současný trend směřuje k termoplastickým přilbám a takové konstrukce jsou vyhodnocovány předními světovými armádami pro vývoj pokročilých bojových přileb. Vzhledem k tomu, že budoucí přilba se předpokládá jako

sofistikované zařízení, které bude integrovat více elektroniky a snímacích systémů, bude potřeba přilby, která bude lehčí než stávající modely z reaktoplastu a bude nabízet větší ochranu. Pokročilé termoplastické kompozity také nabízejí potenciální výhody v podobě zkrácení doby cyklu a kvality vzduchu v závodě při výrobě. Skladování prepregů může probíhat při pokojové teplotě a prakticky bez omezené doby skladovatelnosti. Hlavní nevýhodou kompozitů na bázi termoplastů je mnohem nižší tuhost než u kompozitů na bázi reaktoplastické matrice. [37]



Obrázek 24 Neprůstřelná vesta a přilba od českého výrobce ARGUN [38]

5 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Abychom mohli správně a hospodárně používat technické materiály, musíme znát jejich vlastnosti a umět je co nejpřesněji zjišťovat. Při používání jsou materiály vystaveny různému namáhání, jako je tah, tlak, střih, krut a ohyb. Tato namáhání působí převážně jako kombinace dvou i více prostých namáhání. Materiál musí mít jisté vlastnosti, aby mohl vyvolaným namáháním odolávat. Mezi ně patří například pevnost, tvárnost, pružnost atd. Mechanické vlastnosti ovlivňuje také pracovní teplota. Aby bylo zřejmé že výrobek namáháním odolá, musí se zjistit jeho vlastnosti. Mechanické zkoušky se nejčastěji provádí na tělíscích vyrobených přímo z výrobku nebo ze stejného materiálu.

Z hlediska působení síly na zkušební vzorek rozdělujeme mechanické zkoušky na:

- Statické zkoušky
- Dynamické zkoušky rázové a cyklické
- Zvláštní technické zkoušky (např. zkoušky tvrdosti) [39]

5.1 Statická zkouška ohybem

Mechanické ohybové zkoušky se mohou provádět ve tříbodovém nebo čtyřbodovém uložení. Pro stanovení pevnostních a elastických vlastností zkouškou ohybem se předpokládá lineární rozdělení normálových napětí po průřezu zkušebního tělíska. Velikost pevnosti výrazně ovlivňuje poloha vláken vzhledem k neutrální rovině.

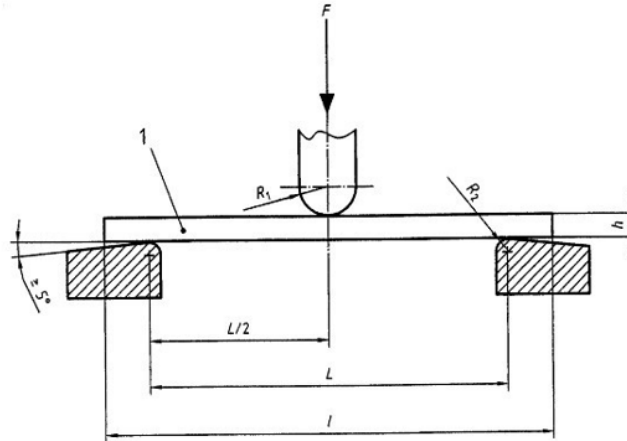
Ve zkušebním tělísku při zkoušce tříbodovým ohybem vzniká napjatost s maximálním zatížením a definovaným místem lomu v místě zatížení (uprostřed délky vzorku). Mezi vrstvami uprostřed tloušťky tělesa leží největší smykové napětí.

Během zkoušení je důležité pozorovat typ porušení, protože porušení lomem vyvolané tahem nebo tlakem je jediným dovoleným typem porušení. Získané veličiny slouží především ke srovnávání. Zkouší se podle několika norem pro různé druhy vyztužení, například podle ČSN EN ISO 178 a ČSN EN ISO 14125. [6]

Postup zkoušky tříbodovým ohybem:

Zkouška se provádí na zkušebním tělísku obdélníkového průřezu, který se položí na dvě podpěry. Poté je tělísko konstantní rychlostí ohýbáno trnem uprostřed vzdálenosti podpěr, do té doby, než dojde k porušení tělesa nebo dokud deformace nedosáhne předem určené

hodnoty. Během tohoto postupu se měří síla působící na zkušební tělísko a výsledný průhyb zkušebního tělíska uprostřed vzdálenosti podpěr. [40]



Obrázek 25 Schéma zkoušky třibodovým ohybem [40]

U této zkoušky zjišťujeme: [40]

Pevnost v ohybu

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

Kde: σ_f ...příslušná pevnost ohybu [MPa]

F...použitá síla [N]

L...rozpětí [mm]

b...šířka zkušebního tělesa [mm]

h...tloušťka zkušebního tělesa [mm]

Deformace ohybem

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \quad (2)$$

Kde: ε_f ...příslušná deformace ohybem [-]

s...průhyb [mm]

h...tloušťka zkušebního tělesa [mm]

L...rozpětí [mm]

Modul pružnosti v ohybu

$$E_f = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3)$$

Kde: E_f ...modul pružnosti v ohybu [MPa]

$\Delta\sigma$...rozdíl napětí v ohybu [MPa]

$\Delta\varepsilon$...rozdíl deformace ohybem [-]

5.2 Rázová zkouška houževnatosti

Rázové zkoušky se provádí ke zjištění energie spotřebované na porušení zkušebního tělíska. Zjištěná hodnota spotřebované energie udává měřítko houževnatosti. Podobně jako zkoušky statické se mohou realizovat namáháním v tahu, tlaku, ohybu nebo krutu. Nejpoužívanější je rázová zkouška v ohybu prováděná na stroji nazývaném Charpyho kladivo. Zkouška se měří podle normy ČSN EN ISO 179-1 a ČSN EN ISO 179-2.

Postup zkoušky:

Zkušební tělísko se umístí na podpěry, které se nachází v nejnižší poloze dráhy kladiva. Kladivo, které je upevněné v počáteční poloze, se uvolní a přerazí zkušební tělísko. Po přeražení se kladivo vykývne do konečné polohy, která je nižší než poloha počáteční, protože se při přeražení spotřebovala určitá práce. Tato práce se nazývá nárazová práce. [6,41]

U této zkoušky zjišťujeme: [41]

Nárazová práce

$$W_B = G \cdot (H - h) \quad (4)$$

Kde: W_B ...nárazová práce [J]

G ...tíhová síla kladiva [N]

H ...počáteční poloha kladiva [m]

h ...konečná poloha kladiva [m]

Rázová houževnatost Charpy

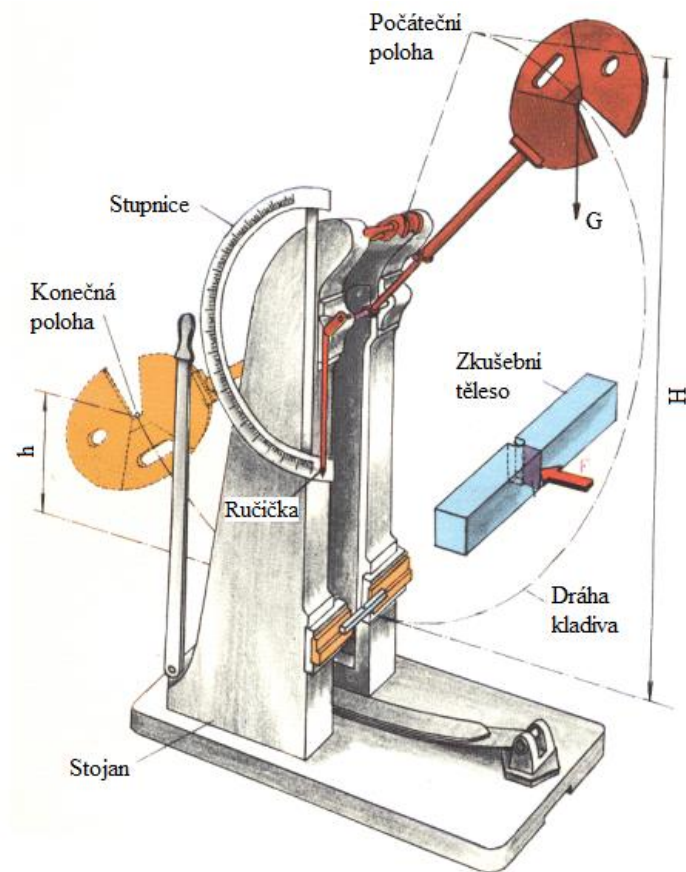
$$a_{cU} = \frac{W_B}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (5)$$

Kde: a_{cU} ...rázová houževnatost Charpy [$kJ \cdot m^{-2}$]

h ... tloušťka zkušebního tělesa [mm]

b ...šířka zkušebního tělesa [mm]

W_B ...nárazová práce [J]



Obrázek 26 Schéma rázové zkoušky v ohybu [39]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem bakalářské práce je návrh materiálové skladby a výroba prototypu krytky bojového vozidla využitím technologie autoklávového lisování. Při výběru materiálové skladby je důležité se zaměřit na výsledné mechanické vlastnosti z důvodu odolnosti dílu vůči namáháním vznikajícím během provozu.

Praktická část se bude skládat z dílčích cílů:

1. Návrh materiálové skladby kompozitních dílů z předimpregnovaného materiálu ozn. GG 204P IMP503Z.
2. Výroba zkušebních vzorků technologií ručního kladení a následné vytvrzení v autoklávu.
3. Provedení statické zkoušky ohybem dle ČSN EN ISO 178 a rázové zkoušky v ohybu dle ČSN EN ISO 179-1 pro různé orientace vrstev.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.
5. Diskuze naměřených výsledků.
6. Návrh a výroba vytvrzovacího přípravku z duralu ozn. EN AW 2017.
7. Výroba prototypu a volba technologického postupu, včetně jeho fotodokumentace.
8. Závěr.

7 NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Před samotnou výrobou kompozitních desek na zkušební tělíska bylo nutné navrhnout orientaci vrstev prepregů a počet vrstev pro jednotlivé typy zkušebních těles. Pro výrobu byl vybrán prepreg na bázi uhlíkové výztuže a epoxidové pryskyřice ozn. GG 204P IMP503Z, který je vhodný ke zpracování v autoklávu. Pro zhotovení tělísek bylo nutné vyrobit čtyři desky ve dvou velikostech a tloušťkách.

7.1 Návrh skladby zkušebních tělísek

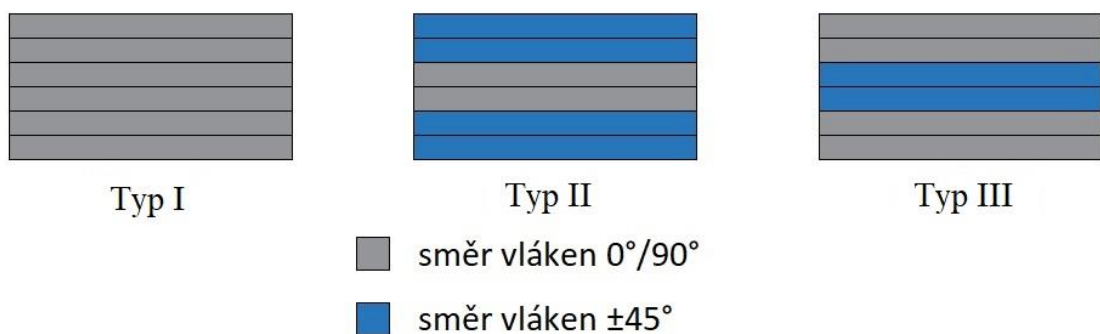
Pro zkoušení mechanických vlastností byly zvolené tři typy tělísek s rozdílnou orientací jednotlivých vrstev prepregů.

Typy byly následující:

Typ I – stejný směr vláken ve všech vrstvách prepregu ($0^\circ/90^\circ$)

Typ II – směr vláken prvních dvou vrstev $\pm 45^\circ$, následné střídání s vrstvami ve směru vláken $0^\circ/90^\circ$

Typ III – směr vláken prvních dvou vrstev 0° a 90° , následné střídání s vrstvami ve směru vláken $\pm 45^\circ$



Obrázek 27 Názorná skladba vrstev jednotlivých tělísek

7.2 Zjištění počtu vrstev prepregů

Počet vrstev lze zjistit z následující rovnice:

$$T \approx m_s \cdot n \quad (6)$$

Kde: T...tloušťka výrobku [mm]

m_s ...plošná hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

n...počet vrstev [-]

pro statickou zkoušku tříbodovým ohybem:

$$n \approx \frac{2}{0,22} = 9,09 \rightarrow \text{zvoleno 9 vrstev prepregů}$$

pro rázovou zkoušku v ohybu:

$$n \approx \frac{4}{0,22} = 18,18 \rightarrow \text{zvoleno 18 vrstev prepregů}$$

Bylo tedy zjištěno, že na desku pro výrobu tělísek na zkoušku tříbodovým ohybem, kde je normou ČSN EN ISO 178 doporučována tloušťka 2 mm, je potřeba 9 vrstev prepregů. Pro tělíška na rázovou zkoušku v ohybu je doporučována normou ČSN EN ISO 179-1 tloušťka 4 mm, proto bylo zvoleno 18 vrstev prepregů.

7.3 Výroba zkušebních vzorků

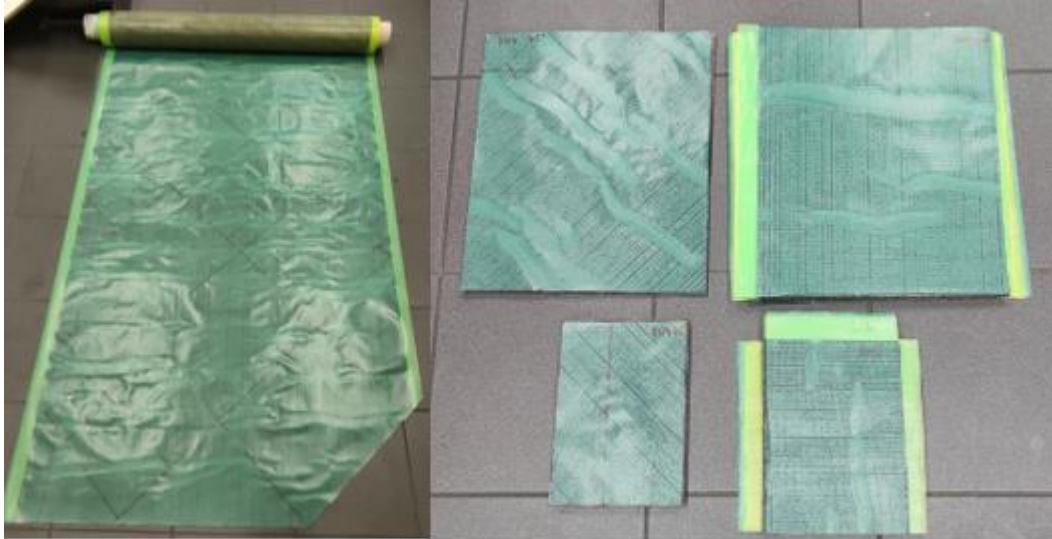
Pro zhotovení tělísek o zvolených orientacích bylo nutné vyrobit 4 desky ve dvou velikostech a tloušťkách. Výroba se skládá z několika dílčích kroků, jejich pracovní postup bude popsán v následujících kapitolách.

7.3.1 Příprava formy

Formu bylo nejdříve nutné očistit po předchozí výrobě. To se provedlo za pomoci papírového ubrousku, technického lihu a škrabky. Následně se povrch formy ošetřil plničem pórů (Chem Trend Zyvox Sealer GP). Plnič se pomocí papírového ubrousku rozetřel po povrchu formy a rozleštil. Podle postupu daného výrobcem byly nanесeny celkem čtyři vrstvy. Po nanесení každé vrstvy se čekalo 15 minut na usušení plniče na povrchu formy. Po usušení poslední vrstvy se forma naseparovala pomocí vysokoteplotního separátoru (Chem Trend Chemlease A2191W). Postup separace byl shodný jako u nanásení vyplňovače.

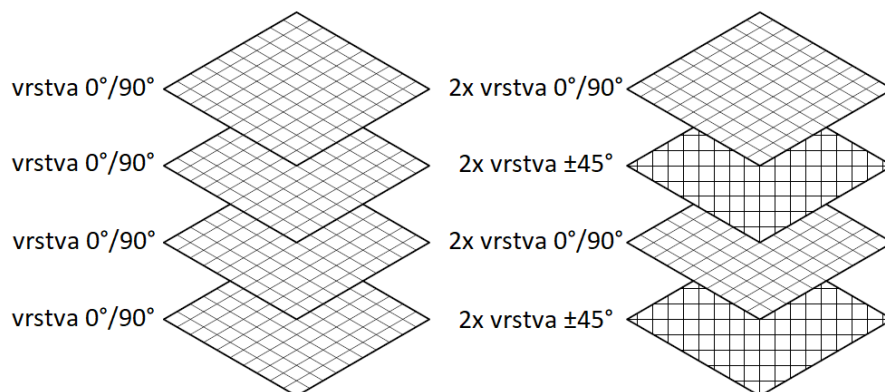
7.3.2 Stříhání a kladení prepregů

Rozměr desek byl zvolen 400 x 333 mm a 240 x 170 mm, aby bylo možné vyrobit dostatečné množství zkušebních tělísek pro mechanické zkoušky. Pomocí nůžek a pravítka byly prepregy nastříhány na tyto rozměry.

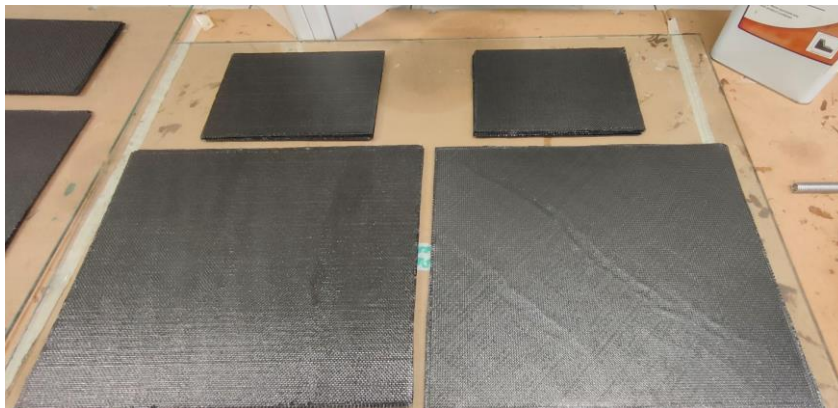


Obrázek 28 Role prepregu (vlevo) a nastříhané prepregy (vpravo)

Z nastříhaných prepregů byly strženy ochranné fólie a ve stanovených vrstvách byly kladeny na naseparovaný povrch formy. Pomocí laminovacích válečků byly odstraňovány vzduchové bubliny a vrstvy přitlačovány k sobě.

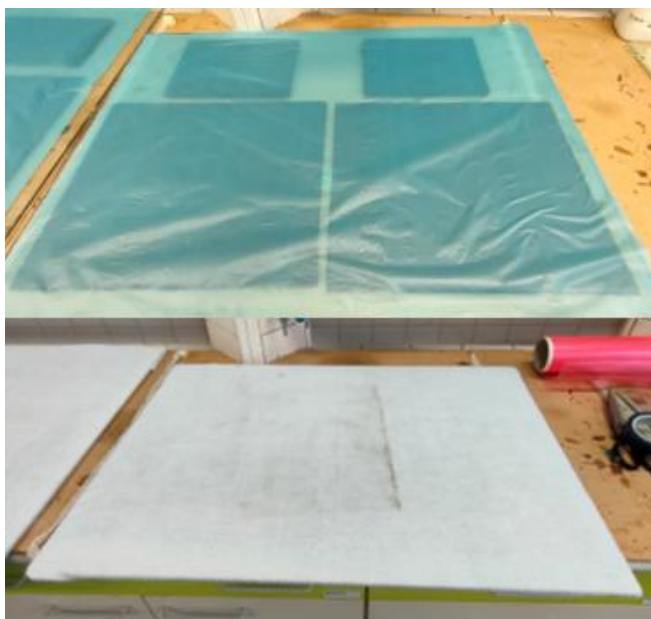


Obrázek 29 Schématické znázornění kladení prepregů



Obrázek 30 Navrstvené prepregy

Na nakladené vrstvy prepregů byla položena separační fólie, která slouží k oddělení vyráběného výrobku od dalších pomocných materiálů. Pro odsátí přebytečné pryskyřice během vytvrzovacího procesu byla na separační fólii položena odsávací rohož.



Obrázek 31 Prepregy překryté separační fólií (nahore) a odsávací rohoží (dole)

7.3.3 Zavakuování formy

Pro zavakuování formy se použil vakuovací fóliový rukáv, který se ustříhl tak, aby oba konce přesahovaly formu přibližně o 100 mm. Následně se forma vložila do vakuovacího rukávu, ve kterém se poté vyřízl malý otvor, do kterého se vložil vakuovací ventil. Pomocí těsnicí pásky se oba konce vakuovacího rukávu utěsnili. Na závěr se pomocí vývěvy zkontrolovala těsnost. Hadice vývěvy se připojila na vakuovací ventil a vytvořil se podtlak kolem -0,95 bar. Pokud vzduch unikal, netěsnosti se opravily přitlačením nebo přidáním těsnicí pásky

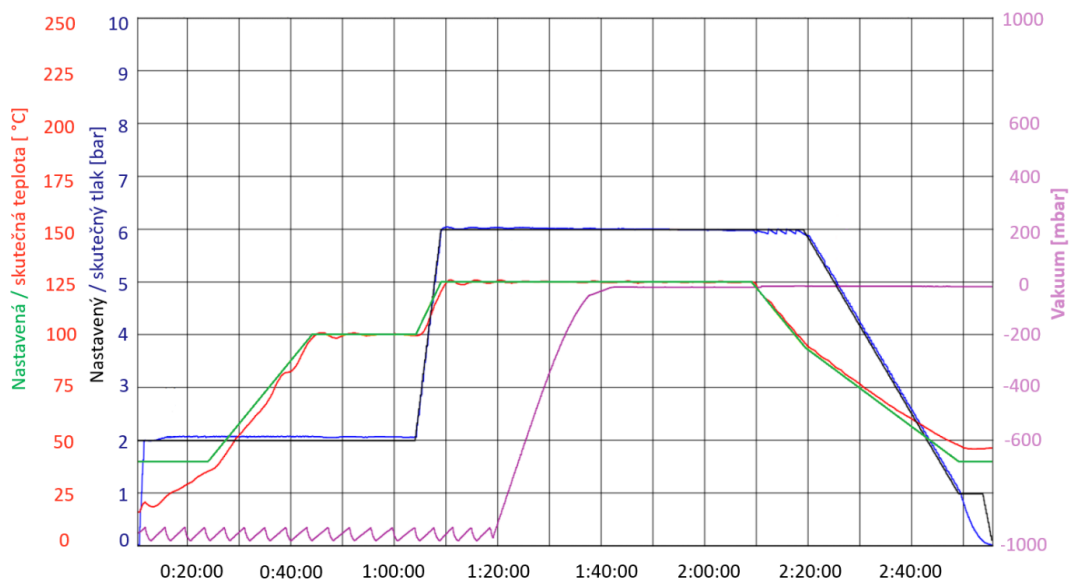
k vakuovací fólii. Po dosažení a udržení daného podtlaku byla forma připravena pro vytvrzování v autoklávu.



Obrázek 32 Zavakuovaný výrobek

7.3.4 Vytvrzení v autoklávu

Vytvrzování desek probíhalo v autoklávu od výrobce OP Panini S.r.l., model G00300572. Nejdříve se autokláv spustil a na ovládacím panelu nastavil vytvrzovací cyklus, který je znázorněn na Obrázku 33. Dále se otevřely ventily pro vstup chladicí vody a přívod vzduchu. V tuto chvíli se forma vložila do autoklávu a napojila na vakuovací soustavu. Na manometru se zkontrolovalo zde je podtlak ve formě v pořádku. Pokud ano, dveře autoklávu se zavřely a spustil se vytvrzovací program. Po jeho skončení se forma vyjmula z autoklávu a odstranili se všechny přídavné materiály.



Obrázek 33 Průběh teploty, tlaku a vakua během vytvrzovacího cyklu



Obrázek 34 Autokláv



Obrázek 35 Desky po vytvrzení v autoklávu

8 PROVEDENÍ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

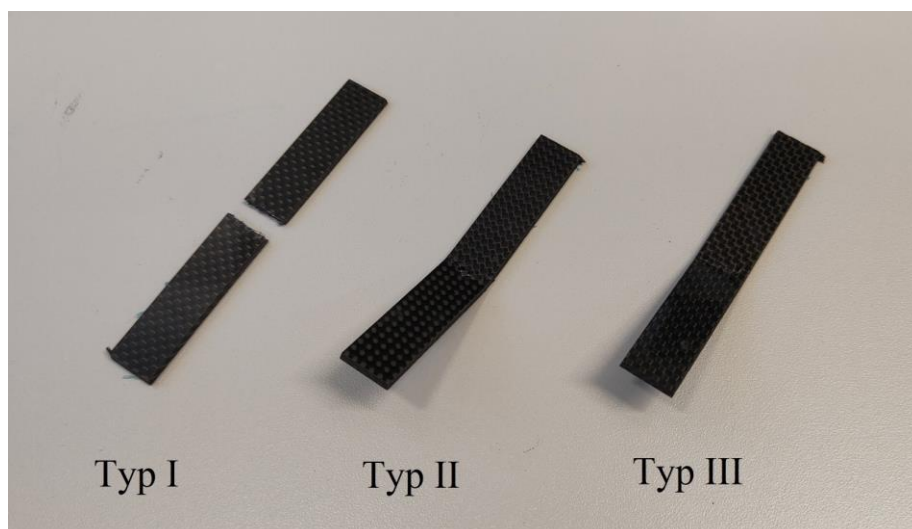
Pro srovnání vyrobených materiálů s odlišnou orientací vláken byla provedena mechanická zkouška tříbodovým ohybem a rázová zkouška v ohybu. Zkoušky byly vykonány na strojích v laboratoři Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

8.1 Zkouška tříbodovým ohybem (ČSN EN ISO 178)

Vodním paprskem pomocí DWG souboru byla z vytvrzených desek o větším rozměru vyřezána zkušební tělíska o rozměru 100 x 15 x 2 mm. Reálná tloušťka tělísek se pohybovala kolem 2,3 mm. Zkouška byla na zkušebním stroji Zwick 1456. Rozpětí podpěr bylo nastaveno na 80 mm.



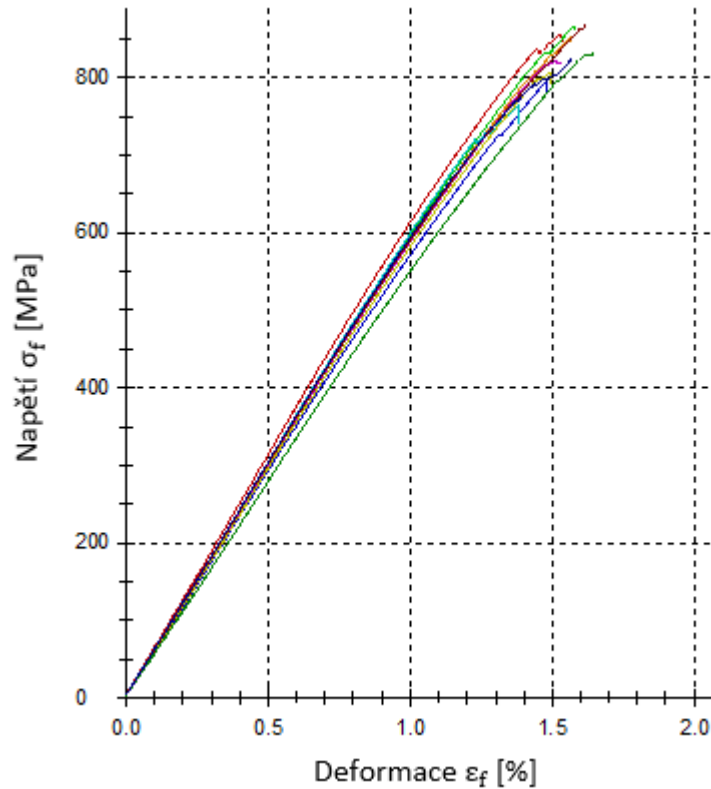
Obrázek 36 Realizace zkoušky tříbodovým ohybem



Obrázek 37 Tělíska po provedení zkoušky tříbodovým ohybem

8.1.1 Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem

Výsledky tělísek Typu I



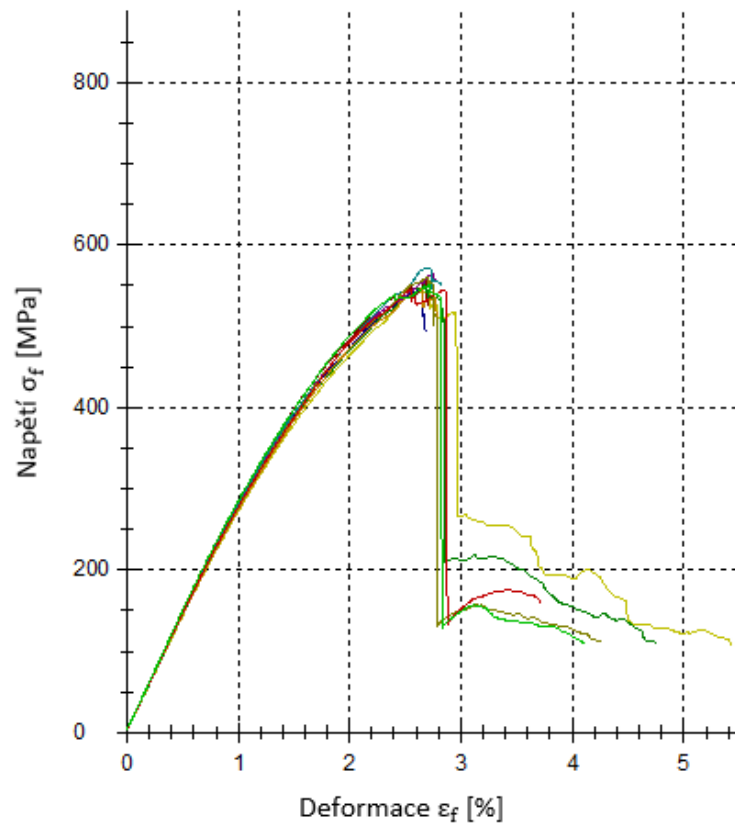
Obrázek 38 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska Typu I

Tabulka 4 Naměřená a zpracovaná data ze zkoušky tříbodovým ohybem tělísek Typu I

n	E_f [MPa]	σ_f [MPa]	W [Nmm]	S_f [mm]	ϵ_f [%]
1	61662	856	2490,0	8,2	1,54
2	59710	865	2563,2	8,4	1,58
3	57805	794	2181,9	7,9	1,48
4	59212	853	2502,5	8,3	1,56
5	59145	823	2346,6	8,1	1,52
6	60146	764	1994,4	7,4	1,39
7	58175	808	2260,4	8	1,50
8	59220	867	2663,1	8,6	1,61
9	54804	832	2563,9	8,7	1,63
10	59857	826	2525,6	8,4	1,58
\bar{x}	58974	829	2409,2	8,2	1,54
s	1809	33	208,4	0,4	0,07
v [%]	3	4	8,7	4,9	4,60

Na obrázku 38 lze sledovat průběh měření a z Tabulky 4 naměřená data pro tělíska Typu I. Aritmetický průměr souboru stanovený z 10 měření se směrodatnou odchylkou činí pro modul pružnosti v ohybu $E_f 58974 \pm 1809$ MPa, pevnost v ohybu $\sigma_f 829 \pm 33$ MPa, pro vykonanou práci $W 2409,2 \pm 208,4$ Nmm a deformaci ohybem $\varepsilon_f 1,54 \pm 0,07$ %.

Výsledky tělísek Typu II



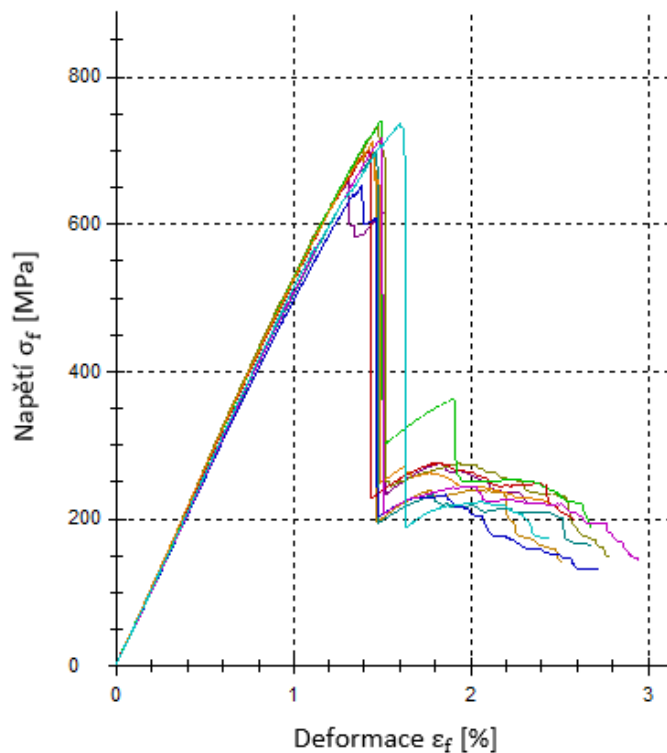
Obrázek 39 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska Typu II

Tabulka 5 Naměřená a zpracovaná data ze zkoušky tříbodovým ohybem tělísek Typu II

n	E_f [MPa]	σ_f [MPa]	W [Nmm]	S_f [mm]	ϵ_f [%]
1	27950	542	3001,2	14,2	2,66
2	29149	557	3181,9	14,4	2,70
3	28236	551	3074,0	14,3	2,68
4	28579	546	3046,5	14,1	2,64
5	28289	548	3026,9	14,2	2,66
6	29215	565	3278,0	14,7	2,76
7	29234	572	3163,2	14,3	2,68
8	28282	561	3155,5	14,4	2,70
9	28691	545	2856,0	13,6	2,55
10	29334	551	3241,5	14,5	2,72
\bar{x}	28696	554	3102,5	14,3	2,68
s	505	10	126,3	0,3	0,05
v [%]	2	2	4,1	2,1	2,0

Na obrázku 39 lze vidět průběh měření a z Tabulky 5 získaná data pro tělíska Typu II. Aritmetický průměr souboru stanovený z 10 měření se směrodatnou odchylkou činí pro modul pružnosti v ohybu E_f 28696 ± 505 MPa, pevnost v ohybu σ_f 554 ± 10 MPa, pro vykonanou práci W $3102,5 \pm 126,3$ Nmm a deformaci ohybem ϵ_f $2,68 \pm 0,05$ %.

Výsledky tělísek typu III



Obrázek 40 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska Typu III

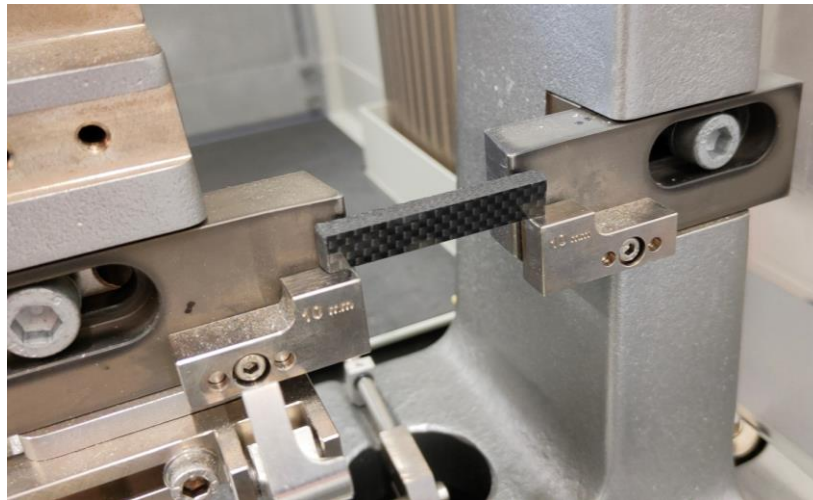
Tabulka 6 Naměřená a zpracovaná data ze zkoušky třibodovým ohybem tělísek Typu III

n	E_f [MPa]	σ_f [MPa]	W [Nmm]	S_f [mm]	ϵ_f [%]
1	52889	703	1795,0	7,4	1,39
2	52705	659	1587,5	7	1,31
3	50555	700	1914,0	7,8	1,46
4	53342	733	2019,3	7,9	1,48
5	52280	700	1855,0	7,6	1,43
6	52935	741	2057,3	8	1,50
7	50226	652	1682,0	7,4	1,39
8	53251	712	1929,4	7,7	1,44
9	50782	717	1994,8	8	1,50
10	51209	737	2257,5	8,5	1,59
\bar{x}	52017	706	1909,2	7,7	1,45
s	1199	30	192,7	0,4	0,08
v [%]	2	4	10,1	5,5	5,40

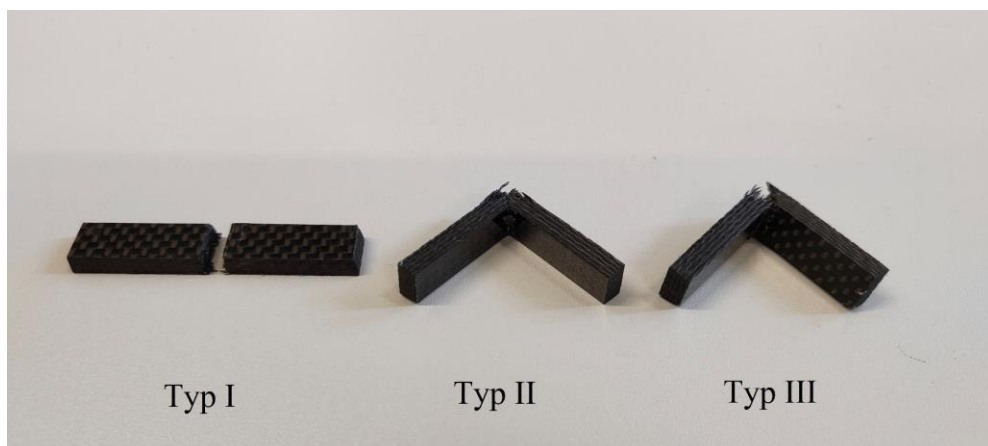
Na obrázku 40 lze pozorovat průběh měření a z Tabulky 6 naměřená data pro tělíška Typu III. Aritmetický průměr souboru stanovený z 10 měření se směrodatnou odchylkou činí pro modul pružnosti v ohybu E_f 52017 \pm 1199 MPa, pevnost v ohybu σ_f 706 \pm 30 MPa, pro vykonanou práci W 1909,2 \pm 197,7 Nmm a deformaci ohybem ϵ_f 1,45 \pm 0,08 %.

8.2 Rázová zkouška v ohybu (ČSN EN ISO 179-1)

Vodním paprskem pomocí DWG souboru byla z vytvrzených desek o menším rozměru vyřezána zkušební tělíska o rozměru 55 x 10 x 4 mm. Reálná tloušťka tělísek se pohybovala kolem 4,7 mm. Zkouška byla provedena na zkušebním stroji Zwick HIT25P. Rozpětí podpěr bylo nastaveno na 40 mm. Měření se provádělo rázem kolmo na laminy (na širší stranu) a tělíska nebylo potřeba opatřit vrubem z důvodu vysoké křehkosti uhlíkových kompozitů.



*Obrázek 41 Ustavení zkušebního tělíska před měřením
rázové houževnatosti*



Obrázek 42 Zkušební tělíska po provedení rázové zkoušky v ohybu

8.2.1 Výsledky rázové zkoušky v ohybu

Výsledky tělísek Typu I

Tabulka 7 Naměřená a zpracovaná data z rázové zkoušky v ohybu tělísek Typu I

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}	s	v [%]
W_B [J]	2,99	2,75	3,19	2,97	2,89	2,82	3,04	2,81	2,82	2,83	2,91	0,13	4,57
a_{cU} [kJ/m ²]	60,56	55,82	64,60	60,20	58,55	57,22	61,53	56,99	57,04	57,40	58,99	2,70	4,57

V Tabulce 7 lze vidět naměřené hodnoty tělísek Typu I. Hodnota aritmetického průměru se směrodatnou odchylkou stanovená ze souboru z 10 měření činí pro rázovou houževnatost Charpy a_{cU} $58,99 \pm 2,70$ kJ/m².

Výsledky tělísek Typu II

Tabulka 8 Naměřená a zpracovaná data z rázové zkoušky v ohybu tělísek Typu II

n	1	2	3	4	5	6	\bar{x}	s	v [%]
W_B [J]	5,30	5,53	6,15	5,57	5,36	5,13	5,51	0,35	6,42
a_{cU} [kJ/m ²]	107,43	112	124,7	112,8	108,66	103,92	111,58	7,19	6,44

V Tabulce 8 můžeme vidět naměřené hodnoty tělísek Typu II. Získaná data byla naměřená pouze ze 6 tělísek z důvodu vady na vytvrzené desce způsobené posunutím vakuovacího ventilu na povrch desky během vytvrzování. Hodnota aritmetického průměru se směrodatnou odchylkou činí pro rázovou houževnatost Charpy a_{cU} $111,58 \pm 7,19$ kJ/m².

Výsledky tělísek Typu III

Tabulka 9 Naměřená a zpracovaná data z rázové zkoušky v ohybu tělísek Typu III

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}	s	v [%]
W_B [J]	5,07	4,85	5,11	5,25	5,37	5,79	5,73	5,20	4,80	5,78	5,29	0,37	6,93
a_{cU} [kJ/m ²]	102,69	98,21	103,50	106,46	108,89	117,24	116,16	105,35	97,29	117,03	107,28	7,43	6,93

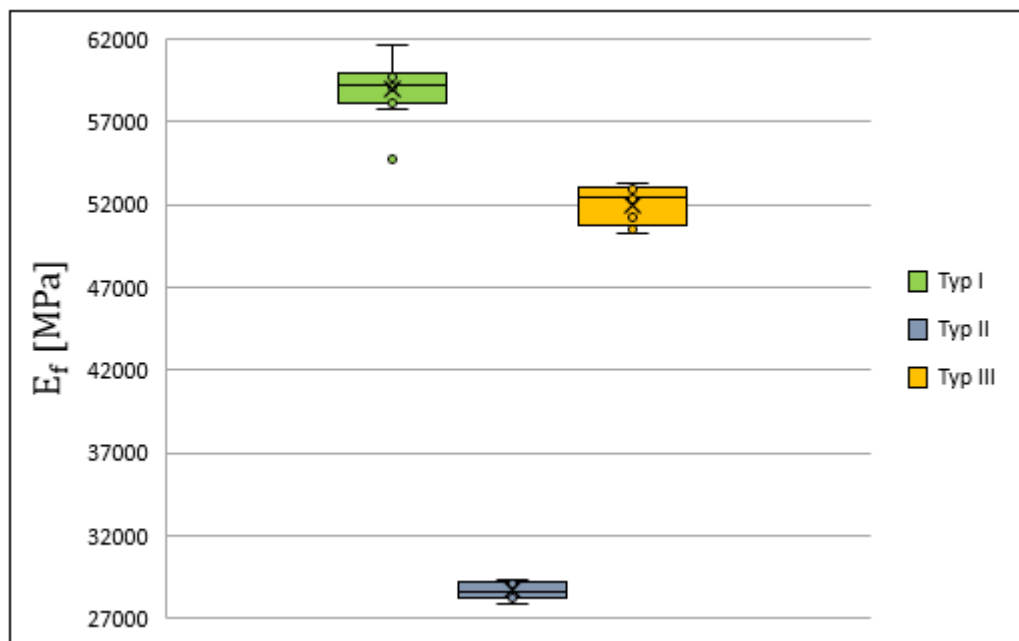
V Tabulce 9 lze vidět naměřené hodnoty tělísek Typu III. Hodnota aritmetického průměru se směrodatnou odchylkou stanovená ze souboru z 10 měření činí pro rázovou houževnatost Charpy a_{cU} $107,28 \pm 7,43$ kJ/m².

9 POROVNÁNÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Porovnání výsledků bylo provedeno pomocí krabicových diagramů, které zobrazují data pomocí jejich kvartilů. Spodní část obdélníku značí 1. kvartil a horní část 3. kvartil. Křížkem je označen aritmetický průměr a vodorovnou čarou uvnitř obdélníku medián. Linie vycházející z obdélníku, tzv. vousy, značí minimální a maximální hodnotu souboru dat. Odlehlé hodnoty jsou pak zobrazeny jako jednotlivé body.

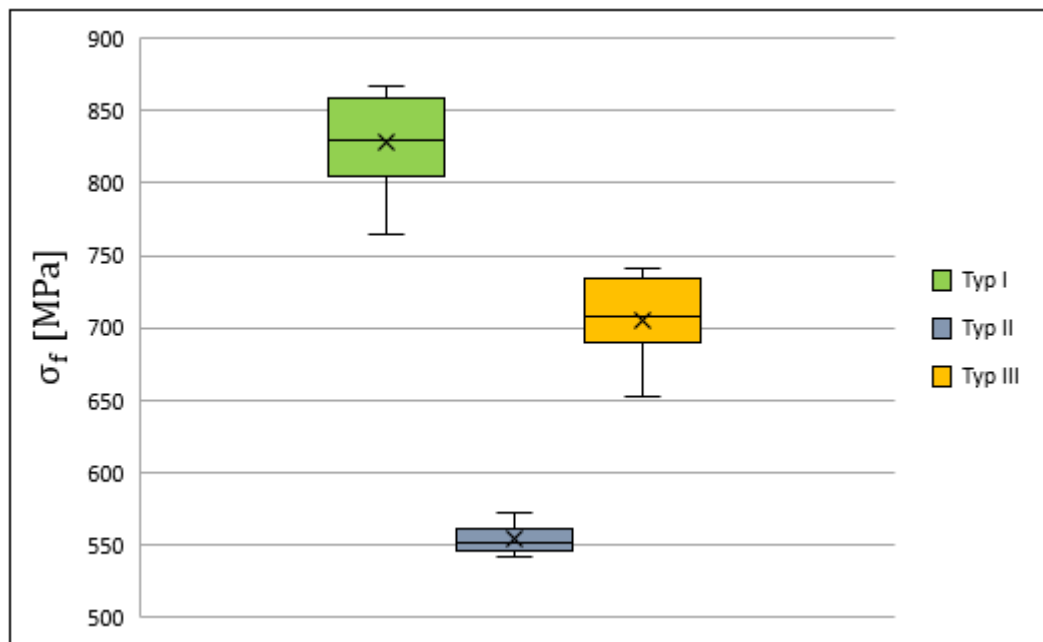
9.1 Porovnání výsledků zkoušky třibodovým ohybem

Modul pružnosti v ohybu



Obrázek 43 Krabicové diagramy znázorňující moduly pružnosti v ohybu

Na Obrázku 43 lze vidět, že nejvyšší modul pružnosti v ohybu vykazovala tělíska Typu I. Dále si u tělísek Typu I můžeme všimnout odlehlé hodnoty, která mohla být způsobena vadou v tělísku nebo nesprávným ustavením tělíska na podpěrách. Tělíska Typu III měla lehce nižší modul pružnosti v ohybu než tělíska Typu I. Nejnižší modul pružnosti vykazovala tělíska Typu II, které výrazně zaostávala před tělisky Typu I a Typu III.

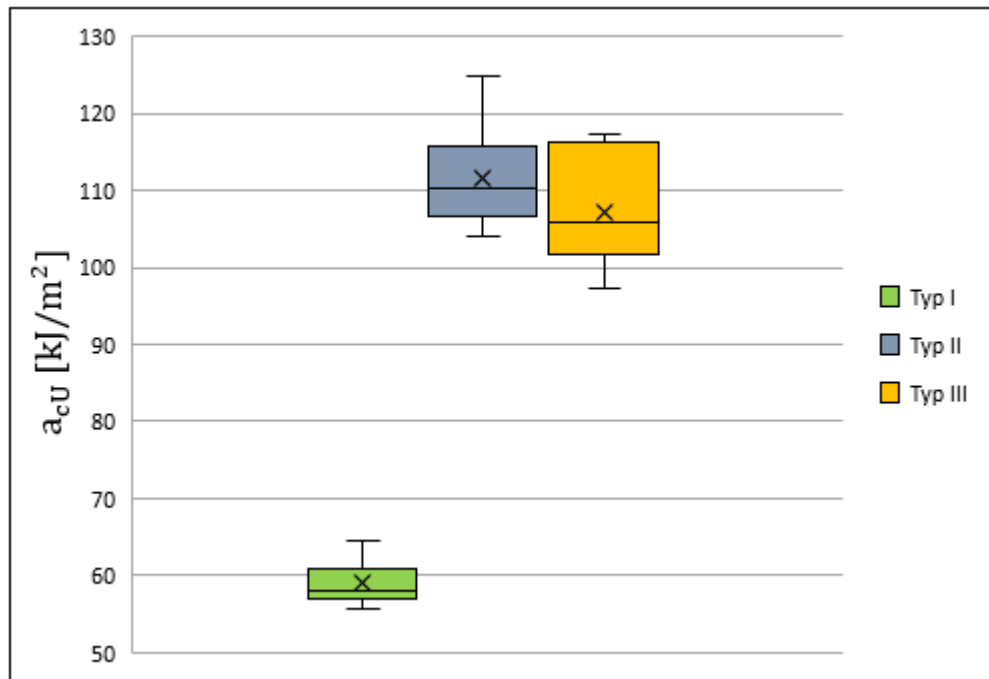
Pevnost v ohybu

Obrázek 44 Krabicové diagramy znázorňující pevnost v ohybu

Na Obrázku 44 je patrné, že výsledky porovnání pevnosti v ohybu jednotlivých typů tělísek jsou takřka totožné s výsledky modulu pružnosti v ohybu. To znamená, že nejvyšší pevnosti v ohybu dosáhla tělíska Typu I. Za nimi byla tělíska Typu III a s nejnižší pevností v ohybu byla opět tělíska Typu II.

9.2 Porovnání výsledků rázové zkoušky v ohybu

Rázová houževnatost Charpy



Obrázek 45 Krabicové diagramy znázorňující rázovou houževnatost Charpy

Z Obrázku 45 je zřejmé, že hodnoty rázové houževnatosti Charpy u tělísek Typu II a Typu III jsou si poměrně blízké. Lze však vidět, že aritmetický průměr hodnot mají vyšší tělíska typu II. Naopak nejnižší hodnoty rázové houževnatosti Charpy měla tělíska Typu I.

9.3 Diskuze výsledků

Po vyhodnocení výsledků je možné říci, že ani jeden typ tělísek neměl nejlepší vlastnosti ve všech provedených zkouškách. Z tohoto důvodu by se musel při volbě orientace a skladby vrstev kompozitu pro výrobu dílu volit jistý kompromis. Jako nejlepší volbou se zdá orientace vrstev, kterou měla tělíska Typu III. Tento typ dosahoval spolu s tělísky Typu II nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti Charpy. Tělíska Typu II měla nejnižší modul pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu. Tělíska Typu III měla také poměrně uspokojivé hodnoty modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu. Tělíska Typu I měla hodnoty modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu nejvyšší, ale v rázové houževnatosti Charpy výrazně zaostávala.

Tabulka 10 Mechanické vlastnosti tělísek vědeckých prací

Tělíška	Aritmetický průměr hodnot			Zpracovatelská technologie
	E_f [MPa]	σ_f [MPa]	a_{cU} [kJ/m ²]	
1	29755	346	-	Ruční laminování
2	27200	392	90,8	Autoklávové lisování
Typ I	58974	829	58,99	Autoklávové lisování

V práci [42] byly testovány mechanické vlastnosti tělísek z uhlíkové plátňové tkaniny sycené polyuretan-metakrylátovou pryskyřicí (viz. Tabulka 11, tělíško 1). Vyráběny byly metodou ruční laminace pod vakuovou fólií. S tělíškem Typu I byly taktéž vrstvy pokládány ve směru vláken 0°/90°. Lze si všimnout že hodnoty modulu pružnosti v ohybu E_f a pevnosti v ohybu σ_f má tělíško Typu I dvojnásobné. Důvodem zřejmě bude, že byl pro výrobu tělíška Typu I použit uhlíkový prepreg, který obecně má větší procentuální obsah výztuže, než u ručně laminovaných výrobků, a byl vyráběn metodou lisování v autoklávu. Rázová houževnatost Charpy a_{cU} u tělíška 1 měřena nebyla, ale lze usoudit, že by měla taktéž nižší hodnoty s porovnáním s Typem I.

Při porovnání s prací [43], kde byly vyráběny tělíška ze skelného prepregu a vytvrzovány v autoklávu (viz. Tabulka 11, tělíško 2), si lze všimnout, že tělíško Typu I má více jak dvojnásobné hodnoty modulu pružnosti v ohybu E_f a pevnosti v ohybu σ_f . Avšak hodnoty rázové houževnatosti Charpy a_{cU} jsou nižší. Důvodem je, že uhlíková vlákna jsou sice pevnější než skelná, ale jsou také křehčí.

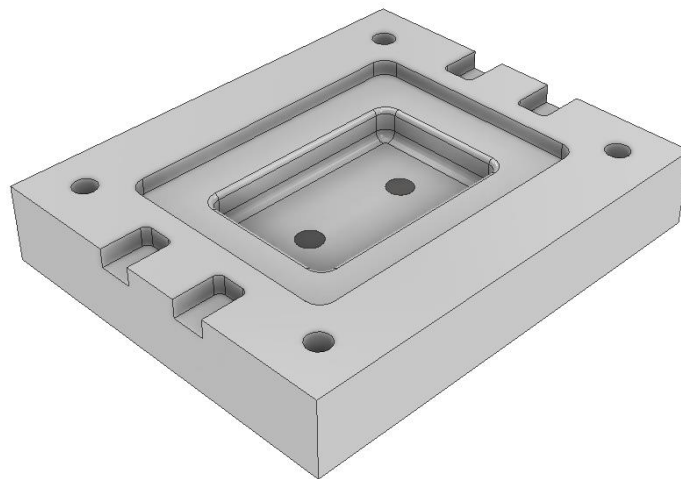
Závěrem lze říci, že pro výrobu dílů, kde jsou vyžadovány výborné mechanické vlastnosti je metoda autoklávového lisování vhodná. Je však nutné vybrat správný výchozí materiál a skladbu jednotlivých vrstev materiálu s ohledem na druh zatížení výrobku.

10 VÝROBA PROTOTYPU KRYTKY

Po porovnání mechanických vlastností navržených tělísek s rozdílnou orientací vrstev byl proveden návrh vytvrzovacího přípravku. Dále byl vytvořen rámcový technologický postup výroby krytky a samotná výroba prototypu. Materiál byl zvolen stejný jako v předchozí výrobě kompozitních desek. Pokládání vrstev prepregů bylo prováděno dle tělísek Typu III.

10.1 Návrh vytvrzovacího přípravku

Přípravek byl navržen dle výkresové dokumentace krytky (viz. Příloha P III). Zvoleným materiálem byl dural s označením EN AW 2017, aby přípravek odolával vysokým teplotám a tlakům v autoklávu během vytvrzování a byl lehký pro manipulaci. Vyráběl se na pětiosé frézce. Následně byl povrch dutiny vytvrzovacího přípravku broušen pro lepší jakost ploch.


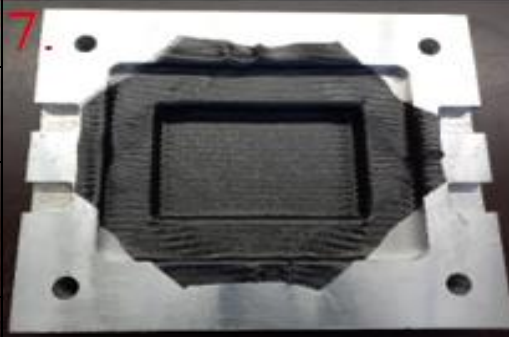


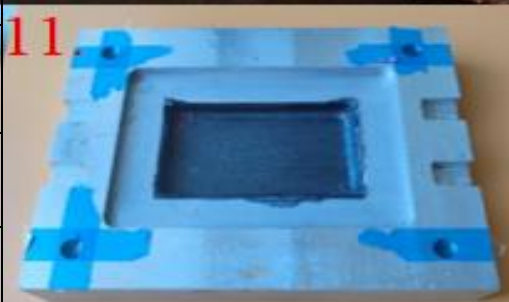


Obrázek 46 3D model vytvrzovacího přípravku

10.2 Rámcový technologický postup

Jedná se o posloupnost operací, jakými bude díl vyroben. V příloženém technologickém postupu se nachází jednotlivé operace, použité pomůcky a nástroje, a také je přidána fotodokumentace.

Tabulka 11 Rámcový technologický postup výroby krytky

č. o.	Operace	Pomůcky, nástroje	Fotodokumentace
1.	Vyjmutí prepregu z mrazáku 1 den před pokládáním	-	
2.	Čištění přípravku	Bavlněný hadřík, líh	
3.	Aplikace plniče mikropórů	Plnič mikropórů, papírový ubrousek	
4.	Separace přípravku	Separátor, papírový ubrousek	
5.	Kontrola správnosti separace	Lepicí páska	
6.	Nastříhání prepregů (podle nástřihového plánu)	Nůžky, pravítko, metr	
7.	Pokládání 1. vrstvy prepregu	Přítlačný váleček, speciální pomůcky	
8.	Debulking	Aplikování vakua	
9.	Pokládání 2.-9. vrstvy prepregu	Přítlačný váleček, speciální pomůcky	
10.	Zavakuování	SeparáčnÍ fólie, odsávací rohož, vakuovací fólie, těsnící páska	
11.	Vytvzení v autoklávu	Autokláv, vakuovací systém	
12.	Odformování	Stlačený vzduch, speciální pomůcky	
13.	Ořezání dílu	Ořezávací robot, kotoučová pila	
14.	Leštění dílu	Lešticí pasta, textilie	
15.	Lakování dílu	Lakovací pistol	

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byl návrh a výroba kompozitní krytky bojového vozidla pomocí technologie autoklávového lisování.

V teoretické části bakalářské práce bylo popsáno základní rozdělení kompozitních materiálů, druhy vyztužujících vláken a druhy matric. Rovněž jsou popsány prepregy a způsoby jejich výroby. Další kapitola se zabývá zpracovatelskými technologiemi. Jsou zde popsány podstaty jednotlivých technologií, jejich výhody a nevýhody. Dále se zabývá využitím kompozitních materiálů ve vojenském průmyslu. Na závěr byly vysvětleny mechanické zkoušky tříbodovým ohybem a rázové houževnatosti v ohybu, které byly využity v praktické části.

Praktická část se zabývala výrobou kompozitních desek pro jednotlivá zkušební tělíska. Pro výrobu byl vybrán uhlíkový tkaninový prepreg – ozn. GG 204P IMP503Z vhodný pro vytvrzování v autoklávu. Dále byly zvoleny tři typy materiálové skladby jednotlivých tělísek. Všechny vrstvy prepregů v Typu I měli shodný směr vláken $0^\circ/90^\circ$. V Typu II byly první dvě vrstvy pod úhlem vláken $\pm 45^\circ$ a následně se střídaly s vrstvami pod úhlem $0^\circ/90^\circ$. V poslední Typu III měly první dvě vrstvy směr vláken $0^\circ/90^\circ$ a střídaly se s vrstvami pod úhlem $\pm 45^\circ$. Poté se vypočítal potřebný počet vrstev prepregů. Následně byl popsán postup výroby desek od přípravy formy po vytvrzení v autoklávu. Po vyrobení desek se tělíska vyřezala pomocí vodního paprsku.

Dále byla tělíska podrobena mechanickými zkouškami. Jednalo se o statickou zkoušku tříbodovým ohybem a rázovou zkoušku v ohybu. Získaná data byla vyhodnocena a porovnána pomocí krabicových diagramů. Bylo zjištěno, že nejlepšími zjištěnými mechanickými vlastnostmi se vykazovala tělíska Typu III.

Posledním krokem bakalářské práce byla výroba prototypového dílu krytky. Nejprve se začalo s návrhem a vyrobením vytvrzovacího přípravku podle výkresové dokumentace dílu. Dále byl zvolen vhodný technologický postup, podle kterého se provedla samostatná výroba prototypu. Zvolen byl stejný materiál jako v předchozí výrobě kompozitních desek. Pokládání vrstev prepregů bylo prováděno dle tělísek Typu III.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [2] CAMPBELL, F.C. *Structural Composite Materials* [online]. ASM International, 2010. ISBN 978-1-61344-124-4.
- [3] STAAB, G. H. *Laminar composites*. Elsevier, 1999. ISBN 978-0-7506-7124-8.
- [4] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>
- [5] *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2022-2-5] Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/podzim2018/TI1008/um/11_kompozity.pdf
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] GIBSON, R. F.. *Principles of Composite Material Mechanics*. Vydání 4. CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4987-2072-4.
- [8] SPARKS, E. *Advances in Military Textiles and Personal Equipment*. Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-1-84569-699-3.
- [9] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [10] *Kompozitní materiály* [online]. Praha [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>
- [11] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [12] LENGSELD, H. et al. *Composite Technology - Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*. Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-599-9.
- [13] POMÁZI, Ákos a Andrea TOLDY. Multifunctional Gelcoats for Fiber Reinforced Composites. *Coatings*. 2019, 9(3). ISSN 2079-6412. Dostupné z: [doi:10.3390/coatings9030173](https://doi.org/10.3390/coatings9030173)

- [14] MEDEIROS, Roberto José de, Selma Hissae Shimura da NÓBREGA a Eve Maria Freire de AQUINO. Failure Theories on Carbon/Kevlar Hybrid Fabric Based Composite Laminate: Notch and Anisotropy Effects. *Materials Research*. 2019, [online]. 22(3) [cit. 2022-03-29]. ISSN 1980-5373. Dostupné z: doi:10.1590/1980-5373-mr-2018-0099
- [15] Technologie výroby kompozitů. *Havel-composites.com* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf>
- [16] CAMPBELL, F. C. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. Elsevier, 2004. ISBN 978-1-85617-415-2.
- [17] Vacuum Infusion in Ship Building. *Toshniwal.net*. 2020, [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.toshniwal.net/blog/Vacuum-Moulding/>
- [18] GANDHI, U. N. et al. Hanser Publishers, 2020. ISBN 978-1-56990-694-1.
- [19] MALLICK, P. K. a Seymour NEWMAN, ed. *Composite materials technology: processes and properties*. Mnich: Hanser Publishers, c1990, 399 s. ISBN 3446156844.
- [20] *Transfer molding* [online]. [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: https://www.wikiwand.com/en/Transfer_molding
- [21] SHRIGANDHI, Ganesh D. a Basavaraj S. KOTHAVALE, 2021. Biodegradable composites for filament winding process. *Materials Today: Proceedings* [online]. 42, 2762-2768 [cit. 2022-04-03]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.12.718
- [22] *USE OF COMPOSITE MATERIALS IN DEFENCE* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/applications/defence>
- [23] *COMPOSITES IN DEFENCE* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://defproac.com/?p=6182>
- [24] *A Review of the Global Composites Market and Turkish Composites Market* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.reinforcer.com/en/category/detail/A-Review-of-the-Global-Composites-Market-and-Turkish-Composites-Market/61/350/0>

- [25] JAWAID, Mohammad a Mohamed THARIQ. *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. Elsevier, 2018. ISBN 978-0-08-102131-6.
- [26] BIELAWSKI, Radosław. COMPOSITE MATERIALS IN MILITARY AVIATION AND SELECTED PROBLEMS WITH IMPLEMENTATION. *Review of the Air Force Academy*. 2017, 15(1), 11-16. ISSN 18429238. Dostupné z: doi:10.19062/1842-9238.2017.15.1.2
- [27] *51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 12 April 2010 - 15 April 2010, Orlando, Florida, 2010*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. ISBN 978-1-60086-961-7.
- [28] *THE AIRCRAFT* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.eurofighter.com/the-aircraft>
- [29] KONIECZNY, Jarosław a Krzysztof LABISZ. MATERIALS USED IN THE COMBAT AVIATION CONSTRUCTION. *Transport Problems*. 2021 [online]. 16(2), 5-18 [cit. 2022-04-09]. ISSN 2300-861X. Dostupné z: doi:10.21307/tp-2021-019
- [30] ROESELER, William G., Branko SARH a Max U. KISMARTON. *COMPOSITE STRUCTURES: THE FIRST 100 YEARS* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM16proceedings/contents/pdf/MonA/MoAM1-01sp_roeselerw228184p.pdf
- [31] *Everything About Drone Airframes And Their Lightweight, Composite Materials* [online], 2019. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://roboticsbiz.com/everything-about-uav-airframes-and-their-lightweight-composite-materials/>
- [32] *MQ-4C Triton Broad Area Maritime Surveillance (BAMS) UAS* [online], 2020. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.naval-technology.com/projects/mq-4c-triton-bams-uas-us/>
- [33] AKELLA, Kiran a Niranjan NAIK. *Composite armour - A review* [online]. 297-313 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283735712_Composite_armour_-_A_review

- [34] WICKERT, Matthias a Manfred SALK. *Ballistics 2013 - 27th International Symposium on Ballistics*. DEStech Publications, 2013. ISBN 978-1-60595-106-5.
- [35] MOURITZ, A.P et al. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structures*. 2001 [online]. **53**(1), 21-42 [cit. 2022-04-16]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/S0263-8223(00)00175-6
- [36] *Lodě* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.wrightys-warships.com/>
- [37] DIMENSKI, Dimko a Vineta SREBRENKOSKA. *Advanced prepreg ballistic composites for military helmets* [online]. 717-721 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/35337928.pdf>
- [38] *Neprůstřelná vesta a přilba* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <http://www.argun.cz/produkty-hlavni>
- [39] DRIML, Bohuslav. *Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
- [40] ČSN EN ISO 178, *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011
- [41] ČSN EN ISO 179, *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*, Český normalizační institut, 1998
- [42] BODLÁK, Lukáš. *Vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2016, 105 s. (100 512 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/37987>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Rusnáková, Soňa.
- [43] ŽALEK, Tomáš. *Vývoj technologie lisování kompozitu pro automobilový průmysl*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015, 95 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/33746>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Rusnáková, Soňa.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

b	Šířka zkušebního tělesa
ČSN	Česká technická norma
DWG	Formát souborů programu AutoCAD
EN	Evropská norma
E_f	Modul pružnosti v ohybu
F	Síla
G	Tíhová síla kladiva
H	Počáteční poloha kladiva
h	Konečná poloha kladiva
ISO	Mezinárodní norma
L	Rozpětí
m_s	Plošná hmotnost
n	Počet vzorků
RTM	Resin transfer molding
S_f	Průhyb při maximální síle
s	Směrodatná odchylka
T	Tloušťka výrobku
W	Vykonaná práce
W_B	Nárazová práce
α_{cU}	Rázová houževnatost Charpy
σ_f	Pevnost v ohybu
ε_f	Deformace ohybem
\bar{x}	Aritmetický průměr
v	Variační koeficient

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Rozdělení dle orientace a geometrie výztuže [4]	11
Obrázek 2 Vlákenné a částicové kompozity [11]	12
Obrázek 3 Aramid-uhlíková hybridní tkanina [14]	14
Obrázek 4 Jednosměrný a tkaninový prepreg [12]	17
Obrázek 5 Vzory tkanin [12]	18
Obrázek 6 Schéma výroby pryskyřicové fólie [12]	19
Obrázek 7 Schéma impregnace výztuže [12]	20
Obrázek 8 Schéma impregnace pomocí rozpouštědla [12]	21
Obrázek 9 Schéma ručního kladení [13]	22
Obrázek 10 Schéma vakuové infuze [17]	23
Obrázek 11 Technologie RTM [20]	25
Obrázek 12 Schéma autoklávového lisování [7]	26
Obrázek 13 Schéma vytvrzovacího cyklu [16]	27
Obrázek 14 Schéma navíjení [21]	28
Obrázek 15 Světový trh kompozitů z hlediska hodnoty v roce 2016 (vlevo) a rozdělení aplikací ve vojenském průmyslu (vpravo) [23,24]	29
Obrázek 16 Eurofighter Typhoon [28]	31
Obrázek 17 Materiály použité v bombardéru B-2 [29]	31
Obrázek 18 Boeing CH-47 Chinook [30]	32
Obrázek 19 Bezpilotní letoun MQ-4C Triton [32]	33
Obrázek 20 Keramicko-kompozitní pancíř [33]	33
Obrázek 21 Obrněné vozidlo Foxhound [34]	34
Obrázek 22 Hlídkové plavidlo třídy Skjold [36]	35
Obrázek 23 Korveta třídy Visby [36]	36
Obrázek 24 Neprůstřelná vesta a přilba od českého výrobce ARGUN [38]	37
Obrázek 25 Schéma zkoušky tříbodovým ohybem [40]	39
Obrázek 26 Schéma rázové zkoušky v ohybu [39]	41
Obrázek 27 Názorná skladba vrstev jednotlivých tělísek	44
Obrázek 28 Role prepregu (vlevo) a nastříhané prepregy (vpravo)	46
Obrázek 29 Schématické znázornění kladení prepregů	46
Obrázek 30 Navrstvené prepregy	47
Obrázek 31 Prepregy překryté separační fólií (nahore) a odsávací rohoží (dole)	47
Obrázek 32 Zavakuovaný výrobek	48
Obrázek 33 Průběh teploty, tlaku a vakua během vytvrzovacího cyklu	48

Obrázek 34 Autokláv	49
Obrázek 35 Desky po vytvrzení v autoklávu.....	49
Obrázek 36 Realizace zkoušky třibodovým ohybem	50
Obrázek 37 Tělíska po provedení zkoušky třibodovým ohybem	50
Obrázek 38 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska Typu I	51
Obrázek 39 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska Typu II	52
Obrázek 40 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci pro tělíska Typu III.....	53
Obrázek 41 Ustavení zkušební tělíska před měřením.....	55
Obrázek 42 Zkušební tělíska po provedení rázové zkoušky v ohybu.....	55
Obrázek 43 Krabicové diagramy znázorňující moduly pružnosti v ohybu	57
Obrázek 44 Krabicové diagramy znázorňující pevnost v ohybu.....	58
Obrázek 45 Krabicové diagramy znázorňující rázovou houževnatost Charpy.....	59
Obrázek 46 3D model vytvrzovacího přípravku.....	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [1]	15
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti vybraných matric [1,7].....	16
Tabulka 3 Použití kompozitů v leteckém průmyslu [27].....	30
Tabulka 4 Naměřená a zpracovaná data ze zkoušky tříbodovým ohybem tělísek Typu I...51	
Tabulka 5 Naměřená a zpracovaná data ze zkoušky tříbodovým ohybem tělísek Typu II .53	
Tabulka 6 Naměřená a zpracovaná data ze zkoušky tříbodovým ohybem tělísek Typu III 54	
Tabulka 7 Naměřená a zpracovaná data z rázové zkoušky v ohybu tělísek Typu I	56
Tabulka 8 Naměřená a zpracovaná data z rázové zkoušky v ohybu tělísek Typu II	56
Tabulka 9 Naměřená a zpracovaná data z rázové zkoušky v ohybu tělísek Typu III.....	56
Tabulka 10 Mechanické vlastnosti tělísek vědeckých prací.....	60
Tabulka 11 Rámcový technologický postup výroby krytky	62

SEZNAM PŘÍLOH

Tištěné, součástí textu práce:

Příloha P I: Materiálový list matrice

Příloha P II: Materiálový list tkaniny

Příloha P III: Výkres výrobku

Příloha P IV: Výkres přípravku

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE



Via Tiepolo, 19 20022 CASTANO PRIMO (MI) Tel. +39 0331 880564 www.impregnatex.it

MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

DESCRIPTION

Modified epoxy resin IMP503Z is suitable for prepegging of carbon/glass and aramid fabrics. IMP503Z with his high transparency is suitable for "carbon look" composite part where high cosmetical requirements are needed. IMP503Z can be used with carbon or metallic mould with the standard technologies: Hot Press, Wrapping, Autoclave and Vacuum Bag.

BENEFITS AND FEATURES

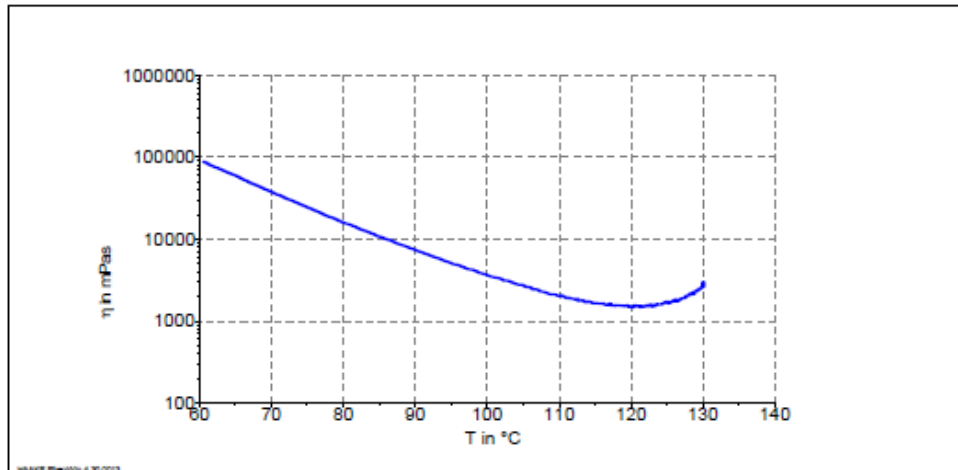
- Field of applications: automotive, sporting goods, marine, industrial
- Different curing cycles are possible
- Good mechanical properties
- UV resistance improved

RESIN PROPERTIES

TYPE		TOUGHENED
Cured resin density	gr/cm ³	1,15 ÷ 1,25
Gel Time at 125 °C (257 °F)	minuti	6'-9'
Gel Time at 110 °C (221 °F)	minuti	20 ÷ 26
TACK		MEDIUM/HIGH
Resin VOC on prepreg	%	< 1
Tg fully cured (Tan Delta DMA)	°C (°F)	120 (248)
Shelf life at room temperature (23 °C)	weeks	5
Shelf Life (-18°C approx)	years	1

VISCOSITY VS TEMPERATURE BEHAVIOUR

The plot under depicted below is performed with cone-plate rehometer starting from 60°C until viscosity kick off. Parameters: frequency 0.2 Hz and heating rate 3 °C/ min.



CURING CYCLES SUGGESTED

TEMPERATURES	TIME	Tg (TanDelta DMA, °C)
110	2h	120-125
125	1h	120-125

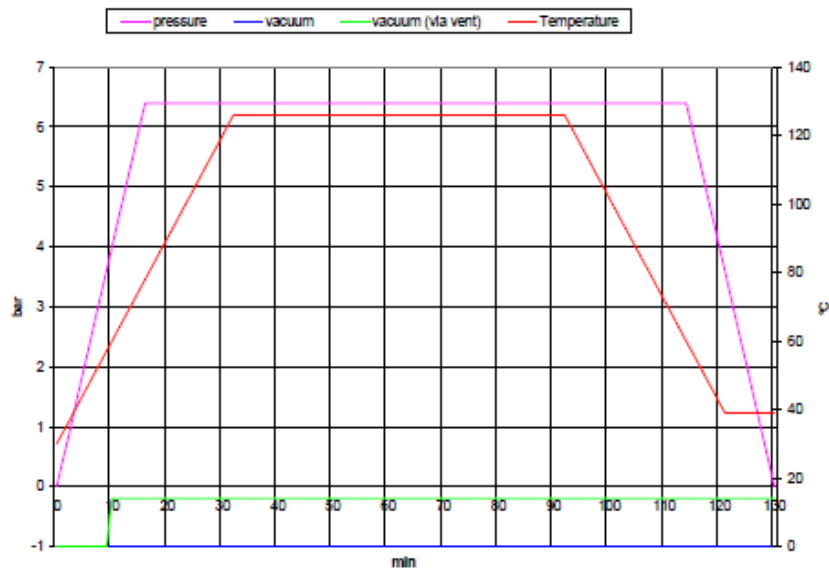
PROCESS DESCRIPTIONS

Autoclave:

125°C cycle

1. After making the bag put it in the autoclave and apply -0.9 ÷ -1.0 bar vacuum
2. Heat to 125°C at 1-3 min/°C rate
3. Apply the pressure, with quick increment slope, in order to reach the maximum possible value (ex. 4÷7 bar) before 80°C. Reached the process pressure is possible reduce the vacuum value to -0.2 bar (via vent). This option depend on the evaluations of the autoclave driver.
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 60°C under pressure, then release the pressure
6. At room temperature get the part out of the autoclave

AUTOCLAVE CYCLE



Hot Press:

125°C cycle:

1. Put the prepreg material into the mould at room temperature and close the mould at 1Bar pressure
2. Heat to 125°C a 1-3°C/min (3-5°C/min for small part if possible)
3. When 100-110°C is reached apply 2-3 Bar or over if the flow can be controlled
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 40-50°C under pressure and pull the part out

IMP503 Z is a reactive epoxy formulation, too high heat up rate and/or too high temperature dwell can give out of control temperature inside the stack lay up when thick laminate are processed (thickness over 1 cm)

These autoclave and hot press cycle are only suggestions based on Impregmatex Compositi experiences and are not absolute way to process properly the material. Different equipments may need different curing cycle conditions.

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

The mechanical data below were performed on laminate cured by hot press technology at 125°C curing cycle (see above).

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTMD790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²]	ILSS ASTM 2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
GG630T	730	57	800	56	64
GG428T	800	52	-	64	59
GG204T-V (1)	800	54	-	64	59
GG205T	810	55	750	68	58
GG240T	800	54	760	65	56
GG380T	800	55	730	64	62
GG90P	655	52	-	70	65
GG204P	810	53	-	66	59
CX400	938	56	-	54	62 (provini ricavati in direzione +45°)
GG800T	822	60	-	52	64
GG285T4	805	51	-	61	65
VV290T	630	27	-	57	64.8
VV380	710	23	-	64	60

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTM D790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²]	ILSS ASTM 2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
VV580T	760	30	1160	60	56
VV700	750	25	-	56	64
KK300	440	21	-	44	56
GV330UD	1150	115	700	73	66
GV335UD	650	250	-	62	54

The values are to be understood as the average of the experimental values observed.

- (1) is also available as stabilized WF1, for exposed areas where high aesthetic of textile construction must be maintained during the process.

These mechanical data were obtained by hot press technology. With different curing cycle technology these data can be different.

PREPREG STORAGE LIFE

This prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. Storage life at different temperatures:

- 12 Months at -18 °C
- 5 weeks at +23 °C

After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before opening the polythene bag to prevent water condensation.

PRECAUTIONS FOR USE

To handle properly the prepreg product observe the established precautions.

Operators working with this prepreg should wear clean and impervious gloves to reduce the possibility of skin contact and to prevent the prepreg contamination
Safety data sheet is available for this product.

NOTE

The above mentioned technical informations are based on our actual knowhow and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.
Impregnatex Compositi will reserve to made further modification to this paperwork

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST TKANINY



Balanced Carbon Fabric

WOVEN FABRIC DATA SHEET

G. Angeloni
REFERENCE

GG 204 P

CHARACTERISTICS		Nominal	Tolerance	Normative
Mass per unit area	g/m ²	220	± 5%	ISO 4605
Weave		Plain		ISO 2113
Width	mm	1000/1200	± 2,5%	ISO 22198
Thickness	mm	0,16	± 2,5%	ISO 5084(**)
Other informations		Loomstate		

Nominal Construction		WARP		WEFT	
Fiber Description		HR Carbon Fiber 3K 200 tex		HR Carbon Fiber 3K 200 tex	
Thread Count	ends/cm	5,5	ISO 4602	5,5	ISO 4602
Weight Distribution	g/m ² %	3K Carbon	110	3K Carbon	110
			50%		50%
Selvages		Weaving style	LENO	Type of Fiber	HM polyester 22 tex

(**) Theoretical thickness for an epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Date of Issue	05/10/2012	No. of Pages	1
---------------	------------	--------------	---

Note : Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

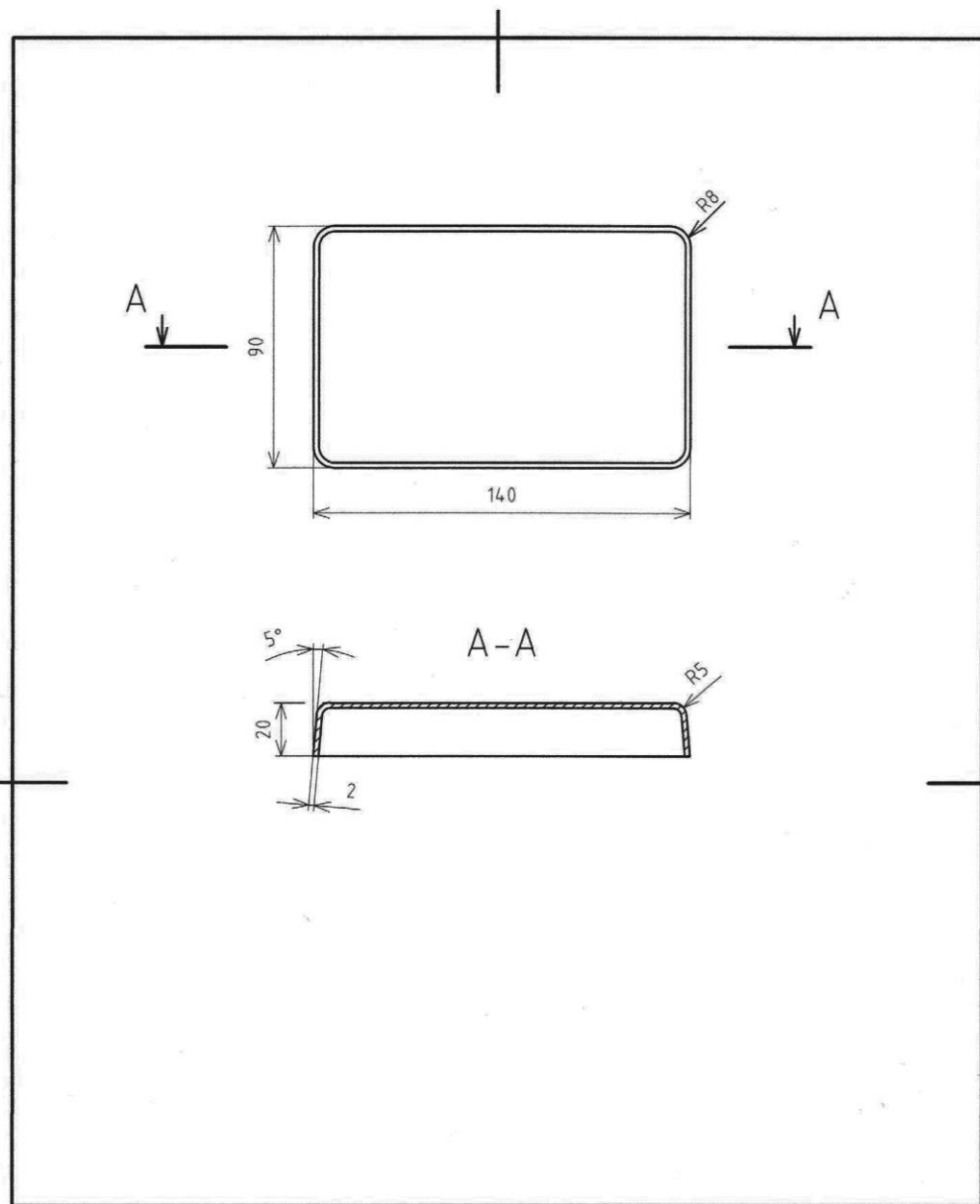
G. Angeloni srl



via Abate Tommaso , 72/A5 - 30020 Quarto d'Altino (VE) - ITALY

Tel. +39 0422 823801 - 780580 Fax +39 0422 782782

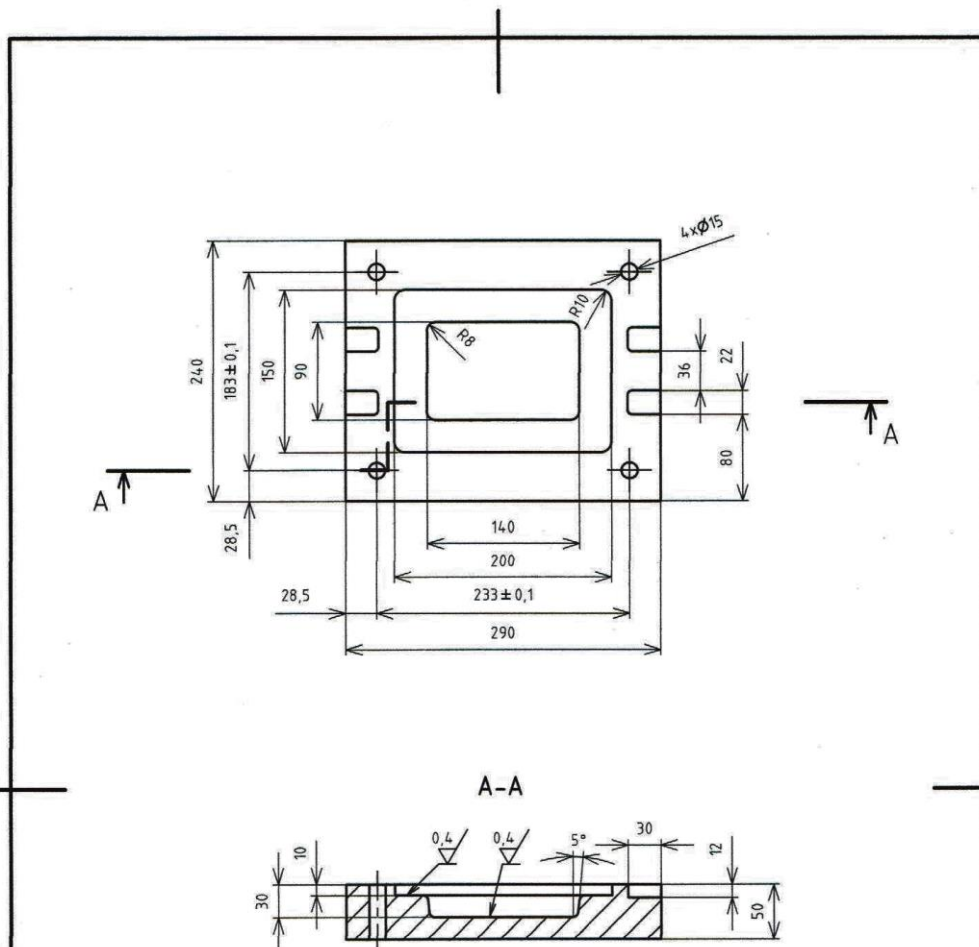
E-Mail : info@g-angeloni.com

PŘÍLOHA P III: VÝKRES VÝROBKU



 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická		Měřítko	Přesnost ISO 2768-mH
		1:2	Promítání 
Materiál GG 204P IMP503Z		Hmotnost	Sestava
Polotovary		Chráněno podle ISO 16016	
Skupina		Název <h2 style="text-align: center;">KRYTKA</h2>	
Kreslil SVĚTLÍK RADEK			
Datum vydání 16.05.2022		UTB-01-002-22 List 1/1	

PŘÍLOHA P IV: VÝKRES PŘÍPRAVKU



3,2/ (✓)

NEKÓTOVANÉ POLOMĚRY R5

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická		Měřítko	Přesnost
		1:5	Promítání
Materiál EN AW 2017 Polotovar Skupina	Hmotnost Název	Sestava Chráněno podle ISO 16016	
Kreslil SVĚTLÍK RADEK Datum vydání 16.5.2022	PŘÍPRAVEK Číslo dokumentu UTB-01-001-22		List