

Testování mechanických vlastností kompozitu pro dopravní aplikace

Bc. Tomáš Kurečka

Diplomová práce
2023

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Tomáš Kurečka
Osobní číslo:	T21424
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Testování mechanických vlastností kompozitu pro dopravní aplikace

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku kompozitních materiálů, vlastnosti, vlákna, matrice, sendviče.
2. Přehled mechanických zkoušek pro polymerní kompozitní materiály.
3. Zrealizujte experimentální výrobu vláknových kompozitu pomocí vytvrzování v autoklávu.
4. Experimentální testování mechanických vlastností dle zvolených metodik a jejich vyhodnocení.
5. Závěr a diskuse dosažených výsledků.

Forma zpracování diplomové 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 diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

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

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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 – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je stanovit mechanické vlastnosti kompozitu určeného k výrobě kompozitních nástrojů pro dopravní aplikace.

Teoretická část popisuje problematiku epoxidových kompozitních systémů, nástroje určené pro výrobu kompozitních výrobků, technologii vytvrzování kompozitů v autoklávu a jednotlivé zkoušky mechanických vlastností.

Praktická část popisuje návrh a postup výroby zkušebních vzorků, postup měření mechanických vlastností a následné zpracování a grafické vyhodnocení naměřených hodnot. V poslední části je okrajově popsán rámcový technologický postup výroby kompozitní formy.

Klíčová slova: kompozit, prepreg, epoxid, forma, autokláv, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

The diploma thesis aims to determine the mechanical properties of the composite intended for the production of composite tools for transport applications.

The theoretical part describes the problems of epoxy composite systems, tools for the production of composite products, technology of curing composites in autoclave and individual tests of mechanical properties.

The practical part describes the design and process of manufacturing test samples, the process of measuring mechanical properties and the subsequent processing and graphic evaluation of the measured values. In the last part, the framework technological procedure for the production of the composite mold is marginally described.

Keywords: composite, prepreg, epoxy, mold, autoclave, mechanical properties

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za její trpělivost, ochotu, vstřícnost, cenné rady a odborné vedení po celou dobu vypracovávání této diplomové práce. Dále děkuji Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, kterou mi poskytl při realizaci měření mechanických vlastností. V neposlední řadě chci poděkovat rodině za podporu během studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ EPOXIDOVÉ SYSTÉMY	12
1.1 SYNTÉZA EPOXIDOVÝCH PRYSKYŘIC	12
1.2 VYTVRZOVACÍ ČINIDLA.....	13
1.3 VYTVRZOVÁNÍ EPOXIDOVÝCH SYSTÉMŮ	14
1.4 DOBA ZPRACOVATELNOSTI EPOXIDOVÝCH SYSTÉMŮ	15
1.5 PREPREG MATERIÁLY NA BÁZI EPOXIDU	16
1.5.1 Uhlíkové výztuže	18
1.5.2 Orientace tkaniny v kompozitním systému.....	20
2 NÁSTROJE PRO VÝROBU KOMPOZITŮ	22
2.1 KLÍČOVÉ SPECIFIKACE PRO NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY	23
2.1.1 Koeficient teplotní roztažnosti a interakce mezi nástrojem a součástí	23
2.1.2 Obrobitelnost.....	25
2.1.3 Specifická tuhost	25
2.1.4 Tvrdost	25
2.1.5 Tepelná vodivost (Tepelná kapacita)	25
2.2 KOVOVÉ FORMY	25
2.2.1 Výroba.....	27
2.3 KOMPOZITNÍ FORMY.....	28
2.3.1 Výroba.....	29
3 AKTUÁLNÍ VÝVOJ A VÝROBCI TOOLING PREPREGU	31
3.1 VÝROBCI TOOLING PREPREGU	31
3.1.1 Společnost Easy Composites.....	31
3.1.2 Společnost Hexcel.....	32
3.1.3 Společnost Composites Evolution.....	33
3.1.4 Společnost Advanced Composites Group (ACG).....	34
3.1.5 Společnost Toray Advanced Composites.....	34
3.1.6 Společnost 3M Advanced Composites.....	34
4 TECHNOLOGIE VYTVRZOVÁNÍ KOMPOZITŮ V AUTOKLÁVU	35
4.1 PRINCIP AUTOKLÁVU.....	35
4.2 PRINCIP VYTVRZOVÁNÍ	35
5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	38
5.1 MIKROMECHANIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	39
5.2 MAKROMECHANIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	40
5.2.1 Laminátová teorie.....	40
5.2.2 Vytuzující účinek vláken a mechanismy porušování kompozitu	43

5.3	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	44
5.3.1	Zkouška v tahu	44
5.3.2	Zkouška v tlaku	47
5.3.3	Zkouška v ohybu	48
5.3.4	Zkouška zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti	51
5.3.5	Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy	53
II	PRAKTICKÁ ČÁST	54
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	55
7	NÁVRH MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU	56
7.1	MATERIÁL POUŽITÝ PRO VÝROBU VZORKŮ	56
7.1.1	Výztuž	56
7.1.2	Matrice	56
7.2	MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ JEDNOTLIVÝCH POLOTOVARŮ	57
7.2.1	Polotovar č. 1	57
7.2.2	Polotovar č. 2	58
7.2.3	Polotovar č. 3	58
7.2.4	Polotovar č. 4	59
7.2.5	Polotovar č. 5	59
8	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ METODOU AUTOKLÁVOVÉHO LISOVÁNÍ	60
8.1	PŘÍPRAVA FORMY	60
8.2	NASTŘIHÁNÍ PREPREG MATERIÁLU	61
8.3	SKLADBA PREPREG MATERIÁLU NA POVRCH FORMY	62
8.4	PŘÍPRAVA NA PROCES VYTVRZOVÁNÍ	62
8.5	PROCES VYTVRZOVÁNÍ MATERIÁLU	64
8.5.1	Použité zařízení	66
8.5.2	Parametry vytvrzovacího cyklu	67
8.6	NAŘEZÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	67
9	VÝZKUM STATICKÉHO A DYNAMICKÉHO NAMÁHÁNÍ	69
9.1	STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ	69
9.1.1	Zkušební zařízení	69
9.1.2	Zkušební vzorky	70
9.1.3	Postup měření	70
9.1.4	Výsledky zkoušky	71
9.2	STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ	77
9.2.1	Zkušební zařízení	77
9.2.2	Zkušební vzorky	77
9.2.3	Postup měření	78
9.2.4	Výsledky zkoušky	78

9.3	STANOVENÍ ZDÁNlivÉ MEZILAMINÁRNÍ SMYKOVÉ PEVNOSTI	84
9.3.1	Zkušební zařízení	84
9.3.2	Zkušební vzorky	84
9.3.3	Postup měření	84
9.3.4	Výsledky zkoušky	85
9.4	STANOVENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY	87
9.4.1	Zkušební zařízení	87
9.4.2	Zkušební vzorky	87
9.4.3	Postup měření	88
9.4.4	Výsledky zkoušky	88
10	VYHODNOCENÍ A GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	91
10.1	VYHODNOCENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ	91
10.2	VYHODNOCENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ	95
10.3	VYHODNOCENÍ ZDÁNlivÉ MEZILAMINÁRNÍ SMYKOVÉ PEVNOSTI	98
10.4	VYHODNOCENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI	99
10.5	KOMPLEXNÍ VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TESTOVANÝCH KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ	100
11	NÁVRH VÝROBY KOMPOZITNÍHO NÁSTROJE	101
11.1	3D NÁVRH VYRÁBĚNÉHO DÍLU	101
11.2	3D NÁVRH MASTER MODELU	102
11.3	3D NÁVRH KOMPOZITNÍ FORMY	102
11.4	NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU VÝROBY KOMPOZITNÍ FORMY	103
	ZÁVĚR	105
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	107
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	114
	SEZNAM OBRÁZKŮ	116
	SEZNAM TABULEK	119
	SEZNAM PŘÍLOH	121

ÚVOD

Kompozity se staly cennou třídou technických materiálů a jejich popularita dále rok od roku roste. Skládají se z minimálně dvou hlavních komponent s odlišnými fyzikálními vlastnostmi. Výhodou těchto materiálů je to, že nabízejí mnoho vlastností, kterých nelze s jinými materiály dosáhnout, a také umožňují relativně snadné přizpůsobení těchto vlastností konkrétnímu použití. Například jejich nízká hmotnost ve spojení s vysokou tuhostí vybízí k využití v dopravních aplikacích. Rostoucí popularita těchto materiálů ovšem vyžaduje vývoj nových technologií výroby kompozitních výrobků a také neustálé zlepšování již stávajících metod.

Mezi moderní technologie výroby kompozitů se řadí metoda autoklávového lisování. Tato technologie se primárně využívá pro zpracování prepreg materiálů a umožňuje výrobu tvarově složitých kompozitních výrobků s velmi nízkým rizikem vzniku dutin a pórů. K výrobě kompozitních výrobků touto technologií je ovšem nezbytné mít vhodný typ nástroje. Nástrojem je v tomto případě forma udávající vytvrzovanému prepreg materiálu požadovaný tvar. Nejčastěji se využívají formy vyrobené z hliníku, oceli nebo Invaru 36. Tyto formy jsou využívány převážně pro velké výrobní série. Pokud je ovšem nutné vyrobit rozměrný kompozitní výrobek s vysokým požadavkem na přesnost, pak je vhodné pro výrobu formy využít materiál s tepelnou roztažností obdobnou jako má materiál vytvrzovaného výrobku a zároveň dosáhnout relativně nízké hmotnosti formy. V tomto případě je tedy ideálním řešením využití kompozitní formy. Tento druh nástroje je velmi často využíván v leteckém průmyslu. Právě prepreg materiál určený k výrobě kompozitních forem bude předmětem zkoumání v praktické části této diplomové práce.

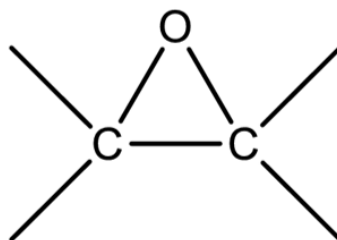
Výzkum bude konkrétně zaměřen na určení mechanických vlastností navržených kompozitních systémů vyrobených metodou autoklávového lisování. Polotovarem k výrobě těchto kompozitních systémů je prepreg materiál speciálně vyvinutý pro výrobu kompozitních forem. Úkolem bude získat obecné informace o chování tohoto typu materiálu při různých statických a dynamických způsobech namáhání. Porovnat námi testovaný nástrojový prepreg s údaji uvedenými v materiálových listech jiných běžně dostupných nástrojových prepreg materiálů a následně určit optimální materiálové složení kompozitního systému skládajícího se z více vrstev tohoto prepreg materiálu pro výrobu kompozitní formy.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ EPOXIDOVÉ SYSTÉMY

Kompozit je komplexní materiál složený ze dvou nebo více odlišných složek nebo fází, které mají různé fyzikální nebo chemické vlastnosti. Obecně platí, že nespojitá fáze (výztuž) je zapuštěna do spojitě fáze (matrice). Významnou kategorií kompozitních materiálů jsou kompozity s polymerní matricí. V těchto materiálech je tedy výztuž vložena do polymerní matrice, která tuto výztuž spojuje tak, aby na ni přenášela zatížení a také ji chránila před vnějšími vlivy. V současné době v průmyslu pokročilých kompozitních materiálů převažují termosetové pryskyřice. [1, 2]

Jednu z nejpoužívanějších skupin termosetových pryskyřic pro kompozitní aplikace představují epoxidy. Jedná se o druh pryskyřice obsahující v molekule dvě nebo více epoxidových funkčních skupin. Epoxidové skupiny jsou obecně složeny z jednoho atomu kyslíku a dvou atomů uhlíku. Prostřednictvím těchto skupin dochází následně během procesu vytvrzování k tvorbě příčných vazeb. Tyto skupiny mohou být také připojeny přímo k jiné organické skupině. [2, 3, 4]



Obrázek 1 Epoxidová skupina [5]

Výhody epoxidových pryskyřic oproti jiným termosetovým pryskyřicím jsou následující:

- absence těkavých látek během vytvrzování,
- nízké smrštění při vytvrzování,
- vynikající odolnost vůči chemikáliím a rozpouštědlům,
- univerzálnost zpracování,
- vynikající přilnavost k široké škále plniv, vláken a dalších materiálů. [1, 3]

1.1 Syntéza epoxidových pryskyřic

Výchozí surovinou pro přípravu epoxidových pryskyřic je v praxi nejčastěji bisfenol A s epichlorhydrinem nebo dichlorhydrinem, mezi kterými proběhne alkalická kondenzace. Alkalickou reakcí bisfenolu A s epichlorhydrinem se připravuje například jedna

z nejběžnějších organických sloučenin používaná jako součást epoxidových pryskyřic pod označením DGEBA (diglycidylether bisfenol A). Vzájemný poměr těchto výchozích surovin ovlivňuje výslednou molární hmotnost pryskyřice, ze které lze následně také určit její molekulovou hmotnost. Rozložení molární hmotnosti v epoxidové pryskyřici ovlivní proces vytvrzování a vlastnosti vytvrzené pryskyřice. [2, 4, 5]

Kromě podmínek syntézy tedy závisí výkonnost epoxidových pryskyřic především na molekulární struktuře. Hlavním přístupem ke zvýšení tepelné odolnosti a zlepšení mechanických vlastností je snížení molární hmotnosti a zvýšení množství funkčních skupin za účelem zvýšení hustoty zesíťování a zpevnění struktur. Takto ztužené struktury ovšem povedou ke snížení rozpustnosti a zvýšení viskozity, což vede ke zhoršení zpracovatelnosti. Dále je možné připravit pryskyřici na bázi bisfenolu F, na bázi novolaku, případně na bázi glycidylaminu. [2, 4, 5]

1.2 Vytvrzovací činidla

Epoxidové pryskyřice reagují s mnoha sloučeninami. Z toho důvodu mohou být snadno přizpůsobeny tak, aby vyhovovaly jakémukoliv konkrétnímu použití. Směs epoxidu s dalšími typy molekul se nazývá epoxidový systém. Jednou ze základních složek epoxidových systémů je vytvrzovací činidlo nebo tvrdidlo. Tyto sloučeniny řídí rychlost reakce a určují vlastnosti hotového dílu. Na trhu je k dispozici mnoho druhů vytvrzovacích činidel, které lze obecně rozdělit do několika kategorií podle reaktivní funkční skupiny. V závislosti na požadovaných konečných vlastnostech se nejčastěji volí aminová, amidová nebo anhydridová vytvrzovací činidla. Epoxidový systém zároveň často obsahuje další dvě nebo tři vedlejší epoxidové pryskyřice, aby se regulovala viskozita a také přizpůsobily konečné vlastnosti vytvrzeného epoxidového systému. [1, 6]

Vlastnosti konečného produktu závisí na délce řetězce vytvrzovacího činidla. Pokud použijeme vytvrzovací činidlo s dlouhým řetězcem, pak se zvýší pružnost produktu. Vytvrzovací prostředky na bázi aminů jsou trvanlivější a chemicky odolnější než na bázi amidů, ale většina z nich má tendenci reagovat s vodou nebo jinými látkami. Alifatické aminy mají obecně kratší reakční dobu oproti aromatickým aminům. [6]

Společnost Shell Co. vyvinula vytvrzovací činidla pod označením Epon HPT 1061 a 1612, která vzhledem k velkému množství vazby uhlík-uhlík vykazují nižší míru absorpce vlhkosti než v případě vazby uhlík-vodík. Právě nízká absorpce zajišťuje lepší konečné vlastnosti vytvrzeného epoxidového systému. [2]

Tabulka 1 Výhody a nevýhody vytvrzovacích činidel a jejich vliv na konečné vlastnosti vytvrzené pryskyřice [4]

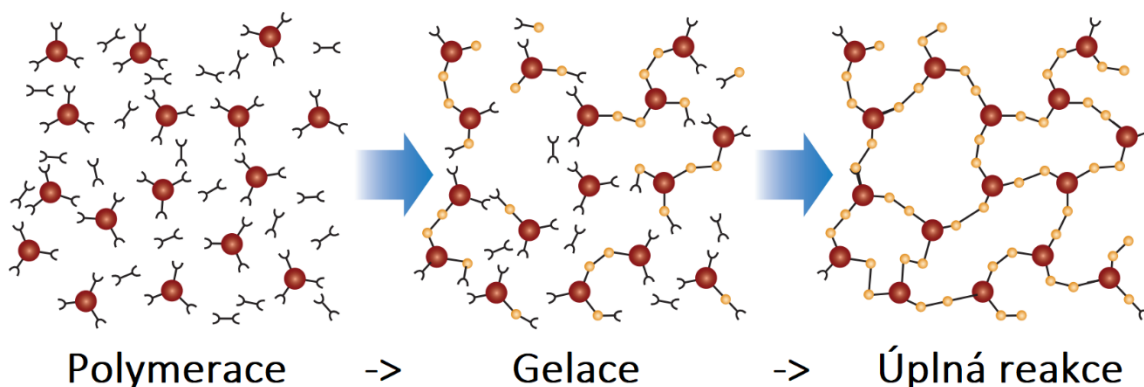
Vytvrzovací činidla	Výhody	Nevýhody
Alifatické aminy	Nízké náklady, Vytvrzování při pokojové teplotě, Nízká viskozita	Dráždí kůži, Kritické poměry směsi
Aromatické aminy	Střední tepelná odolnost, Chemická odolnost	Pevné látky při pokojové teplotě
Polyamidy	Vytvrzování při pokojové teplotě, Flexibilita, Houževnatost, Nízká toxicita	Vysoké náklady, Vysoká viskozita
Amidoaminy	Houževnatost	-
Dikyandiamid	Dobrá elektrická vodivost, Latentní, Vysoká stabilita	Dlouhá doba vytvrzování
Anhydridy	Tepelná a chemická odolnost	Dlouhá doba vytvrzování
Polysulfidy	Odolné proti vlhkosti, Rychlé tuhnutí	Zápach
Katalické	Dlouhá životnost	Dlouhá doba vytvrzování, navlhavost
Melanin	Tvrdość, pružnost	Vytvrzování při zvýšené teplotě
Fenol	Chemická odolnost, Tvrdość	Pevný

1.3 Vytvrzování epoxidových systémů

Během procesu vytvrzování probíhají fyzikální a chemické změny epoxidového systému. Mezi fyzikální změny se řadí změna viskozity a chemickou změnou je lineární polymerace a zesíťování. Tyto chemické změny jsou při vytvrzování epoxidových systémů exotermické, což znamená, že při tomto procesu dochází k uvolňování tepla. Maximální dosaženou teplotu (vrchol exotermie) lze řídit regulací rychlosti vytvrzování. [3, 7]

Většina epoxidových systémů se vytvrzuje při zvýšených teplotách, aby se zvýšila pravděpodobnost, že dojde k úplné reakci mezi epoxidovou pryskyřicí a vytvrzovacím činidlem a také aby se zkrátila doba vytvrzování. Teplota zvolená pro vytvrzování epoxidu silně závisí na povaze pryskyřice a vytvrzovacího činidla a do jisté míry i na zamýšleném použití vytvrzeného systému, jelikož tato teplota výrazně ovlivňuje i teplotu skelného přechodu. Obecně platí, že se vzrůstající teplotou vytvrzování, teplota skelného přechodu roste. Teplota vytvrzování se u kompozitních materiálů pohybuje obvykle okolo 120 °C až 180 °C. Ovšem najdou se i typy epoxidových systémů, které se vytvrzují při pokojové teplotě. [4]

V případě vytvrzování nejběžněji používaného epoxidového systému složeného z epoxidu na bázi diglycidylether bisfenolu A (DGEBA) s primárními alifatickými aminy reagují zpočátku všechny hydroxy skupiny primárních aminů s epoxidem za vzniku dlouhých řetězců. Při této reakci dojde k úbytku téměř poloviny epoxidových skupin a primární aminy se zde transformují na sekundární aminy. Sekundární aminy mohou reagovat se zbylými epoxidovými skupinami pouze při vysoké teplotě. Uvolněné teplo při reakci primárních aminů s epoxidovými skupinami je ovšem dostatečné k tomu, aby došlo k zahájení reakce mezi sekundárními aminy a zbylými epoxidovými skupinami. Během této reakce vznikají příčné vazby, viz. obrázek 2. Tento proces probíhá pomaleji a nemusí při něm již docházet k dalšímu zvyšování teploty. Viskozita epoxidové pryskyřice tedy dosahuje minima při vrcholu exotermické reakce, avšak po vrcholu této reakce dochází k výraznému nárůstu viskozity. [3, 7]



Obrázek 2 Proces zesíťování [6]

Stupeň vytvrzení výrazně ovlivňuje fyzikální vlastnosti a chemickou odolnost epoxidových pryskyřic. V praxi je velmi obtížné dosáhnout úplného vytvrzení, protože některé nezreagované skupiny jsou zachyceny uvnitř ztuhlého materiálu. Rozsah vytvrzení je v mnoha případech velmi obtížné určit, nicméně lze jej vztáhnout k dosaženým vlastnostem jako je například pružnost. [3]

1.4 Doba zpracovatelnosti epoxidových systémů

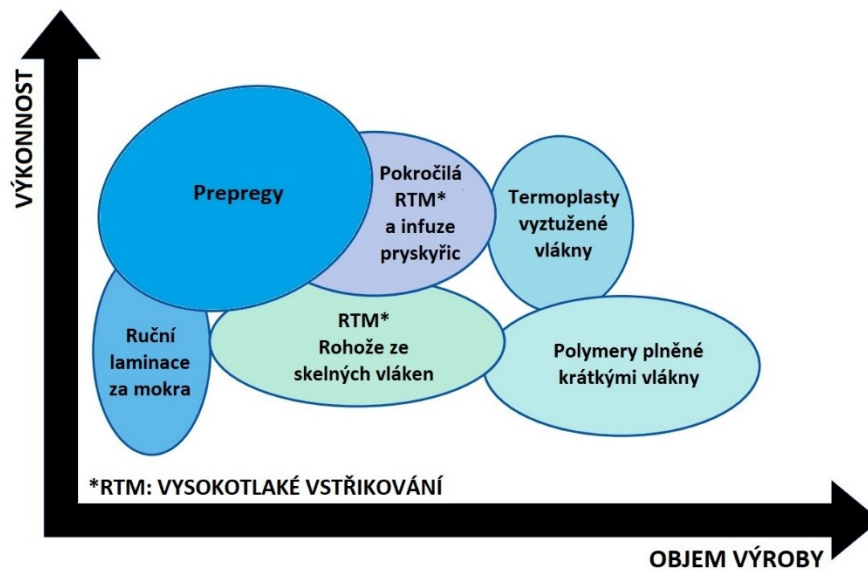
Doba zpracovatelnosti je doba, po kterou můžeme s epoxidovým systémem manipulovat a pracovat. V tomto případě ovšem nehovoříme o době skladovatelnosti, což je doba, po kterou může být pryskyřice skladována, aniž by reagovala. Dlouhá doba vytvrzování epoxidů a často i nutnost jejich zahřátí abychom urychlili proces vytvrzování, zajišťuje relativně dlouhou dobu zpracovatelnosti u většiny epoxidových pryskyřic. Problémem

ovšem může být doba zpracovatelnosti epoxidových systémů, které již obsahují jak pryskyřici, tak vytvrzovací činidlo. Mezi tyto materiály se řadí i prepregy. Proto je vždy nutné počítat s tím, že když se pryskyřice a vytvrzovací činidlo smíchá, tak začne docházet k určitému procesu vytvrzování. Nejlepší způsob jak dosáhnout toho, aby byly tyto materiály i po delší době zpracovatelné, je jejich skladování při nízkých teplotách. Ovšem i v tomto případě je doba skladovatelnosti omezená a po jejím uplynutí, se předpokládá, že je materiál již příliš tvrdý (vytvrzený) na to, aby mohl být využit. [3, 4, 7]

1.5 Prepreg materiály na bázi epoxidu

Kompozitní prepregy jsou směsi vysoce viskózních pryskyřičných matric a výztuh. Prepreg je tedy zkrácený název pro před-impregnované vláknové výztuže částečně vytvrzenou pryskyřicí. Výztuž může být vyrobena z jakéhokoliv typu vláken, v jednosměrné, prošíváné nebo tkané formě. V případě termosetů se pryskyřice smíchá již před nasycením dané výztuže. Množství pryskyřice v prepregu musí být přísně kontrolováno, aby bylo dosaženo jejího požadovaného množství v daném systému. Obsah výztuže (vláken) v tomto systému bývá obvykle okolo 65 % a tento poměr výztuže k matrici je v celém objemu velice rovnoměrně rozložen, kdy odchylka je často pouze ± 2 %. Prepreg je z obou stran chráněn snadno odstranitelnou separační folií. [3, 6]

Právě tyto materiály v posledních letech významně ovlivnily technologický vývoj vysoce výkonných komponent vyztužených vláknů. Dnes jsou již celosvětově rozšířené a více než polovina celosvětové produkce uhlíkových vláken se používá k výrobě prepregů. Využívají se například pro výrobu kompozitních dílů v leteckém a kosmickém průmyslu, pro vysokorychlostní vlaky, automobily, lodě a mnoho dalších aplikací. A to z toho důvodu, že umožňují výrobu velmi lehkých, a přitom vysoce pevných a výkonných kompozitních výrobků. Tyto výhody jsou ovšem na úkor produktivity výroby, jak můžeme vidět na obrázku 3. Z toho důvodu se tato technologie využívá spíše pro velmi malé až středně velké výrobní série. Kde lze snadno sladit výkonnost výrobků a výrobní náklady při využití prepregů. Dalším problémem při používání prepregů je postupné vytvrzování při pokojové teplotě, a tedy nutnost skladování při velmi nízkých teplotách. [8, 9]



Obrázek 3 Závislost výkonnosti na objemu výroby prepregů ve srovnání s jinými technologiemi [10]

Základní požadavky na prepreg materiály jsou následující: [11]

a) **Dobrá kompatibilita mezi maticí (epoxidovou pryskyřicí) a výztuží**

Výztuž by měla být po povrchové úpravě velmi dobře kompatibilní s pryskyřičnou maticí, aby poskytovala vynikající mezi-vrstvovou pevnost.

b) **Správná lepivost a pokrytí**

Prepreg by měl co nejlépe kopírovat tvar formy a přilnout k ní. Přilnavost prepregu by ovšem neměla být příliš vysoká, aby se vrstvy mohly oddělit v případě, že dojde k chybě při vrstvení. Na druhou stranu by lepivost neměla být příliš nízká, aby bylo zaručeno pevné spojení sousedních vrstev.

c) **Odchylka obsahu pryskyřice**

V různých šaržích by měla být odchylka obsahu pryskyřice co nejmenší (alespoň v rozmezí $\pm 3\%$), což zajistí konzistentní mechanické vlastnosti.

d) **Obsah těkavých látek**

Obecně platí, že by měl být obsah těkavých látek nižší než 2% a v rozmezí do $0,8\%$ u prepregů, které mají být použity k výrobě nosných konstrukcí.

e) **Pro delší skladovatelnost**

Doba skladovatelnosti při pokojové teplotě by měla být delší než jeden měsíc a při teplotě pod $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ delší než 6 měsíců.

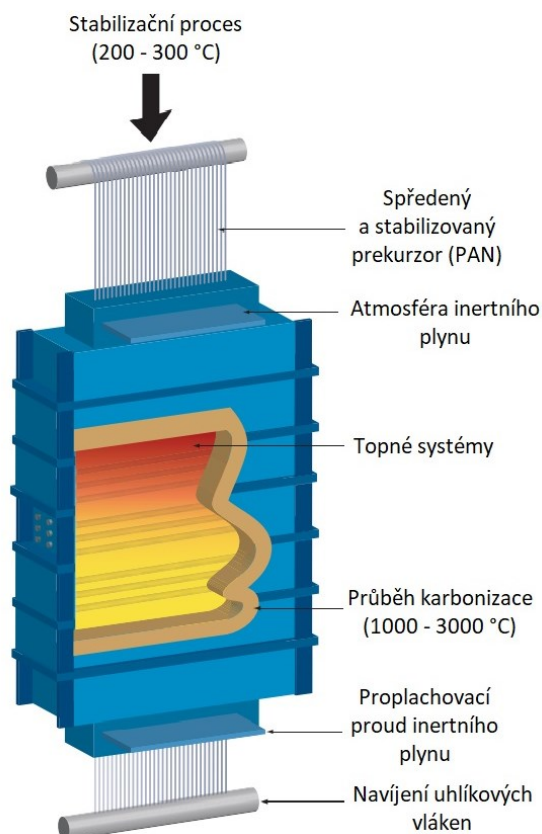
f) Vhodná viskozita pryskyřice

Viskozita pryskyřice by měla být taková, aby byla zajištěna rovnoměrná distribuce a plná impregnace výztuže, ale zároveň by tato epoxidová pryskyřice měla mít v prepregu relativně nízkou schopnost toku. [11]

1.5.1 Uhlíkové výztuže

Pro výrobu prepregů existuje teoreticky široká škála výztuží s různým složením a vlastnostmi, ovšem jedním z nejběžnějších typů jsou vlákna na bázi uhlíku. Tyto vlákna mohou mít různé vlastnosti, obecně však vykazují vynikající pevnost v tahu a tlaku, záporný koeficient teplotní roztažnosti, mají vysoké moduly, vynikající únavové vlastnosti a také nepodléhají korozi. [5]

Uhlíková vlákna se vyrábí karbonizací prekurzorových materiálů při vysokých teplotách v prostředí inertního plynu (viz. obrázek 4). Karbonizovaná vlákna jsou při zpracování tažena nebo vyrovnávána v tahu, aby získala vysokou pevnost a modul pružnosti. Po tomto zpracování se uhlíková vlákna oxidují ponořením do vody, inertního plynu, chlornanu sodného nebo kyseliny dusičné. Vlákno se poté ošetří vhodnou povrchovou úpravou pro dobrou přilnavost s matricovou pryskyřicí. [6]



Obrázek 4 Výroba uhlíkových vláken [6]

Vlastnosti uhlíkových vláken se liší v závislosti na teplotě zpracování, typu vlákna a prekurzoru použitého k jeho výrobě. Vyrábějí se nejčastěji z polyakrylonitrilu (PAN), rayonu nebo dehtu. Ačkoliv je PAN dražší než rayon, tak je hojně využíván, protože výtěžnost uhlíku je u PAN téměř dvojnásobná oproti rayonovým vláknům. [5, 12]

Tabulka 2 Vlastnosti běžně využívaných uhlíkových vláken [6]

	Typ	Pevnost v tahu [GPa]	Tahový modul [GPa]	Poměrné prodloužení při přetržení [%]	Teplota rozpadu [°C]
Uhlík	PAN – SM*	3,4 – 4,8	221 – 241	1,5 – 2,2	3500
	PAN – IM*	4,1 – 6,2	290 – 297	1,3 – 2,0	
	PAN – HM*	4,1 – 5,5	345 – 448	0,7 – 1,0	
	Dehet – LM*	1,4 – 3,1	172 – 241	0,9	
	Dehet – HM*	1,9 – 2,8	379 – 621	0,5	
	Dehet – UHM*	2,4	690 – 965	0,3 – 0,4	

*SM – Standard Modulus (Standartní modul)

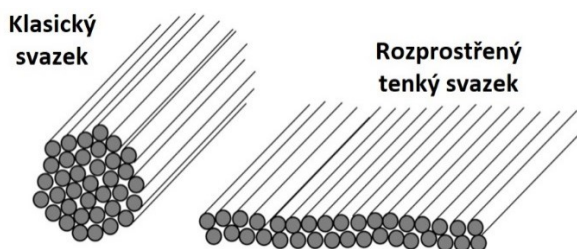
*LM – Low Modulus (Nízký modul)

*IM – Intermediate Modulus (Střední modul)

*HM – High Modulus (Vysoký modul)

*UHM – Ultra High Modulus fiber (Vlákno s ultra vysokým modulem)

Uhlíková vlákna se dodávají v nekroucených svazcích vláken (roving). Svazek se může skládat z 1 000 vláken až po více než 200 000 vláken. Typickým označením svazku s 12 000 vláken je 12k. Obvykle platí, že se snižující se velikostí svazku se snižuje pevnost. Například pro letectví jsou běžné velikosti svazků 3k, 6k a 12k, přičemž 3k a 6k jsou nejjednodušší a nejrozšířenější velikosti svazků využívající se pro tkaniny. Právě se svazky vláken ve formě tkanin se u prepregů setkáme nejčastěji. [5]



Obrázek 5 Svazek vláken (roving) [13]

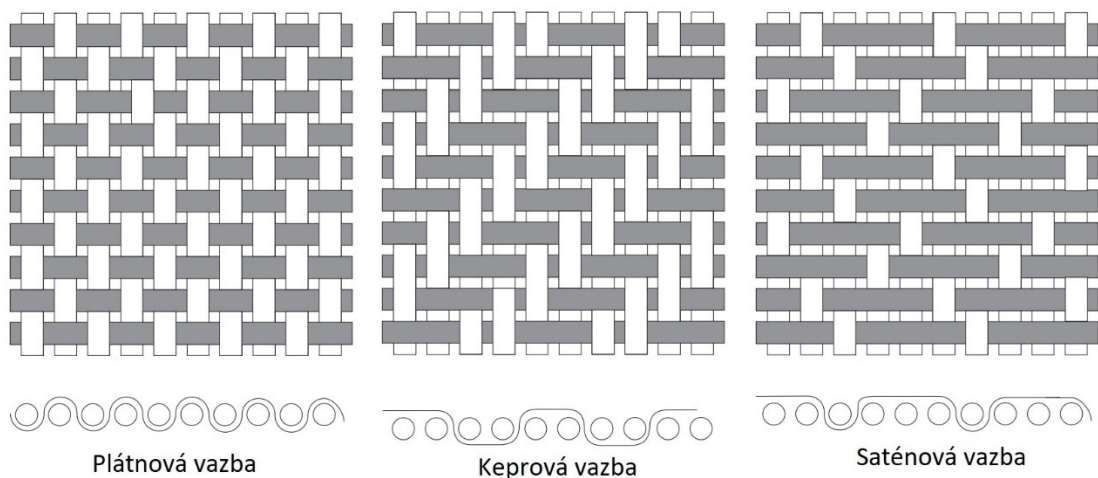
Tkaniny tvořené uhlíkovými vlákny jsou dvourozměrné tkané výrobky, které se zhotovují na tkalcovském stavu proplétáním dvou ortogonálních (vzájemně kolmých) sad rovingů (osnovy a výplně), kde směry osnovy a výplně tvoří osy ortotropie. Směr osnovy je

rovnoběžný s délkou role, zatímco výplň (příze) je kolmá na délku role. Na zpracovatelské a konečné vlastnosti mají výrazný vliv následující vlastnosti: [5, 7, 14]

- druh vazby tkaniny,
- plošná hmotnost Q [g/m²],
- hustota tkaní ve směru osnovy v_0 a ve směru výplně v_v = počet svazků na 1 cm,
- tloušťka tkaniny t [mm],
- počet svazků v osnově p_0 a ve výplni p_v ,
- druh materiálu osnovy a výplně. [7]

Druhy vazeb jsou následující: [5]

- plátňová – odolnost proti smykovému pohybu v rovině, nižší tuhost a pevnost,
- keprová – vyšší tuhost a pevnost, lépe tvarovatelné, než v případě plátňové vazby,
- saténová – minimální propletení vláken, vysoká pevnost, hladký povrch. [5]



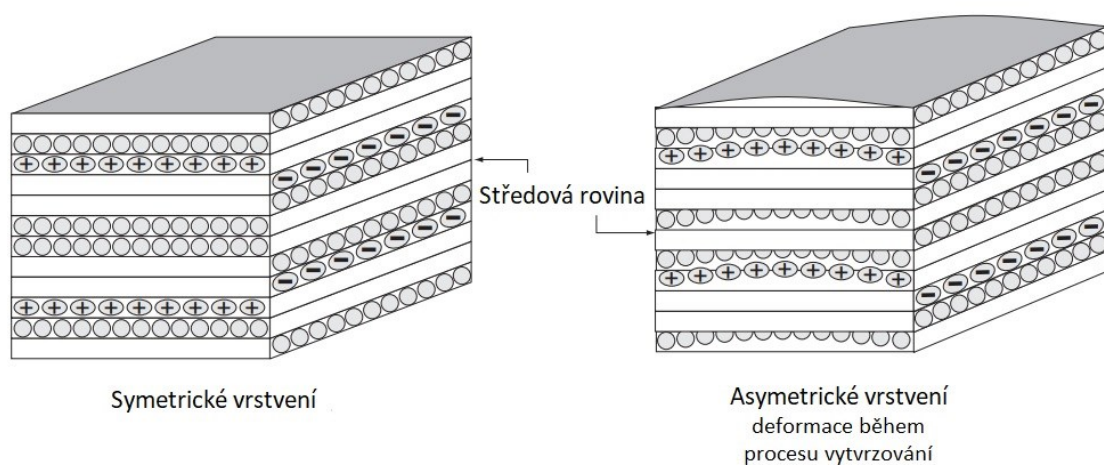
Obrázek 6 Druhy vazeb [6]

1.5.2 Orientace tkaniny v kompozitním systému

Orientace vláken výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitu, z toho důvodu by při návrhu jeho složení měla být respektována určitá pravidla. V případě vrstvení tkanin by měl mít symetrický kompozitní systém (laminát) geometrickou i materiálovou symetrii vzhledem ke střední ploše. Tato geometrická symetrie tedy vyplývá z identické orientace jednotlivých vrstev, případně materiálové symetrie jednotlivých vrstev nad a pod střední plochou. Aby bylo dosaženo symetrického laminátu, pak může v tomto systému existovat

jak lichý, tak sudý počet vrstev. Symetrie je nezbytná pro udržení rozměrové stability při zpracování a v provozu. Kompozitní systém (laminát) je vyvážený i tehdy, pokud obsahuje kolem střední plochy stejný počet plusových a minusových vrstev. Toto uspořádání pomáhá zabránit jeho deformaci. [6, 15, 16]

V případě nesymetrického laminátu jsou vrstvy uspořádány asymetricky vzhledem ke středové ploše. Tyto lamináty obsahují libovolný počet vrstev s libovolnou orientací tkaniny. Zde neexistují žádná zjednodušená pravidla pro odhad vlastností tohoto materiálu. Často se zde vyskytují deformace a zbytkové křivosti. [6, 15]



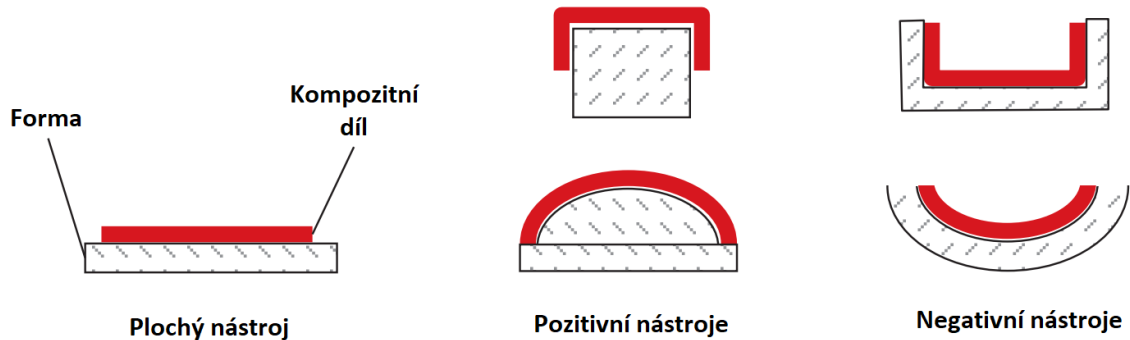
Obrázek 7 Porovnání symetrického a asymetrického vrstvení tkanin [6]

Pokud má laminát orientovaná vlákna v takových směrech, že má stejné mechanické vlastnosti ve všech směrech v rovině tohoto laminátu, pak hovoříme o takzvaném kvazi-izotropním materiálu. Obecně se tedy laminát považuje za kvazi-izotropní, pokud je složen ze stejného počtu vrstev tkaniny v každém z úhlů 0° , 90° , $+45^\circ$, -45° . [6]

V případě symetrické tkaniny v plátnové vazbě jsou obě strany navzájem identické a mají stejný počet přízí probíhajících v osnově i směr plnění. Proto jsou vrstvy pod úhly 0° nebo 90° v podstatě totéž. Tyto tkaniny se tedy často označují 0/90. Toto pravidlo platí i pro orientaci tkaniny pod úhly $+45^\circ$ a -45° , které se pak označují $\pm 45^\circ$. Zde tedy přirozeně platí vyváženost. Ovšem symetrii z hlediska pořadí orientace vrstev od středové roviny je pro získání stabilního laminátu nutné dodržet i u těchto tkanin. Tyto pravidla ovšem nelze uplatnit u všech typů vazeb. [6]

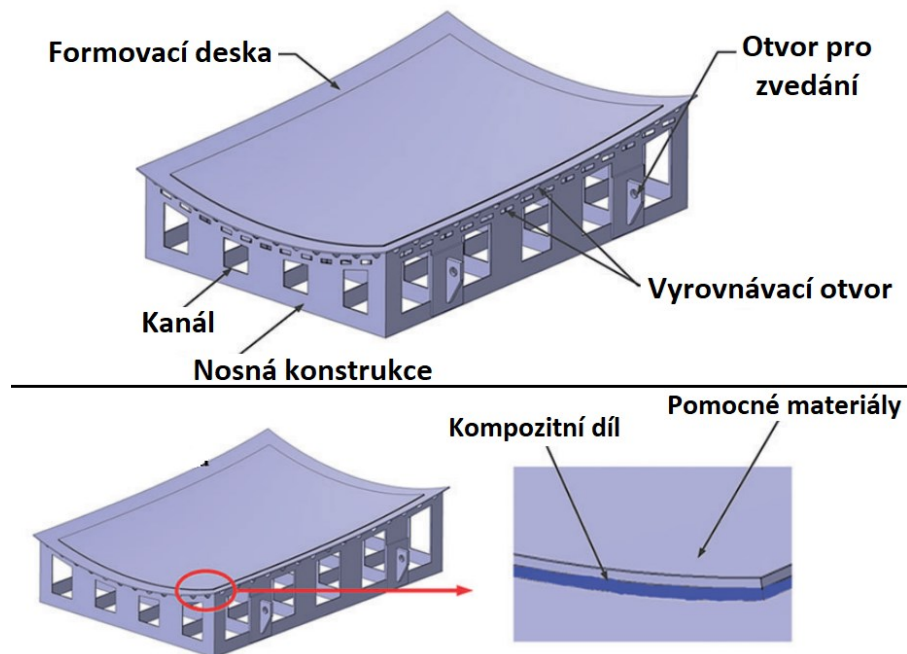
2 NÁSTROJE PRO VÝROBU KOMPOZITŮ

Základem pro výrobu kompozitních materiálů jsou formy a nástroje různých konstrukcí a tvarů. Každý nástroj je navržen podle požadovaného procesu výroby, tvaru hotového výrobku, počtu vyráběných kusů a požadavků s ohledem na kvalitu povrchu a rozměrovou přesnost. Obecně je můžeme rozdělovat podle tvaru na ploché, pozitivní a negativní. [5, 6]



Obrázek 8 Kontury nástrojů [8]

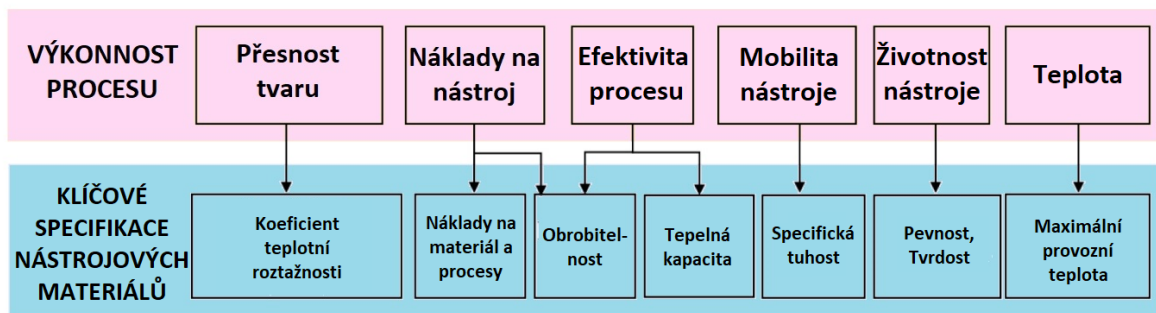
Typický nástroj využívaný pro výrobu kompozitů v autoklávu (obrázek 9) se obvykle skládá ze dvou hlavních částí, kterou je formovací deska ve tvaru negativu vyráběného dílu a nosná konstrukce (rám). Druhým a tvarově jednodušším nástrojem je desková forma, která ovšem z důvodu absence nosné konstrukce obsahující kanály pro průchod horkého vzduchu neposkytuje tak kvalitní distribuci a přenos tepla na spodní stranu formovací desky. [17]



Obrázek 9 Rámová forma [17]

2.1 Klíčové specifikace pro nástrojové materiály

Existuje mnoho požadavků, které musí konstruktér nástroje zvážit předtím, než vybere vhodný materiál, ze kterého bude tento nástroj vyroben. Díky těmto požadavkům a specifikacím je také možné vyhodnotit proveditelnost a schopnost současných vyvíjených nástrojových materiálů pro výrobu výrobků z kompozitů. [18]



Obrázek 10 Klíčové specifikace nástrojových materiálů a jejich odpovídajícím způsobem ovlivněné výkonnosti procesu a vlastnosti produktů [18]

2.1.1 Koeficient teplotní roztažnosti a interakce mezi nástrojem a součástí

Koeficient teplotní roztažnosti nástroje ovlivňuje během výroby velkou měrou přesnost tvaru kompozitního výrobku. Vzhledem k tomu, že mnoho běžných nástrojových materiálů, jako je hliník a ocel, expanduje větší rychlostí než vytvrzovaný kompozitní výrobek, je nutné korigovat jejich velikost nebo kompenzovat rozdíly ve vlastnostech tepelné roztažnosti těchto materiálů. Tento problém nastává i v případě ochlazování, kdy se nástroj s velkou tepelnou roztažností smršťuje rychleji než daný kompozitní výrobek a tím může dojít k praskání tohoto výrobku nebo vzniku delaminace. Tento efekt lze opět minimalizovat dosažením co nejshodnější tepelné roztažnosti kompozitního výrobku a nástroje, případně snížením interakce mezi nástrojem a vyráběnou součástí. [18, 5]

Přímému popisu interakce mezi nástrojem a součástí se věnovalo již několik studií. V těchto studiích byl studován statický a dynamický koeficient tření na rozhraní nástroje a kompozitního výrobku. Nízký koeficient tření mezi nástrojem a výrobkem je tedy nutný v případě, že je mezi tímto nástrojem a výrobkem výrazný rozdíl v koeficientu teplotní roztažnosti. A to z toho důvodu, že v případě vysokého koeficientu tření a teplotní roztažnosti nastává velmi výrazné riziko deformace a praskání výrobku, jelikož mezi tímto nástrojem a výrobkem dojde ke vzniku velkého smykového napětí, které lze vypočítat pomocí následující rovnice: [19, 20]

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

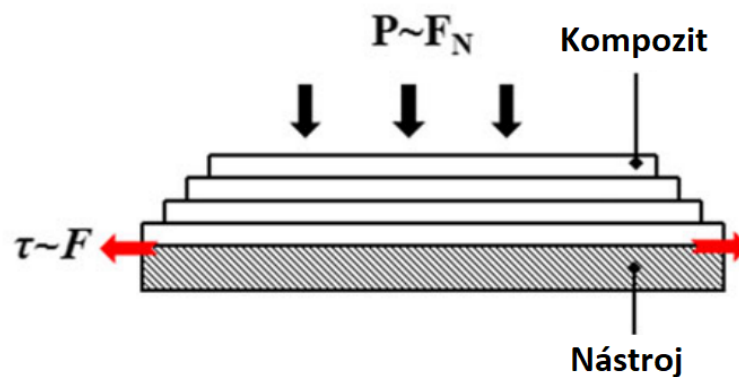
kde: τ – smykové napětí [Pa]

F – působící síla [N]

A – kontaktní plocha mezi nástrojem a výrobkem [m²]

Součinitel tření byl v této studii konkrétně měřen mezi hliníkovým nástrojem a prepregem na bázi epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny. Bylo zjištěno, že koeficient tření se může výrazně měnit během procesního cyklu a to tak, že s rostoucí teplotou koeficient klesá. Ovšem pro tento pozorovaný trend nebylo v první studii poskytnuto žádné vysvětlení. V další studii zabývající se tímto problémem byl tento jev vysvětlen z hlediska viskozity a množství pryskyřice na povrchu prepregu. [19, 20]

Bylo také zjištěno, že interakce mezi nástrojem a výrobkem roste se zvyšujícím se tlakem působícím na výrobek. [20]



Obrázek 11 Vliv působící normálové síly na vznik smykového napětí [19]

Tření můžeme naopak snížit použitím separačního přípravku na povrchu nástroje. [20]

Na koeficient tření mezi nástrojem a výrobkem má tedy také výrazný vliv použitý materiál nástroje a drsnost jeho povrchu. V odborném článku byl tento koeficient pro jednotlivé materiály porovnáván a bylo zjištěno, že největší interakce mezi nástrojem a výrobkem probíhá u nástroje vyrobeného z oceli. Naopak nejmenší interakce, a tedy i třecí koeficient byl pozorován u formy vyrobené ze skla. [21]

2.1.2 Obrobitelnost

Obrábění nástrojů pro výrobu kompozitů je často vyžadováno z toho důvodu, aby tyto nástroje splňovali rozměrové a tvarové požadavky a požadovanou kvalitu povrchu. Jedním z nejrozšířenějších procesů je vrtání, obrábění hran a drážkování. Je zde kladen velký důraz na efektivitu a finanční náročnost tohoto procesu. [22]

2.1.3 Specifická tuhost

Specifická tuhost neboli poměr tuhosti k hustotě materiálu výrazně ovlivňuje mobilitu (pohyblivost) daného nástroje, která je klíčová z toho důvodu, že je nutné s těmito nástroji velmi často manipulovat a přemísťovat je například při umísťování do autoklávu. Tato schopnost je přímo závislá na hmotnosti nástroje. [18]

2.1.4 Tvrdost

Tvrdost materiálu má výrazný vliv na životnost nástroje, která je v tomto případě zásadní. Se vzrůstající tvrdostí materiálu roste odolnost proti oděru, kvalita povrchu a možný počet výrobních cyklů nástroje. [18]

2.1.5 Tepelná vodivost (Tepelná kapacita)

Tepelná vodivost a tepelná kapacita nástroje hraje důležitou roli při výpočtu účinnosti neboli množství energie a času potřebného k dosažení cílové teploty pro vytvrzování kompozitního výrobku. Přesná volba tohoto množství energie a času tedy výrazně ovlivňuje efektivitu daného procesu, a to zejména u rozměrnějších součástí například v leteckém průmyslu. [18]

2.2 Kovové formy

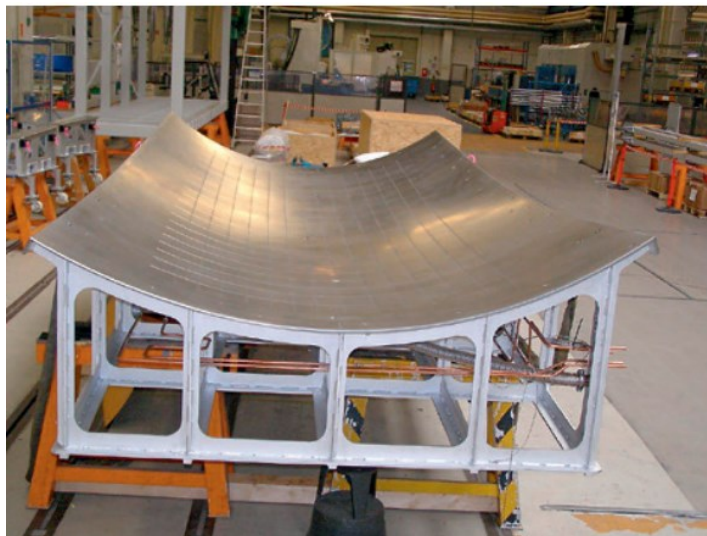
Kovy se řadí mezi nejčastěji používanou třídu materiálů pro konstrukci nástrojů pro výrobu kompozitů. Tato rozšířenost je dána jejich snadnou dostupností a také jejich vysokou konstrukční odolností. Z toho důvodu je možné tyto nástroje bez problému využívat pro několik jednotek až desítek tisíc výrobních cyklů. Povrch těchto nástrojů je zpravidla také odolný vůči organickým rozpouštědlům. Mezi nejběžněji využívané kovové materiály pro výrobu forem se řadí ocel, hliník a litina. Nevýhodou těchto materiálů je ovšem to, že vykazují výrazný koeficient teplotní roztažnosti a v případě oceli je často problémem i její vysoká hmotnost. Další vlastnosti jednotlivých kovových materiálů jsou uvedeny v následující tabulce. [8, 11]

Tabulka 3 Vlastnosti kovových materiálů [11]

Materiál	Výhody	Nevýhody
Hliník	Dobrá tepelná vodivost, Nízká hmotnost,	Provozní teplota pod 180 °C, Nízká tuhost, Špatná rozměrová stabilita
Nástrojová ocel	Poloviční koeficient teplotní roztažnosti oproti hliníku, Vysoká tuhost a životnost, Vysoká provozní teplota, Dobrá rozměrová a tvarová přesnost	Vysoká hmotnost
Litina	Snadné opracování, Velká tuhost formy, Velká tepelná kapacita	Vysoká hmotnost

Pro výrobu nástrojů se také stále častěji využívá slitina železa a niklu v poměru 36 % niklu a 64 % železa pod označením Invar 36. Nástroje z tohoto materiálu se velmi často využívají v leteckém průmyslu pro výrobu velmi přesných kompozitních výrobků se složitou geometrií. Výraznou výhodou oproti ocelovým, případně hliníkovým nástrojům je to, že tato slitina vykazuje velmi nízký koeficient teplotní roztažnosti, který je srovnatelný s kompozitními materiály na bázi epoxidové pryskyřice a uhlíkových vláken. Právě díky této jedinečné vlastnosti se tento materiál stal oblíbený při výrobě nástrojů. Ovšem v porovnání s tradičními materiály, jako je ocel nebo hliník je Invar 36 výrazně dražší. Další nevýhodou je to, že vykazuje výrazně nižší tvrdost oproti nástrojovým ocelím. Tento nedostatek však lze částečně kompenzovat povlakováním nebo tepelným a chemicko-tepelným zpracováním. [23]

Byl proveden výzkum, kde byla zkoumána tvrdost galvanicky poniklovaného Invaru 36. Tvrdost takto zpracovaného materiálu dosahovala více než 50 HRC a byla tedy téměř srovnatelná s ocelovými nástrojovými materiály. [23]

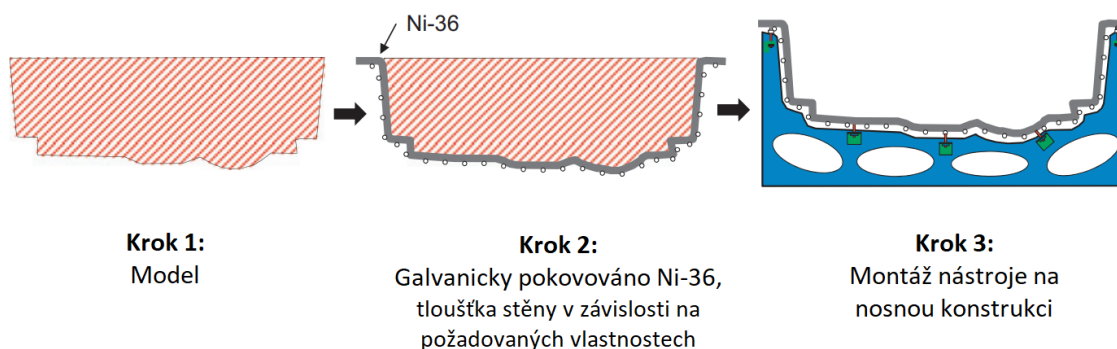


Obrázek 12 Nástroj z materiálu Invar 36 pro výrobu kompozitů [8]

2.2.1 Výroba

Techniky používané při výrobě nástrojů se mohou lišit v závislosti na použitém materiálu a technologii, pro kterou jsou tyto nástroje určeny. Tyto metody výroby můžeme obecně rozdělit na přímé a nepřímé. [8]

Přímá nástrojová výroba spočívá v obrobení nástroje již přímo z daného nástrojového materiálu (hliníku, oceli) pomocí vytvořeného CAD modelu nástroje. Naopak při nepřímé výrobě nástrojů se CAD data nejprve využijí k výrobě modelu z vhodného materiálu, jehož obrys odpovídá obrysu finálního nástroje a tento model se teprve následně v dalších krocích použije k výrobě daného nástroje. V případě kovových materiálů se nepřímá metoda nejčastěji využívá pro výrobu nástrojů na bázi slitiny niklu a železa. Nevýhodou ve srovnání s přímo vyráběnými nástroji je ovšem skutečnost, že se zde při jednotlivých výrobních krocích postupně navyšují tolerance. [8]



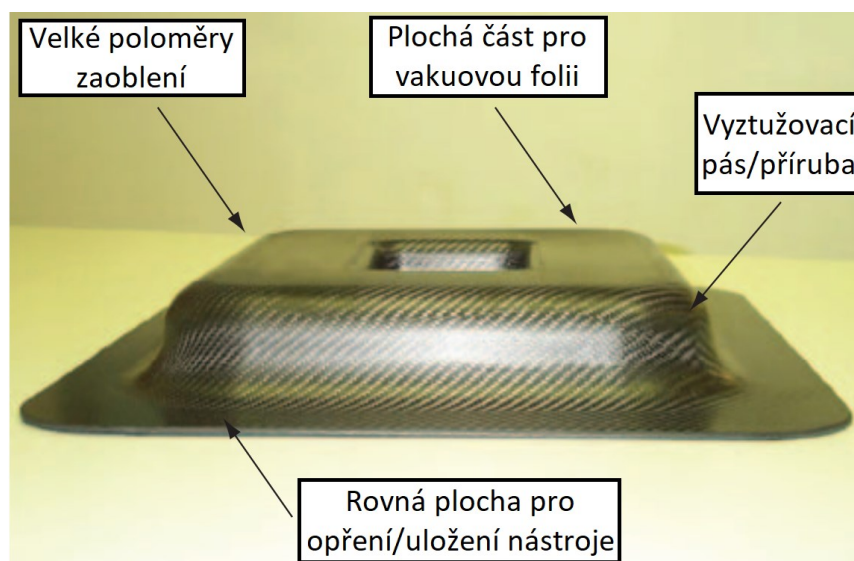
Obrázek 13 Zjednodušený výrobní postup pro výrobu nástroje ze slitiny niklu a železa [8]

2.3 Kompozitní formy

V porovnání s tradičními kovovými nástroji poskytují kompozitní materiály pro konstrukci nástrojů řadu výhod, mezi které se řadí nižší náklady na výrobu, nižší hmotnost, snadná manipulace a skladování a téměř totožný koeficient teplotní roztažnosti s vyráběným kompozitním výrobkem. Z toho důvodu jsou tyto formy využívány nejčastěji pro výrobu rozměrných výrobků, u kterých jsou kladeny velké nároky na rozměrovou přesnost nebo vysokou teplotu vytvrzování. Skvělým příkladem využití těchto nástrojů byla jejich aplikace při výrobě teleskopů ALMA, které jsou umístěny v Chile. Tyto teleskopy se skládají z několika kompozitních segmentů, u nichž bylo vyžadováno, aby byly téměř identické, a tedy velmi rozměrově přesné. Aby bylo možné tyto náročné požadavky na přesnost splnit, byly pro jejich výrobu použity kompozitní nástroje. [24]

Nástroje z kompozitních materiálů jsou obvykle konstruovány s kvazi-izotropní strukturou. Tato struktura by ovšem měla co nejvíce odpovídat struktuře vytvrzovaného kompozitního výrobku, jelikož koeficient tepelné roztažnosti kompozitního nástroje i výrobku je silně závislý na jejich příslušných laminátových strukturách. [8, 25]

Nevýhodou těchto nástrojů je ovšem v porovnání s kovovými nástroji nižší životnost v závislosti na teplotě vytvrzování. Zejména epoxidové pryskyřice mohou vykazovat oxidační rozklad při teplotách okolo 200 °C, což vede ke vzniku mikrotrhlin na jejich povrchu z toho důvodu často nelze využívat kompozitní nástroje pro více než několik set vytvrzovacích cyklů. Mezi další typické známky opotřebení těchto nástrojů se řadí oděr povrchu způsobený především čistícími operacemi. [8]



Obrázek 14 Typické prvky u kompozitních nástrojů [6]

2.3.1 Výroba

Technologie výroby vytvrzovacích nástrojů z kompozitů je zjednodušeně shrnuta do následujících bodů: [21]

a) Výroba modelu (master model)

Model je vyroben nejčastěji třískovým obráběním pomocí CNC obráběcího stroje z připraveného polotovaru. Použitý polotovar často bývá slepen z více bloků materiálu, případně je využit polotovar, který se skládá ze základní nosné konstrukce a hrubého tvaru dílu, na kterém je nanesena vrstva pryskyřice ve formě pasty. Tato vrstva je po vytvrzení obrobena do požadovaného tvaru. V případě tvarově jednodušších modelů je možné jejich konstrukci vytvořit pomocí plechu, u kterého je požadovaný tvar zajištěn pomocí žeber. [21]

Tabulka 4 Materiály master modelů a jejich vlastnosti [21]

Materiál master modelu	Výhody	Nevýhody
Ytong	Dostupnost, hmotnost, cena, teplotní odolnost	Křehkost, jakost povrchu
Ocel s podpůrnou konstrukcí	Dostupnost, cena, teplotní odolnost	Pouze pro jednoduché tvary
Dřevo (masiv)	Dostupnost, hmotnost, cena, teplotní odolnost	Vliv vlhkosti na rozměrovou stabilitu
PUR pěna (modelové bloky)	Standartní technologie, hmotnost, homogenita povrchu, rozměrová stabilita	Vyšší cena
PUR (modelovací pasty)	Standartní technologie, homogenita povrchu, rozměrová stabilita	Vyšší cena, komplikované nanášení
Nástrojové bloky (Epoxyd)	Homogenita povrchu, teplotní odolnost, rozměrová stabilita	Vysoká cena
Uhlíková pěna	Teplotní odolnost, hmotnost, tuhost, rozměrová stabilita	Špatná dostupnost, vysoká cena

b) Aplikace gelcoatu

Na připravený a naseparovaný model je v některých případech aplikován gelcoat, jehož úkolem je dosáhnout lepší kvality povrchu formy a vytvořit ochrannou vrstvu,

kterou je možné brousit a opravovat. Tloušťka této vrstvy bývá nejčastěji okolo několika desetin milimetru. [21]

c) **Skladba materiálu**

Technologické vrstvy se liší podle použité technologie výroby. [21]

d) **Sycení a vytvrzování**

Sycení materiálu probíhá pouze u technologie VARTM. Vytvrzování probíhá nejčastěji v autoklávu nebo v peci. Parametry vytvrzování jsou závislé na vytvrzovaném materiálu a požadovaných vlastnostech. [21]

e) **Odformování**

Po vytvrzení následuje sejmutí vytvrzeného materiálu z modelu a začištění. V některých případech je vhodné formu připevnit k podpůrné konstrukci. [21]

f) **Dokončování**

Mezi dokončovací operace se může řadit obrábění formy, ověřování tvaru formy a kontrola jejího povrchu. [21]

3 AKTUÁLNÍ VÝVOJ A VÝROBCI TOOLING PREPREGU

Pro výrobu kompozitních nástrojů (forem) se nejčastěji využívají materiály označované jako tooling prepregy. Obecné vlastnosti prepreg materiálů byly popsány již v přecházejících kapitolách, ovšem tooling prepregy mají vlastnosti upravené tak, aby kompozitní nástroje, které jsou z těchto materiálů vyrobeny, splňovali vysoké nároky, které jsou na ně kladeny. [24]

3.1 Výrobci tooling prepregu

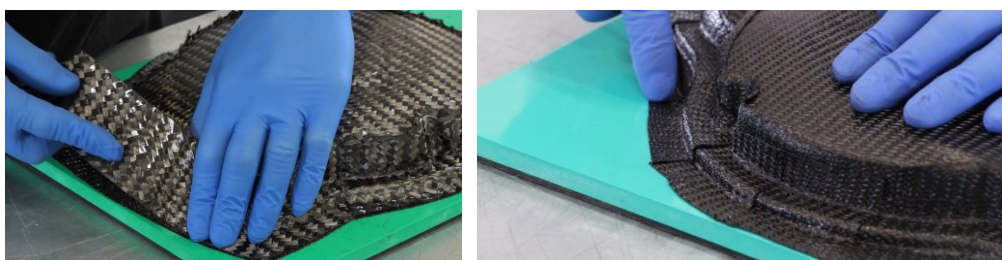
V této kapitole budou uvedeny příklady firem zabývajících se výrobou tooling prepregu a také zde budou popsány jejich produkty a práce při vývoji těchto produktů.

3.1.1 Společnost Easy Composites

Společnost Easy Composites byla založena v roce 2010 ve Velké Británii a v časně době se řadí mezi globální lídry ve výrobě a dodávkách pokročilých kompozitních materiálů. Tato společnost se také zabývá testováním a hodnocením jejich kvality, a především výzkumem a vývojem nových pokročilých kompozitních technologií a také poskytuje podrobné návody pro výrobu kompozitních forem s využitím jejich produktů. [26]

Pro vytvrzování v peci ve vakuu mimo autokláv byl touto společností vyvinut tooling prepreg pod označením XT135. Tento produkt byl vyvinut tak, aby splňoval vysoký standard v rámci kvality povrchu a velmi nízkého obsahu dutin vzniklých během vytvrzování a tím umožňoval výrobu vysoce kvalitních kompozitních forem bez značných investic a provozních nákladů na autokláv. Prepreg XT135 je na bázi uhlíkových vláken a nejčastěji je dodáván s hustotou tkaniny 250 g/m² a 415 g/m² tvořící keprovou vazbu. [27]

Dalšími produkty jsou tooling prepregy pod označením XT180 a XT210, které jsou určeny pro vytvrzování v autoklávu. Kompozitní forma z těchto dvou materiálů je vhodná pro vyšší provozní teploty a dosahuje lepších mechanických vlastností. Tyto řady prepregů jsou nejčastěji vyráběny na zakázku podle přesných požadavků na výsledný produkt. [27]



Obrázek 15 Tooling prepreg XT135 [27]

3.1.2 Společnost Hexcel

Společnost Hexcel je výrobce uhlíkových vláken, výztužných tkanin, lepidel, pryskyřic, RTM systémů a před-impregnovaných laminátů. Tato společnost také představila tooling prepreg určený pro výrobu kompozitních nástrojů pod označením HexTOOL[®] M81 a M61. Tyto produkty mají kvazi-izotropní strukturu tvořenou uhlíkovými vlákny, díky které není vyžadován striktní harmonogram vrstvení. Plošná hmotnost je zde 2000 g/m² a 4000 g/m². Jejich výhodou je také jejich relativně snadná obrobitelnost, což umožňuje výrobu vysoce tvarově a rozměrově přesných kompozitních nástrojů. Hustota tohoto kompozitu je asi o 75 % nižší než v případě Invaru, což zajišťuje nízkou hmotnost, a tedy i snadnou manipulovatelnost. [28, 29, 30]

Produkt HexTOOL[®] M81 je navržen pro výrobu kompozitních nástrojů pomocí vytvrzování v autoklávu při teplotě 125 °C po dobu šesti hodin, po němž by mělo následovat vytvrzování v peci při teplotě 205 °C po dobu dvou hodin. Tento prepreg je založen na epoxidové pryskyřici s nízkou tekutostí. Lze jej skladovat při teplotě -18 °C po dobu dvanácti měsíců. Při pokojové teplotě je životnost omezena na 21 dní. Nástroje vyrobené z tohoto tooling prepregu vydrží více než 100 vytvrzovacích cyklů o teplotě 120 °C. [28, 29, 30]

Produkt HexTOOL[®] M61 je založen na bismaleimidové pryskyřici, díky tomu má tento prepreg zvýšenou lepidivost a životnost až 30 dní při pokojové teplotě. V případě použití tohoto produktu dosahují nástroje životnosti až několik set vytvrzovacích cyklů o teplotě 180 °C. [28, 29, 30]



Obrázek 16 Kompozitní nástroj vyrobený pomocí tooling prepregu HexTOOL[®] [30]

3.1.3 Společnost Composites Evolution

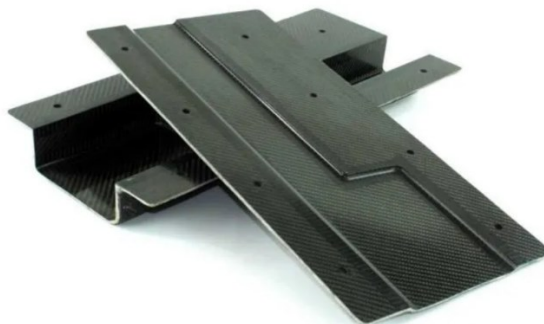
Společnost Composites Evolution sídlí ve Velké Británii a zabývá se vývojem, výrobou a prodejem prepregů. [31]

Pro výrobu kompozitních forem byla touto společností vyvinuta řada tooling prepregu pod označením Evopreg® EPT. Tato řada tooling prepregu se skládá z před-impregnovaných uhlíkových vláken tvořící keprovou vazbu s hustotou tkaniny 205 g/m² a 605 g/m². Doporučená metoda vytvrzování je pomocí autoklávu za teplot uvedených v materiálových listech daného produktu. [32, 33]

Prvním produktem této řady je prepreg pod označením EPT120, který byl navržen tak, aby zajistil vysokou flexibilitu a efektivitu výrobního procesu pomocí značné variability ve volbě vytvrzovacích cyklů. Tento produkt je také díky své dlouhé zpracovatelnosti při pokojové teplotě, která se pohybuje okolo 22 dnů, ideální pro výrobu větších a složitějších nástrojů nebo pro sériovou výrobu několika menších nástrojů před jediným předem plánovaným vytvrzováním. [32, 33]

Dalším produktem je prepreg pod označením EPT110. Nástroje vyrobené z tohoto materiálu poskytují vysokou rozměrovou stabilitu, velmi dobrou kvalitu povrchu a teplotní odolnost až do teploty 190 °C. [32, 33]

Tato společnost také vyvinula nový nástrojový prepregový systém založený na hybridní kombinaci uhlíkové a lněné výztuže. V tomto novém hybridním nástrojovém systému je tedy několik uhlíkových objemových vrstev nahrazeno cenově dostupnějším lnem a tím je dosaženo výrazného snížení nákladů na výrobu nástroje (až o 15 %). Částečné nahrazení uhlíku lnem lze provést, jelikož tepelná roztažnost lněných vláken je téměř totožná s tepelnou roztažností uhlíkových vláken. Sekundární výhodou je pak i snížení hmotnosti nástroje a nižší zátěž na životní prostředí. [34]



Obrázek 17 Nástroje z hybridního prepregového systému od firmy Composites Evolution [34]

3.1.4 Společnost Advanced Composites Group (ACG)

Společnost ACG vyvinula deformovatelný kompozitní systém pod označením DForm[®] vhodný pro výrobu nástrojů, který kombinuje konformitu krátkých vláken se směrovými vlastnostmi dlouhých vláken. Tento produkt poskytuje při výrobě kompozitních nástrojů oproti standartním dlouhovláknovým tkaninovým prepregům řadu výhod, mezi které se převážně řadí velmi snadná přizpůsobivost složitým geometriím při výrobě tvarově složitějších nástrojů. Tento kompozitní systém zároveň poskytuje zaručený plochý povrch nástroje bez lokálních ztenčení, bez ztráty orientace vláken nebo změn v obsahu pryskyřice. [28]

3.1.5 Společnost Toray Advanced Composites

Společnost Toray poskytuje řadu epoxidových před-impregnovaných laminátů pod označením AmberTool[®], která je vhodná pro výrobu kompozitních nástrojů. Jedná se o vysoce flexibilní materiál se zpracovatelností při pokojové teplotě po dobu až 30 dnů, vysokou lepivostí a velmi nízkou vytvrzovací teplotou. Vytvrzování je tedy možné provádět již od teploty 40 °C. Tyto prepregy obsahují podle požadovaných vlastností výztužný materiál na bázi skla nebo uhlíku. Nástroje vyrobené z tohoto produktu dosahují dobré kvality povrchu a nízké poréznosti. [35]

3.1.6 Společnost 3M Advanced Composites

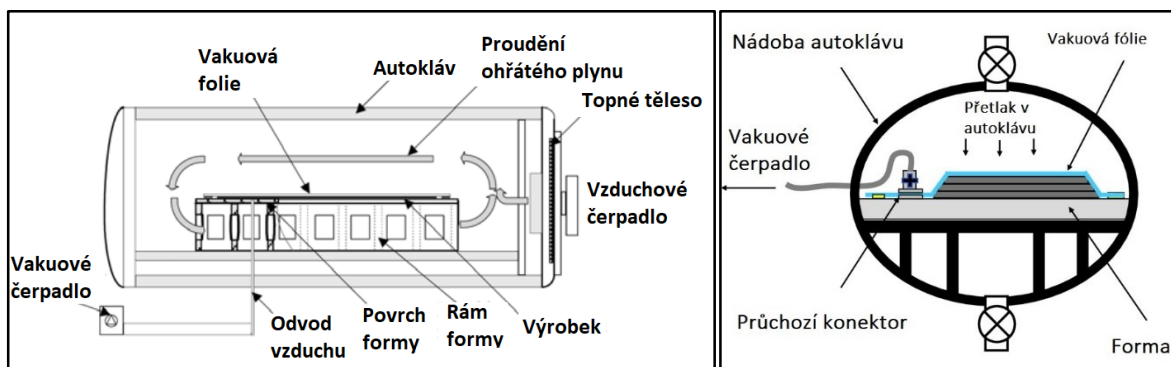
Společnost 3M Advanced Composites ve spolupráci s firmou TenCate představila svůj prepreg pro výrobu nástrojů již v roce 2012. Od této doby tyto společnosti společně vyvíjí a dodávají produkty pro výrobu nástrojů. V případě společnosti 3M se jedná o produkty pod označením Fortified Tooling Prepreg, které jsou na bázi uhlíkových vláken a pryskyřice obohacené nanočásticemi oxidu křemičitého. Právě tento produkt představoval pro společnost 3M velký průlom při vývoji nástrojových prepregů, jelikož nástroje z tohoto produktu mají vysokou lomovou houževnatost, smykovou pevnost, tvrdost a odolnost proti poškrábání a vzniku mikrotrhlin a oproti dříve používaným materiálům vykazovali až o 33 % nižší hodnotu smrštění. [36]

4 TECHNOLOGIE VYTVRZOVÁNÍ KOMPOZITŮ V AUTOKLÁVU

Technologie vytvrzování kompozitů v autoklávu je jednou z nejběžnějších metod využívajících se pro zpracování prepreg materiálů s termosetovou matricí, jelikož umožňuje relativně velkou flexibilitu použití. Primární funkcí této technologie je zajištění určité teploty a tlaku působícího po stanovenou dobu na vytvrzovaný materiál. Materiál je konkrétně uložen pod vakuovou folií, pod níž je aplikováno vakuum a na vnější stranu této folie naopak působí přetlak. Tato technologie se využívá především pro výrobu tvarově složitých a rozměrných kompozitních výrobků o malých až středně velkých sériích s velmi nízkým rizikem vzniku dutin a pórů ve zpracovávaném materiálu. Nevýhodou této technologie je ovšem vysoká pořizovací cena zařízení a jeho relativně vysoká energetická náročnost. [8, 17, 37]

4.1 Princip autoklávu

Autokláv je tlakové zařízení, které se skládá z tlakové nádoby, generátoru horkého plynu, cirkulace horkého plynu, vakuového systému, elektronického ovládání a dalších systémů (viz. obrázek 18). [37, 38]



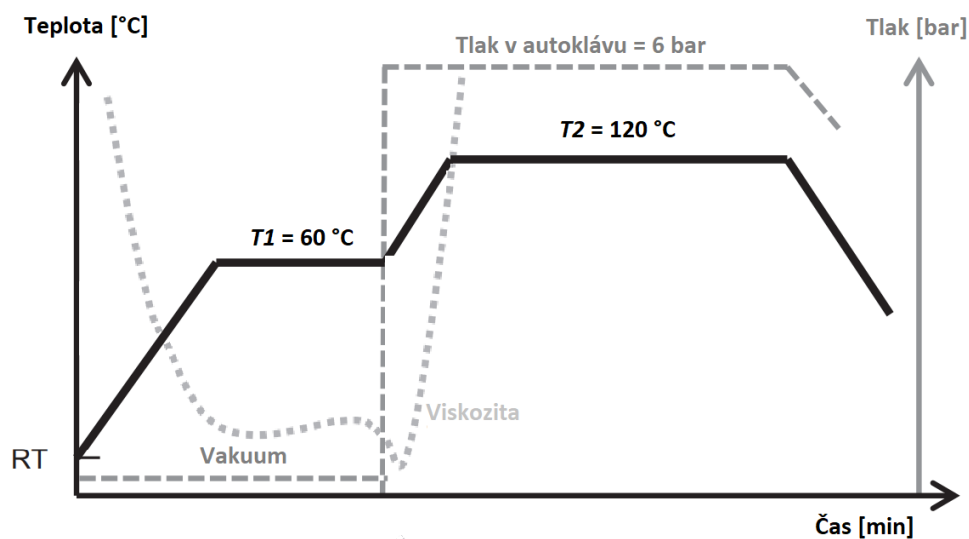
Obrázek 18 Princip autoklávu [37, 38]

Tlaková nádoba má nejčastěji válcový tvar o průměru 1 – 8 metrů s klenutými konci, z nichž jeden je tvořen dveřmi. Tyto zařízení jsou obvykle instalovány vodorovně na pevném podloží, aby do nich byl zajištěn snadný přístup. [12]

4.2 Princip vytvrzování

Vytvrzování kompozitních systémů na bázi epoxidu může trvat jen několik minut, ovšem obvykle se čas vytvrzování pohybuje v řádu hodin. Průběh typického vytvrzování v autoklávu spočívá v ohřevu na teplotu T_1 , následuje krátká výdrž na této teplotě, během

které klesá viskozita pryskyřice, neprobíhá síťovací reakce a na výrobek působí často pouze vakuum. Poté následuje ohřev na konečnou teplotu T_2 , při kterém dále klesá viskozita, dokud nedojde k zahájení síťovací reakce. Se začátkem ohřevu na tuto teplotu se zároveň také postupně navyšuje tlak v autoklávu, zatímco vakuum ve vakuovém vaku klesá. Teplota T_2 je nejčastěji udržována po dobu jedné až pěti hodin. Při výdrži na teplotě T_2 již dochází k procesu zesíťování a tato výdrž zároveň umožňuje dosažení rovnoměrné struktury. Po uplynutí výdrže na teplotě T_2 nastává postupné ochlazování v závislosti na teplotě zhruba po dobu hodiny. Při vytvrzovacím procesu tedy dochází jak ke změnám teplot, tak ke změně tlaku působícího na vytvrzovaný materiál. Hodnoty těchto teplot a tlaků se volí podle typu vytvrzovaného materiálu (viz. kapitola 1.3). Přenos tepla na vytvrzovaný materiál je zajištěn vedením a konvekcí tepla nebo tepelným zářením. Typický průběh vytvrzování epoxidového systému vyztuženého vlákny je znázorněn na obrázku 19. [8, 17]



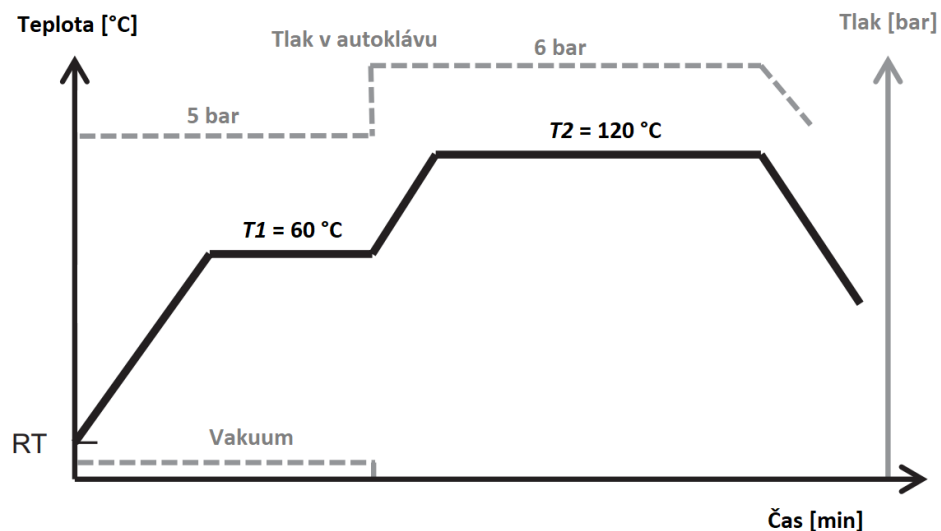
Obrázek 19 Konvenční tlakový a teplotní profil při vytvrzování kompozitního systému na bázi epoxidu [8]

Při volbě teploty a tlaku vytvrzování je třeba zohlednit následující požadavky:

- Pryskyřice musí být vytvrzována homogenně a musí dosahovat požadovaného stupně zesíťování v co nejkratším čase.
- V žádném místě součásti nesmí být překročena maximální přípustná teplota materiálu, jejíž hodnota je ovlivněna teplotou rozkladu daného materiálu.
- Tlak působící během vytvrzování musí být dostatečně vysoký, aby se zabránilo vzniku dutin a pórů ve vytvrzovaném výrobku a také, aby se zajistila rovnoměrná distribuce pryskyřice. [8]

Tlak uvnitř autoklávu je vytvářen inertním plynem, jakým je například N_2 nebo CO_2 . V některých případech lze využít i vzduch, ten ovšem při použití vysokých teplot zvyšuje nebezpečí požáru. Ke konsolidaci prepregů a ke snížení pórovitosti se obecně používá tlak o velikosti až 7 barů. Vyšší hodnota tlaku zároveň zajistí rychlejší dosažení požadované teploty v součásti, jelikož se zvýší účinnost přenosu tepla. Tento tlak také vytváří smykové síly, které zvyšují proudění pryskyřice a smáčení vláken. Všechny tyto uvedené faktory mají výrazný vliv na vlastnosti finálního kompozitního výrobku. [8]

Výše popsany tlakový profil ovšem nemusí být vždy nutně ideální, jelikož pokud pryskyřice začne gelovatět již během první izotermie (teploty $T1$), pak nelze dosáhnout její dobré konsolidace. Tlak, který následně začne působit, tedy nebude schopen snížit pórovitost. Další problém takového ohřevu je spojen s hydrostatickým tlakem pryskyřice. Protože pokud je materiál během první izotermie pouze ve vakuu, pak je hydrostatický tlak velmi nízký nebo dokonce záporný a z toho důvodu se následně v materiálu mají tendenci vytvářet póry. Abychom těmto problémům předešli je často běžnou praxí vytvořit tlak působící na materiál již během první izotermie, jehož velikost se pohybuje přibližně okolo 60 – 85 % maximálního tlaku, který se aplikuje v druhé izotermě (viz. obrázek 20). [8]



Obrázek 20 Tlakový a teplotní profil s nárůstem tlaku již v průběhu první izotermie [8]

5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů je potřeba posuzovat jak z hlediska jejich složení, tak z hlediska jejich konstrukce, způsobu zpracování a druhu namáhání. A to z toho důvodu, že všechny tyto faktory výrazně ovlivňují mechanické chování daného kompozitního materiálu. Mechanické vlastnosti lze podle stupně komplexnosti testovaného vzorku charakterizovat na pěti úrovních: [2]

- složka (vlákna, matrice),
- lamina (vrstva),
- laminát,
- konstrukční prvek,
- konstrukční sestava. [2]

K získání vstupních dat pro teoretické určení makromechanických vlastností se využívá mikromechanická analýza. Tím se rozumí, že k určení vlastností laminátu a konstrukčního prvku je potřeba znát vlastnosti jednotlivých složek, případně laminy. Mezi základní charakteristiky lamin se řadí tuhost a pevnost. Tuhost laminy je určena čtyřmi nezávislými veličinami: [39, 40]

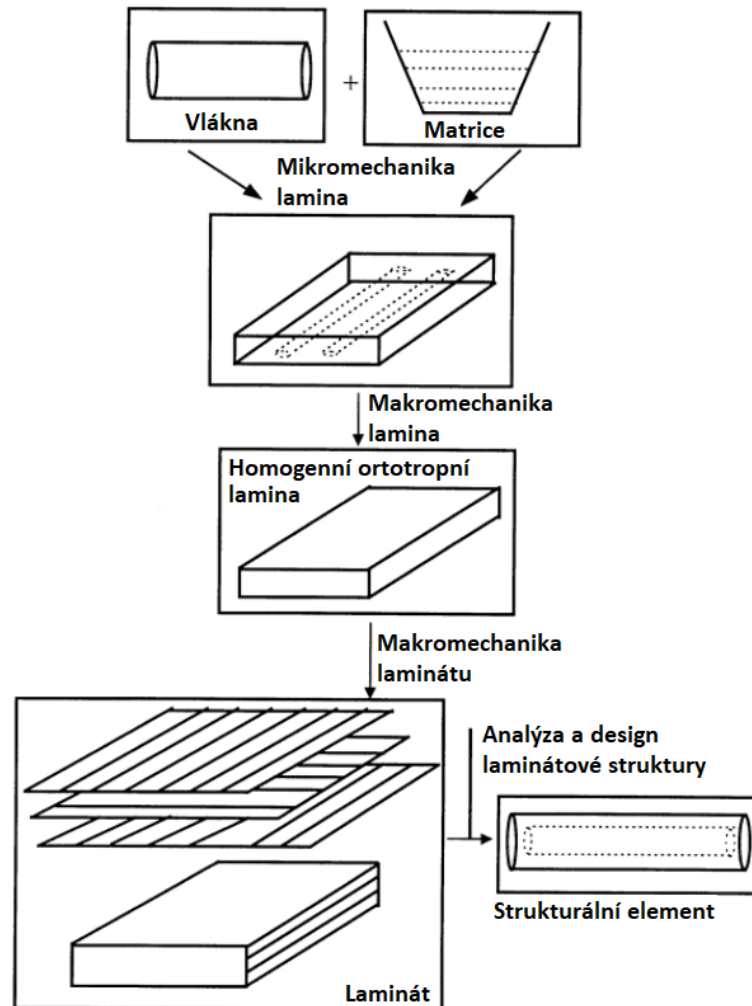
- modulem pružnosti ve směru vláken E_L ,
- modulem pružnosti ve směru kolmém k vláknům E_T ,
- modulem pružnosti ve smyku G ,
- Poissonovým číslem μ .

Pevnost laminy je pak dána:

- mezí pevnosti v tahu ve směru vláken,
- mezí pevnosti v tahu ve směru kolmém k vláknům,
- mezí pevnosti v tlaku ve směru vláken,
- mezí pevnosti v tlaku ve směru kolmém k vláknům,
- mezí pevnosti ve smyku v rovině vrstvy. [40]

Jakmile analyticky určíme vlastnosti těchto složek a lamin, pak je můžeme začít považovat za homogenní vrstvy, ze kterých se skládá výsledný laminát nebo konstrukční prvek.

Ten by měl být navržen tak, aby měl v jednotlivých směrech požadované mechanické vlastnosti. Využívá se zde tedy anizotropie materiálů. K analýze těchto materiálů se následně využívá teorie vrstvených desek nebo skořepin. [39, 41, 42]



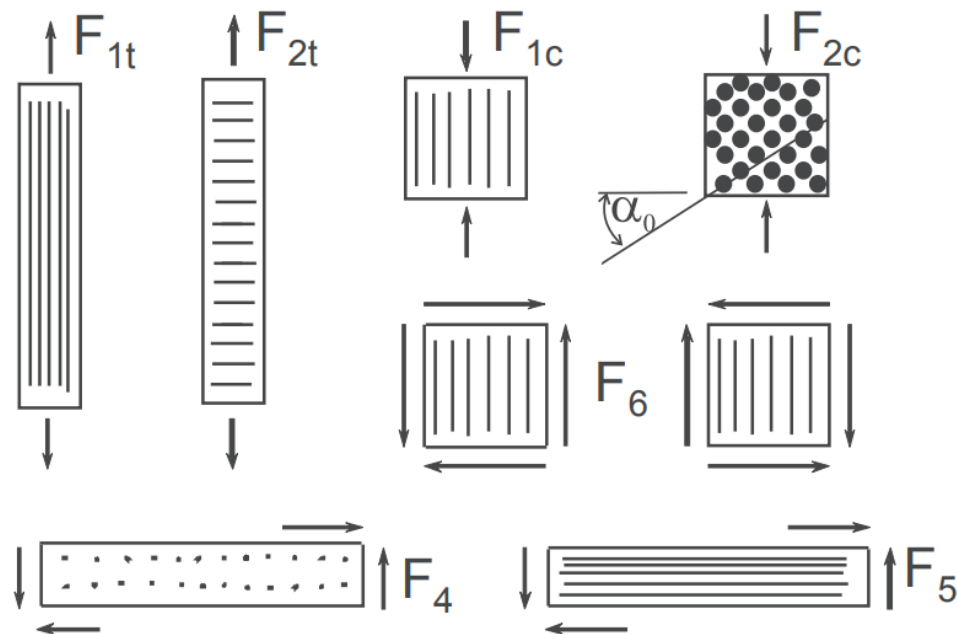
Obrázek 21 Schéma analýzy laminátových kompozitů [43]

5.1 Mikromechanika kompozitních materiálů

Jak již bylo zmíněno, tak teorie mikromechaniky kompozitních struktur je založena na přijetí hypotézy o ekvivalentní makroskopické homogenitě. Pomocí této hypotézy je možné efektivně formulovat základní makroskopické vlastnosti heterogenních látek v závislosti na vlastnostech jednotlivých složek a geometrických parametrech kompozitní struktury. To znamená, že tato hypotéza umožňuje prezentovat heterogenní materiál jako ekvivalentní anizotropní homogenní materiál, jelikož zde platí předpoklad, že charakteristický rozměr struktury je dostatečně malý ve srovnání s charakteristickým rozměrem tělesa. [12, 41]

Mikromechanika se nejčastěji využívá k předpovědi tuhosti a pevnosti materiálu. Při těchto předpovědích se uplatňují různé přístupy, ovšem u žádného z nich se nedosahuje absolutní přesnosti. [12]

Jednoduché zkušební konfigurace používané k měření hodnot pevnosti pro jednosměrnou laminu jsou znázorněny na obrázku 22. [12]



Obrázek 22 Zkušební konfigurace pro jednosměrnou laminu [12]

5.2 Makromechanika kompozitních materiálů

Makromechanika se zabývá popisem vlastností laminátů nebo konstrukčních prvků. V praxi se nejčastěji vytvářejí kompozitní konstrukce z laminátů, které mají několik vrstev s různou orientací vláken. Orientace vláken v jednotlivých vrstvách se volí podle způsobu zatížení kompozitní konstrukce. Výsledné vlastnosti laminátu závisí na parametrech struktury a vlastnostech jednotlivých lamin. [12, 41]

Technická laminátová teorie je zobecněním rovnic technické teorie mechanického chování izotropních desek a skořepin. [41]

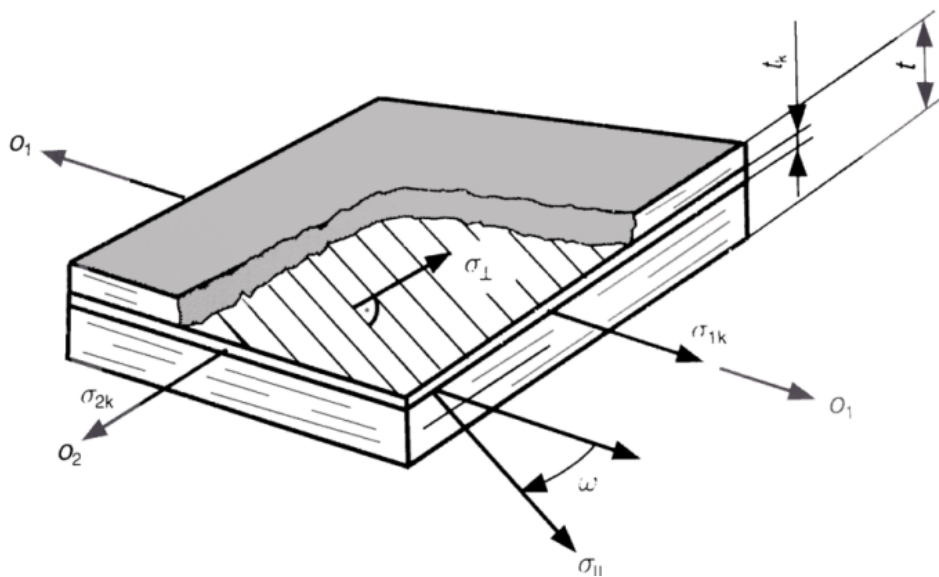
5.2.1 Laminátová teorie

Laminátová teorie neboli dvourozměrná teorie kontinua se využívá k určení napětí $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ a jednotlivých složek přetvoření $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$ v každé vrstvě laminátu. [7]

Tato teorie je aplikovatelná, pokud jsou splněny následující podmínky: [7]

- všechny vrstvy se v důsledku pevného spojení deformují stejně,
- tloušťky desek a skořepin jsou u sendvičových struktur malé,
- jedná se o symetrický laminát (viz. kapitola 1.5.2). [7]

K popisu laminátové teorie byl zvolen rovinný element vrstveného kompozitu (obrázek 23), který je složen z určitého množství n jednosměrně vyztužených vrstev, jejichž orientace se vztahuje k osám O_1 A O_2 . [7]



Obrázek 23 Rozložení složek v laminátu [7]

Podle první podmínky laminátové teorie pak platí pro k -tou vrstvu podmínka kompatibility:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{1k} &= \bar{\varepsilon}_1, \\ \varepsilon_{2k} &= \bar{\varepsilon}_2, \\ \gamma_{12k} &= \bar{\gamma}_{12}.\end{aligned}\tag{2}$$

Veličiny s pruhem označují přetvoření všech vrstev laminátu v osách O_1 A O_2 . [7]

Stav napjatosti v jednotlivých vrstvách laminátu je určen pomocí vztahu tuhosti Q jednotlivých vrstev ($k=1$ až n): [7]

$$\begin{aligned}\sigma_{1k} &= Q_{11k}\bar{\varepsilon}_1 + Q_{12k}\bar{\varepsilon}_2 + Q_{16k}\bar{\gamma}_{12}, \\ \sigma_{2k} &= Q_{12k}\bar{\varepsilon}_1 + Q_{22k}\bar{\varepsilon}_2 + Q_{26k}\bar{\gamma}_{12}, \\ \tau_{12k} &= Q_{16k}\bar{\varepsilon}_1 + Q_{26k}\bar{\varepsilon}_2 + Q_{66k}\bar{\gamma}_{12}.\end{aligned}\tag{3}$$

Na základě uvedených stavů napjatosti je následně nutné stanovit podmínky rovnováhy, které se vyjadřují silami na jednotku šířky: [7]

$$\begin{aligned} f_1 &= \bar{\sigma}_1 \cdot t = \sum_{k=1}^N \sigma_{1k} t_k, \\ f_2 &= \bar{\sigma}_2 \cdot t = \sum_{k=1}^N \sigma_{2k} t_k, \\ f_{12} &= \bar{\tau}_{12} \cdot t = \sum_{k=1}^N \sigma_{12k} t_k. \end{aligned} \quad (4)$$

kde: f_1, f_2, f_{12} – síly na jednotku délky

t – celková tloušťka stěny

t_k – tloušťka jednotlivé vrstvy ($k=1$ až n)

$\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\tau}_{12}$ – střední napětí v kompozitu

Z uvedených rovnic můžeme následně určit Hookův zákon pro vícevrstvý kompozitní materiál: [7]

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_1 &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N Q_{11k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N Q_{12k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N Q_{16k} \frac{t_k}{t}, \\ \bar{\sigma}_2 &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N Q_{12k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N Q_{22k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N Q_{26k} \frac{t_k}{t}, \\ \bar{\tau}_{12} &= \bar{\varepsilon}_1 \sum_{k=1}^N Q_{16k} \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 \sum_{k=1}^N Q_{26k} \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} \sum_{k=1}^N Q_{66k} \frac{t_k}{t}, \end{aligned} \quad (5)$$

Součinitelé u složek poměrné deformace představují tuhosti celého laminátu. Z tohoto zákona tedy plyne tzv. zákon spolupůsobení: [7]

„Hodnota každého prvku matice tuhosti vícevrstvého kompozitu je rovna součtu tuhostí jednotlivých vrstev.“

Jak je patrné, důsledkem jednoduché laminátové teorie je nezávislost elastických vlastností laminátu na pořadí uložených vrstev. [7]

5.2.2 Vyztužující účinek vláken a mechanismy porušování kompozitu

V kompozitních materiálech je možné v rovině vrstvy uložit vlákna v libovolném směru. Obecně lze říci, že vyztužující účinek dosahuje maxima, pokud jsou tyto vlákna uložena ve směru namáhání, jelikož vlákna uložena kolmo ke směru zatížení naopak snižují pevnost tohoto materiálu. U kompozitů s vlákny uloženými v různých směrech dochází, že se popsané vlastnosti superponují. To znamená, že pokud je laminát v jednom směru zatížen tahem, pak ve vrstvách s orientací vláken mimo směr zatížení dochází k poškození dříve než v případě vrstev s vlákny orientovanými ve směru namáhání. Důsledkem toho je, že v určitém momentu zatížení začnou ve struktuře tohoto kompozitu vznikat trhliny, které způsobují snížení tuhosti materiálu, jelikož v určitých případech mohou mít negativní vliv i na vrstvy, které jsou zatěžovány ve směru vláken. Z toho důvodu může při zvýšeném vzniku trhlin dojít i k samotnému selhání materiálu, a to zejména u materiálů náchylných ke vzniku mezivláknové poruchy. Tvorba těchto trhlin je ovšem více nežádoucí z hlediska působení chemických látek. [7]

K selhání konstrukčního prvku dochází tehdy, pokud tento prvek nemůže dále plnit svou funkci. Nejčastějším typem selhání je lom materiálu, ovšem může se zde řadit také nadměrný průhyb, při kterém se nadměrně sníží výkonnost materiálu. Průhyb materiálu lze předpovídat snadněji než vznik trhlin a lomu. K předpovědi těchto selhání se berou v úvahu následující kritéria: [12]

- kritérium maximálního napětí,
- kritérium maximální deformace,
- kritérium interakčního porušení,
- zkrácené kritérium maximální deformace,
- mechanika poškození. [12]

Chování při porušení jednosměrně vyztužené vrstvy se odráží také v chování laminátu s vrstvami ve formě tkaniny. Jelikož takový kompozit je opět složen z vrstev, které jsou zároveň zatěžovány jak ve směru vláken, tak ve směru kolmém na směr vláken. V tomto materiálu tedy při zatížení vznikají první poruchy na příčně uložených vláknech a tím nepatrně poklesne jeho tuhost. Ovšem až se zvyšujícím zatížením dojde k porušení i nosných vláken uložených ve směru namáhání, a tedy k selhání materiálu. [7]

5.3 Zkoušky mechanických vlastností kompozitních materiálů

Nestabilita technik zpracování kompozitů a nedostatek přesných teorií, které by plně předpovídali jejich vlastnosti a chování, vyžaduje k určení mechanických vlastností kompozitních materiálů provádět zkoušky mechanických vlastností přímo na daném materiálu. Při těchto zkouškách je potřeba vzít v úvahu rozložení a obsah výztuže, složitost vnitřní struktury a anizotropní případně kvazi-izotropní chování materiálu. [2]

Zkoušky mechanických vlastností můžeme rozdělit na: [2]

- statické (tah, tlak, ohyb),
- dynamické (zkouška rázové houževnatosti).

5.3.1 Zkouška v tahu

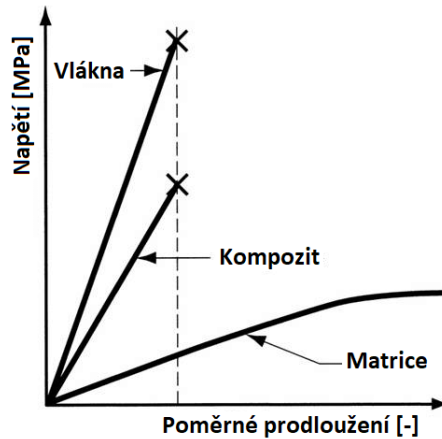
Tahová zkouška je obecně u polymerních materiálů dána normou ČSN EN ISO 527-1 až 5. Kompozitní materiály vyztužené jednosměrnými vlákny popisuje norma ČSN EN ISO 527-5 a zkušební podmínky pro izotropní a ortotropní kompozity vyztužené vlákny jsou popsány normou ČSN EN ISO 527-4. Právě poslední zmíněná norma tedy slouží k popisu tahové zkoušky pro kompozity s výztuží ve formě tkanin a rohoží. [44, 45, 46]

Princip zkoušky:

Princip této zkoušky spočívá v tahovém namáhání zkušební vzorku konstantně se měnícím zatížením. Toto zatížení působí v jedné ose. Rychlost zatěžování se nejčastěji určuje v závislosti na délce zkušební tělesa. Obecně se udává rychlost zatěžování jako 1 % celkové délky zkušební tělesa za minutu. Výsledkem tohoto zatížení je deformace zkušební vzorku až do jeho přetržení, nebo do dosažení požadovaného prodloužení. [7, 44]

K zavedení tahového zatížení do vzorku se nejčastěji používají upínací čelisti. Tímto způsobem upnutí dochází k tomu, že je tahové zatížení vyvoláno smykovou silou na rozhraní čelistí a vzorku. Tato smyková síla je rovna součinu upínací síly a efektivního koeficientu tření na tomto rozhraní. Vzorek musí být upnut takovou silou, aby se zabránilo jeho poškození nebo vytržení z čelistí. [47]

Průběh tahové zkoušky u kompozitních materiálů je dán tahovým diagramem uvedeným na obrázku 24. [48]



Obrázek 24 Tahový diagram [48]

Pomocí tahové zkoušky zjišťujeme a vyhodnocujeme převážně pevnost, poměrné prodloužení, modul pružnosti, tažnost a zúžení zkoušeného materiálu. [7, 44]

Mez pevnosti v tahu lze určit pomocí následujícího vztahu: [49]

$$\sigma_{t_{max}} = \frac{F_{t_{max}}}{S_0} \quad (6)$$

kde: $\sigma_{t_{max}}$ – mez pevnosti v tahu [MPa]

$F_{t_{max}}$ – zatěžující síla [N]

S_0 – původní průřez zkušebního tělesa [mm²]

Poměrné prodloužení je pak dáno vztahem: [49]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (7)$$

kde: ε – poměrné prodloužení [-]

Δl – prodloužení zkušebního tělesa [mm]

l_0 – původní délka zkušebního tělesa [mm]

Modul pružnosti ve směru osy x lze určit v oblasti malých deformací, tedy v oblasti, kde je závislost napětí na poměrném prodloužení lineární, pomocí následující rovnice: [7]

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} \quad (8)$$

kde: E_x – modul pružnosti ve směru osy x [MPa]

σ_x – napětí ve směru osy x [MPa]

ε_x – poměrné prodloužení v ose x [-]

Ke stanovení modulu pružnosti v ose y je nutné určit hodnoty σ_y a ε_y pomocí Poissonova čísla, které se stanoví z přetvoření ε_x a ε_y vyvolaných napětím σ_x : [7]

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (9)$$

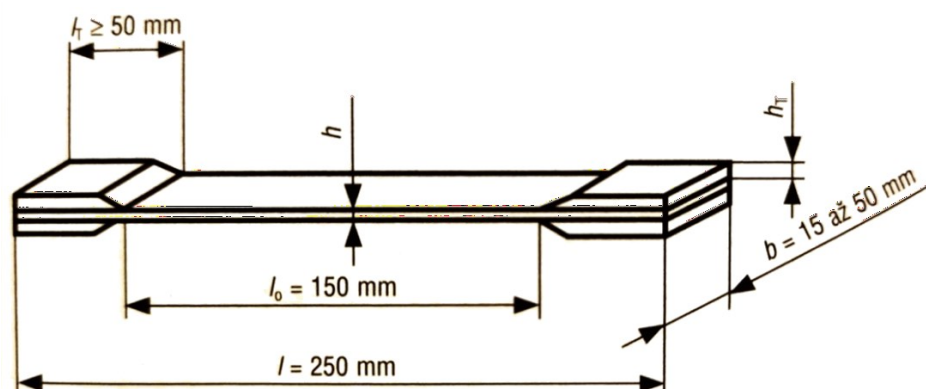
kde: ε_x – poměrné prodloužení v ose x [-]

ε_y – poměrné prodloužení v ose y [-]

Přetvoření se u tahové zkoušky obvykle měří odporovými tenzometry nebo průtahoměry. [7]

Zkušební vzorky:

V případě kompozitních materiálů je pro tahovou zkoušku možné využít více typů zkušebních vzorků. Rozměry a tvary těchto vzorků jsou popsány příslušnou normou. U laminátů s výztuží ve formě tkaniny a také u jednosměrně vyztužených laminátů se v mnoha případech osvědčilo využití prizmatického zkušebního tělesa se zesílením v místě upnutí, viz. obrázek 25. Materiál zesílení by měl mít shodný modul pružnosti jako materiál zkušebního tělesa a toto zesílení by také mělo být zkoseno ve směru k měrné délce tělesa, a to z toho důvodu, aby se snížil vliv koncentrace napětí. Tato část nejčastěji bývá ke zkušebnímu vzorku přilepena pomocí lepidla s vysokou roztažností. Lom zkušebního tělesa musí nastat ve vzdálenosti minimálně 10 mm od konců zesílení. Abychom dosáhli přesných výsledků měření, pak musí být zkušební těleso z polotovaru vyříznuto vždy v ose ortotropie materiálu. Toto pravidlo platí zvláště u vzorků, které jsou vyztuženy jednosměrnými vlákny. [7, 46, 47]



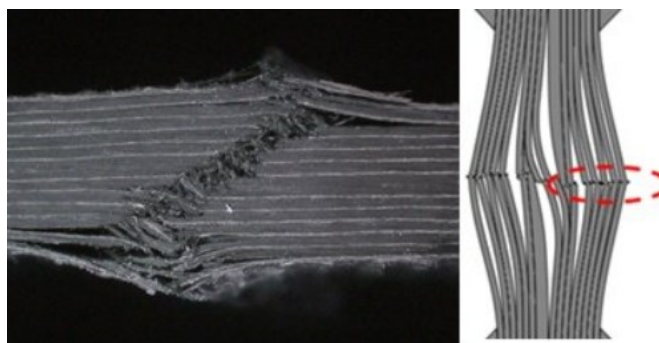
Obrázek 25 Příklad zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku jednosměrně, izotropně a anizotropně vyztuženého kompozitu dle normy ČSN EN ISO 527 [7]

5.3.2 Zkouška v tlaku

Zkouška v tlaku v rovině výztuže pro vlákny vyztužené plastové kompozity je popsána normou ČSN EN ISO 14126. Mezi další běžně používané zkušební normy se řadí norma ASTM D695 a ASTM D3410. [50]

Princip zkoušky:

Princip této zkoušky spočívá v tlakovém namáhání zkušebního vzorku plynule se měnícím zatížením. Při tomto zatěžování je zároveň zabráněno vybočení zkušebního vzorku z osy namáhání, a to z toho důvodu, že v případě kompozitních materiálů má při tlakovém namáhání výrazný vliv na výsledky měření mikrovzpěr jednotlivých vláken (obrázek 26). Proto je vhodné toto chování eliminovat použitím různých přípravků, které poskytují přesné vyrovnání a vedení zkušebního vzorku. Vybočení zkušebního vzorku zároveň v mnoha případech nelze vizuálně pozorovat, z toho důvodu se k odhalení tohoto jevu využívají dva axiálně orientované tenzometry namontované na protilehlých plochách měřeného vzorku. Maximální tolerovaná hodnota vybočení neboli ohybu zkušebního vzorku je pak dána příslušnou normou. [47, 50]

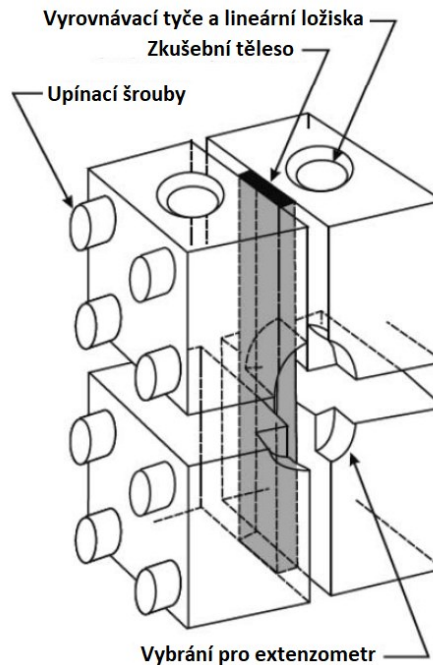


Obrázek 26 Mikrovzpěr vznikající při zkouškách tlakem kompozitních materiálů [51]

Obecně existují tři způsoby zavedení tlakového zatížení do zkušebního vzorku: [50]

- Koncové zatížení (ASTM D695) – veškeré zatížení je zavedeno do plochého konce zkušebního tělesa.
- Smykové zatížení (ČSN EN ISO 14126 – metoda 1, ASTM D3410) – zatížení je zaváděno do širokých ploch zkušebního tělesa.
- Kombinované zatížení (ČSN EN ISO 14126 – metoda 2, ASTM D6641) – kombinace smykového a koncového zatížení.

Koncepce kombinovaného zavedení zátěže se vyvinula z pokusu eliminovat deformaci vzorků v důsledku působení koncových zatížení. Přípravek využívající se k upnutí vzorku při tomto druhu zatěžování je uveden na obrázku 27. [47]



Obrázek 27 Schéma přípravku pro kombinovanou zatěžovací kompresi [47]

Zkoušební vzorky:

V případě kompozitních materiálů se tlakové zkoušky provádějí na plochých a relativně tenkých zkoušebních vzorcích ve tvaru obdélníku. Přesné rozměry těchto vzorků jsou dány příslušnou normou. [47, 50]

5.3.3 Zkouška v ohybu

Zkouška v ohybu pro vlákny vyztužené plastové kompozity je popsána normou ČSN EN ISO 14125. [52]

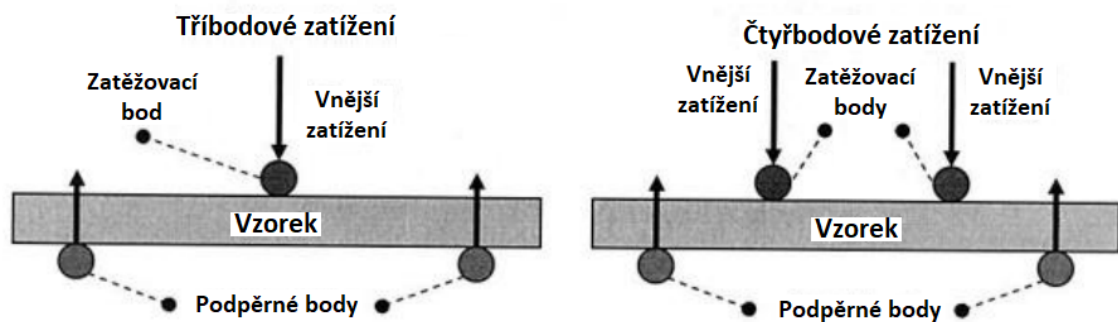
Ohyb není základní vlastností materiálu, jedná se o kombinaci těchto tří druhů namáhání: [53]

- tahu,
- tlaku,
- smyku.

Výsledkem toho je, že pokud se na vzorek aplikuje ohybové zatížení, indikují se všechny tři druhy napětí. Zkušební vzorek namáhaný ohybem tedy selže, jakmile jedno z těchto tří základních napětí dosáhne své mezní hodnoty. Navzdory zjevné složitosti vyplývající z kombinace více druhů namáhání je zkouška v ohybu relativně snadno proveditelná. [53]

Princip zkoušky:

Zkušební vzorek je při zkoušce zatěžován ve vodorovné poloze v konfiguraci třibodového nebo čtyřbodového zatížení. Zkušební přípravek má dva podpěrné body nacházející se v blízkosti obou konců zkušebního tělesa a zatěžovací čelo se vyskytuje s jednou (třibodové zatížení) nebo dvěma (čtyřbodové zatížení) konfiguracemi. Vzdálenost mezi podpěrami lze snadno upravit tak, aby se přípravek přizpůsobil různým geometriím vzorků a poměrům tloušťky k délce. V případě třibodového zatížení působí zatěžovací čelo do středu vzdálenosti podpěr a v případě čtyřbodového zatížení působí oba zatěžovací body až na výjimky v jedné čtvrtině délky rozpětí. [50, 53, 54]



Obrázek 28 Schéma třibodové a čtyřbodové zkoušky ohybem [55]

Zkušební vzorek je tedy vodorovně umístěn na podpěry přípravku a zatěžovací čelo začne plynule rostoucí silou působit na horní část zkušebního vzorku, a to tak, že tlakové napětí vzniká v horní části a tahové napětí ve spodní části průřezu. Maximální hodnoty těchto napětí jsou na povrchové vrstvě materiálu. Pokud je vzorek zároveň symetrický kolem střední roviny svého průřezu (např. obdélníkový), pak budou hodnoty maximálního tahového a tlakového napětí stejně velké. To, zda vzorek selže v tahu nebo tlaku pak závisí na tom, která hodnota pevnosti je nižší. [50, 53, 54, 56]

Ohybové zatížení má největší hodnotu v průřezu maximálního průhybu (v polovině vzdálenosti mezi podpěrami). V tomto místě se tedy nachází maximální hodnota ohybového momentu, kterou lze určit pomocí následující rovnice: [56]

$$M_o = \frac{F \cdot L_S}{4} \quad (10)$$

kde: M_o – maximální ohybový moment [Nmm]

F – působící síla [N]

L_S – vzdálenost mezi podpěrami [mm]

Tato hodnota ohybového momentu nám následně za předpokladu lineárního rozložení napětí v průřezu (lineárně-elastická oblast) slouží k určení celkového ohybového napětí uvnitř materiálu pomocí následujícího vztahu: [56]

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (11)$$

kde: σ_o – napětí v ohybu [MPa]

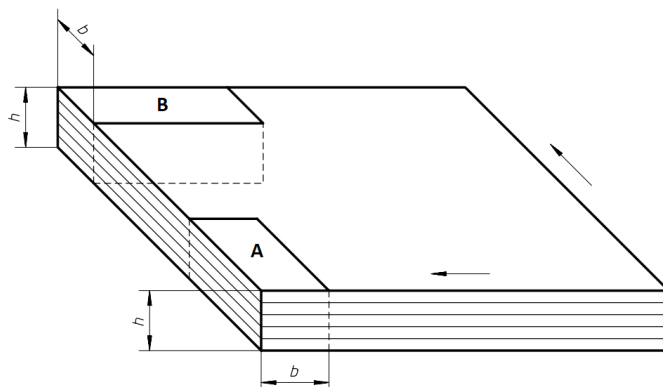
M_o – maximální ohybový moment [Nmm]

W_o – modul průřezu v ohybu [mm³]

Moduly průřezu základních geometrických obrazců jsou uvedeny v tabulkách. K jeho určení se využívají Steinerovy věty. [56]

Zkušební vzorky:

Rozměry a tvar zkušebních vzorků jsou dány příslušnou normou. Zkušební vzorek musí být vyřezán tak, aby byla osa zkušebního vzorku v jednom ze dvou hlavních směrů výrobku (viz. obrázek 29). Vzorky nesmí být zkroucené, povrchy a hrany vzorků nesmí být poškrábané a také by neměly obsahovat žádné důlky, propadliny a ořepy. Tloušťka vzorku se nesmí v rámci střední třetiny délky odchylovat o více než 2 % od střední hodnoty v centrální oblasti. Maximální tolerovaná odchylka od předepsané šířky vzorku je 3 %. Zkušební série musí obsahovat minimálně pět zkušebních vzorků. [52]



Obrázek 29 Rozmístění zkušebních vzorků [52]

5.3.4 Zkouška zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti

Zkouška sloužící ke stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku u vláknny vyztužených plastových kompozitů je dána normou ČSN EN ISO 14130. [57]

Jedná se o důležitou mechanickou zkoušku, která poskytuje informace o odolnosti kompozitu vůči delaminaci vznikající při působení smykových sil rovnoběžných s vrstvami laminátu, tzn informace o kvalitě vazby mezi pryskyřicí a vlákny. Tato zkušební metoda je relativně jednoduchá a je vhodná převážně pro kompozity s termoplastickou matricí. [58]

Princip zkoušky:

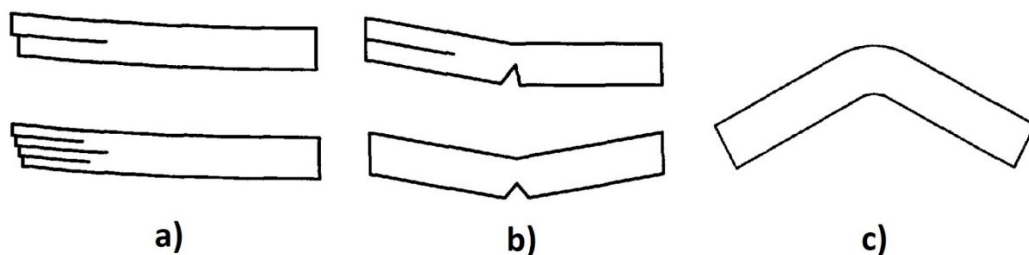
Mezilaminární pevnost ve smyku se určuje pomocí tříbodového ohybu krátkého nosníku. Krátký nosník je tedy umístěn na dvě podpěry s rozpětím 8 nebo 10 mm. Tyto vzdálenosti musí být určeny s přesností $\pm 0,1$ mm. Zatížení je na vzorek aplikováno ve středu vzdálenosti mezi podpěrami. Konkrétně se zde využívá skutečnosti, že pokud je rozpětí podpěr ve srovnání s tloušťkou vzorku dostatečně malé, pak dochází při ohybu v daném zkušebním vzorku k výskytu relativně velkého smykového napětí. Tímto způsobem lze v kompozitních materiálech generovat smykový lom, což umožňuje určení pevnosti ve smyku. [57, 59, 58]

Přípustné způsoby porušení ve smyku: [57]

- jednoduchý smyk,
- vícenásobný smyk.

Nepříjatelné způsoby porušení: [57]

- nesmykové způsoby porušení (tah, tlak),
- smíšené způsoby porušení (smyk a tah, smyk a tlak),
- plastický smyk.



Obrázek 30 Způsoby selhání krátkého nosníku [57]

a) jednoduchý a vícenásobný smyk; b) smyk a tah, tah; c) plastický smyk

Pro výpočet zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti lze využít následující rovnici: [58]

$$\tau_{12} = 0,75 \cdot \frac{F_{max}}{b \cdot h} \quad (12)$$

kde: τ_{12} – smyková pevnost [MPa]

F_{max} – maximální působící síla [N]

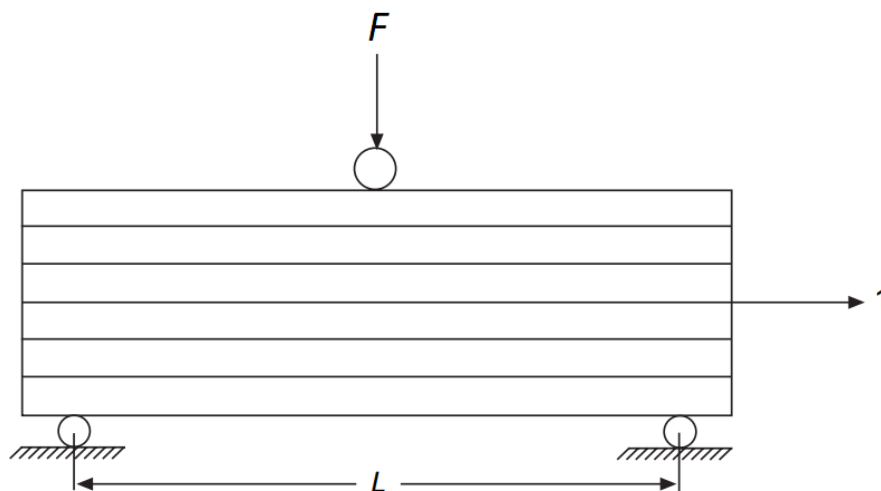
b – šířka měřeného vzorku [mm]

h – tloušťka měřeného vzorku [mm]

Tato rovnice je založena na předpokladu parabolicky rozloženého smykového napětí po tloušťce zkušební vzorku. Z toho důvodu je možné určit hodnotu mezilaminární pevnosti pouze zdánlivě. Proto není vhodné tuto zkušební metodu používat pro generování skutečných návrhových informací.

Zkušební vzorky:

Rozměry a tvar zkušebních vzorků určuje příslušná norma. Nejčastěji se však pro tuto zkoušku využívají standardní lamináty o tloušťce 2 mm s tolerancí $\pm 0,02$ mm a tato tloušťka musí být po celé délce v rozmezí 5 % střední tloušťky. Šířka vzorků by měla být s přesností $\pm 0,2$ mm. Vzorky musí být ploché a nesmí obsahovat žádné vady. Poloměr zatěžujícího čela musí být $5 \pm 0,2$ mm a poloměr podpěr $2 \pm 0,2$ mm. [57]



Obrázek 31 Zkouška zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku [58]

5.3.5 Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy

Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy je popsána normou ČSN EN ISO 179. [60]

Jedná se o dynamickou destruktivní zkoušku, která se používá pro stanovení rázové houževnatosti materiálu při vysokých rychlostech deformace. Tato houževnatost zohledňuje jak pevnost, tak tažnost materiálu. [50]

Princip zkoušky:

Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy se provádí ve tříbodovém ohybovém nastavení. Pro provedení této zkoušky je nutné na spodní část kladiva pevně nasadit požadovaný typ úderníku. Následně se kladivo uchytí v horní poloze. Poté je nutné správně umístit vzorek na podpěrný přípravek. V případě vzorků s vrubem je vrub otočen směrem od kyvadlového kladiva a je umístěn přesně naproti bodu, ve kterém kladivo narazí na vzorek. Následuje uvolnění kyvadla, čímž dojde k úderu úderníku na vzorek definovanou energií, což povede k jeho přeražení (lomu) jediným zásahem. Nárazem do vzorku předá kladivo část své kinetické energie. Poté se porovná rozdíl největšího výkyvu kladiva po přeražení vzorku s počáteční polohou, ze které byl úderník spuštěn a na základě toho je hodnota této kinetické (deformační) energie nutné k přeražení vzorku určena. Pomocí energie absorbované při lomu je následně možné určit rázovou houževnatost: [50, 60]

$$A_n = \frac{W}{b \cdot h} \quad (13)$$

kde: A_n – rázová houževnatost [$\text{kJ} \cdot \text{m}^2$]

W – deformační energie absorbovaná k přeražení zkušebního tělesa [J]

b – šířka zkušebního tělesa [mm]

h - tloušťka zkušebního tělesa [mm]

Zkušební vzorky:

Rázová houževnatost je výrazně ovlivněna tvarem vzorku a jeho rozměry. Tento tvar a rozměry jsou popsány v příslušné normě. V případě materiálů s vyšší pevností jsou zkušební vzorky opatřeny vrubem. Zde jsou tedy vlastnosti vzorku výrazně ovlivněny i tvarem a rozměry vrubu. [60]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem praktické části diplomové práce bylo testování mechanických vlastností kompozitu pro dopravní aplikace. Zkoumaným materiálem byl konkrétně kompozit na bázi prepregu určený pro výrobu nástrojů. Z tohoto typu materiálu bylo nejdříve nutné navrhnout vhodné složení kompozitního systému. Tento návrh zahrnuje orientaci prepreg tkaniny v jednotlivých vrstvách. Následovala výroba zkušebních vzorků metodou autoklávového lisování, kdy byla z každého navrženého kompozitního systému vytvořena série vzorků pro danou zkoušku mechanických vlastností. Poté byl proveden výzkum statického a dynamického namáhání. Hlavním cílem experimentu tedy bylo získat informace o mechanickém chování testovaného prepreg materiálu, porovnat mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků, vyhodnotit vliv orientace tkaniny na vlastnosti kompozitního systému a následně určit jeho nejvhodnější složení pro dosažení co největší životnosti budoucího kompozitního nástroje.

V druhém úseku praktické části diplomové práce byl proveden samotný návrh výroby kompozitního nástroje ze zvoleného kompozitního systému. Navržený nástroj byl určen pro výrobu kompozitního sacího kanálu v provedení NACA metodou autoklávového lisování.

Cílem diplomové práce bylo:

1. Vypracování literární rešerše na aktuální problematiku kompozitních forem a na požadavky, které jsou na ně kladeny.
2. Návrh materiálového složení kompozitního systému určeného pro výrobu kompozitních vzorků z tooling prepregu.
3. Výroba zkušebních vzorků pomocí technologie autoklávového lisování.
4. Experimentální stanovení mechanických vlastností při statickém a dynamickém zatížení dle zvolení norem.
5. Vyhodnocení naměřených hodnot.
6. Návrh výroby kompozitního nástroje.

7 NÁVRH MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU

Při návrhu materiálového složení kompozitního systému byly dodrženy všechna pravidla skladby kompozitního prepreg materiálu. Konkrétně bylo navrženo pět různých složení kompozitního systému. Na základě každého návrhu byl zhotoven polotovar ve formě kompozitní desky s příslušným složením a navrženou orientací jednotlivých vrstev. Právě tyto polotovary byly následně využity k přípravě zkušebních vzorků.

7.1 Materiál použitý pro výrobu vzorků

Zkoumaným materiálem použitým pro výrobu zkušebních vzorků byl tooling prepreg dodaný firmou MEEM s.r.o., Plzeň.

Tooling prepreg se využívá pro výrobu kompozitních nástrojů. Hlavním důvodem využití tohoto druhu materiálu je jeho vysoká rozměrová stabilita, nízká hmotnost a také relativně nízké náklady spojené s výrobou nástroje.

Materiál byl dodán ve formě rolí o šířce 1 metr.

7.1.1 Výztuž

Námi využitý tooling prepreg obsahoval tkaninu s keprovou vazbou na bázi uhlíkových vláken (viz. kapitola 1.5.1). Materiál byl ve dvou rozdílných modifikacích, které se lišily plošnou hmotností tkaniny. Konkrétně byly využity následující modifikace: [61]

- Tkanina č. 1: plošná hmotnost 200 g/m^2
- Tkanina č. 2: plošná hmotnost 600 g/m^2

7.1.2 Matrice

Tkanina byla prosycena epoxidovým systémem **ER 78T**. Tento systém je na bázi formulované epoxidové pryskyřice HOTMELT, která je speciálně navržena pro lisování a výrobu nástrojů s dlouhou životností. [61]

Základní vlastnosti pryskyřice: [61]

- teplota skelného přechodu: $135 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$,
- hustota: $1,2 \text{ g/cm}^3$,
- barva: *transparentní*.

Výhodou této pryskyřice je její dobrá přilnavost, chemická odolnost a možnost vyrobit daný produkt pomocí relativně krátkého vytvrzovacího cyklu. Tento druh matrice se zároveň vyznačuje značnou univerzálností, jelikož ji lze využít k prosycování jak uhlíkových, tak skleněných, aramidových nebo čedičových vláken. [61]

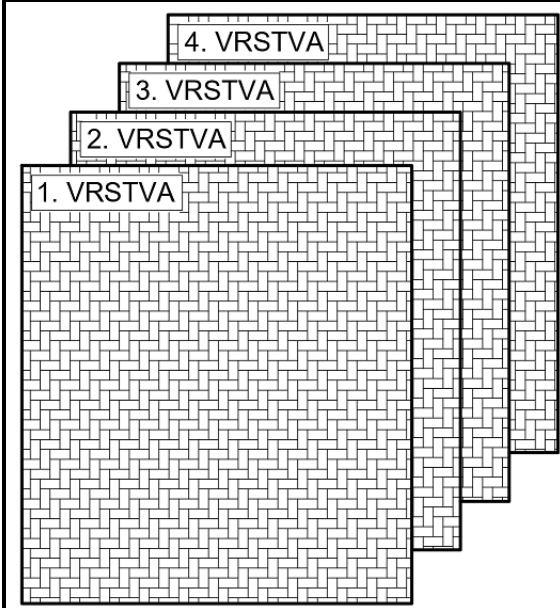
7.2 Materiálové složení jednotlivých polotovarů

Polotovary byly složeny ze tří vrstev prepreg materiálu s hustotou tkaniny 600 g/m^2 a jedné vrstvy s hustotou tkaniny 200 g/m^2 . Vrstva s nižší hustotou tkaniny tvořila pohledovou (funkční) stranu výrobku pro dosažení kvalitnějšího povrchu. Počet vrstev byl určen podle požadované tloušťky kompozitního systému, která se měla pohybovat kolem dvou milimetrů. Volba více vrstev zároveň umožnila dosažení větší variability kompozitního systému, jelikož bylo možné u každé vrstvy orientovat vlákna jiným směrem. Právě orientace vláken výrazně ovlivní konečné mechanické vlastnosti kompozitního systému.

7.2.1 Polotovar č. 1

Návrh polotovaru č. 1 se skládá ze čtyř vrstev prepreg materiálu orientovaných pod úhlem 0° vůči předpokládanému směru zatěžování. Podrobné údaje popisující jeho složení jsou uvedeny v následující tabulce.

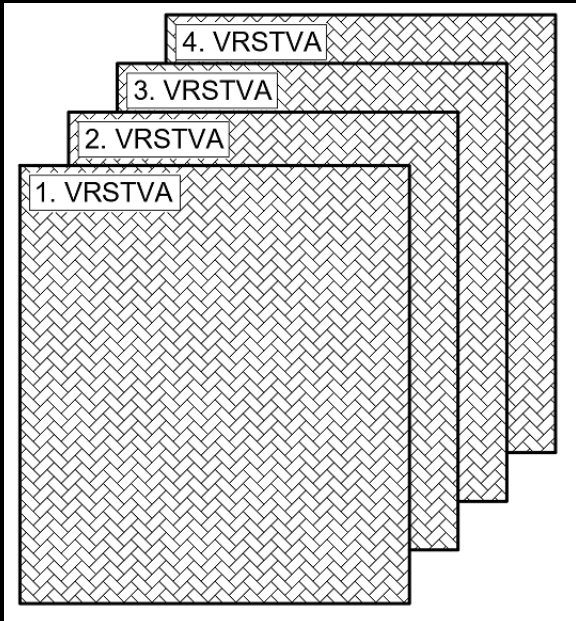
Tabulka 5 Materiálové složení polotovaru č. 1

	Polotovar č. 1
	Rozměry [mm]
	400 x 450 x 2
	Počet vrstev
	4
	Orientace vrstev
	1. vrstva: 0°
	2. vrstva: 0°
3. vrstva: 0°	
4. vrstva: 0°	

7.2.2 Polotovár č. 2

Návrh polotovaru č. 2 se skládá z vrstev orientovaných pod úhlem 45° vůči předpokládanému směru zatěžování. Podrobné údaje popisující složení polotovaru č. 2 jsou uvedeny v tabulce 6.

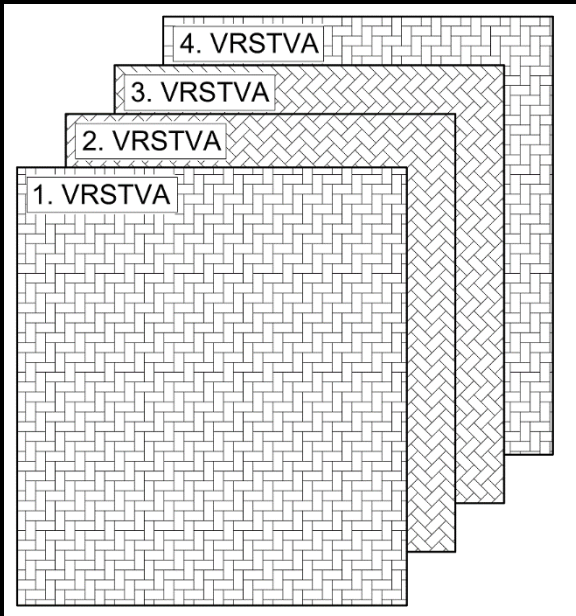
Tabulka 6 Materiálové složení polotovaru č. 2

	Polotovár č. 2
	Rozměry [mm]
	400 x 450 x 2
	Počet vrstev
	4
	Orientace vrstev
	1. vrstva: 45°
	2. vrstva: 45°
3. vrstva: 45°	
4. vrstva: 45°	

7.2.3 Polotovár č. 3

Polotovár č. 3 se skládá z vrstev orientovaných pod úhlem 0° a 45° vůči předpokládanému směru zatížení. Podrobné údaje o složení tohoto polotovaru jsou uvedeny v tabulce 7.

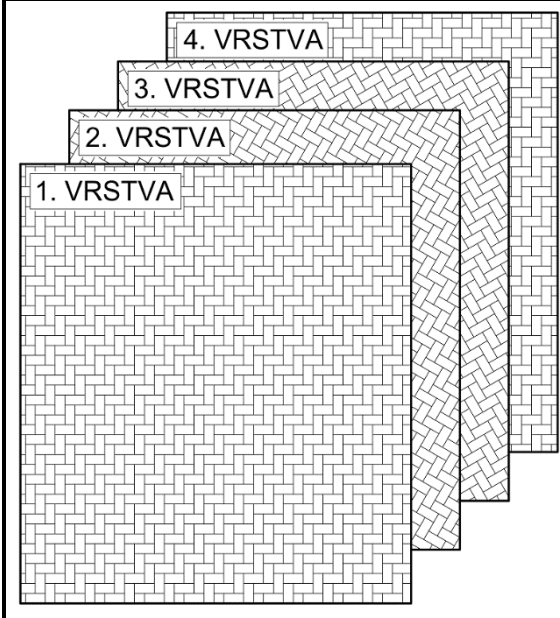
Tabulka 7 Materiálové složení polotovaru č. 3

	Polotovár č. 3
	Rozměry [mm]
	400 x 450 x 2
	Počet vrstev
	4
	Orientace vrstev
	1. vrstva: 0°
	2. vrstva: 45°
3. vrstva: 45°	
4. vrstva: 0°	

7.2.4 Polotovár č. 4

Polotovár č. 4 se skládá z vrstev orientovaných pod úhlem 0° a $\pm 30^\circ$ vůči předpokládanému směru zatížení. Podrobné údaje o složení tohoto polotovaru jsou uvedeny v tabulce 8.

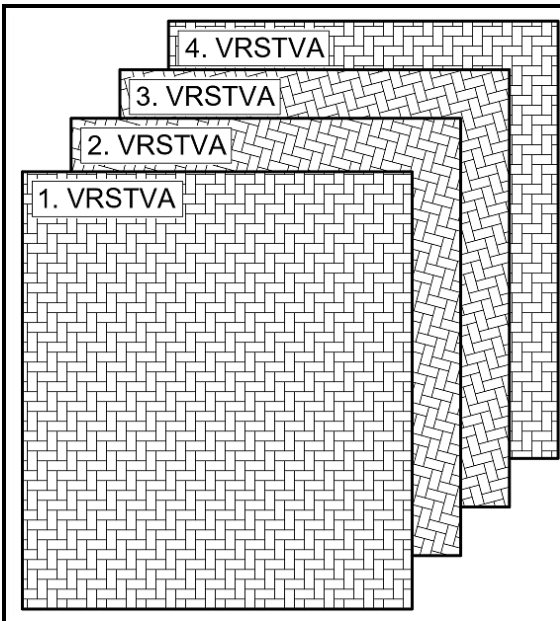
Tabulka 8 Materiálové složení polotovaru č. 4

	Polotovár č. 4
	Rozměry [mm]
	400 x 450 x 2
	Počet vrstev
	4
	Orientace vrstev
	1. vrstva: 0°
	2. vrstva: $+30^\circ$
3. vrstva: -30°	
4. vrstva: 0°	

7.2.5 Polotovár č. 5

Polotovár č. 5 se skládá z vrstev orientovaných pod úhlem 0° a $\pm 15^\circ$ vůči předpokládanému směru zatížení. Podrobné údaje o složení tohoto polotovaru jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 Materiálové složení polotovaru č. 5

	Polotovár č. 5
	Rozměry [mm]
	400 x 450 x 2
	Počet vrstev
	4
	Orientace vrstev
	1. vrstva: 0°
	2. vrstva: $+15^\circ$
3. vrstva: -15°	
4. vrstva: 0°	

8 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ METODOU AUTOKLÁVOVÉHO LISOVÁNÍ

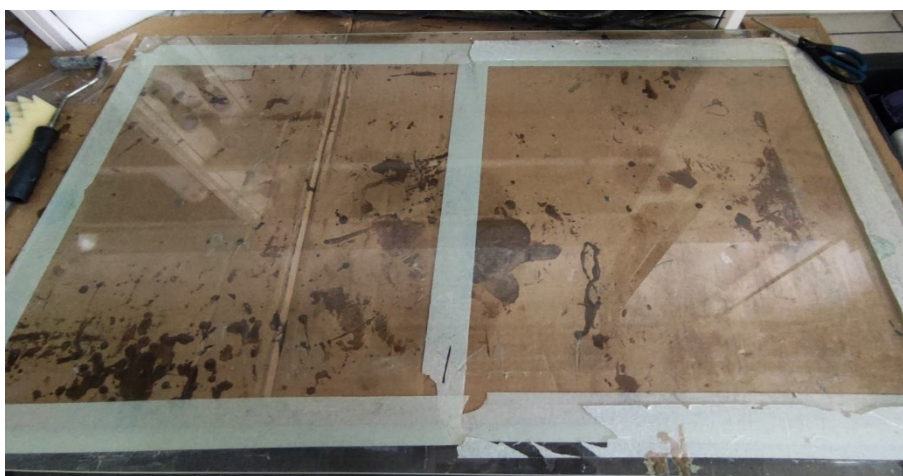
Po návrhu materiálového složení jednotlivých polotovarů určených k přípravě zkušebních vzorků následovala jejich samotná výroba. Princip výroby spočíval ve využití metody autoklávového lisování. Podrobný postup výroby bude popsán v následujících kapitolách.

8.1 Příprava formy

Pro výrobu všech polotovarů byla využita rovná skleněná forma, jejíž povrch bylo nutné před samotným kladením materiálu připravit. Postup přípravy formy je popsán v následujících bodech:

1. Mechanické očištění formy

Mechanické očištění slouží k odstranění nejhrubších nečistot z povrchu formy. Tyto zbytkové nečistoty je nutné odstranit z toho důvodu, abychom eliminovali vznik různých vad a nepřesností na konečném výrobku.



Obrázek 32 Očištěná forma

2. Nanesení přípravku Zyvox Sealer GP

Přípravek Zyvox Sealer GP vytváří ochranou/těsnicí vrstvu na povrchu formy, čímž následně zamezuje pryskyřici v mechanickém zachycení v mikropórech a nerovnostech. Zároveň také poskytuje základ potřebný k prodloužení životnosti separačního přípravku. Celkem byly nanесeny čtyři vrstvy tohoto přípravku, kdy každá vrstva byla nanесena v intervalu 15 minut.

3. Nanesení separátoru Chemlease 2191W

Separáční prostředek Chemlease 2191W se využívá ke snadnému odformování výsledného výrobku po skončení vytvrzovacího cyklu. Tento druh separátoru je na vodní bázi.

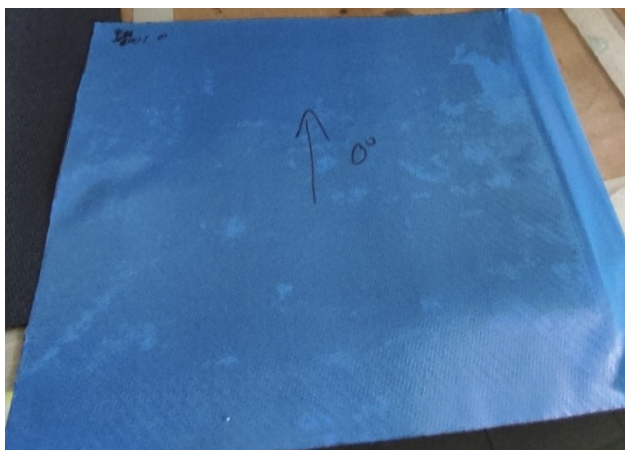
Na povrch formy bylo naneseno celkem pět vrstev separáčn iho prostředku v intervalu 10 minut.



Obrázek 33 Použitý separáční a ochranný p r iavek

8.2 Nastřihání prepreg materiálu

Prepreg materiál určený k v yrobn e zkušebních vzorků byl ručně nastřihán podle požadovaných rozměrů a orientace vlák en, která odpovídala n avrhm materiálového složení jednotlivých polotovarů.



Obrázek 34 Nastřihan y prepreg materiál

8.3 Skladba prepreg materiálu na povrch formy

Nastříhaný prepreg materiál byl následně ručně kladen na povrch formy. Jeden vystřižený dílec tvořil jednu vrstvu kompozitního systému. Celkem byly tedy pro výrobu jednoho typu polotovaru položeny čtyři vrstvy prepreg materiálu a to tak, že na formu byla nejprve umístěna jedna vrstva tkaniny s plošnou hmotností 200 g/m^2 a následně položeny tři vrstvy tkaniny s plošnou hmotností 600 g/m^2 .



Obrázek 35 Skladba prepreg materiálu

8.4 Příprava na proces vytvrzování

Poté co byly položeny všechny vrstvy prepreg materiálu bylo nutné formu připravit na proces vytvrzování materiálu v autoklávu. Postup přípravy je podrobně popsán v následujících bodech:

1. Zakrytí materiálu separační folií

Na položený materiál bylo nutné umístit separační folii, která přispívá ke snadnějšímu odformování výrobku po konci vytvrzovacího cyklu.



Obrázek 36 Separací folie

2. Položení odsávací rohože

Na separační folii byla následně položena odsávací rohož, která se využívá k zachycení přebytečné pryskyřice odváděné z materiálu pomocí tlaku během vytvrzovacího procesu. Na formu byla také umístěna přípojka pro připojení ventilu k odsávání vzduchu.



Obrázek 37 Odsávací rohož

3. Zavakuování formy

Před samotným vytvrzováním v autoklávu bylo nutné formu pečlivě zavakuovat, abychom zabránili úniku vzduchu a docílili tak při procesu vytvrzování požadovaného podtlaku, který se měl pohybovat okolo hodnoty -1 bar.

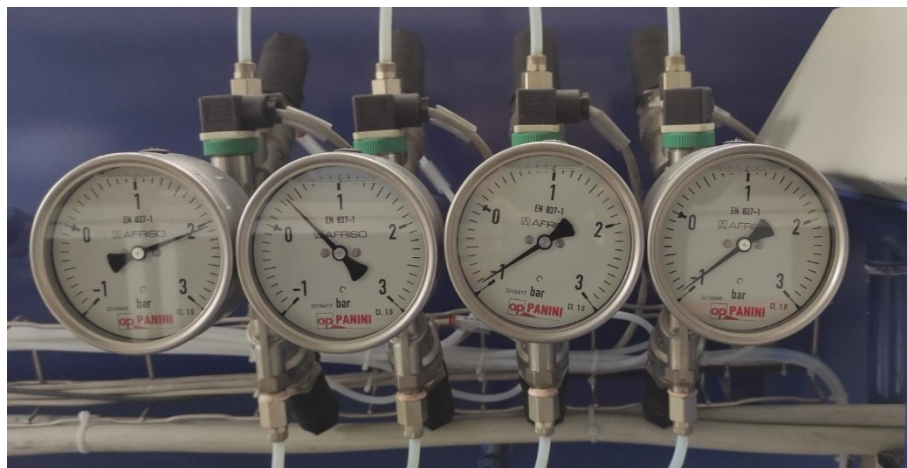
Forma byla zavakuována pomocí vakuovacího rukávu, do něhož byla forma vložena. Po vložení formy byl tento rukáv utěsněn těsnící páskou a následně byl pomocí vložené přípojky připojen ventil k odsávání vzduchu. Na tento ventil byla po vložení formy do autoklávu připojena hadice vývěvy. Následně byl spuštěn mechanismus tvorby vakua a tím mohla být zkontrolována kvalita utěsnění vakuovacího rukávu. V našem případě dosahovalo vakuum u zavakuovaných forem hodnoty -0,96 bar. Tato hodnota vakua byla dostatečná, bylo tedy možné přejít k zahájení procesu vytvrzování.



Obrázek 38 Vakuovací rukáv a těsnící páska



Obrázek 39 Zavakuovaná forma



Obrázek 40 Kontrola tlaku vakua (zprava barometr č. 1 a 2)

8.5 Proces vytvrzování materiálu

Proces vytvrzování byl založen na metodě autoklávového lisování. Tato metoda umožňuje řízení vytvrzovacího cyklu pomocí zajištění určité teploty a tlaku působícího po stanovenou dobu na vytvrzovaný materiál. Podrobný popis této technologie je uveden v teoretické části práce (kapitola 4).

Před spuštěním vytvrzovacího cyklu bylo tedy nutné vytvořit program, pomocí kterého se tento cyklus bude řídit. Tvorba programu probíhala v PLC prostředí přímo na kontrolním panelu stroje. Program obsahuje rozdělení vytvrzovacího cyklu do jednotlivých časově

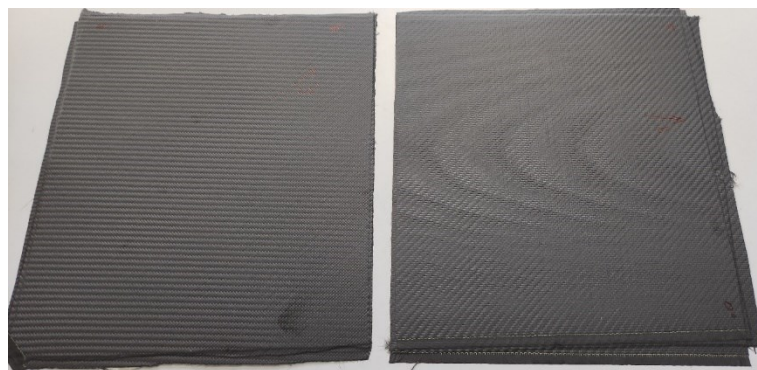
ohraničených fází, ve kterých probíhá ohřev, tlakování, vakuování, výdrž, ochlazování, odtlakování a odvakuování. Tyto fáze na sebe navazují a obsahují údaje o požadované teplotě a tlaku uvnitř autoklávu a také rychlosti ohřevu nebo ochlazování na danou teplotu.

Poté co byl vytvořen požadovaný program bylo nutné otevřít přívod vzduchu a vody, spustit mechanismus vakuování a opět zkontrolovat tlak vakua ve formách. Následným uzavřením dveří autoklávu došlo ke splnění všech podmínek pro spuštění vytvrzovacího cyklu.

Po skončení vytvrzování byl autokláv otevřen, zastaven vakuovací mechanismus a forma vytažena z autoklávu. Následně bylo ještě nutné uzavřít přívod vody a vzduchu. Po vytažení formy z autoklávu zbývalo již pouze samotné odformování výrobku.



Obrázek 41 Forma po konci vytvrzování



Obrázek 42 Vyrobené polotovary

8.5.1 Použité zařízení

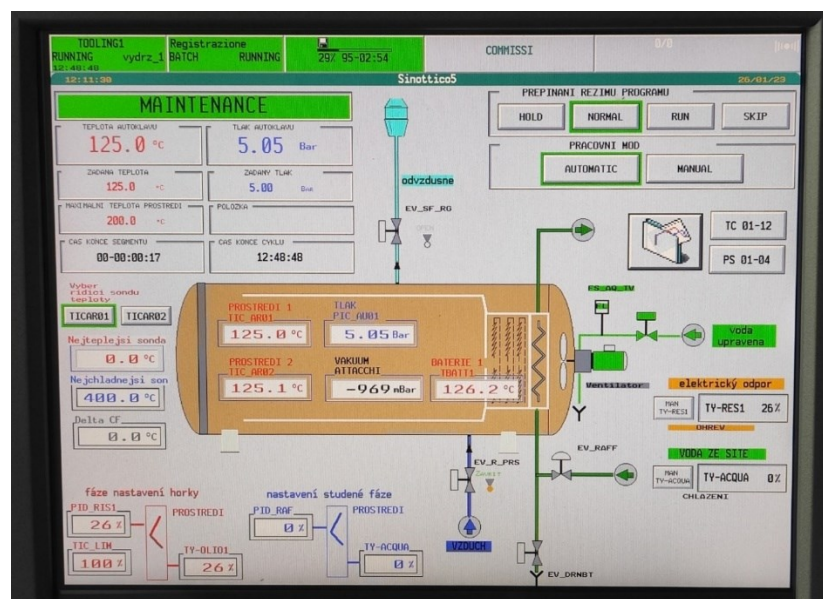
Proces vytvrzování probíhal v autoklávu od italského výrobce OP Panini S.r.l, model G00300572.



Obrázek 43 Autokláv Panini G00300572

Tento typ autoklávu byl navržen tak, aby mohl pracovat s přetlakem o hodnotě až 10 bar a dokázal během pracovního cyklu vyvinout teplotu až 250 °C.

Ohřev vzduchu je zajišťován pomocí elektrických odporových topných kabelů. Rovnoměrná distribuce tohoto ohřátého vzduchu uvnitř autoklávu je následně zabezpečována pomocí ventilátoru. Naopak v případě chlazení slouží ventilátor k distribuci ochlazeného vzduchu. Vzduch je chlazen pomocí chladiče, v němž proudí studená voda. Pro zajištění přívodu tlakového vzduchu je autokláv napojen na centrální rozvod vzduchu z kompresorovny. Tlak v nádobě autoklávu je regulován řadou pneumatických ventilů. Všechny tyto procesy jsou řízeny prostřednictvím řídicího PLC panelu a kontrolního systému v počítači.



Obrázek 44 Řídicí PLC panel autoklávu

8.5.2 Parametry vytvrzovacího cyklu

Parametry jednotlivých fází vytvrzovacího cyklu byly voleny s ohledem na údaje uvedené v materiálovém listu. Zvolené parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 10 Parametry vytvrzovacího cyklu

Parametry jednotlivých fází vytvrzování					
Fáze	Ohřev 1	Ohřev 2	Výdrž	Ochlazování	Ukončení
Čas [min]	5	25	60	35	2
Teplota [°C]	40	125	125	40	-
Tlak [bar]	2	5	5	-	-
Vakuum [bar]	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98
Rychlost ohřevu [°C/min]	5	5	-	-	-
Rychlost ochlazování [°C/min]	-	-	-	10	-

S využitím těchto parametrů byly vyrobeny všechny navržené polotovary určené pro výrobu zkušebních vzorků.

8.6 Nařezání zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly nařezány z připravených polotovarů pomocí vodního paprsku. Pro jednotlivé zkušební metody byla z každého navrženého a vyrobeného polotovaru nařezána série zkušebních vzorků o 10 nebo 5 kusech. Číselné označení zkušební série odpovídalo číselnému označení polotovaru, ze kterého byla tato série nařezána. Princip značení byl tedy následující:

- Polotovar č. 1: Zkušební série č. 1 [0;0;0;0]
- Polotovar č. 2: Zkušební série č. 2 [45;45;45;45]
- Polotovar č. 3: Zkušební série č. 3 [0;45;45;0]
- Polotovar č. 4: Zkušební série č. 4 [0;30;-30;0]
- Polotovar č. 5: Zkušební série č. 5 [0;15;-15;0]

Rozměry vzorků byly učeny na základě norem daných zkušebními metodami.

Nařezání zkušebních vzorků zajistila firma Karel Kaňák, s.r.o., Rohatec. Řezání bylo provedeno na stroji WJ1010-1Z-Dynamite.



Obrázek 45 Stroj WJ1010-1Z-Dynamite



Obrázek 46 Průběh řezání

9 VÝZKUM STATICKÉHO A DYNAMICKÉHO NAMÁHÁNÍ

Mechanické vlastnosti navržených kompozitních systémů s rozdílným materiálovým složením byly měřeny pomocí destruktivních statických a dynamických zkoušek. Tyto zkoušky mechanických vlastností byly provedeny v laboratořích Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

9.1 Stanovení tahových vlastností

Zkouška v tahu byla provedena dle normy ČSN EN ISO 527-4.

Tabulka 11 Parametry zkoušky v tahu


Parametry zkoušky	
Rychlost zatěžování [mm/min]	1

9.1.1 Zkušební zařízení

Zkouška v tahu byla provedena na zkušebním stroji Zwick/Roell Vibrophore 100. Stroj je primárně určen pro dynamické (únavové) testování materiálu, ale je možné jej využít i jako plnohodnotný testovací stroj pro statické zkoušky.

Tabulka 12 Parametry stroje Zwick/Roell Vibrophore 100

Parametry stroje	
Maximální síla [kN]	100
Maximální amplituda síly [kN]	±50
Maximální oscilační posun [mm]	3
Testovací frekvenční rozsah [Hz]	30 - 285
Maximální testovací výška [mm]	1200
Hloubka testovací oblasti [mm]	550
Maximální zdvih, rám stroje [mm]	977,5
Ovládání čelistí k upnutí vzorků	Hydraulické
Testovací SW	testXpert R

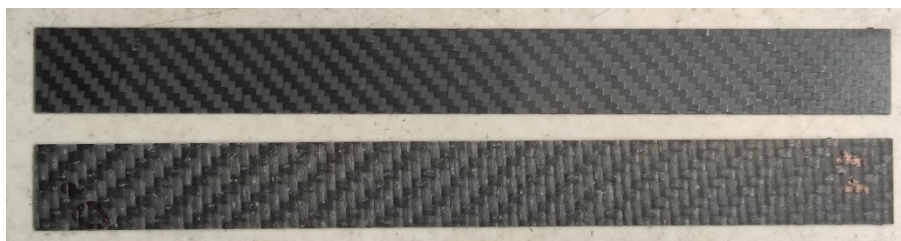


9.1.2 Zkušební vzorky

Z každého navrženého polotovaru byla pro zkoušku v tahu nařezána série zkušebních vzorků o pěti kusech. Dle normy ČSN EN ISO 527-4 byly pro provedení zkoušky zvoleny vzorky typu 2. Rozměry těchto zkušebních vzorků jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13 Rozměry zkušebních vzorků pro zkoušku v tahu

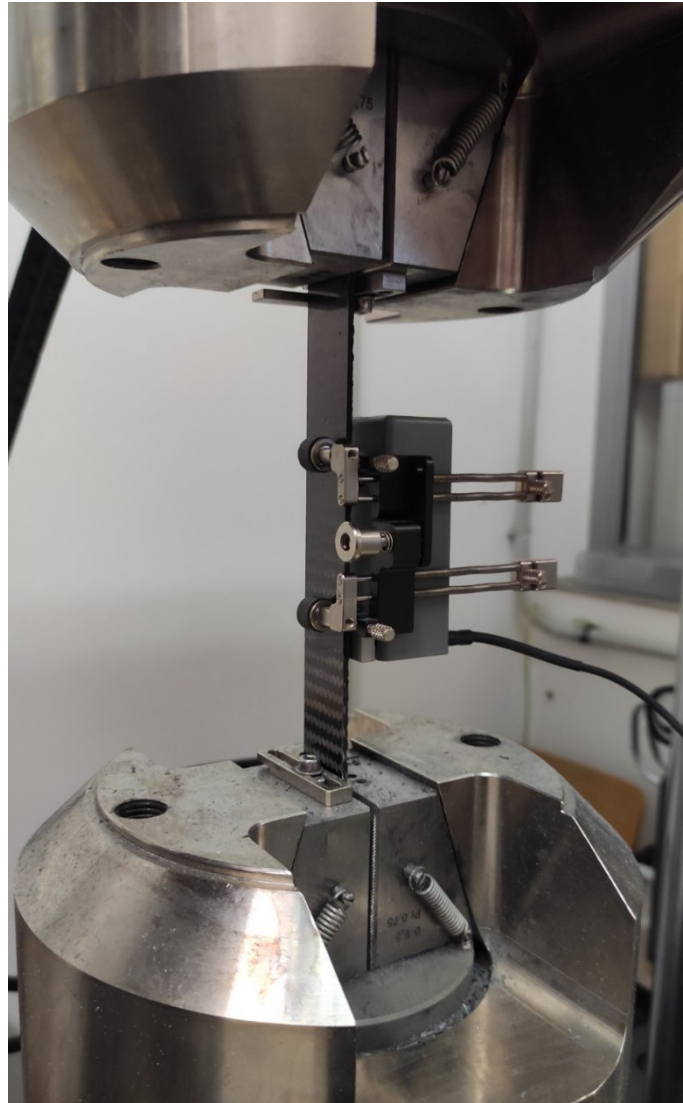
Rozměry zkušebních vzorků	
Délka l [mm]	250
Šířka b [mm]	25
Tloušťka h [mm]	2



Obrázek 47 Nařezané zkušební vzorky pro zkoušku v tahu

9.1.3 Postup měření

Přípravené zkušební vzorky byly do zkušebního zařízení upnuty pomocí hydraulických čelistí tlakem 70 bar. Upínací tlak musel být takový, aby bylo zabráněno vytržení zkušebního vzorku z čelistí a také, aby nedošlo k jeho poškození. Před zahájením zkoušky byl na těleso upnut extenzometr, který měřil v rozsahu 0 – 0,25 % L_0 modul pružnosti v tahu. Po upnutí extenzometru byla zahájena samotná zkouška, kdy byl vzorek zatěžován plynule rostoucí silou. Jakmile byla dosažena požadovaná hodnota prodloužení pro získání modulu pružnosti byl extenzometr z testovaného vzorku odstraněn a zbylá část zkoušky probíhala bez něj. Zkouška pokračovala až do úplného selhání zkušebního vzorku.



Obrázek 48 Upnutý vzorek s extenzometrem

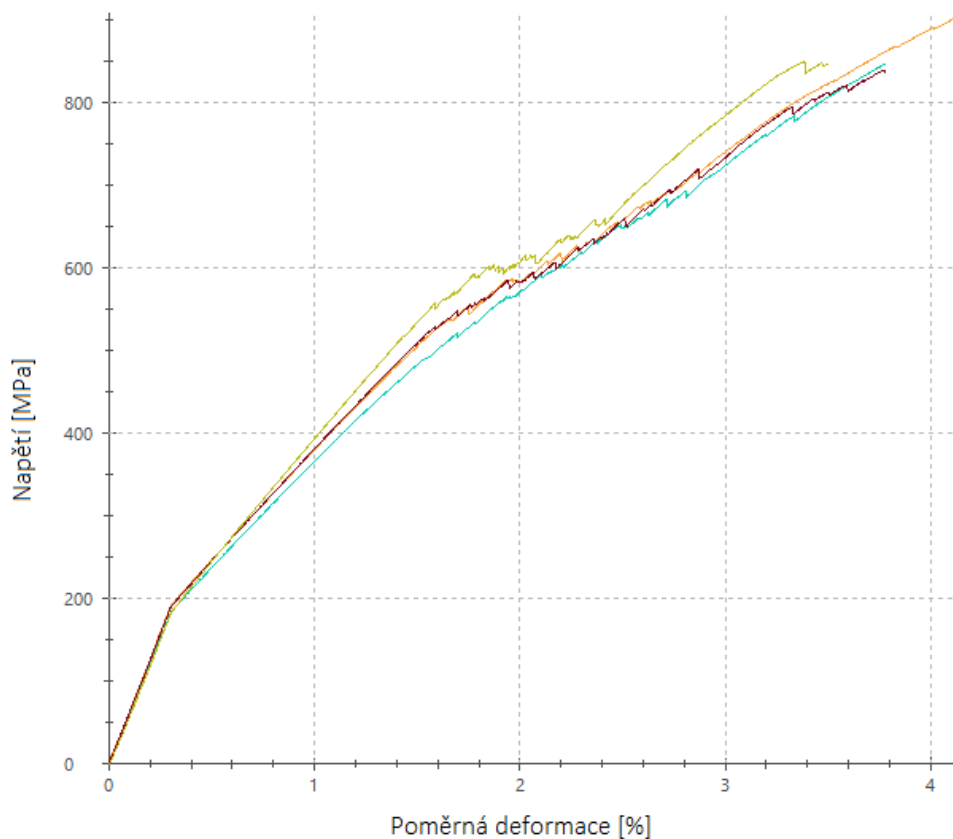
9.1.4 Výsledky zkoušky

Zkouška v tahu byla provedena na pěti zkušebních sériích. Výstupem měření u každé zkušební série bylo 5 hodnot modulu pružnosti v tahu E_t , meze pevnosti v tahu $\sigma_{t_{max}}$, poměrného prodloužení na mezi pevnosti ε_{max} a deformační práce W . Z těchto hodnot byl následně pro každou sérii vypočten aritmetický průměr \bar{x} , směrodatná odchylka výběru s_x a variační koeficient dané veličiny v_x . Průběh tahové zkoušky byl u každého měření graficky zaznamenán v podobě tahové křivky, která zobrazuje závislost napětí na poměrném prodloužení.

a) Zkušební série č. 1, [0;0;0;0]

Tabulka 14 Výsledky zkoušky v tahu pro zkušební sérii č. 1

Zkušební série č. 1				
n = 5	E_t	$\sigma_{t_{max}}$	ε_{max}	W
	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	62 340	858,4	4,0	54 347
s_x	1 063	24,8	0,6	10 222
v_x [%]	1,70	2,89	14,03	18,81



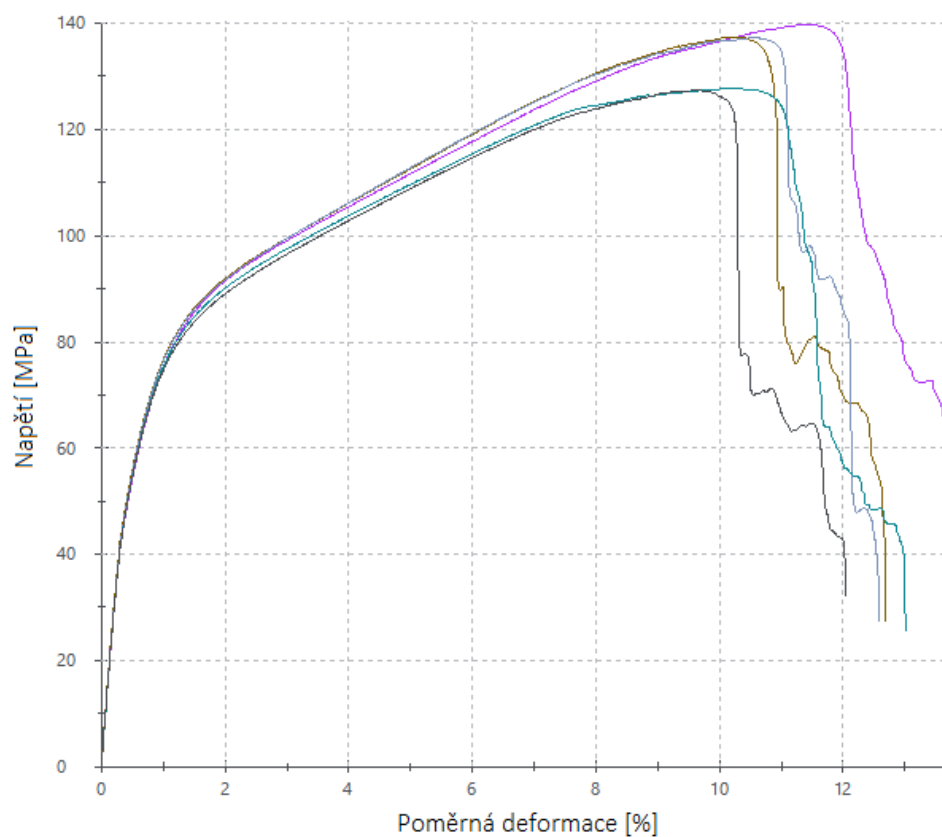
Obrázek 49 Průběhy tahových křivek u zkušební série č. 1

Z výše uvedeného grafu lze pozorovat, že u všech zkušebních vzorků dané série došlo při hodnotě napětí okolo 600 MPa k částečnému zpretrhání určitých vláken v daném systému, ovšem po překonání tohoto jevu ještě následoval výrazný nárůst napětí bez vzniku lomu zbylých vláken. K celkovému selhání systému došlo až při napětí pohybujícím se okolo hodnoty 855 MPa. Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu je u dané série tedy $\sigma_{t_{max}} = 858,4 \pm 24,8 \text{ MPa}$.

b) Zkušební série č. 2, [45;45;45;45]

Tabulka 15 Výsledky zkoušky v tahu pro zkušební sérii č. 2

Zkušební série č. 2				
n = 5	E_t	$\sigma_{t_{max}}$	ϵ_{max}	W
	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	13 880	133,8	10,5	28 137
s_x	131	5,9	0,7	2 586
v_x [%]	0,94	4,40	6,25	9,19



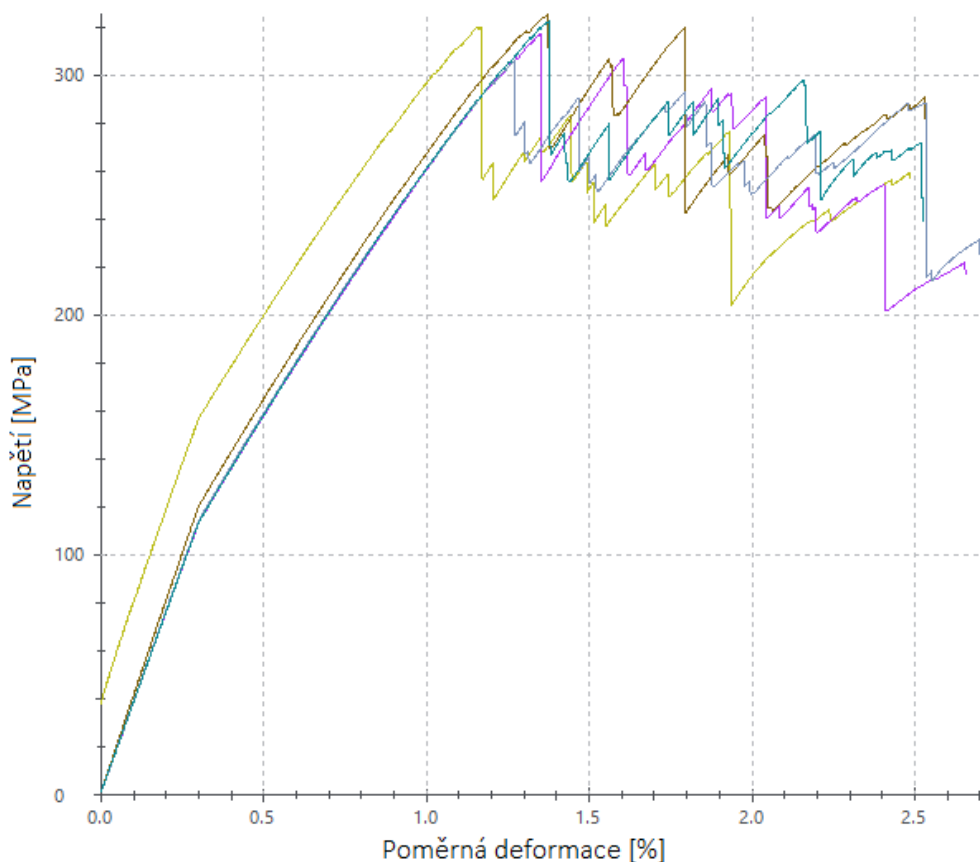
Obrázek 50 Průběhy tahových křivek u zkušební série č. 2

Z grafu lze pozorovat okolo hodnoty napětí 90 MPa výraznou změnu v nárůstu poměrné deformace vzhledem k rostoucímu zatížení. Kdy konkrétně dochází s rostoucím napětím k nižší odolnosti kompozitního systému vůči této deformaci. Tento efekt je způsoben výrazně odlišnou orientací vláken ve všech vrstvách daného kompozitního systému vůči aplikovanému směru zatížení. Z toho důvodu lze předpokládat, že tento typ kompozitního systému bude vykazovat největší sklony ke vzniku deformací. K celkovému selhání materiálu u jednotlivých vzorků došlo okolo hodnoty napětí 133 MPa. Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu je tedy $\sigma_{t_{max}} = 133,8 \pm 5,9 \text{ MPa}$.

c) Zkušební série č. 3, [0;45;45;0]

Tabulka 16 Výsledky zkoušky v tahu pro zkušební sérii č. 3

Zkušební série č. 3				
n = 5	E_t	$\sigma_{t_{max}}$	ε_{max}	W
	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	38 320	318,2	1,4	6 005
s_x	999	7,5	0,1	406
v_x [%]	2,61	2,36	6,68	6,50



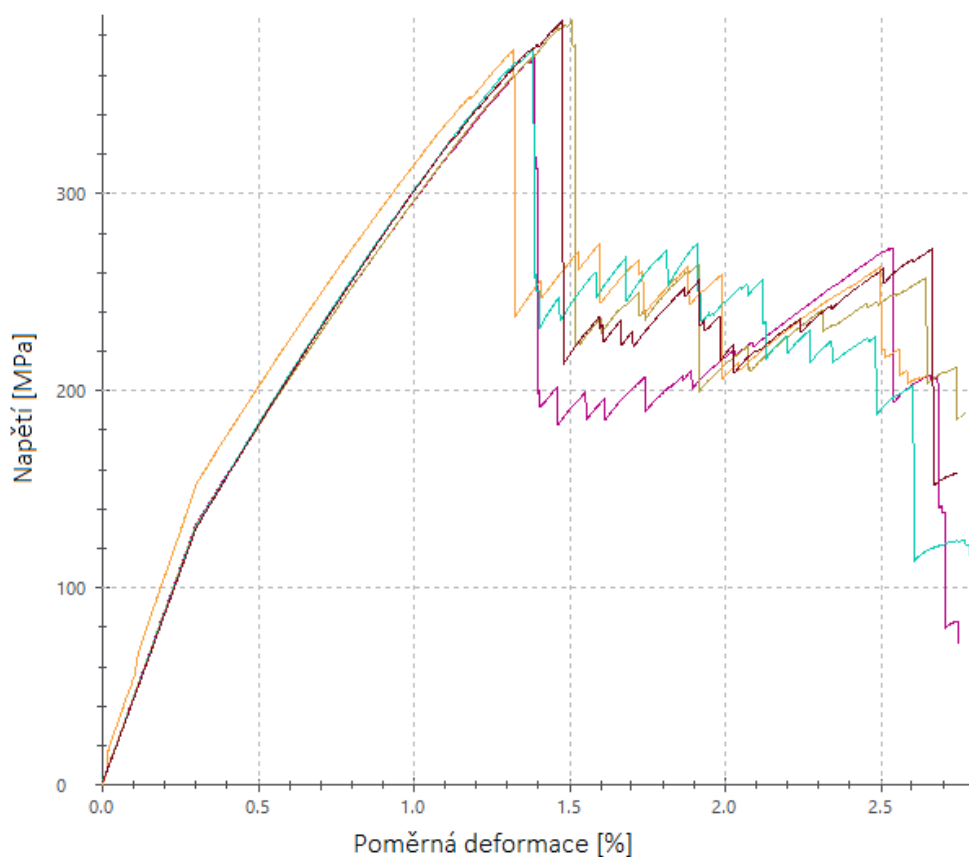
Obrázek 51 Průběhy tahových křivek u zkušební série č. 3

Z grafu na obrázku 51 lze vidět, že se průběh tahové zkoušky v porovnání s předchozími zkušebními sériemi výrazně lišil. Po překročení meze pevnosti došlo k výrazné delaminaci mezi jednotlivými vrstvami daného kompozitního systému, poté napětí opět mírně vzrostlo a následně došlo k další delaminaci testovaného materiálu. Tento děj se několikrát zopakoval a na grafu je zřetelně znázorněn v podobě několika skokových změn působícího napětí. Toto chování bylo pravděpodobně způsobeno výrazně odlišnou orientací vláken v jednotlivých vrstvách testovaného kompozitního systému. Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu je u dané série $\sigma_{t_{max}} = 318,2 \pm 7,5 \text{ MPa}$.

d) Zkušební série č. 4, [0;30;-30;0]

Tabulka 17 Výsledky zkoušky v tahu pro zkušební sérii č. 4

Zkušební série č. 4				
n = 5	E_t	$\sigma_{t_{max}}$	ϵ_{max}	W
	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	44 380	378,1	1,4	7 980
s_x	2 147	8,9	0,1	573
v_x [%]	4,84	2,34	5,90	7,18



Obrázek 52 Průběhy tahových křivek u zkušební série č. 4

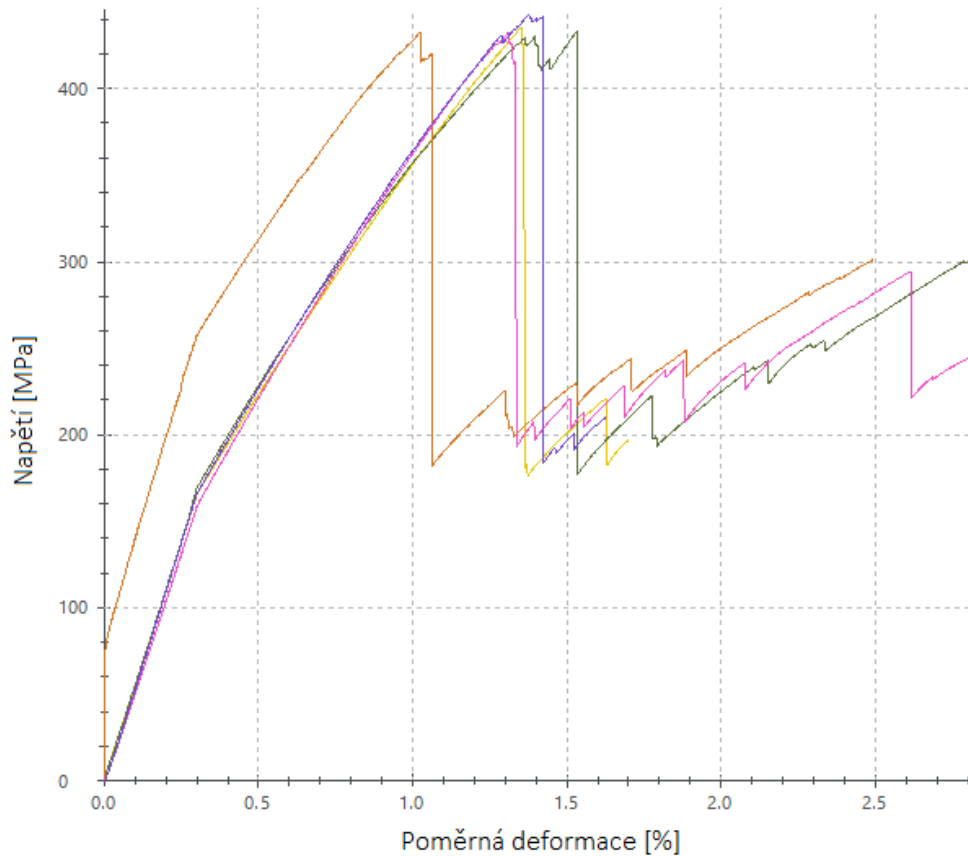
Průběh tahové zkoušky graficky zobrazený na obrázku 52 se oproti předchozím zkušebním sériím opět výrazně lišil. Po překonání meze pevnosti došlo v důsledku selhání materiálu k výraznému poklesu napětí, ovšem v tomto bodě stále nedošlo k úplnému přetržení zkušební vzorku. Zkouška tedy pokračovala a s opětovným nárůstem napětí následně došlo k delaminaci jednotlivých vrstev kompozitního systému. Toto chování bylo pravděpodobně opět způsobeno odlišnou orientací vláken v jednotlivých vrstvách testovaného kompozitu. Delaminace jednotlivých vrstev ovšem nebyla tak výrazná jako v případě předchozí zkušební série, jelikož je zde oproti

zkušební sérii č. 3 nižší rozdíl v orientaci vláken mezi jednotlivými vrstvami. Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu je u dané série $\sigma_{t_{max}} = 378,1 \pm 8,9 \text{ MPa}$.

e) Zkušební série č. 5, [0;15;-15;0]

Tabulka 18 Výsledky zkoušky pro zkušební sérii č. 5

Zkušební série č. 5				
n = 5	E_t	$\sigma_{t_{max}}$	ϵ_{max}	W
	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	56 040	435,4	1,3	8 932
s_x	2 164	4,1	0,2	1 028
v_x [%]	3,87	1,00	13,04	11,51



Obrázek 53 Průběhy tahových křivek u zkušební série č. 5

Průběh tahové zkoušky, který je graficky zobrazen na obrázku 53, je obdobný jako u zkušební série č. 4. V tomto případě ovšem materiál vykazuje mírně vyšší hodnotu pevnosti a po překonání této meze pevnosti nastane ještě razantnější pokles v napětí než v případě zkušební série č. 4. U tohoto navrženého kompozitního systému oproti předchozímu návrhu vznikne pouze částečná delaminace jednotlivých vrstev, jelikož se

orientace vláken mezi jednotlivými vrstvami liší pouze minimálně. Na zobrazeném grafu se tedy nenachází tak výrazné opakující se skokové změny ve velikosti působícího napětí. U zkušební série č. 5 je průměrná hodnota meze pevnosti v tahu $\sigma_{t_{max}} = 435,4 \pm 4,1 \text{ MPa}$.

9.2 Stanovení ohybových vlastností

Zkouška v ohybu byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14125 v tříbodové konfiguraci zatížení.

Tabulka 19 Parametry zkoušky v ohybu

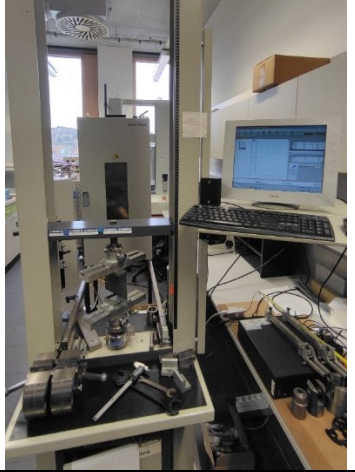
Parametry zkoušky	
Rychlost zatěžování [mm/min]	1
Vzdálenost podpěr [mm]	65

9.2.1 Zkušební zařízení

Zkouška v ohybu byla provedena na univerzálním zkušebním stroji Zwick/Roell 1456, který je vhodný pro určení materiálových vlastností při statických zatíženích v tahu, tlaku a ohybu.

Tabulka 20 Parametry stroje Zwick/Roell 1456

Parametry stroje	
Maximální síla [kN]	20
Pracovní šířka [mm]	420
Strojová výška [mm]	1284
Celková výška stroje [mm]	2012
Celková šířka stroje [mm]	630
Hmotnost stroje [kg]	150
Testovací SW	testXpert



9.2.2 Zkušební vzorky

Z každého navrženého polotovaru byla pro zkoušku v ohybu nařezána série zkušebních vzorků o deseti kusech (obrázek 54). Dle normy ČSN EN ISO 14125 byly voleny rozměry zkušebních vzorků na základě typu výztuže testovaného kompozitního systému. Tyto rozměry jsou uvedeny v tabulce 21.

Tabulka 21 Rozměry zkušebních vzorků pro zkoušku v ohybu

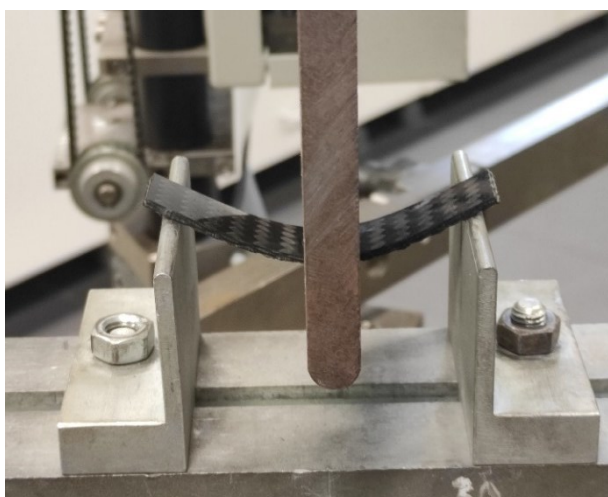
Rozměry zkušebních vzorků	
Délka l [mm]	80
Šířka b [mm]	15
Tloušťka h [mm]	2



Obrázek 54 Nařezané zkušební vzorky pro zkoušku v ohybu

9.2.3 Postup měření

Připravený vzorek byl vodorovně umístěn na dvě podpěry. Vzdálenost mezi těmito podpěrami byla 65 mm. Poté bylo zahájeno samotné měření, kdy na vzorek začalo působit postupně narůstající silou zatěžovací čelo. S působícím zatížením došlo k průhybu vzorku. Tento průhyb plynule narůstal až do úplného selhání materiálu.



Obrázek 55 Namáhaný vzorek

9.2.4 Výsledky zkoušky

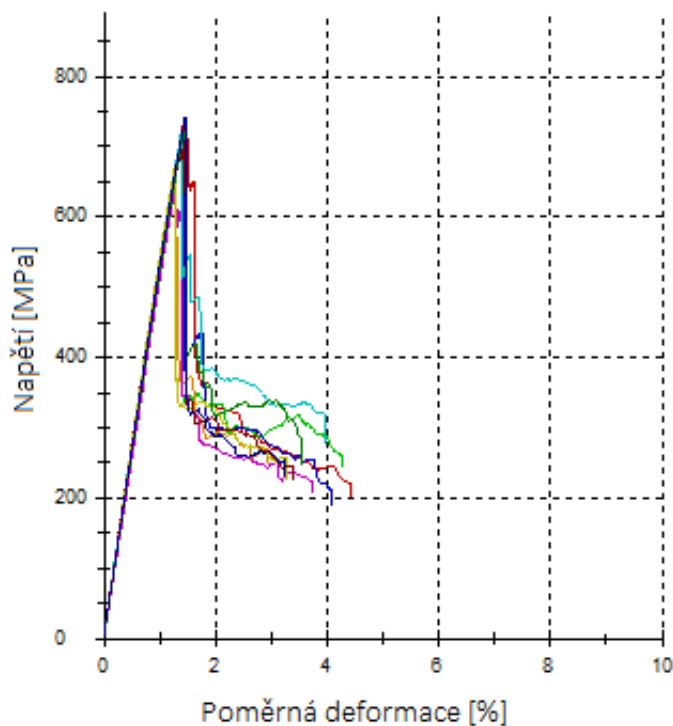
Zkouška v ohybu byla provedena na pěti zkušebních sériích. Výstupem měření u každé zkušební série bylo 10 hodnot modulu pružnosti E_o , meze pevnosti v ohybu $\sigma_{o_{max}}$, poměrné deformace na mezi pevnosti ε_{max} a deformační práce W . Z těchto hodnot byl následně pro

každou sérii vypočten aritmetický průměr \bar{x} , směrodatná odchylka výběru s_x a variační koeficient dané veličiny v_x . Průběh ohybové zkoušky byl u každého měření graficky zaznamenán v podobě křivky, která zobrazuje závislost napětí na poměrné deformaci.

a) **Zkušební série č. 1, [0;0;0;0]**

Tabulka 22 Výsledky zkoušky v ohybu pro zkušební sérii č. 1

Zkušební série č. 1				
n = 10	E_o	$\sigma_{o_{max}}$	ϵ_{max}	W
	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	53 370	704,6	1,38	1 056
s_x	1 225	30,2	0,08	106
v_x [%]	2,30	4,28	5,20	9,98



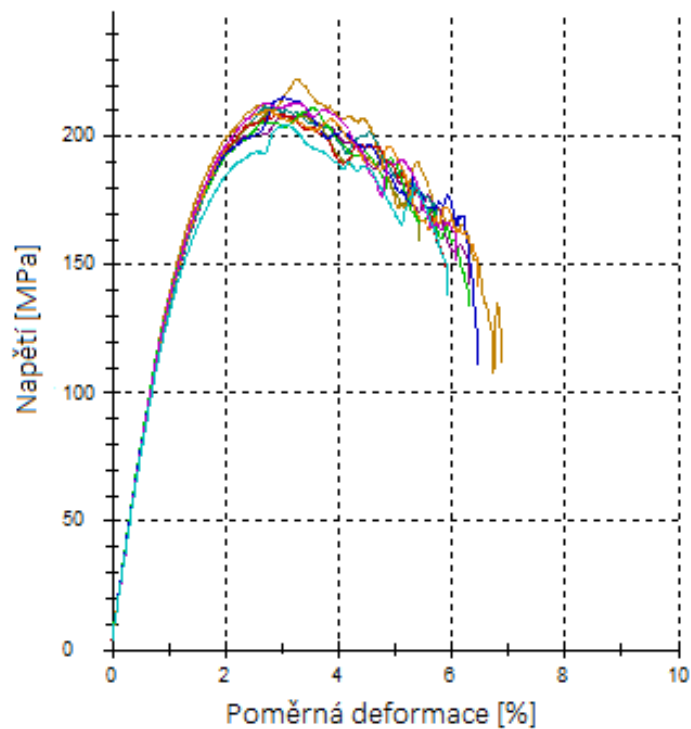
Obrázek 56 Pracovní diagram ohybové zkoušky u zkušební série č. 1

Z grafu na obrázku 56 je patrné, že v případě ohybové zkoušky se u zkušební série č. 1 vyskytuje výrazný modul pružnosti. Je zde také jednoznačně definovatelný bod selhání materiálu, který se u jednotlivých zkoušek v dané sérii pohybuje okolo hodnoty 700 MPa. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu je tedy u dané série $\sigma_{o_{max}} = 704,6 \pm 30,2 \text{ MPa}$.

b) Zkušební série č. 2, [45;45;45;45]

Tabulka 23 Výsledky zkoušky v ohybu pro zkušební sérii č. 2

Zkušební série č. 2				
n = 10	E_o	$\sigma_{o_{max}}$	ε_{max}	W
	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	14 930	211,6	3,12	969
s_x	287	4,6	0,27	116
v_x [%]	1,92	2,14	8,62	11,90



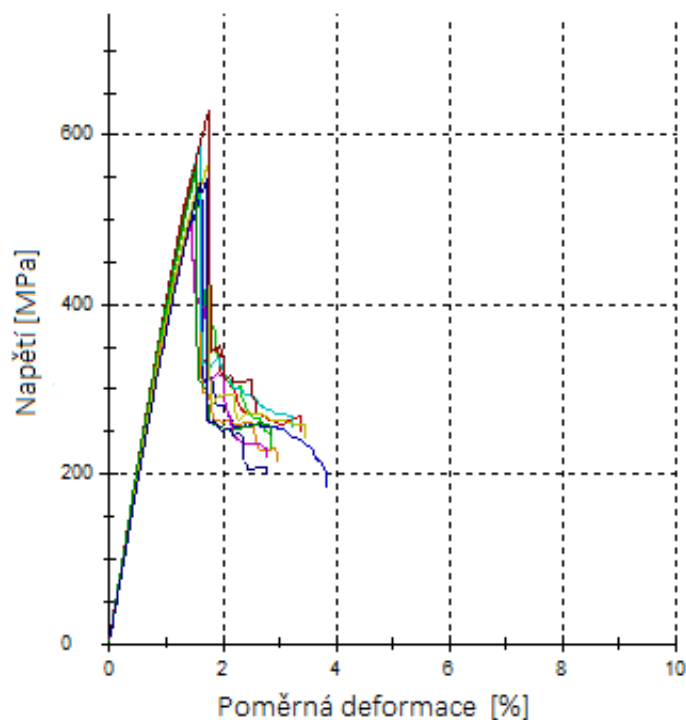
Obrázek 57 Pracovní diagram ohybové zkoušky u zkušební série č. 2

Na obrázku 57 jsou uvedeny průběhy ohybových zkoušek pro zkušební sérii č. 2. U všech zkušebních vzorků dané série došlo k selhání materiálu okolo hodnoty napětí 210 MPa. Žádný vzorek nevykazoval příliš odlišné chování. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu je tedy u dané série $\sigma_{o_{max}} = 211,6 \pm 4,6$ MPa.

c) Zkušební série č. 3, [0;45;45;0]

Tabulka 24 Výsledky zkoušky v ohybu pro zkušební sérii č. 3

Zkušební série č. 3				
n = 10	E_o	$\sigma_{o_{max}}$	ϵ_{max}	W
	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	40 290	560,1	1,61	1 021
s_x	1 481	36,5	0,09	122
v_x [%]	3,68	6,51	6,14	11,93



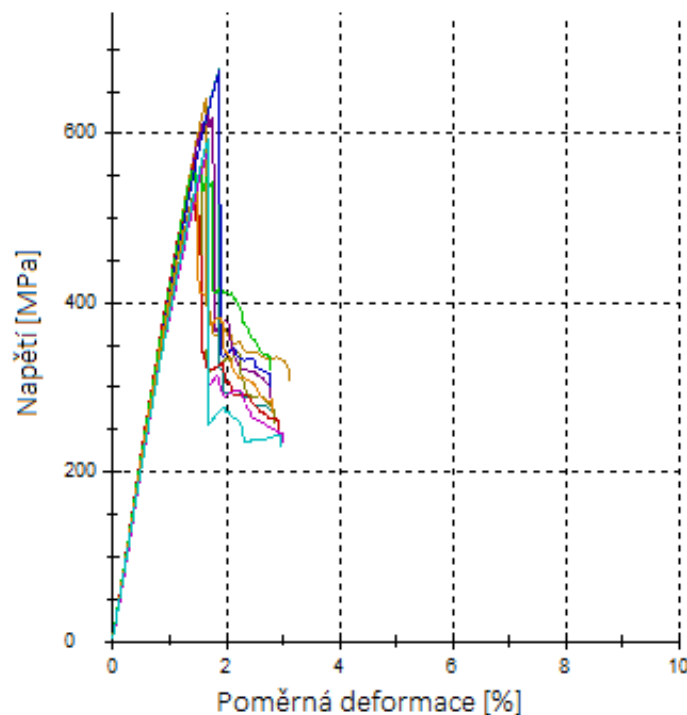
Obrázek 58 Pracovní diagram ohybové zkoušky u zkušební série č. 3

Na uvedeném grafu je znázorněn průběh ohybové zkoušky pro jednotlivé vzorky zkušební série č. 3. Z tohoto grafu je zřejmé, že selhání materiálu nastalo okolo napětí 560 MPa. Průběh zkoušky je u všech vzorků téměř totožný, z toho důvodu můžeme říct, že se v případě této zkušební série nevyskytuje žádná odlehlá hodnota způsobená chybou vzniklou v průběhu měření. Žádnou hodnotu tedy není nutné z dané série vyloučit. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu je u dané série $\sigma_{o_{max}} = 560,1 \pm 36,5$ MPa.

d) Zkušební série č. 4, [0;30;-30;0]

Tabulka 25 Výsledky zkoušky v ohybu pro zkušební sérii č. 4

Zkušební série č. 4				
n = 10	E_o	$\sigma_{o_{max}}$	ϵ_{max}	W
	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	41 890	601,1	1,63	1 104
s_x	1 291	50,9	0,15	195
v_x [%]	3,09	8,46	9,07	17,61



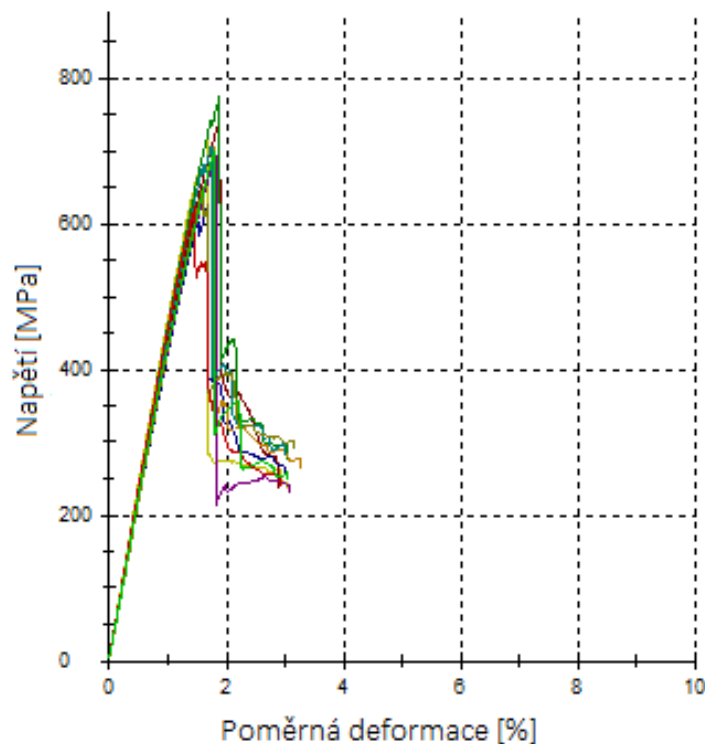
Obrázek 59 Pracovní diagram ohybové zkoušky u zkušební série č. 4

Na obrázku 59 jsou uvedeny průběhy ohybových zkoušek pro zkušební sérii č. 4. U všech zkušebních vzorků dané série došlo k selhání materiálu okolo hodnoty napětí 600 MPa. Žádný vzorek nevykazoval příliš odlišné chování. Jelikož se zde nevyskytovala žádná odlehlá hodnota, tak nebylo nutné žádná naměřená data ze zkušební série vyloučit. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu je tedy u dané série $\sigma_{o_{max}} = 601,1 \pm 50,9 \text{ MPa}$.

e) Zkušební série č. 5, [0;15;-15;0]

Tabulka 26 Výsledky zkoušky v ohybu pro zkušební sérii č. 5

Zkušební série č. 5				
n = 10	E_o	$\sigma_{o_{max}}$	ε_{max}	W
	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]
\bar{x}	44 930	693,9	1,73	1 337
s_x	1 680	49,3	0,14	191
v_x [%]	3,84	7,10	7,84	14,26



Obrázek 60 Pracovní diagram ohybové zkoušky u zkušební série č. 5

Z grafu je patrné, že v případě ohybové zkoušky se u zkušební série č. 5 vyskytuje stejně jako v případě série č. 1 výrazný modul pružnosti. Je zde také jednoznačně definovatelný bod selhání materiálu, který se u jednotlivých zkoušek v dané sérii pohybuje okolo hodnoty 700 MPa. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu je tedy u dané série $\sigma_{o_{max}} = 693,9 \pm 49,3 \text{ MPa}$.

9.3 Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti

Zkouška zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14130.

Tabulka 27 Parametry zkoušky mezilaminární smykové pevnosti

Parametry zkoušky	
Rychlost zatěžování [mm/min]	1
Vzdálenost podpěr [mm]	10

9.3.1 Zkušební zařízení

Zkouška zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti byla provedena na stroji Zwick/Roell 1456. Parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 20.

9.3.2 Zkušební vzorky

Z každého navrženého polotovaru byla pro zkoušku zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti nařezána série zkušebních vzorků o deseti kusech. Rozměry těchto vzorků, uvedené v tabulce 28, byly zvoleny na základě příslušné normy.

Tabulka 28 Rozměry zkušebních vzorků pro zkoušku zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti

Rozměry zkušebních vzorků	
Délka l [mm]	20
Šířka b [mm]	10
Tloušťka h [mm]	2

9.3.3 Postup měření

Princi této zkoušky se příliš nelišil od zkoušky třibodovým ohybem. Jediným rozdílem zde byla zvolená vzdálenost podpěr, která dosahovala pouze 10 mm a byla určena na základě tloušťky zkušební vzorku. Volba této vzdálenosti měla zaručit, že při namáhání selže zkušební vzorek na smyk. Vzorek byl tedy umístěn na dvě podpěry. Poloměr zaoblení těchto podpěr byl 2 mm. Následně na vzorek začalo působit postupně narůstající silou zatěžovací čelo s poloměrem 5 mm. S působícím zatížením došlo u zkušební vzorku k delaminaci jednotlivých vrstev a selhání materiálu na smyk.

9.3.4 Výsledky zkoušky

Zkouška zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti byla provedena na pěti zkušebních sériích. Výstupem měření u každé zkušební série bylo 10 hodnot zátěžné síly působící na mezi pevnosti. Z těchto hodnot byla následně pro každý vzorek vypočtena hodnota zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pomocí následujícího vzorce:

$$\tau_{max} = 0,75 \cdot \frac{F_{max}}{b \cdot h} \quad (14)$$

Z naměřených a vypočtených hodnot byl poté pro každou sérii vypočten aritmetický průměr \bar{x} , směrodatná odchylka výběru s_x a variační koeficient dané veličiny v_x .

a) Zkušební série č. 1, [0;0;0;0]

Tabulka 29 Výsledky zkoušky zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pro zkušební sérii č. 1

Zkušební série č. 1		
n = 10	F_{max}	τ_{max}
	[N]	[MPa]
\bar{x}	1041	41,1
s_x	55	2,2
v_x [%]	5,27	5,27

Na základě naměřených údajů byla v případě zkušební série č. 1 vypočtena průměrná hodnota zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti $\tau_{max} = 41,1 \pm 2,2 \text{ MPa}$.

b) Zkušební série č. 2, [45;45;45;45]

Tabulka 30 Výsledky zkoušky zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pro zkušební sérii č. 2

Zkušební série č. 2		
n = 10	F_{max}	τ_{max}
	[N]	[MPa]
\bar{x}	780,1	30,8
s_x	34,6	1,1
v_x [%]	4,44	4,44

Dle naměřených údajů byla v případě zkušební série č. 2 vypočtena průměrná hodnota zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti $\tau_{max} = 30,8 \pm 1,1 \text{ MPa}$.

c) Zkušební série č. 3, [0;45;45;0]

Tabulka 31 Výsledky zkoušky zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pro zkušební sérii č. 3

Zkušební série č. 3		
n = 10	F_{max}	τ_{max}
	[N]	[MPa]
\bar{x}	973,3	38,5
s_x	50,7	2,0
v_x [%]	5,20	5,20

V případě zkušební série č. 3 byla na základě naměřených údajů vypočtena průměrná hodnota zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti $\tau_{max} = 38,5 \pm 2,0$ MPa.

d) Zkušební série č. 4, [0;30;-30;0]

Tabulka 32 Výsledky zkoušky zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pro zkušební sérii č. 4

Zkušební série č. 4		
n = 10	F_{max}	τ_{max}
	[N]	[MPa]
\bar{x}	943,8	37,3
s_x	71,6	2,9
v_x [%]	7,58	7,58

Na základě naměřených údajů byla v případě zkušební série č. 4 vypočtena průměrná hodnota zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti $\tau_{max} = 37,3 \pm 2,9$ MPa.

e) Zkušební série č. 5, [0;15;-15;0]

Tabulka 33 Výsledky zkoušky zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pro zkušební sérii č. 5

Zkušební série č. 5		
n = 10	F_{max}	τ_{max}
	[N]	[MPa]
\bar{x}	980,1	38,7
s_x	83,5	3,3
v_x [%]	8,52	8,52

V případě zkušební série č. 5 dosahovala zdánlivá mezilaminární smyková pevnost hodnoty $\tau_{max} = 38,7 \pm 3,3 \text{ MPa}$.

9.4 Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy

Zkouška rázové houževnatosti byla provedena metodou Charpy dle normy ČSN EN ISO 179.

Tabulka 34 Parametry zkoušky rázové houževnatosti

Parametry zkoušky	
Energie kladiva [J]	7,5
Rychlost pádu [m/s]	3,7
Vzdálenost podpěr [mm]	18
Zkušební metoda	Charpy

9.4.1 Zkušební zařízení

Zkouška rázové houževnatosti byla provedena na univerzálním zkušebním stroji CEAST 696300, který je určen pro rázové ohybové zkoušky vrubové houževnatosti metodou Charpy a Izod.



Obrázek 61 Zkušební stroj CEAST 696300

9.4.2 Zkušební vzorky

Z každého navrženého polotovaru byla pro zkoušku rázové houževnatosti nařezána série zkušebních vzorků o deseti kusech. Rozměry těchto vzorků, uvedené v tabulce 35, byly zvoleny na základě normy ČSN EN ISO 179 dle použité zkušební metody a materiálu vzorků.

Tabulka 35 Rozměry zkušebních vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti

Rozměry zkušebních vzorků	
Délka l [mm]	50
Šířka b [mm]	10
Tloušťka h [mm]	2



Obrázek 62 Nařezaný zkušební vzorek pro zkoušku rázové houževnatosti

9.4.3 Postup měření

Zkouška byla provedena ve tříbodovém ohybovém nastavení. Pro provedení zkoušky byl zvolen úderník vyvolávající energii 7,5 J. Zkušební vzorek byl umístěn na podpěrný přípravek a kladivo bylo umístěno do počáteční polohy. Následně bylo kladivo z této polohy uvolněno a došlo k přeražení zkušebního vzorku, čímž kladivo předalo část své kinetické energie. Na základě velikosti předané kinetické energie byla následně vypočtena rázová houževnatost daného materiálu (rovnice 13).

9.4.4 Výsledky zkoušky

Zkouška rázové houževnatosti byla provedena na pěti zkušebních sériích. Výstupem měření u každé zkušební série bylo 10 hodnot deformační práce W a rázové houževnatosti A_{cN} . Z těchto hodnot byl následně pro každou sérii vypočten aritmetický průměr, směrodatná odchylka výběru a variační koeficient dané veličiny.

a) Zkušební série č. 1, [0;0;0;0]

Tabulka 36 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební sérii č. 1

Zkušební série č. 1		
$n = 10$	W	A_{cN}
	[N.mm]	[kJ/m ²]
\bar{x}	2,1	108,7
s_x	0,3	12,5
v_x [%]	11,43	11,44

b) Zkušební série č. 2, [45;45;45;45]

Tabulka 37 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební sérii č. 2

Zkušební série č. 2		
n = 10	W	A _{cN}
	[N.mm]	[kJ/m ²]
\bar{x}	2,4	124,1
s _x	0,2	6,9
v _x [%]	5,60	5,58

c) Zkušební série č. 3, [0;45;45;0]

Tabulka 38 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební sérii č. 3

Zkušební série č. 3		
n = 10	W	A _{cN}
	[N.mm]	[kJ/m ²]
\bar{x}	2,7	141,8
s _x	0,5	23,7
v _x [%]	16,73	16,73

d) Zkušební série č. 4, [0,30;-30;0]

Tabulka 39 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební sérii č. 4

Zkušební série č. 4		
n = 10	W	A _{cN}
	[N.mm]	[kJ/m ²]
\bar{x}	2,8	147,3
s _x	0,5	22,8
v _x [%]	15,47	15,47

e) Zkušební série č. 5, [0;15;-15;0]

Tabulka 40 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební sérii č. 5

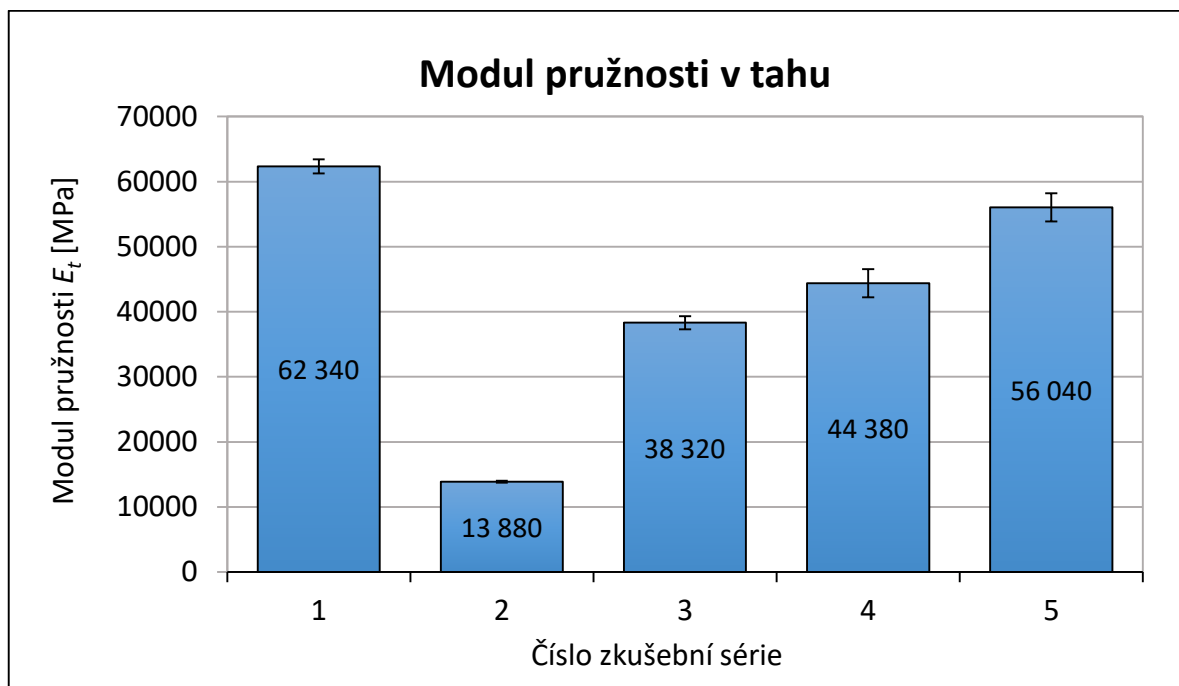
Zkušební série č. 5		
n = 10	<i>W</i>	<i>A_{cN}</i>
	[N.mm]	[kJ/m ²]
\bar{x}	2,9	150,9
<i>s_x</i>	0,5	22,5
<i>v_x</i> [%]	14,86	14,86

10 VYHODNOCENÍ A GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

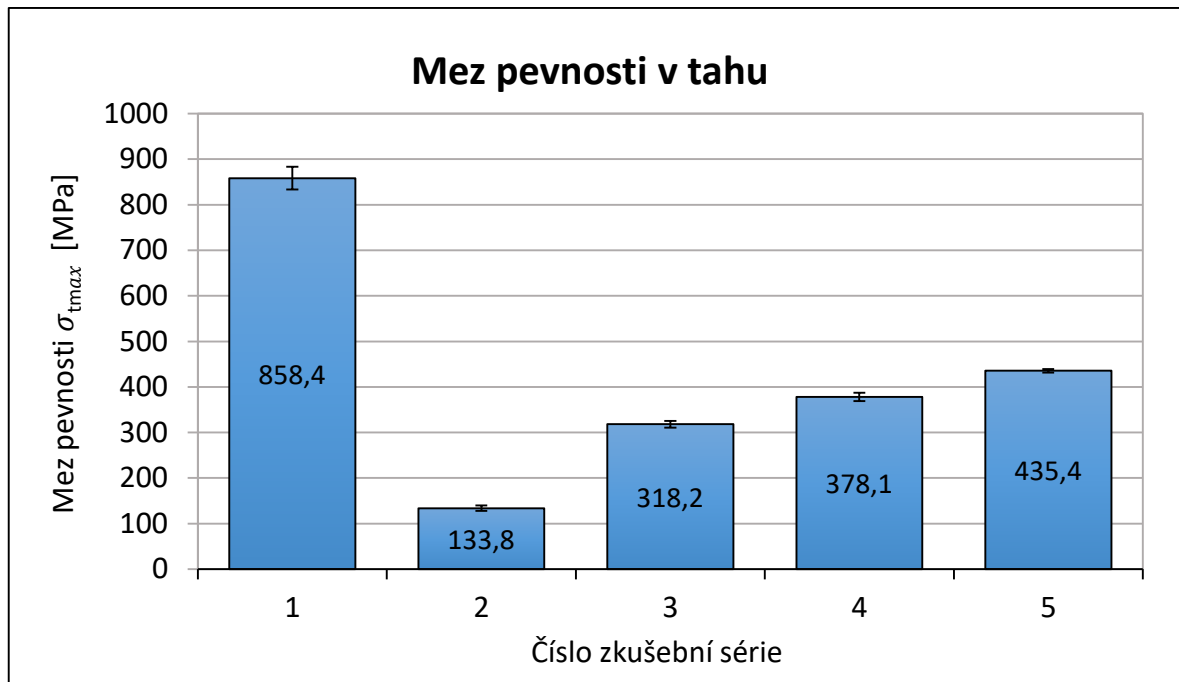
Naměřené a zpracované hodnoty mechanických vlastností navržených kompozitních systémů s rozdílným materiálovým složením byly následně pro každou testovací metodu graficky zpracovány a porovnávány. Materiálové složení s nevhodnějšími vlastnostmi bude následně využito při návrhu výroby kompozitního nástroje.

10.1 Vyhodnocení tahových vlastností

V případě tahové zkoušky byly mezi jednotlivými navrženými kompozitními systémy porovnávány hodnoty modulu pružnosti E_t , meze pevnosti σ_{tmax} a poměrné deformace ε_{max} .



Obrázek 63 Porovnání hodnot modulu pružnosti v tahu E_t

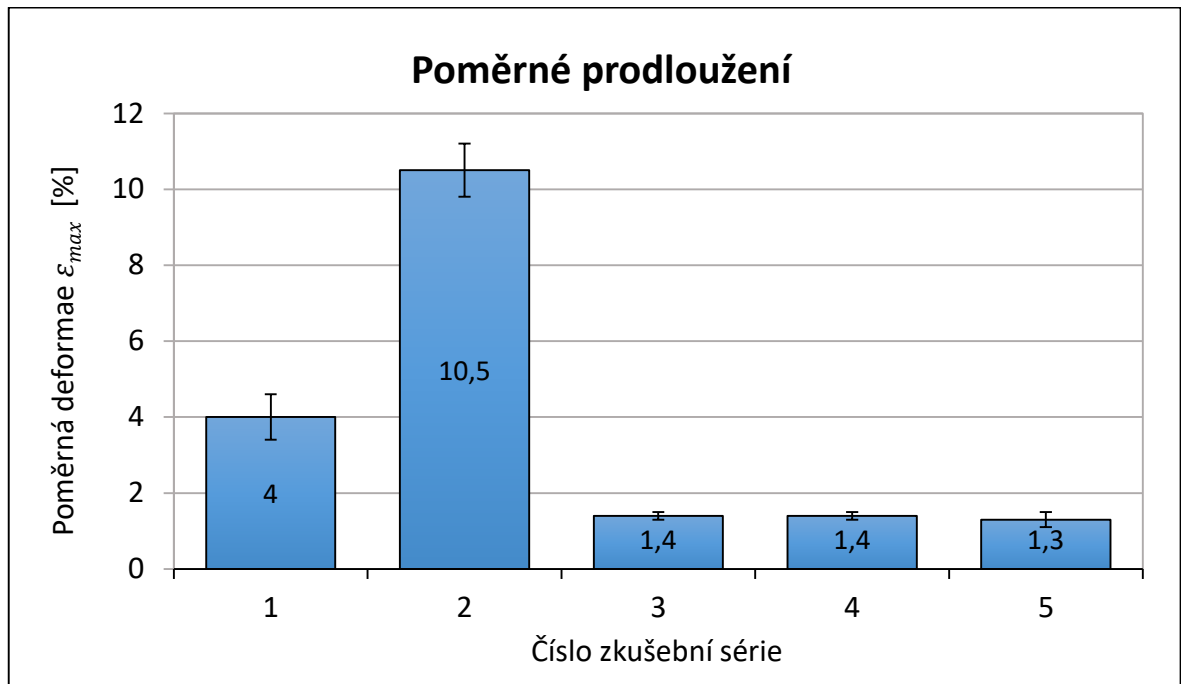


Obrázek 64 Porovnání hodnot meze pevnosti v tahu σ_{tmax}

Z grafů uvedených na obrázku 63 a 64 lze vidět porovnání hodnot modulu pružnosti a meze pevnosti v tahu mezi jednotlivými zkušebními sériemi. Hodnota modulu pružnosti i meze pevnosti u zkušební série č. 1 výrazně převyšovala všechny ostatní materiálové návrhy. Modul pružnosti v tomto případě dosahoval hodnoty $E_t = 62\,340 \pm 10\,63\text{ MPa}$ a mez pevnosti dosahovala hodnoty $\sigma_{tmax} = 858,4 \pm 24,8\text{ MPa}$. Důvodem takto výrazně nadprůměrných výsledků u této série je orientace vláken ve směru působícího zatížení. Pokud jsou vlákna ve všech vrstvách kompozitního systému orientována ve směru působícího zatížení, pak dojde k téměř absolutnímu přenosu daného zatížení na tyto vlákna, které jsou následně namáhána v podélném směru. Právě v podélném směru vykazují vlákna největší odolnost proti namáhání. Zároveň pokud se tento kompozitní systém skládá ze stejně orientovaných vláken ve všech vrstvách daného systému, pak je zde nižší riziko vzniku delaminace mezi jednotlivými vrstvami. K delaminaci může naopak dojít, pokud jsou výrazné rozdíly v orientaci vláken mezi jednotlivými vrstvami kompozitního systému, jelikož zde každá vrstva vykazuje odlišné vlastnosti a může zde vznikat napětí způsobující tuto delaminaci. Právě tento případ vznikl při testování zkušební série č. 3, která se skládala z vzorků s vlákny orientovanými pod úhlem 0° a 45° vůči aplikovanému směru zatížení. Vysoká náchylnost k delaminaci může tedy v některých případech způsobit i celkové snížení meze pevnosti materiálu.

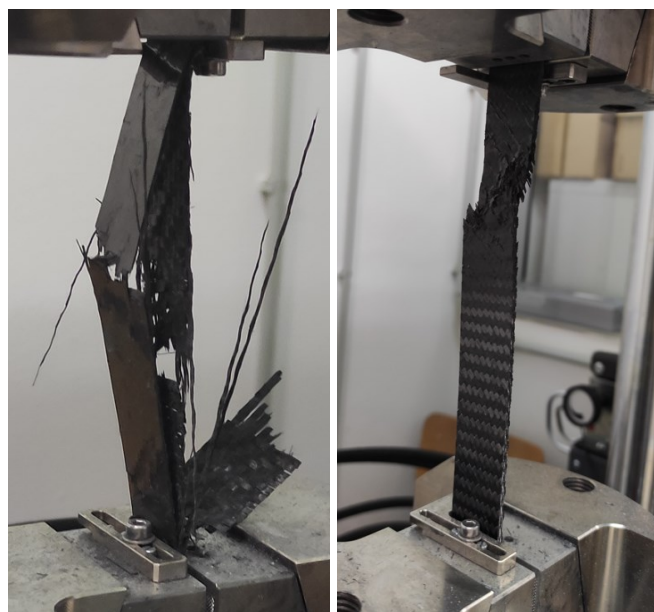
Výrazně podprůměrná byla naopak hodnota modulu pružnosti a meze pevnosti u zkušební série č. 2. Zde se byl průměrný modul pružnosti $E_t = 13\,880 \pm 131\text{ MPa}$ a mez pevnosti

$\sigma_{t_{max}} = 133,8 \pm 5,9 \text{ MPa}$. Důvodem takto nízkých hodnot byla orientace vláken pod úhlem 45° vůči aplikovanému směru zatížení ve všech vrstvách kompozitního systému.



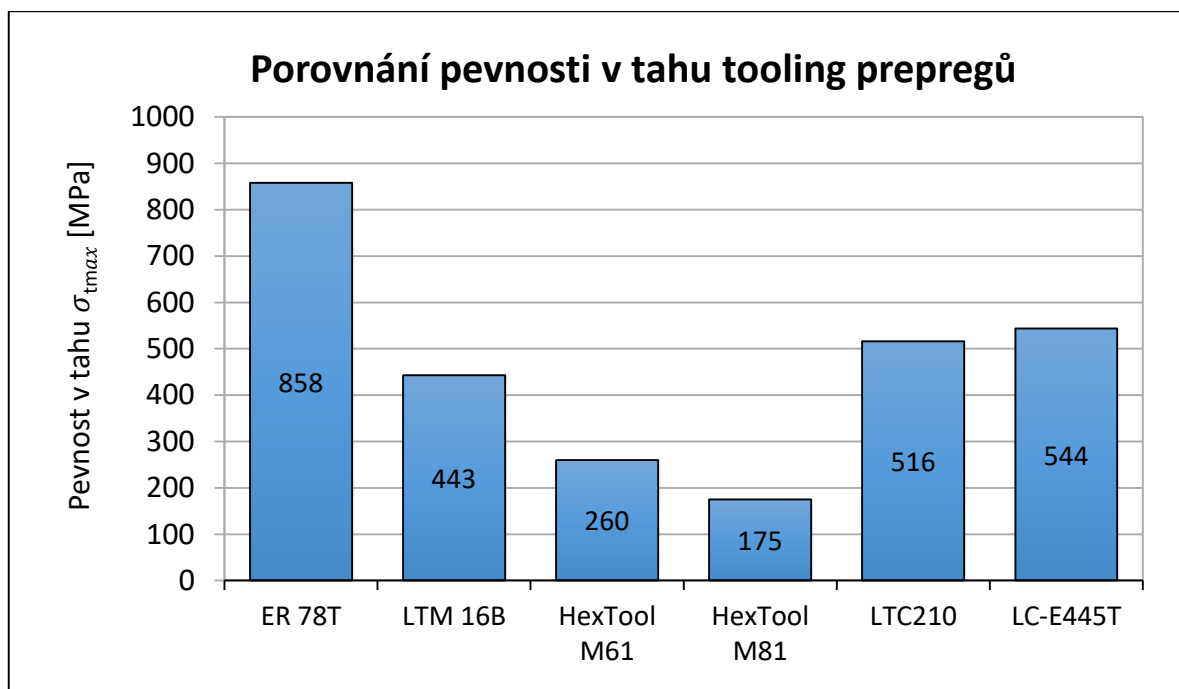
Obrázek 65 Porovnání hodnot poměrného prodloužení ϵ_{max}

Největší hodnota poměrné deformace byla naměřena u zkušební série č. 2. Tyto výsledky jsou způsobeny orientací vláken, kdy v případě této série bylo přenášeno velké množství napětí na matici, která vykazuje relativně vysokou schopnost deformace, ale zároveň nízkou pevnost.



Obrázek 66 Zkušební vzorky po tahové zkoušce (zkušební série č. 1 a č. 2)

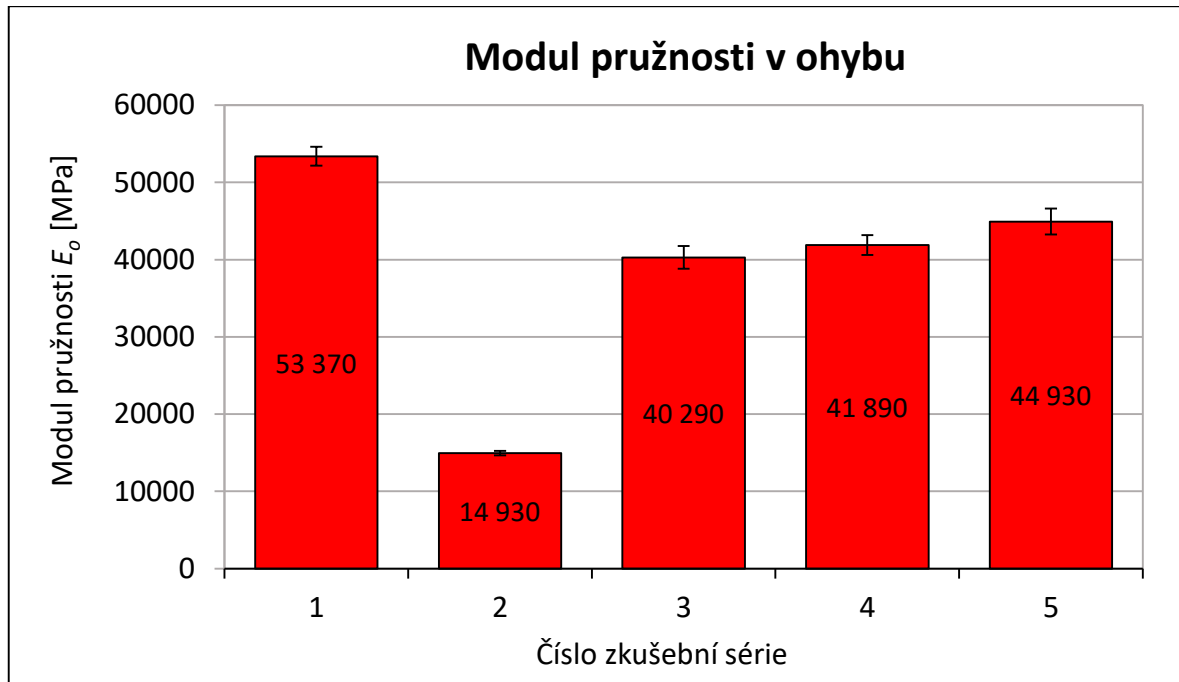
Pokud orientačně porovnáme pevnost v tahu námi testovaného prepreg materiálu s pevnostmi v tahu uvedenými v materiálových listech jiných běžně dostupných tooling prepregů, pak zjistíme, že je hodnota pevnosti u námi testovaného materiálu výrazně nadprůměrná. Hodnoty zobrazené v grafu na obrázku 67 je ovšem potřeba brát s určitou rezervou, jelikož v materiálových listech jsou často uvedeny pouze orientační hodnoty. Konkrétně byly porovnávány mechanické vlastnosti laminátů s orientací vláken 0° vůči aplikovanému směru zatížení. První sloupec zobrazuje přibližné výsledky pevnosti v tahu námi testovaného tooling prepregu ER 78T (MEEM, s.r.o., Plzeň). Dále je zde z materiálových listů uvedena orientační pevnost v tahu pro tooling prepreg LTM[®] 16B (Solvay), HexTool[®] M61 (Hexcel), HexTool[®] M81 (Hexcel), LC210 (SHD Composites) a LC-E445T (Lincoln Composite Materials).



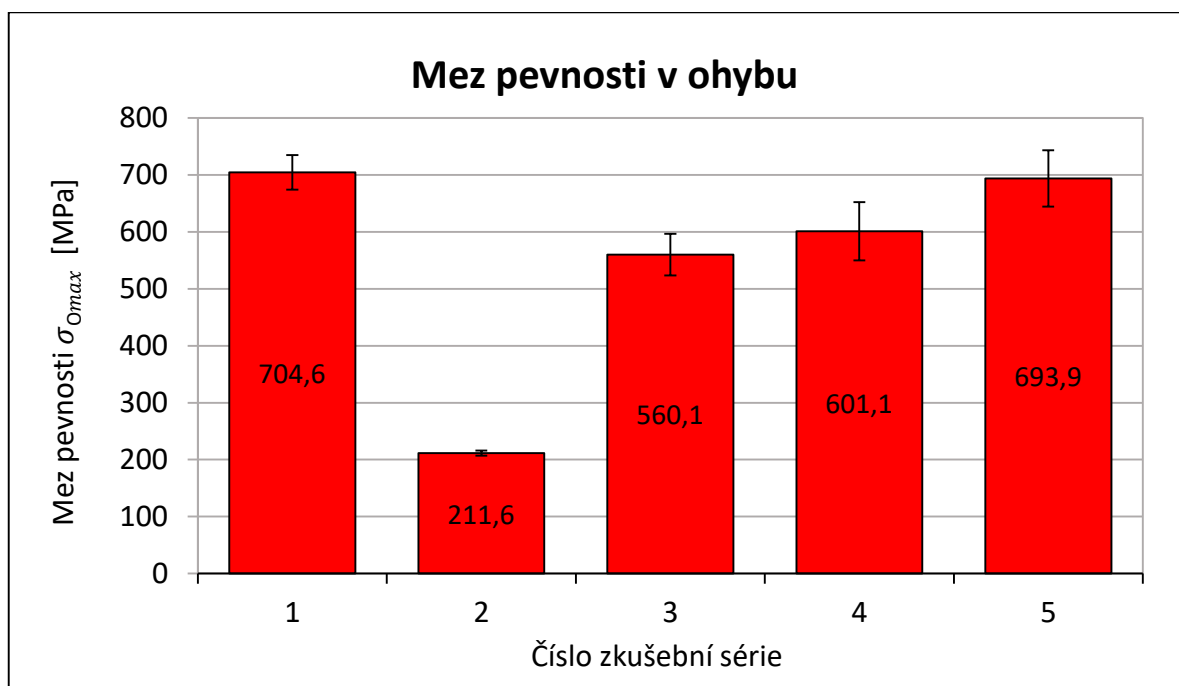
Obrázek 67 Orientační porovnání pevnosti v tahu námi testovaného prepregu s jinými komerčně nabízenými tooling prepregy [62, 63, 64, 65, 66]

10.2 Vyhodnocení ohybových vlastností

V případě ohybové zkoušky byly mezi jednotlivými navrženými kompozitními systémy porovnávány hodnoty modulu pružnosti E_o , meze pevnosti $\sigma_{o_{max}}$ a poměrné deformace ε_{max} .

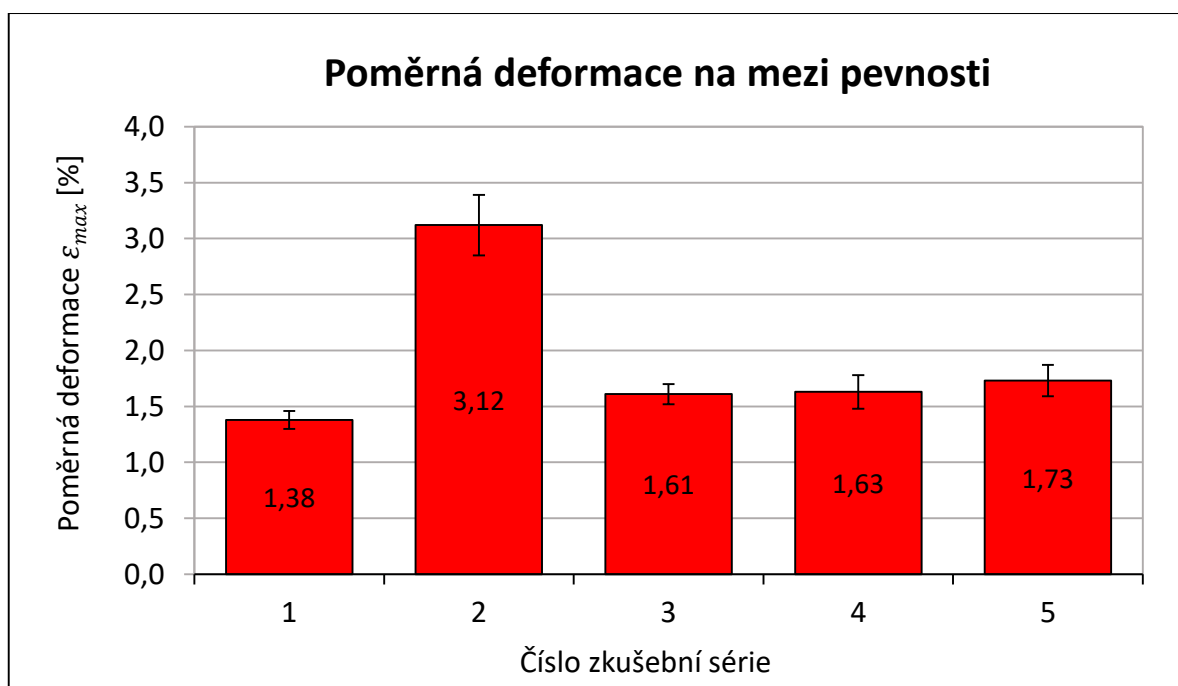


Obrázek 68 Porovnání hodnot modulu pružnosti v ohybu E_o



Obrázek 69 Porovnání hodnot meze pevnosti v ohybu $\sigma_{o_{max}}$

Z grafů uvedených na obrázku 68 a 69 lze vyčíst, že modul pružnosti i mez pevnosti v ohybu dosahovala nejvyšší hodnoty v případě zkušební série č. 1, tedy u kompozitního systému s orientací vláken 0° vůči aplikovanému směru zatížení. Toto chování lze vysvětlit tak, že v případě ohybové zkoušky je daný materiál namáhán v části průřezu na tah a v části průřezu na tlak. Pokud jsou tedy vlákna orientována ve směru namáhání, pak dojde stejně jako u tahové zkoušky v případě zkušební série č. 1 k vysokému využití jejich pevnostního potenciálu, jelikož je na ně přenášena velká část daného namáhání. Naopak pokud vlákna pootočíme vůči směru namáhání i o několik jednotek stupňů, pak může dojít k poklesu modulu pružnosti a meze pevnosti i o několik desítek procent. Z toho důvodu můžeme pozorovat tak razantní pokles těchto hodnot u zkušební série č. 2, tedy u materiálu s ve všech vrstvách orientovanými vlákny pod úhlem 45° vůči aplikovanému směru zatížení. Tento jev je způsoben tím, že v případě takto orientované výztuže je přenášeno větší procento namáhání na matici a není plně využito potenciál pevnosti uhlíkových vláken. Kompromisem pak je kombinace orientace vláken v jednotlivých vrstvách.

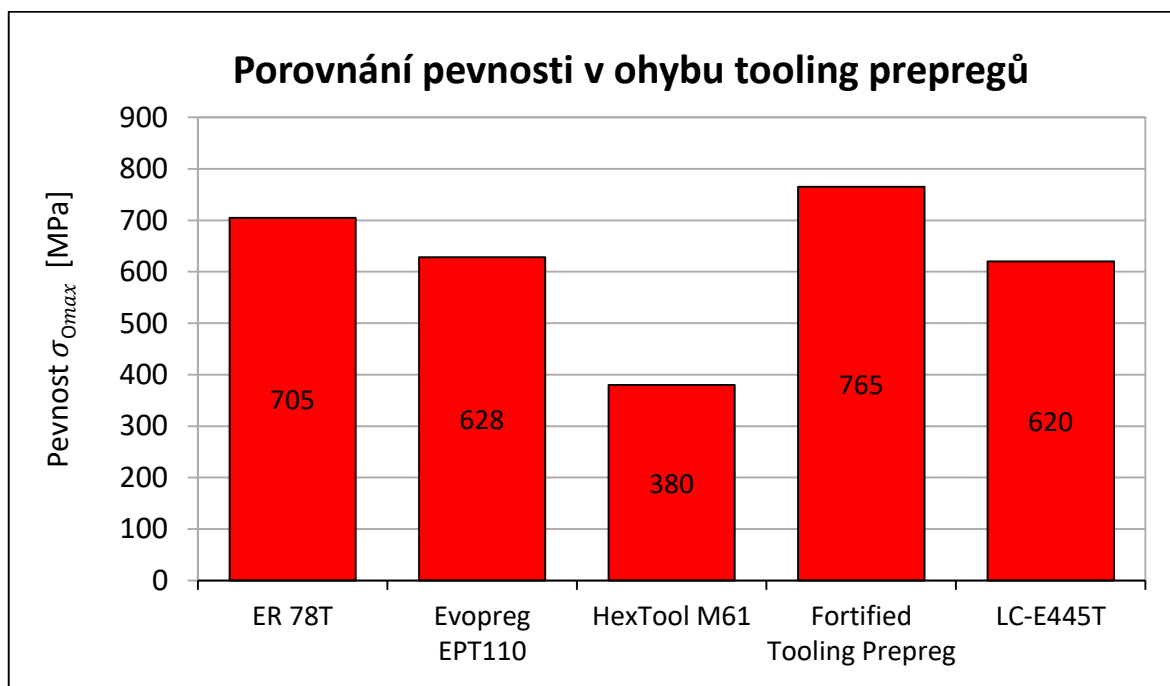


Obrázek 70 Porovnání hodnot poměrné deformace na mezi pevnosti ε_{max}

Největší hodnota poměrné deformace byla naměřena u zkušební série č. 2. Je to opět způsobeno orientací vláken, kdy v případě této série bylo přenášeno velké množství napětí na matici, která vykazuje relativně vysokou schopnost deformace, ale zároveň nízkou pevnost. Naopak nejnižší hodnota poměrné deformace nám vyšla u zkušební série č. 1. Pokud bychom chtěli zvolit kompromis mezi poměrnou deformací, modulem pružnosti

a mezi pevnosti, pak nám na základě obrázků 68, 69 a 70 pravděpodobně vykazuje nejlepší výsledky zkušební série č. 5.

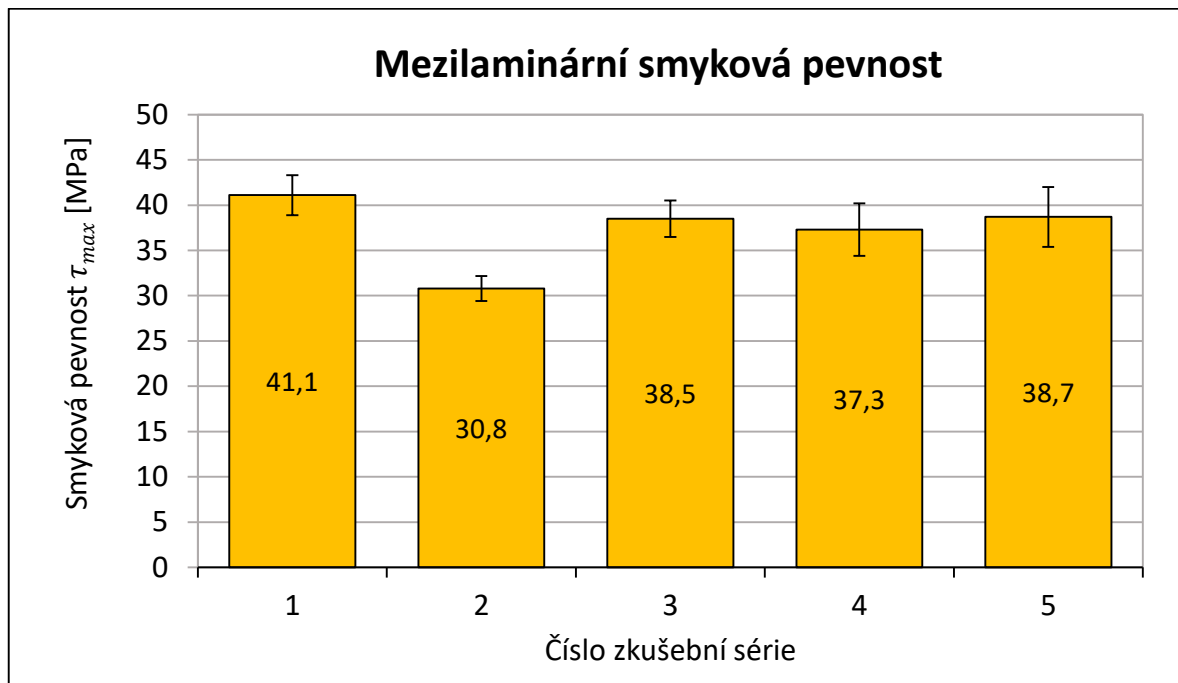
Pokud orientačně porovnáme pevnost v ohybu námi testovaného prepreg materiálu s pevnostmi v ohybu uvedenými v materiálových listech jiných běžně dostupných tooling prepregů, pak zjistíme, že je s nimi námi testovaný materiál srovnatelný a v mnoha případech je i převyšuje. Hodnoty zobrazené v grafu na obrázku 71 je ovšem opět potřeba brát s určitou rezervou, jelikož v materiálových listech jsou často uvedeny pouze orientační hodnoty. I v případě ohybu byly porovnávány mechanické vlastnosti laminátů s orientací vláken 0° vůči aplikovanému směru zatížení. První sloupec zobrazuje přibližné výsledky pevnosti v ohybu námi testovaného tooling prepregu ER 78T (MEEM, s.r.o., Plzeň). Dále je zde z materiálových listů uvedena orientační pevnost v ohybu pro tooling prepreg Evopreg[®] EPT110 (Composites Evolution), HexTool[®] M61 (Hexcel), Fortified Tooling Prepreg (3M Advanced Composites) a LC-E445T (Lincoln Composite Materials).



Obrázek 71 Orientační porovnání pevnosti v ohybu námi testovaného prepregu s jinými komerčně nabízenými tooling prepregy [63, 66, 67, 68]

10.3 Vyhodnocení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti

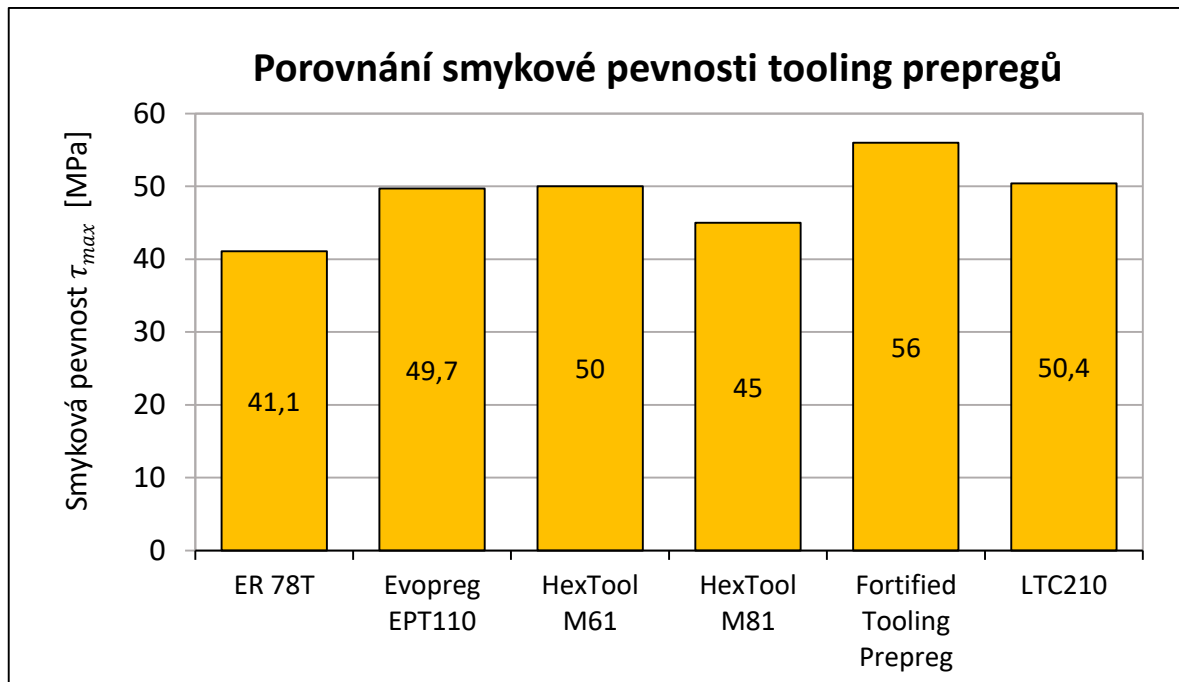
V případě této zkoušky byly mezi jednotlivými navrženými kompozitními systémy porovnávány hodnoty zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti τ_{max} .



Obrázek 72 Porovnání hodnot zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti

Na základě uvedeného grafu můžeme říci, že v případě hodnoty zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti jsou mezi jednotlivými zkušebními sériemi procentuálně menší rozdíly než v případě modulu pružnosti a meze pevnosti u zkoušky v ohybu. Tento jev je způsoben tím, že mezilaminární pevnost není takovou měrou závislá na orientaci vláken v jednotlivých vrstvách, oproti tomu vykazuje větší závislost na soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami laminátu, a tedy odolnosti proti delaminaci. Nejvyšší hodnota je naměřena u zkušební série č. 1, ovšem jelikož tato se tato hodnota určuje pouze zdánlivě, pak v rámci chyby měření nelze jednoznačně definovat, že toto materiálové složení vykazuje nejlepší výsledky. Obecně lze tedy říci, že všechny zkušební série s výjimkou série č. 2 vykazují v rámci chyby měření téměř srovnatelné výsledky.

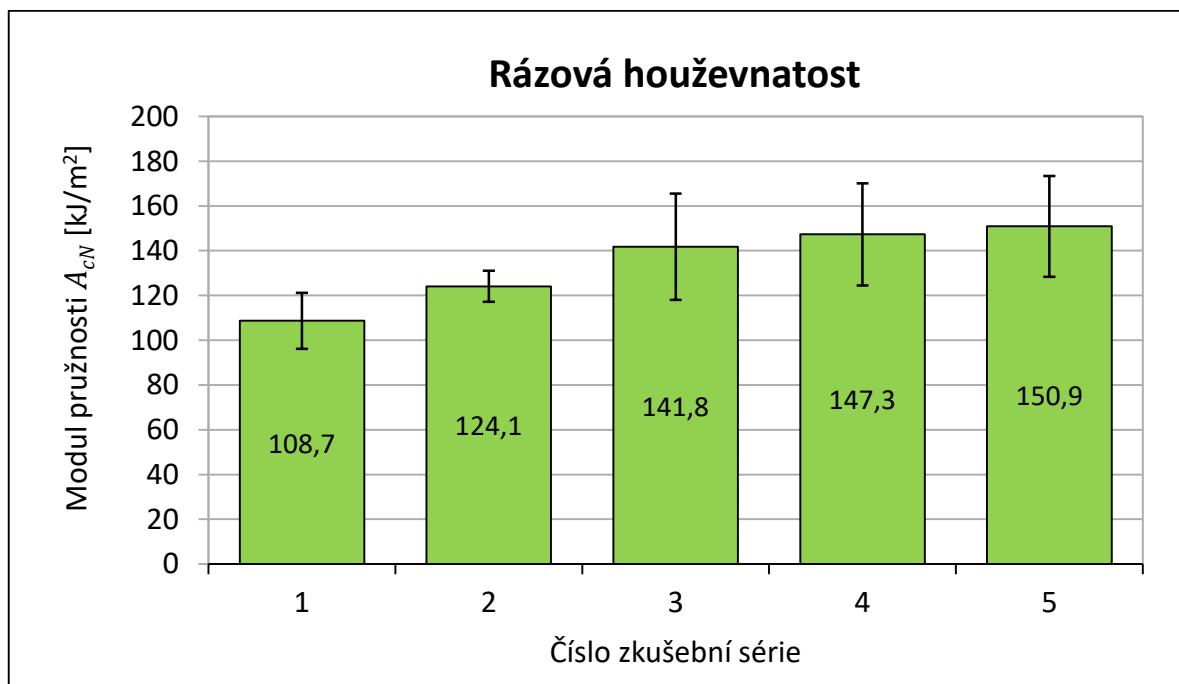
I v případě zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti můžeme naměřené hodnoty u zkušební série č. 1 porovnat s dalšími běžně dostupnými tooling prepregy. Hodnoty mezilaminární smykové pevnosti těchto tooling prepregů budou opět získány z údajů uvedených v materiálových listech, z toho důvodu bude toto srovnání pouze orientační, jelikož se reálné výsledky mohou lišit.



Obrázek 73 Orientační porovnání zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti námi testovaného prepregu s jinými komerčně nabízenými tooling prepregy [63, 64, 65, 67, 68]

10.4 Vyhodnocení rázové houževnatosti

V následujícím grafu bude porovnávána rázová houževnatost A_{cN} navržených kompozitních systémů.



Obrázek 74 Porovnání hodnot rázové houževnatosti

Na základě uvedeného grafu můžeme říci, že nevyšší hodnota rázové houževnatosti byla naměřena v případě zkušební série č. 5. Tedy u materiálu s orientací vláken 0° a $\pm 15^\circ$. Rázová houževnatost v tomto případě dosahovala hodnoty $A_{cN} = 150,9 \pm 22,5 \text{ kJ/m}^2$. Ovšem v rámci chyby měření dosáhla téměř totožných výsledků zkušební série č. 3 a č. 4. Naopak absolutně nejnižší hodnota byla naměřena u série č. 1. Rázová houževnatost v tomto případě dosahovala pouze hodnoty $A_{cN} = 108,7 \pm 15,5 \text{ kJ/m}^2$. Právě tyto výsledky potvrzují to, že tento materiál bude pravděpodobně ze všech navržených kompozitních systémů nejméně odolný proti rázům.

10.5 Komplexní vyhodnocení mechanických vlastností testovaných kompozitních systémů

Předchozím porovnáním mechanických vlastností testovaného prepreg materiálu s mechanickými vlastnostmi uvedenými v materiálových listech jiných běžně dostupných tooling prepregů bylo zjištěno, že je s nimi námi testovaný materiál srovnatelný a v mnoha případech je i převyšuje. Zároveň při využití námi zvoleného tooling prepregu dosahuje pohledová strana výrobku velmi dobré kvality povrchu. Na základě těchto faktů můžeme jednoznačně říci, že je tento materiál vhodný pro výrobu kompozitních forem.

Kompozitní formy jsou často konstruovány s kvazi-izotropní strukturou, dále je u nich kladen požadavek na dobrou rázovou houževnatost, mezilaminární smykovou pevnost a také odolnost v ohybu. Zároveň by se struktura formy neměla příliš odlišovat od struktury vyráběného výrobku. Ke splnění všech těchto podmínek se nejvíce přibližuje materiálové složení č. 4.

Struktura tohoto laminátu se společně s materiálovým složením č. 3 nejvíce přibližuje kvazi-izotropní struktuře a také struktuře vyráběného výrobku. Materiálové složení č. 4 ale v porovnání s materiálovým složením č. 3 vykazuje lepší rázovou houževnatost a také pevnost v ohybu.

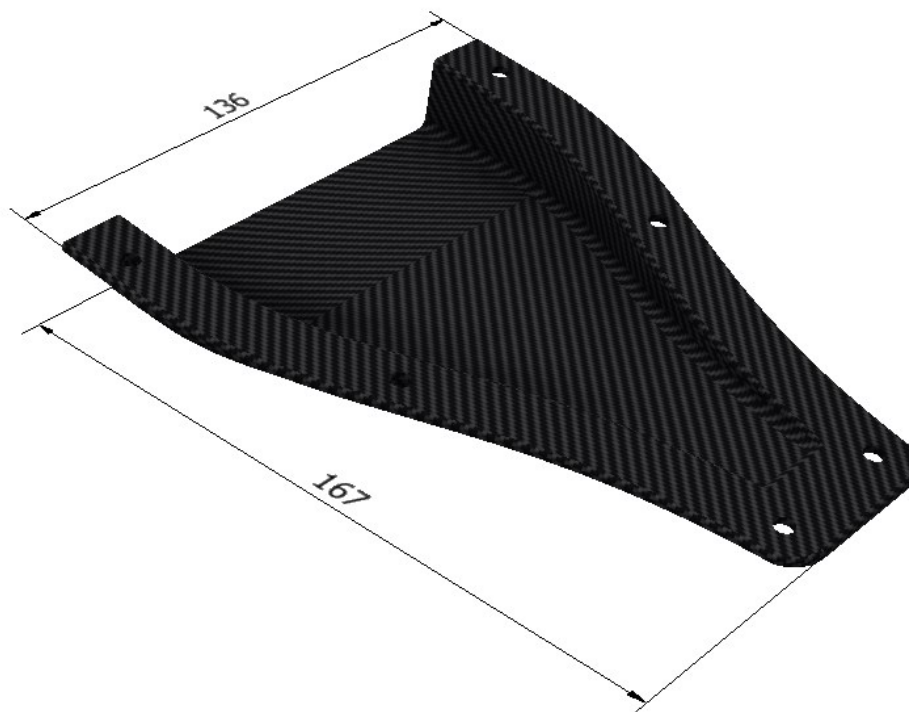
Výsledky tahové zkoušky nejsou v tomto případě natolik zásadní a sloužili nám převážně pro orientační srovnání námi testovaného materiálu s jinými běžně dostupnými kompozitními materiály pro výrobu forem

11 NÁVRH VÝROBY KOMPOZITNÍHO NÁSTROJE

Na základě získaných a vyhodnocených výsledků mechanických vlastností testovaných kompozitních systémů na bázi tooling prepregu byl následně vytvořen návrh výroby kompozitní formy určené pro výrobu kompozitního sacího kanálu v provedení NACA metodou autoklávového lisování. Konstrukční návrh vyráběného dílu, master modelu a kompozitní formy byl vytvořen v programu Autodesk Inventor Professional.

11.1 3D návrh vyráběného dílu

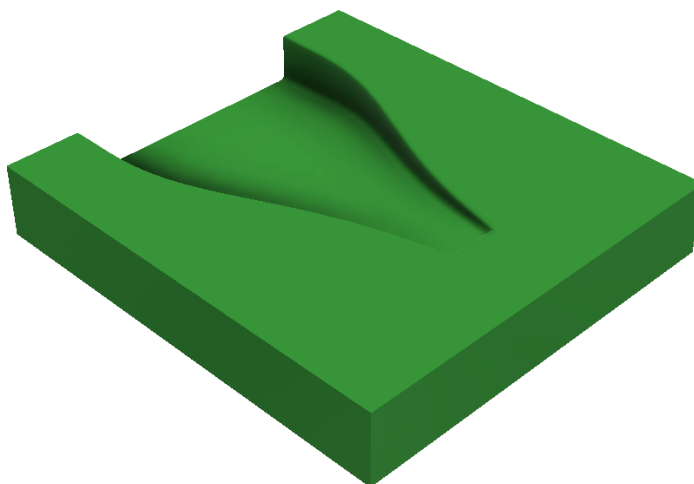
Jako předloha pro budoucí návrh výroby kompozitní formy nám sloužil vytvořený 3D model vyráběného dílu. Vyráběným dílem byl konkrétně sací kanál v provedení NACA, který se využívá k přesměrování vzduchu, aniž bychom narušili mezní vrstvu. Jedná se například o ideální řešení sloužící k přívodu vzduchu určeného k chlazení do motorového prostoru nebo do prostoru brzd. Tento druh výrobku byl zvolen z toho důvodu, jelikož bývá velmi často vyráběn z kompozitu na bázi epoxidu a uhlíkových vláken. Při jeho výrobě je tedy možné využít kompozitní formu z námi navrženého materiálu a zároveň tak zužitkovat všechny výhody, které z aplikace tohoto nástroje plynou.



Obrázek 75 3D model sacího kanálu NACA

11.2 3D návrh master modelu

Master model vyráběného dílu je jeden z nejdůležitějších článků při budoucím návrhu výroby kompozitní formy. Geometrie master modelu odpovídá geometrii vyráběného dílu, bylo zde ovšem nutné zohlednit všechny technologické přídatky. Rozměry desky jsou 180 x 156 x 30 mm.



Obrázek 76 3D model master modelu

11.3 3D návrh kompozitní formy

Při návrhu kompozitní formy se vycházelo z tvaru a rozměrů modelu vyráběného dílu. To znamená, že obrys formy by měl být totožný s obrysem finálního výrobku (master modelu). Dalším kritériem při návrhu formy byla předpokládaná metoda výroby daného výrobku. V tomto případě by měla forma sloužit pro výrobu daného dílu pomocí metody autoklávového lisování. Konkrétně byla navržena forma s pozitivní geometrií o rozměrech



Obrázek 77 3D model kompozitní formy

11.4 Návrh technologického postupu výroby kompozitní formy

Technologický postup popisuje jednotlivé operace sloužící k výrobě daného výrobku. V tabulce 41 bude uveden rámcový technologický postup, který je možné využít k výrobě kompozitní formy. U každé operace je udán popis prováděných činností, použitý materiál a také použité pomůcky a měřidla.

První krok při výrobě formy by měl zahrnovat výrobu master modelu na CNC obráběcím centru pomocí vytvořeného 3D modelu. Vhodným materiálem pro jeho výrobu by mohla být vysokoteplotní epoxidová nástrojová deska od firmy EasyComposites o rozměrech 250 x 250 x 50 mm. Právě tento materiál byl zvolen z důvodu jeho vysoké teplotní odolnosti, možnosti vyrobit rozměrově a tvarově velmi přesný model a jednoduchosti zpracování. Dalším důvodem pak byla nevhodnost použití master modelu z PUR materiálu z důvodu inhibice vytvrzovaného epoxidového prepregu polyuretanem při zvýšené teplotě. Nevýhodou tohoto materiálu je ovšem jeho vysoká cena.

Po dokončení všech tvarových ploch by měla následovat aplikace plniče na povrch master modelu. Konkrétně byl vybrán plnič, který je kompatibilní s materiálem master modelu. Zvolený plnič by měl zajistit vysoce lesklý povrch připravený pro aplikaci separačního prostředku. Tento přípravek lze aplikovat jak stříkáním, tak nanášením pomocí ubrousku. Doporučuje se nanést maximálně 8 vrstev tohoto přípravku. Po jeho úplném vytvrzení je potřeba odstranit zbývající nerovnosti.

Po aplikaci vhodného separačního prostředku by následně již bylo možné začít s laminací připraveného prepreg materiálu na povrch master modelu. Při laminaci je nutné dodržet požadovanou skladbu jednotlivých vrstev. Poté je nutné materiál zavakuovat a vložit do autoklávu.

Následovala by volba vytvrzovacího programu na základě materiálového listu daného výrobku, případně podle provedených zkoušek a požadovaných konečných vlastností výrobku. Po vytvrzení je nutné formu sejmout z master modelu a následně ořezat přebytečný materiál.

Tabulka 41 Rámcový technologický postup výroby kompozitní formy

Krok	Popis činnosti	Materiál (výrobce)	Stroj, pomůcky, měřidla
1	Výroba master modelu na CNC obráběcím centru	Vysokoteplotní epoxidová nástrojová deska – EB700 (EasyComposites)	CNC obráběcí centrum DMG MORI NTX 1000
2	Dokončení tvarových ploch master modelu	-	Brusný papír P150 až P1200
3	Aplikace plniče na povrch master modelu	S120 Advanced Board Sealer (EasyComposites)	Papírový ubrousek
4	Odstranění zbývajících nerovností	-	Brusný papír P1200
5	Aplikace separačního prostředku	CR1 Easy-Lease Chemical Release Agent (EasyComposites)	Papírový ubrousek
6	Nařezání tooling prepregu	Tooling prepreg ER 78T (MEEM s.r.o., Plzeň)	Zalamovací nůž, nůžky, metr, pravítko, úhelník
7	Ruční laminování	Tooling prepreg ER 78T (MEEM s.r.o., Plzeň)	Váleček, speciální přípravky
8	Vakuování	Separální folie, odsávací rohož, vakuová fólie, těsnící páska	Nůžky, metr, ventil k odsávání vzduchu
9	Vytvrzování	-	Autokláv
10	Dodatečné vytvrzování	-	Vytvrzovací pec
11	Vyjmutí master modelu z formy	-	Nůžky, nůž, speciální přípravky
12	Ořezání výrobku	-	Diamantový kotouč, bruska

ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce byla podrobně rozebrána problematika epoxidových kompozitních systémů. Další kapitola byla věnována problematice nástrojů určených pro výrobu kompozitních výrobků metodou autoklávového listování. Jelikož byl předmětem zkoumání této diplomové práce materiál určený pro výrobu kompozitních forem, pak bylo také nutné zmínit informace o aktuálním vývoji tohoto typu materiálu a také výrobce, kteří se na tomto vývoji podílí. Následoval popis technologie vytvrzování kompozitů v autoklávu. Zde byl zmíněn princip tohoto zařízení a procesní podmínky. V poslední kapitole teoretické části byly podrobně popsány jednotlivé zkoušky mechanických vlastností.

Praktická část diplomové práce byla primárně zaměřena na určení mechanických vlastností při statickém a dynamickém namáhání navržených kompozitních systémů. Všechny navržené kompozitní systémy se skládaly z několika vrstev nástrojového prepreg materiálu. Jednotlivé návrhy se od sebe odlišovaly pouze orientací vláken v jednotlivých vrstvách tohoto kompozitního systému.

Následoval popis výroby zkušebních vzorků metodou autoklávového lisování. Pro každou zkušební metodu bylo vždy vytvořeno pět zkušebních sérií. Každá z těchto sérií obsahovala vzorky s odlišnou skladbou zvoleného nástrojového prepreg materiálu.

Hlavní kapitola praktické části diplomové práce uvádí popis provedených zkoušek mechanických vlastností, který zahrnuje rozměry zkušebních vzorků, postup měření, použité zkušební zařízení a výsledky zkoušky. Tyto výsledky byly následně vyhodnoceny a graficky zpracovány. Na základě tohoto vyhodnocení byla vybrána zkušební série, která dosahovala nejideálnějších vlastností pro výrobu kompozitního nástroje.

Pro výrobu kompozitního nástroje bylo konkrétně vybráno materiálové složení č. 4. Toto materiálové složení se společně se zkušební sérií č. 3 oproti zbylým návrhům nejvíce přibližovalo kvazi-izotropní struktuře, která je u kompozitních forem často žádoucí a také předpokládané struktuře vyráběného výrobku. Z toho důvodu bylo z výběru vyřazeno materiálové složení č. 1 a č. 5, které sice u určitých zkušebních metod dosahovaly výrazně nadprůměrných výsledků, ovšem v případě jejich zatížení v jiném směru by zde nastal výrazný pokles těchto naměřených hodnot. Tento pokles by pravděpodobně nebyl tak výrazný právě u materiálového složení č. 4, které navíc vykazovalo v rámci chyby měření téměř největší odolnost proti rázovému namáhání, která je pro životnost kompozitních forem klíčová. Je zde také téměř srovnatelná mezilaminární smyková pevnost jako u zkušební série

č. 3 a č. 5. Naopak mez pevnosti v ohybu je zde výrazně vyšší než v případě zkušební série č. 3. Z toho důvodu bylo upřednostněno použití materiálového složení č. 4. Nicméně naměřené hodnoty mechanických vlastností pro materiálové složení č. 1, č. 2 a č. 5 byly neméně důležité, jelikož nám sloužily pro získání obecného přehledu o mechanických vlastnostech tohoto typu prepreg materiálu a také k porovnání námi zvoleného prepregu s jinými běžně dostupnými tooling prepregy.

V poslední části diplomové práce byl vytvořen samotný návrh výroby kompozitní formy pro výrobu kompozitního sacího kanálu v provedení NACA s využitím námi zvoleného materiálového složení. Návrh výroby zahrnoval tvorbu 3D modelu výrobku vyráběného pomocí námi navržené formy, návrh master modelu a samotné kompozitní formy. Následně je zde v jednotlivých krocích uveden rámcový technologický postup výroby kompozitní formy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KAR, Kamal Krishna. *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*. Berlin: Springer, 2017. ISBN 978-3-662-49512-4.
- [2] YI, Xiao-Su, Shanyi DU a Litong ZHANG. *Composite Materials Engineering, Volume 1: Fundamentals of Composite Materials*. Singapore: Springer Singapore, 2018, 765 s. ISBN 978-981-13-5465-6.
- [3] BALASUBRAMANIAN, Murugesan. *Composite Materials and Processing*. Boca Raton: CRC Press, 2014, 648 s. ISBN 978-1-4398-8054-8.
- [4] BRENT STRONG, A. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*. 2nd edition. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2008, 640 s. ISBN 978-087263854-9.
- [5] CAMPBELL, Flake C. *Manufacturing processes for advanced composites*. New York: Elsevier, 2004. ISBN 9781856174152.
- [6] DORWORTH, Louis C., Ginger L. GARDINER a Greg M. MELLEMA. *Essentials of Advanced Composite Fabrication & Repair*. Newcastle, Washington: Aviation Supplies & Academics, 2009. ISBN 978-1-61954-118-4.
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] LENGSELD, Hauke, Felipe WOLFF-FABRIS, Johannes KRÄMER, Javier LACALLE a Volker ALTSTÄDT. *Composite Technology: Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*. Munich: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-599-9.
- [9] DE ANDRADE RAPONI, Olivia, Lorena Cristina Miranda BARBOSA, José Everardo Baldo JUNIOR, Antonio Carlos Ancelotti JUNIOR a Alessandro GUIMARÃES. *Effects of the exposition of an autoclave prepreg to the processing environment on its properties, curing cycle, and final composite behavior. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, 106(11-12), 5129-5136. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-05022-5.

- [10] HEXCEL. *HexPly® Prepreg Technology* [online]. Hexcel Corporation, 2020 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf.
- [11] XIAO-SU, Yi, Du SHANYI a Zhang LITONG. *Composite Materials Engineering, Volume 2: Different Types of Composite Materials*. Singapore: Springer Singapore, 2018. ISBN 978-981-10-5689-5.
- [12] BARBERO, Ever J. *Introduction to Composite Materials Design*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-1381-9680-3.
- [13] GALOS, Joel. *Thin-ply composite laminates: a review*. *Composite Structures* [online]. 2020, 236 [cit. 2022-11-28]. ISSN 02638223. doi:10.1016/j.compstruct.2020.111920.
- [14] SRINIVASAN, Karthik. *Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications*. Alpha Science International Limited, 2009. ISBN 9781842654910.
- [15] STAAB, George H. *Laminar Composites*. 2nd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015, 466 s. ISBN 978-0-12-802400-3.
- [16] LIPTÁKOVÁ, Tatiana a Pavol ALEXYS. *Polymérne konštrukčné materiály*. Žilina: University of Žilina, 2012. ISBN 978-80-554-0505-6.
- [17] WANG, Qing, Lingyun WANG, Weidong ZHU, Qiang XU a Yinglin KE. *Design optimization of molds for autoclave process of composite manufacturing*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. 2017, 36(21), 1564-1576 [cit. 2022-12-20]. ISSN 0731-6844., Dostupné z: doi:10.1177/0731684417718265.
- [18] LI, Yong, Yao XIAO, Long YU, Kang JI, Dongsheng LI a Alessandra CAGGIANO. *A review on the tooling technologies for composites manufacturing of aerospace structures: materials, structures and processes*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2022, 154(2), 603-626 [cit. 2022-12-02]. ISSN 1359835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2021.106762.
- [19] JOVEN, Ronald, Behrouz TAVAKOL, Alejandro RODRIGUEZ, Mauricio GUZMAN a Bob MINAIE. *Characterization of shear stress at the tool-part interface during autoclave processing of prepreg composites*. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2013, 129(4), 2017-2028 [cit. 2022-12-03]. ISSN 00218995. Dostupné z: doi:10.1002/app.38909.
- [20] KAUSHIK, V., J. RAGHAVAN, Alejandro RODRIGUEZ, Mauricio GUZMAN a Bob MINAIE. *Experimental study of tool-part interaction during autoclave*

- processing of thermoset polymer composite structures. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]., 2010, 41(9), 1210-1218 [cit. 2022-12-03]. ISSN 1359835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2010.05.003.
- [21] Časopis Transfer: *Elektronický sborník VZLÚ - výzkum a vývoj pro letecký průmysl*. [online]. Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s., 2007-2014 [cit. 2022-12-03]. Dostupný z: <http://www.vzlu.cz/cz/publikace/casopis-transfer/>.
- [22] FLEISCHER, Jürgen, Roberto TETI, Gisela LANZA, Paul MATIVENGA, Hans-Christian MÖHRING a Alessandra CAGGIANO. *Composite materials parts manufacturing. CIRP Annals* [online]. 2018, 67(2), 603-626 [cit. 2022-12-02]. ISSN 00078506., Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2018.05.005.
- [23] WANG, S. C. a Yar-Ming WANG. *Nickel Plated Invar-36 Alloy for Carbon Fiber Composite Molding Tools* [online]. Warren, Michigan: GM R&D Center, 2008 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.nmfrc.org/pdf/sf2008/sf0826.pdf>.
- [24] DUGMORE, Andrew a Jed ILLSLEY. *Behind every good part is a great tool. Reinforced Plastics* [online]. 2009, 53(2), 22-25 [cit. 2022-12-05]. ISSN 00343617. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-3617(09)70079-7.
- [25] GRANKÄLL, Tommy, Per HALLANDER, Mikael PETERSSON a Malin ÅKERMO. *The true shape of composite cure tools. Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2020, 59, 279-286 [cit. 2022-12-18]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2020.08.052.
- [26] Easy Composites. *About Easy Composites* [online]. UK: Easy Composites, 2022 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.eu/about-us>.
- [27] Easy Composites. *Tooling Prepreg* [online]. UK: Easy Composites, 2022 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/tooling-prepreg>.
- [28] STEWART, Richard. *New prepreg materials offer versatility, top performance. Reinforced Plastics* [online]. 2009, 53(5), 28-33 [cit. 2022-12-22]. ISSN 00343617. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-3617(09)70222-X.
- [29] Hexcel. *HexTool® Tooling Material* [online]. Stamford: Hexcel Corporation, 2022 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.hexcel.com/Products/Tooling/HexTool-Tooling-Material>.

- [30] Hexcel. 2019. *Applications Of HexTOOL® Quasi-Isotropic Prepreg*. AZoM, viewed 22 December 2022, Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=10299>.
- [31] Composites Evolution. *About* [online]. Chesterfield: Composites Evolution, 2022 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://compositesevolution.com/about/>.
- [32] RICHARDSON, Mike. *Composites Evolution unveils new epoxy tooling prepreg system*. *Composites in Manufacturing* [online]. UK: MIT Publishing, 2020 [cit. 2022-12-21]., Dostupné z: <https://www.composites.media/composites-evolution-unveils-new-epoxy-tooling-prepreg-system>.
- [33] Composites Evolution. *Epoxy Tooling Prepregs* [online]. Chesterfield: Composites Evolution, 2022 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://compositesevolution.com/products/epoxy-tooling-prepregs/>.
- [34] Fibre2Fashion News Desk. *Composites Evolution develops hybrid tooling system* [online]. India: TechnicalTextile.net, 2018 [cit. 2022-12-23]. Dostupné z: <https://www.technicaltextile.net/news/composites-evolution-develops-hybrid-tooling-system-246044.html>.
- [35] Toray Advanced Composites. *Advanced Composite Tooling Materials* [online]. Toray TCAC Holding B.V, 2022 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.toraytac.com/products/composite-tooling/composite-tooling-prepregs>.
- [36] Nelson, J.M. & Hine, A.M. & Goetz, D.P. & Sedgwick, P. & Lowe, R.H. & Emilie, R. & King, R.E. & Thompson, W. & Billig, D.A. & Brown, A.P.. *The development of nanosilica-modified tooling prepregs: A progress review and new advances.*, International SAMPE Technical Conference. 2013.
- [37] BI, Feng-yang, Tian-guo JIN, Gao-liang PENG a Wen-jian LIU. *A Rapid Design and Design Knowledge Management System for Mould of Autoclave Forming Resin Matrix Composite Components*. *Polymers and Polymer Composites* [online]. 2012, 20(1-2), 183-190, [cit. 2022-12-26]. ISSN 0967-3911. Dostupné z: doi:10.1177/0967391112020001-235.
- [38] MUJAHID, Yasir, Nabihah SALLIH a Mohamad Zaki ABDULLAH. *A Comparison of Single-Vacuum-Bag and Double-Vacuum-Bag Methods for Manufacturing High-Quality Laminated Composites*. *Advances in Manufacturing Engineering* [online]. Singapore: Springer Singapore,, 2020, 2020-09-01, 457-467 [cit. 2022-12-28]. Lecture

- Notes in Mechanical Engineering. ISBN 978-981-15-5752-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-15-5753-8_42.
- [39] CHAWLA, Krishan K. *Composite Materials: Science and Engineering*. 4th ed. Cambridge: Springer, 2019. ISBN 978-3030289829.
- [40] MACHEK, Václav, Jaromír SODOMKA, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a Dopravní FAKULTA. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 9788001039274.
- [41] ŠUBA, Oldřich, UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ a Technologická FAKULTA. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 9788074540158.
- [42] ŠUBA, Oldřich, UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ a Technologická FAKULTA. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 9788073189488.
- [43] KAW, Autar K. *Mechanics of Composite Materials*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. ISBN 978-0-8493-1343-1.
- [44] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 1: Obecné principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [45] ČSN EN ISO 527-4. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlákny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [46] ČSN EN ISO 527-5. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 5: Zkušební podmínky pro plastové kompozity vyztužené jednosměrnými vlákny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [47] CARLSSON, L. A., D. F. ADAMS a R. B. PIPES. *Basic Experimental Characterization of Polymer Matrix Composite Materials*. *Polymer Reviews* [online]. 2013, 53(2), 277-302 [cit. 2023-01-10]. ISSN 1558-3724., Dostupné z: doi:10.1080/15583724.2013.776588.
- [48] Erdemli Gunaslan, Sultan & Karasin, Abdulhalim & Öncü, M. *Properties of FRP Materials for Strengthening*. 2014.
- [49] MILISAVLJEVIĆ, Jelena, Emina PETROVIĆ, Ivan ĆIRIĆ, Dušan MARKOVIĆ a Milan ĐORĐEVIĆ. *TENSILE TESTING FOR DIFFERENT TYPES OF POLYMERS* [online]. Belgrade, 2012 [cit. 2023-01-10]., Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/256096156_TENSILE_TESTING_FOR_DIFFERENT_TYPES_OF_POLYMERS.

- [50] SABA, N., M. JAWAID a M.T.H. SULTAN. *An overview of mechanical and physical testing of composite materials. Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* [online]. Elsevier, 2019, 2019, 53(2),, 1-12 [cit. 2023-01-10]. ISBN 9780081022924. ISSN 1558-3724. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1.
- [51] LEMANSKI SL, J Wang, Sutcliffe MPF, KD Potter, MR Wisnom. *Modelling failure of composite specimens with defects under compression loading*. Composites A. 2013.
- [52] ČSN EN ISO 14125. *Vlákný vyztužené plastové kompozity – Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [53] ADAMS, Donald. *Flexural testing of composite materials*. In: CompositesWorld [online]. Salt Lake City, Utah: Wyoming Test Fixtures, 2013 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: [https://www.compositesworld.com/articles/flexural-testing-of-composite-materials\(2\)](https://www.compositesworld.com/articles/flexural-testing-of-composite-materials(2)).
- [54] SHRIVASTAVA, Anshuman. *Plastic Properties and Testing. Introduction to Plastics Engineering* [online]. Elsevier, 2018, 2018, 49-110 [cit. 2023-01-21]. ISBN 9780323395007. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-39500-7.00003-4.
- [55] NAGLER, Jacob. *Failure Mechanics of Multi Materials Laminated Systems Review Analysis-Based Project* [online]. Tel-Aviv, 2019 [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.15062.91200.
- [56] TEC-SCIENCE. *Bending flexural test*. In: Tec-science [online]. 2018 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/bending-flexural-test/>.
- [57] ČSN EN ISO 14130. *Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [58] GANESAN, R. a Min-Kang SEO. *Experimental characterization of interlaminar shear strength. Delamination Behaviour of Composites* [online]. Elsevier, 2008, 2008, 24(2), 117-137 [cit. 2023-01-25]. Interface Science and Technology., ISBN 9781845692445. ISSN 2633-366X. Dostupné z: doi:10.1533/9781845694821.1.117.

- [59] ASLAN, Züleyha. *Apparent Interlaminar Shear Strength Measurement by Four Point Short Beam Test*. *Advanced Composites Letters* [online]. 2015, 24(2) [cit. 2023-01-25]. ISSN 2633-366X. Dostupné z: doi:10.1177/096369351502400203.
- [60] ČSN EN ISO 179. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [61] Materiálový list: Tooling prepreg ER 78T. Plzeň: MEEM s.r.o.
- [62] SOLVAY. *Technical Data Sheet: LTM® 16B Tooling prepreg* [online]. In: . Tempe, USA, 2021 [cit. 2023-03-20].
- [63] HEXCEL CORPORATION. *Product Data Sheet: HexTool® M61* [online]. In: . 2016 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexTool_M61_DataSheet_global.pdf.
- [64] HEXCEL CORPORATION. *Product Data Sheet: HexTool® M81* [online]. In: . 2016 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.imatec.it/wp-content/uploads/2016/07/HexTool%C2%AE-M81.pdf>.
- [65] SHD COMPOSITES. *Product Data Sheet: LTC210 Epoxy Tooling Prepreg* [online]. In: . 2022 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://shdcomposites.com/admin/resources/datasheets/ltc210-tds.pdf>.
- [66] LINCOLN COMPOSITE MATERIALS. *Product Data Sheet: LC-R445T Epoxy tooling prepreg* [online]. In: . [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.tmi-slc.com/file/13b382d2-0f45-44f5-aadd-e8de94f03f06>.
- [67] COMPOSITES EVOLUTION. *Technical Data Sheet: Evopreg® EPT110* [online]. In: . Chesterfield, 2021 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://compositesevolution.com/wp-content/uploads/2022/04/Evopreg-EPT110-TDS-v1.3.pdf.pdf>.
- [68] 3M COMPANY. *Product Data Sheet: 3M™ Fortified Tooling Prepreg* [online]. In: . St. Paul, 2012 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://multimedia.3m.com/mws/media/8197800/3mtm-fortified-tooling-prepreg-brochure.pdf>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní norma
ASTM	Americká společnost pro zkoušení a materiály
DGEBA	Diglycidylether bisfenol A
PAN	Polyakrylonitril
SM	Standartní modul
LM	Nízký modul
IM	Střední modul
HM	Vysoký modul
UHM	Ultra vysoký modul
HR	Tvrdost podle Rockwella
CAD	Computer-aided design
CNC	Computer Numerical Control
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process
PLC	Programmable Logic Controller
ACG	Advanced Composites Group
E	Modul pružnosti [MPa]
G	Modul pružnosti ve smyku [MPa]
μ	Poissonovo číslo
F	Zátěžná síla [N]
A	Kontaktní plocha [mm ²]
σ	Normálové napětí [MPa]
σ_{max}	Mez pevnosti [MPa]
τ	Smykové napětí [MPa]

ε	Poměrné prodloužení [-]
Δl	Prodloužení [mm]
O	Osa
Q	Tuhost
S	Průřez [mm ²]
M_o	Ohybový moment [Nmm]
A_n	Rázová houževnatost [kJ·m ²]
A_{cN}	Rázová houževnatost při měření metodou Charpy [kJ·m ²]
W	Deformační práce [N.mm]
l	Délka [mm]
l_o	Původní délka [mm]
b	Šířka [mm]
h	Tloušťka [mm]
\bar{x}	Aritmetický průměr
s_x	Směrodatná odchylka výběru
v_x	Variační koeficient [%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Epoxidová skupina [5]	12
Obrázek 2 Proces zesíťování [6].....	15
Obrázek 3 Závislost výkonnosti na objemu výroby prepregů ve srovnání s jinými technologiemi [10].....	17
Obrázek 4 Výroba uhlíkových vláken [6].....	18
Obrázek 5 Svazek vláken (roving) [13].....	19
Obrázek 6 Druhy vazeb [6].....	20
Obrázek 7 Porovnání symetrického a asymetrického vrstvení tkanin [6]	21
Obrázek 8 Kontury nástrojů [8]	22
Obrázek 9 Rámová forma [17]	22
Obrázek 10 Klíčové specifikace nástrojových materiálů a jejich odpovídajícím způsobem ovlivněné výkonnosti procesu a vlastnosti produktů [18]	23
Obrázek 11 Vliv působící normálové síly na vznik smykového napětí [19].....	24
Obrázek 12 Nástroj z materiálu Invar 36 pro výrobu kompozitů [8]	27
Obrázek 13 Zjednodušený výrobní postup pro výrobu nástroje ze slitiny niklu a železa [8]	27
Obrázek 14 Typické prvky u kompozitních nástrojů [6].....	28
Obrázek 15 Tooling prepreg XT135 [27]	31
Obrázek 16 Kompozitní nástroj vyrobený pomocí tooling prepregu HexTOOL® [30]	32
Obrázek 17 Nástroje z hybridního prepregového systému od firmy Composites Evolution [34].....	33
Obrázek 18 Princip autoklávu [37, 38].....	35
Obrázek 19 Konvenční tlakový a teplotní profil při vytvrzování kompozitního systému na bázi epoxidu [8]	36
Obrázek 20 Tlakový a teplotní profil s nárůstem tlaku již v průběhu první izotermie [8] ..	37
Obrázek 21 Schéma analýzy laminátových kompozitů [43]	39
Obrázek 22 Zkušební konfigurace pro jednosměrnou laminu [12]	40
Obrázek 23 Rozložení složek v laminátu [7].....	41
Obrázek 24 Tahový diagram [48].....	45
Obrázek 25 Příklad zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku jednosměrně, izotropně a anizotropně vyztuženého kompozitu dle normy ČSN EN ISO 527 [7].....	46
Obrázek 26 Mikrovzpěr vznikající při zkouškách tlakem kompozitních materiálů [51] ...	47
Obrázek 27 Schéma přípravku pro kombinovanou zatěžovací kompresi [47]	48
Obrázek 28 Schéma třibodové a čtyřbodové zkoušky ohybem [55]	49
Obrázek 29 Rozmístění zkušebních vzorků [52].....	50

Obrázek 30 Způsoby selhání krátkého nosníku [57]	51
Obrázek 31 Zkouška zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku [58].....	52
Obrázek 32 Očištěná forma	60
Obrázek 33 Použitý separační a ochranný přípravek.....	61
Obrázek 34 Nastříhaný prepreg materiál	61
Obrázek 35 Skladba prepreg materiálu.....	62
Obrázek 36 Separací folie.....	62
Obrázek 37 Odsávací rohož.....	63
Obrázek 38 Vakuovací rukáv a těsnicí páska	63
Obrázek 39 Zavakuovaná forma.....	64
Obrázek 40 Kontrola tlaku vakua (zprava barometr č. 1 a 2).....	64
Obrázek 41 Forma po konci vytvrzování	65
Obrázek 42 Vyrobené polotovary.....	65
Obrázek 43 Autokláv Panini G00300572.....	66
Obrázek 44 Řídící PLC panel autoklávu	66
Obrázek 45 Stroj WJ1010-1Z-Dynamite.....	68
Obrázek 46 Průběh řezání.....	68
Obrázek 47 Nařezané zkušební vzorky pro zkoušku v tahu.....	70
Obrázek 48 Upnutý vzorek s extenzometrem.....	71
Obrázek 49 Průběhy tahových křivek u zkušební série č. 1	72
Obrázek 50 Průběhy tahových křivek u zkušební série č. 2	73
Obrázek 51 Průběhy tahových křivek u zkušební série č. 3	74
Obrázek 52 Průběhy tahových křivek u zkušební série č. 4	75
Obrázek 53 Průběhy tahových křivek u zkušební série č. 5	76
Obrázek 54 Nařezané zkušební vzorky pro zkoušku v ohybu.....	78
Obrázek 55 Namáhaný vzorek.....	78
Obrázek 56 Pracovní diagram ohybové zkoušky u zkušební série č. 1	79
Obrázek 57 Pracovní diagram ohybové zkoušky u zkušební série č. 2	80
Obrázek 58 Pracovní diagram ohybové zkoušky u zkušební série č. 3	81
Obrázek 59 Pracovní diagram ohybové zkoušky u zkušební série č. 4.....	82
Obrázek 60 Pracovní diagram ohybové zkoušky u zkušební série č. 5.....	83
Obrázek 61 Zkušební stroj CEAST 696300	87
Obrázek 62 Nařezaný zkušební vzorek pro zkoušku rázové houževnatosti.....	88
Obrázek 63 Porovnání hodnot modulu pružnosti v tahu E_t	91

Obrázek 64 Porovnání hodnot meze pevnosti v tahu σ_{max}	92
Obrázek 65 Porovnání hodnot poměrného prodloužení ϵ_{max}	93
Obrázek 66 Zkušební vzorky po tahové zkoušce (zkušební série č. 1 a č. 2).....	93
Obrázek 67 Orientační porovnání pevnosti v tahu námi testovaného prepregu s jinými komerčně nabízenými tooling prepregy [62, 63, 64, 65, 66].....	94
Obrázek 68 Porovnání hodnot modulu pružnosti v ohybu E_o	95
Obrázek 69 Porovnání hodnot meze pevnosti v ohybu σ_{omax}	95
Obrázek 70 Porovnání hodnot poměrné deformace na mezi pevnosti ϵ_{max}	96
Obrázek 71 Orientační porovnání pevnosti v ohybu námi testovaného prepregu s jinými komerčně nabízenými tooling prepregy [63, 66, 67, 68].....	97
Obrázek 72 Porovnání hodnot zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti.....	98
Obrázek 73 Orientační porovnání zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti námi testovaného prepregu s jinými komerčně nabízenými tooling prepregy [63, 64, 65, 67, 68]	99
Obrázek 74 Porovnání hodnot rázové houževnatosti	99
Obrázek 75 3D model sacího kanálu NACA.....	101
Obrázek 76 3D model master modelu	102
Obrázek 77 3D model kompozitní formy	102

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Výhody a nevýhody vytvrzovacích činidel a jejich vliv na konečné vlastnosti vytvrzené pryskyřice [4]	14
Tabulka 2 Vlastnosti běžně využívaných uhlíkových vláken [6]	19
Tabulka 3 Vlastnosti kovových materiálů [11]	26
Tabulka 4 Materiály master modelů a jejich vlastnosti [21]	29
Tabulka 5 Materiálové složení polotovaru č. 1	57
Tabulka 6 Materiálové složení polotovaru č. 2	58
Tabulka 7 Materiálové složení polotovaru č. 3	58
Tabulka 8 Materiálové složení polotovaru č. 4	59
Tabulka 9 Materiálové složení polotovaru č. 5	59
Tabulka 10 Parametry vytvrzovacího cyklu	67
Tabulka 11 Parametry zkoušky v tahu	69
Tabulka 12 Parametry stroje Zwick/Roell Vibrophore 100	69
Tabulka 13 Rozměry zkušebních vzorků pro zkoušku v tahu	70
Tabulka 14 Výsledky zkoušky v tahu pro zkušební sérii č. 1	72
Tabulka 15 Výsledky zkoušky v tahu pro zkušební sérii č. 2	73
Tabulka 16 Výsledky zkoušky v tahu pro zkušební sérii č. 3	74
Tabulka 17 Výsledky zkoušky v tahu pro zkušební sérii č. 4	75
Tabulka 18 Výsledky zkoušky pro zkušební sérii č. 5	76
Tabulka 19 Parametry zkoušky v ohybu	77
Tabulka 20 Parametry stroje Zwick/Roell 1456	77
Tabulka 21 Rozměry zkušebních vzorků pro zkoušku v ohybu	78
Tabulka 22 Výsledky zkoušky v ohybu pro zkušební sérii č. 1	79
Tabulka 23 Výsledky zkoušky v ohybu pro zkušební sérii č. 2	80
Tabulka 24 Výsledky zkoušky v ohybu pro zkušební sérii č. 3	81
Tabulka 25 Výsledky zkoušky v ohybu pro zkušební sérii č. 4	82
Tabulka 26 Výsledky zkoušky v ohybu pro zkušební sérii č. 5	83
Tabulka 27 Parametry zkoušky mezilaminární smykové pevnosti	84
Tabulka 28 Rozměry zkušebních vzorků pro zkoušku zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti	84
Tabulka 29 Výsledky zkoušky zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pro zkušební sérii č. 1	85
Tabulka 30 Výsledky zkoušky zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pro zkušební sérii č. 2	85

Tabulka 31 Výsledky zkoušky zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pro zkušební sérii č. 3.....	86
Tabulka 32 Výsledky zkoušky zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pro zkušební sérii č. 4.....	86
Tabulka 33 Výsledky zkoušky zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti pro zkušební sérii č. 5.....	86
Tabulka 34 Parametry zkoušky rázové houževnatosti.....	87
Tabulka 35 Rozměry zkušebních vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti.....	88
Tabulka 36 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební sérii č. 1.....	88
Tabulka 37 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební sérii č. 2.....	89
Tabulka 38 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební sérii č. 3.....	89
Tabulka 39 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební sérii č. 4.....	89
Tabulka 40 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební sérii č. 5.....	90
Tabulka 41 Rámcový technologický postup výroby kompozitní formy	104

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list TOOLING PREPREG ER 78T

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST TOOLING PREPREG ER 78T



ER 78 T

Description

Is formulated HOTMELT epoxy resin, specifically designed for molding and tooling parts with LONG SHELF LIFE, GOOD TACK and SHORT PRODUCTION CYCLE-TIME. It is a very versatile matrix which could be pre-impregnated into carbon, glass, aramid or basalt fibers and is allowing a range of processing temperatures.

Benefits

- Hot melt (Solvent free)
- Good chemical resistance
- Glass transition temperature (135-150°C)
- Good mechanical performance
- High surface quality parts

SYSTEM CURING CONDITIONS

ER 78 T

Steps	Curing Temp.	Gel Time	Curing Time
Cure	70-75 °C	60 min.	240-360 min.
Post-cure 1	95 °C	_____	60 min.
Post-cure 2	125 °C	_____	60 min.
Post-cure 3	150 °C	_____	120 min.

Heat up rate 1-4 °C/min., cooling rate 2 - 5 °C/min.

- COLOUR: transparent
- DENSITY: 1,2 g/cm³

STORAGE and HANDLING

- Shelf life¹: 6 months
- Out life²: 1 week

¹ Shelf Life: the maximum storage life for prepreg, upon receipt by the customer, when stored continuously, in a sealed moisture-proof packing, at -18°C/0°F.

² Out life: the maximum accumulated time allowed at room temperature (23°C) between removal from the freezer and cure.

Prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before unpack which preventing condensation. (A full reel in its packing can take up to 8 hours).

FLEXURAL TEST (5min at 140°C) 8 layers, 250gsm CF-UD, HS 24k carbon fiber, 59%FVC

Flexural strength (ISO 14125)	1 610 MPa
Flexural modulus (ISO 14125)	108 GPa
Interlaminar shear test (ISO 14130)	91 MPa

HANDLING PRECAUTIONS

Safety precautions at workplace

Protective clothing	yes
Gloves	essential
Arm protectors	recommended when skin contact likely
Goggles/safety glasses	yes

SKIN PROTECTION

Before starting work	Apply barrier cream to exposed skin
After washing	Apply barrier or nourishing cream

Cleansing of contaminated skin

Dab off with absorbent paper, wash with warm water and alkali-free soap, then dry with disposable towels. Do not use solvents.

Disposal of spillage

Soak up with sawdust or cotton waste and deposit in plastic-lined bin.

FIRST AID

Contamination of the eyes by resin, hardener or mix should be treated immediately by flushing with clean, running water for 10 to 15 minutes. A doctor should then be consulted.

Material smeared or splashed on the skin should be dabbed off, and the contaminated area then washed and treated with a cleansing cream (see above). A doctor should be consulted in the event of severe irritation or burns. Contaminated clothing should be changed immediately.

Anyone taken ill after inhaling vapors should be moved out of doors immediately.

In all cases of doubt call for medical assistance.

Any technical recommendations given by us whether orally or in writing are not binding on us, also with regard to any rights of third parties. Prospective users should conduct their own trials to determine whether our products are suitable for the intended purpose.