

Experimentální studium technologických parametrů při vakuové infuzní technologii

Bc. Štěpán Žáček

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Štěpán ŽÁČEK**

Osobní číslo: **T100024**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Řízení jakosti**

Téma práce: **Experimentální studium technologických parametrů
při vakuové infuzní technologii**

Zásady pro vypracování:

1. Kompozitní materiály, definice, rozdělení.
 2. Základní složky polymerních kompozitních materiálů.
 3. Zpracovatelské inženýrství kompozitů, rozdělení, základní technologické parametry.
 4. Experimentální studium vybraných technologických parametrů při vakuové infuzi (tkaniny, pryskyřice, pěny,...)
 5. Diskuse dosažených výsledků a formulace závěrů.
-

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

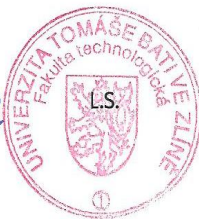
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: ZÁČEK ŠTĚPÁN

Obor: ŘÍZENÍ KAKOSTI

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17.5.2012


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídáne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studiem mechanických vlastností a teploty při vytvrzování kompozitních materiálů vyrobených vakuovou infuzí pod pružnou fólií. Teoretická část popisuje vlastnosti kompozitních materiálů, složení kompozitních materiálů a technologie výroby kompozitních materiálů.

Experimentální část podrobně popisuje technologii vakuové infuze pod pružnou fólií, výrobu vzorků, sledování teploty a vyhodnocení jejich mechanických vlastností.

Klíčová slova: kompozitní materiál, vakuová infuze, multiaxiální tkanina, matrice

ABSTRACT

This thesis is based on the study of mechanical properties and temperatures during curing of composite materials manufactured by vacuum infusion under flexible film. The theoretical part describes the properties of composite materials, the composition and the manufacturing technology of composite materials.

The experimental part describes in detail the technology of vacuum infusion under flexible film, production of samples, temperature monitoring and evaluation of their mechanical properties.

Keywords: composite material, vacuum infusion, multiaxial fabric, matrix

Tímto děkuji vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D za poskytnuté rady a připomínky k této práci. Také děkuji zaměstnancům Univerzitní knihovny ve Zlíně za ochotu a zapůjčený knižní materiál, který mi byl zdrojem podnětných informací.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.1.1 Homogenita a nehomogenita	13
1.1.2 Izotropie a anizotropie	13
1.1.3 Synergický efekt	14
1.1.4 Fáze kompozitních materiálů	15
1.2 DRUHY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	16
1.2.1 Podle disperzní fáze	17
1.2.2 Další dělení kompozitů	17
2 SLOŽENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	19
2.1 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA	19
2.1.1 Skleněná vlákna	22
2.1.2 Aramidová vlákna	24
2.1.3 Uhlíková vlákna	25
2.1.4 Přírodní vlákna	27
2.1.5 Polymerní vlákna	28
2.2 MATRICE – POJIVO	29
2.2.1 Polymerní matrice	30
2.3 VYTVRZOVÁNÍ A STUPEŇ VYTVRZOVÁNÍ	33
2.3.1 Teplota skelného přechodu T_g a chemický stupeň vytvrzení	33
2.3.2 Exotermní reakce	34
3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ	36
3.1 RUČNÍ LAMINACE	36
3.2 STŘÍKÁNÍ	37
3.3 NAVÍJENÍ	38
3.4 PULTRUZE	39
3.5 RTM – RESIN TRANSFER MOULDING	40
3.6 VAKUOVÉ LISOVÁNÍ	42
3.7 VAKUOVÁ INFÚZE	43
II PRAKTICKÁ ČÁST	44
4 TECHNOLOGIE VAKUOVÁ INFUZE POD PRUŽNOU FÓLÍÍ	45
4.1 VAKUOVÁ INFUZE	45
4.1.1 Komponenty a pomocné materiály pro vakuovou infuzi	47
4.2 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTI VZORKŮ	55
4.2.1 Vyhodnocování naměřených výsledků	56
4.3 ZKOUŠKA POMOCÍ PADOSTROJE	57
5 VÝROBA VZORKŮ	58
5.1 POUŽITÉ MATERIÁLY PRO VÝROBU VZORKŮ	58
5.1.1 Polyesterová pryskyřice AROPOL G 105 E	58

5.1.2	Polyesterová pryskyřice NORPOL 420-100.....	59
5.1.3	Skelná tkanina SAERTEX.....	60
5.2	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA.....	60
5.2.1	Zkušební tělísko na zkoušku v tahu.....	61
5.2.2	Zkušební tělísko na zkoušku v ohybu.....	61
5.2.3	Zkušební tělísko na rázovou zkoušku.....	62
5.3	VZOREK 1.....	62
5.3.1	Naměřené hodnoty po tahové zkoušce.....	71
5.3.2	Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce.....	72
5.3.3	Naměřené hodnoty po rázové zkoušce.....	73
5.4	VZOREK 2.....	74
5.4.1	Naměřené hodnoty po tahové zkoušce.....	76
5.4.2	Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce.....	77
5.4.3	Naměřené hodnoty po rázové zkoušce.....	78
5.5	VZOREK 3.....	79
5.5.1	Naměřené hodnoty po tahové zkoušce.....	80
5.5.2	Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce.....	81
5.5.3	Naměřené hodnoty po rázové zkoušce.....	83
5.6	VZOREK 4.....	83
5.6.1	Naměřené hodnoty po tahové zkoušce.....	85
5.6.2	Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce.....	86
5.6.3	Naměřené hodnoty po rázové zkoušce.....	87
6	DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	89
6.1	VYHODNOCENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY.....	89
6.2	VYHODNOCENÍ OHYBOVÉ ZKOUŠKY.....	90
6.3	VYHODNOCENÍ RÁZOVÉ ZKOUŠKY.....	91
	ZÁVĚR.....	92
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	93
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	96
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	98
	SEZNAM PŘÍLOH.....	102

ÚVOD

Civilizace vždy svým vývojem prošla různými obdobími, tato období byla pokaždé pojmenována podle materiálů, které v té době převládaly a určovaly úroveň výrobní technologie. Jako první byla doba kamenná, poté bronzová a železná. Dnešní dobu bychom mohli nazvat „mnohomateriálovou“ a směřujeme do věku „kompozitního“.

Stupně v rozvoji lidské společnosti jsou spojeny se změnami ve využívání materiálů, a můžeme říci, že každý nový materiál, který člověk dovedl využívat, určoval i novou kvalitu v jeho činnosti a životě. Tyto nové materiály jsou složeny z více komponentů a mají charakter cílevědomé konstrukce. Materiál musí mít vždy dopředu určeny vlastnosti podle použití a podle použité výroby.

Kompozity jsou v posledních letech rostoucího zájmu odborníků ve více profesích. Bez nich není možný zajistit další technický pokrok kompozitních materiálů, současně dochází k rozvoji nových výrobních technologií kompozitních materiálů.

Mezi prvními technologiemi výroby kompozitů byla ruční laminace, mezi ty nejnovější technologie patří RTM (Resin Transfer Moulding), a vakuová infuze, která má několik modifikací. Vakuová infuze pod pružnou fólií je modifikace použita v diplomové práci.[1]

Diplomová práce se zabývá výrobou čtyř vzorkových desek vakuovou infuzí pod pružnou fólií, sledováním jejich mechanických vlastností a stupně vytvrzení zjištěnou metodou DSC a následně jejich vyhodnocením.

Teoretická část se obsahuje popise vlastností kompozitních materiálů, rozdělení kompozitních materiálů, popisuje jejich složení, a také jsou zde popsány technologie výroby kompozitních materiálů. V experimentální části je podrobně popsána vakuová infuze a její pomocné materiály. Následně popsán postup při výrobě vzorkových desek a vyhodnocení jejich mechanických vlastností.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou nové moderní technické a konstrukční materiály. Materiál vhodný pro konstrukci moderních zařízení představuje jednodílnou pevnou látkou o určitém objemu a tvaru. V rozměrovém měřítku srovnatelném s výslednou konstrukcí musí být spojitá a ve všech místech stejných vlastností (musí být homogenní). U technických materiálů ještě předpokládáme, že mají i ve všech směrech stejné vlastnosti (musí být izotropní). Z toho pak vychází většina technických aplikací (mechanika, pružnost a pevnost). [2]

Význam definice je podpořen tím, že ještě dnes existují (a to i mezi odborníky z oboru materiálů) mnohé nejasnosti týkající se kompozitních materiálů. Někteří odborníci přisuzují této třídě materiálů velmi široký význam, jiní ji omezují velmi specifickými definicemi a tím ji značně zužují. [1]

Kompozit je název pro heterogenní materiál složený nejméně ze dvou různých materiálových složek, jehož vlastností nedosahuje nejen žádná složka kompozitu samostatně, ale mnohdy ani vlastností, které by se daly předpokládat prostým součtem vlastností těchto složek. [5]

Současné požadavky na kompozitní materiály:

- zvýšení tuhosti (zvláště specifické tuhosti – poměru Youngova modulu a hustoty),
- zvýšení pevnosti (zvláště specifické pevnosti – poměru meze pevnosti a hustoty),
- zvýšení rozměrové stability,
- zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti),
- zvýšení teplotní stability (rozšíření teplotního intervalu použitelnosti),
- zvýšení mechanického tlumení (antivibrační a antihlukové materiály),
- snížení propustnosti pro kapaliny nebo plyny,
- modifikace elektrických vlastností (zvýšení resp. snížení elektrické vodivosti),
- snížení nasákavosti,
- zmenšení teplotní roztažnosti,
- zvýšení korozní nebo chemické odolnosti,

- udržení tuhosti nebo pevnosti při vysoké teplotě,
- snížení negativního dopadu na životní prostředí,
- redukce hmotnosti (snížení hustoty),
- snížení ceny. [2]

1.1 Vlastnosti kompozitních materiálů

1.1.1 Homogenita a nehomogenita

V souvislosti s homogenitou se můžeme setkat se dvěma problémy:

- U nanokompozitů mohou být rozměry nehomogenit poměrně blízké atomárním rozměrům. Pak pro tyto kompozity nejsou plně použitelné jen rovnice klasické fyziky. Může zde dojít i k efektům spojených s atomovou fyzikou.
- Existuje řada struktur, které jsou blízké kompozitům, ale liší se tím, že je počet nehomogenit velmi malý, takže materiál není možné považovat za homogenní v makroměřítku. Jsou to několikavrstvé struktury vrstveného skla nebo armovaný beton. Těmto materiálům se říká kompozitní struktura.

Kompozitní materiál je vnitřně nehomogenní, ale z makroskopického hlediska homogenní.

Vede k určení vlastností kompozitního materiálu, které jsou často jen fiktivní. [2]

1.1.2 Izotropie a anizotropie

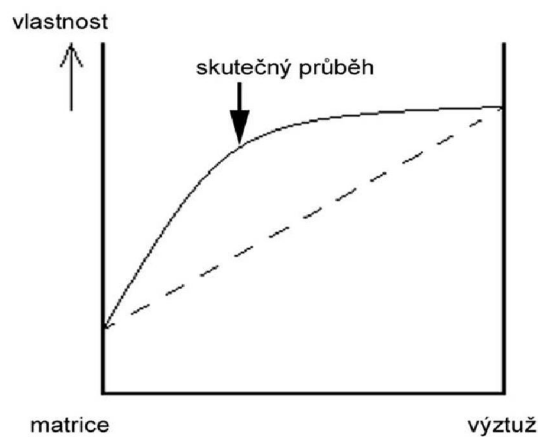
Klasické technické materiály jsou izotropní, nebo jeví jen velmi malou anizotropii. Naproti tomu pro kompozitní materiály je typické, že řada z nich jeví velmi silnou anizotropii vlastností. U kompozitu s plastovou maticí a uspořádanými skleněnými vlákny se jeho tuhost nebo pevnost ve směru vláken a kolmo na ně může lišit až o několik řádů.

- Izotropní materiál má ve všech směrech stejné vlastnosti. Kdybychom nanесли na jednotlivé směrové vektory od počátku souřadnic velikost určité vlastnosti, vytvořily by koncové body kouli.
- Anizotropní materiál má vlastnost v každém směru jinou.
- Pseudoizotropní materiál má vlastnosti stejné ve směru tří kolmých základních os, jsou symetrické podle tří rovin tvořených těmito osami.

- Ortotropní materiál má vlastnosti symetrické podle tří vzájemně kolmých rovin.
- Příčně izotropní materiál má vlastnosti izotropní v určité rovině, vlastnosti jsou symetrické podle této roviny a dvou rovin na ni i na sebe vzájemně kolmých. [2]

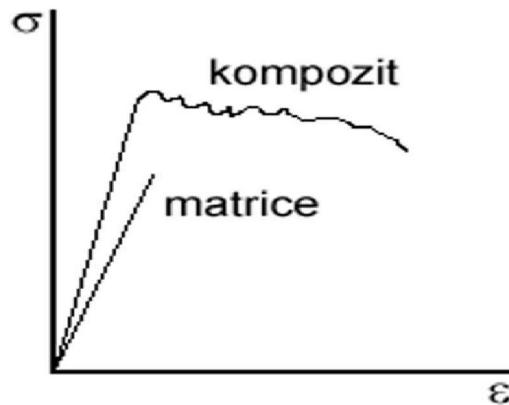
1.1.3 Synergický efekt

Synergický efekt je rozhodujícím pro určení, co kompozit je a co není. Synergický účinek lze symbolicky vyjádřit na první pohled nelogickým matematickým vztahem: $1 + 1 = 3$. Příležitější by proto pro kompozity bylo označení synergické materiály, což by nejlépe vystihovalo jejich podstatu. Tím by odpadly nejasnosti a složité definice kompozitů.



Obr. 1. Synergický efekt kompozitů [10]

Synergické působení pevných a tuhých vláken s poddajnou nebo křehkou kovovou, polymerní nebo keramickou maticí umožňuje konstruovat kompozity s vysokou pevností, tuhostí a houževnatostí, jejichž vlastnosti přesahují vše, co bylo kdy dosaženo u tradičních monolitních materiálů. Bez existence kompozitů by byl další technický pokrok ve všech oborech, ale zejména v leteckém, kosmickém a automobilním průmyslu nemyslitelný. [5]



Obr. 2. Tahový diagram matrice a kompozitu [10]

Kompozity jsou převážně lehké a přitom si zachovávají tuhost a pevnost. Kompozity mají vyšší houževnatost, tepelnou odolnost, rozměrovou stálost, odolnost proti oděru a obvykle nižší cenu. Význam těchto materiálů neustále roste, a to ve všech oblastech techniky. Snad jenom jedna věc je nepříznivá, a to jejich druhotné zpracování a využití, které může u složitých kombinovaných materiálů působit potíže. [8]

1.1.4 Fáze kompozitních materiálů

Další významnou vlastností kompozitů je výrazné makroskopické rozhraní mezi jednotlivými složkami, které kompozit tvoří, a které se u kompozitů nazývají fáze. Tento pojem se u kompozitů ale zásadně liší od stejného pojmu známého z metalurgie kovů. [5]

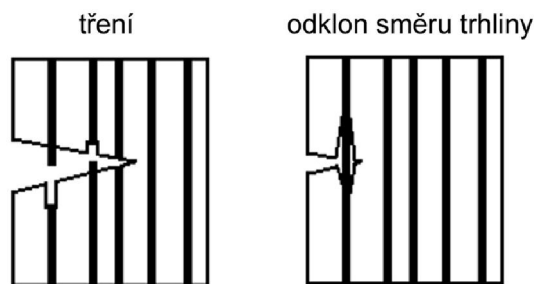
Jednotlivé fáze ovlivňují výsledné vlastnosti materiálu jednak svými vlastními charakteristikami a jednak – a to je důležité – vzájemnou interakcí nebo interakcí tuhých a tekutých struktur. Tyto interakce jsou převážně fyzikální nebo fyzikálně chemické, ale nejsou vyloučeny ani interakce chemické. [1]

Fáze v kompozitních materiálech nazýváme:

1. matrice (fáze spojitá),
2. výztuž (fáze nespojitá).

V porovnání s matricí má výztuž výrazně vyšší hodnoty mechanických vlastností (modul pružnosti, mez pevnosti, tvrdost atd.). Hlavním cílem vyztužení je tedy zlepšení uvedených

vlastností. Nejznámějším přírodním kompozitem je dřevo složené z celulosových vláken uložených v matrici z ligninu. [9]

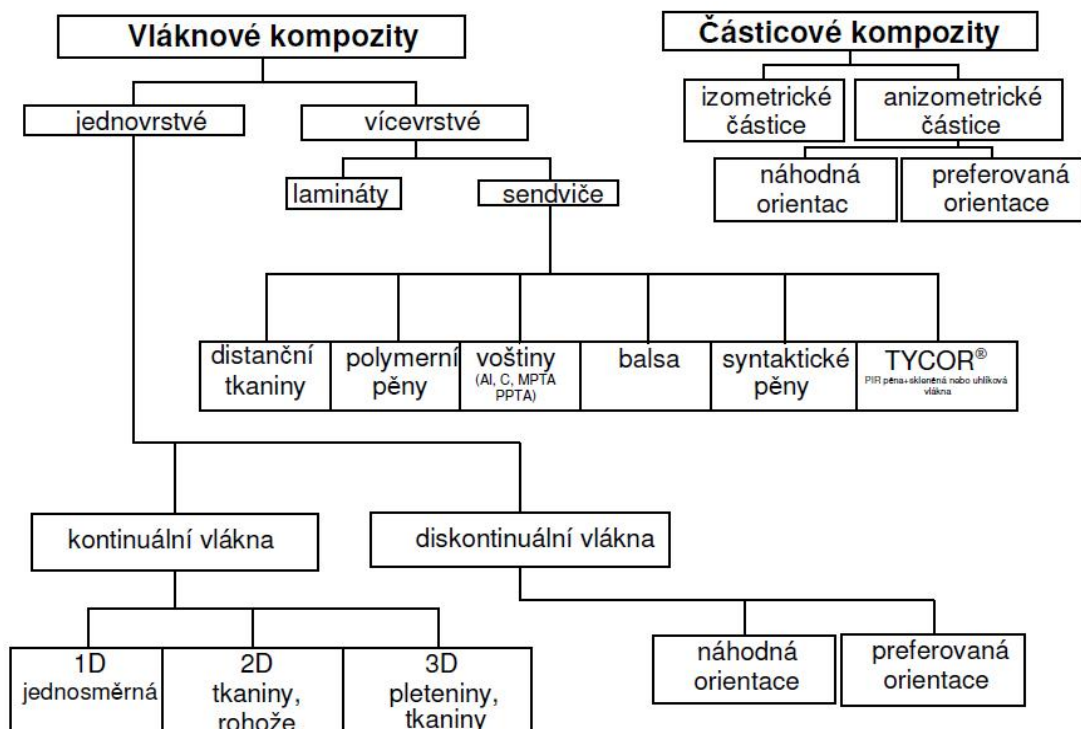


Obr. 3. Jevy na rozhraní matrice – vlákno [11]

1.2 Druhy kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze rozdělit dle mnoha kritérií. V praxi je nejobvyklejší rozdělení dle geometrického charakteru výztuže a typu matrice.

Rozdělení kompozitních materiálů podle orientace výztuže a geometrie je patrné z následujícího schématu. [11]



Obr. 4. Rozdělení kompozitních materiálů [11]

1.2.1 Podle disperzní fáze

- Kompozit prvního typu má disperze (jednu nebo více) z pevné fáze, jsou užívány nejčastěji.
- Kompozit druhého typu má kapalnou disperzi. Tento druh není tolik užíván. Mezi kompozitní materiály se například řadí kompozit s pórovitou strukturou s póry vyplněnými např. mazacím olejem.
- Kompozit třetího druhu má plynnou disperzi. Jde o pěnové materiály, z nichž jsou dnes velmi moderní kovové pěny. Dále jde o vláknové struktury s vlákny buď sli nutými, nebo spojenými malým množstvím pojiva. [2]

1.2.2 Další dělení kompozitů

Kompozity se dále dělí dle typu matrice, druhu dispersní fáze, tvaru disperzní fáze, podle struktury matrice a dispersní fáze, dle použití a nakonec dle speciálních kompozitních materiálů

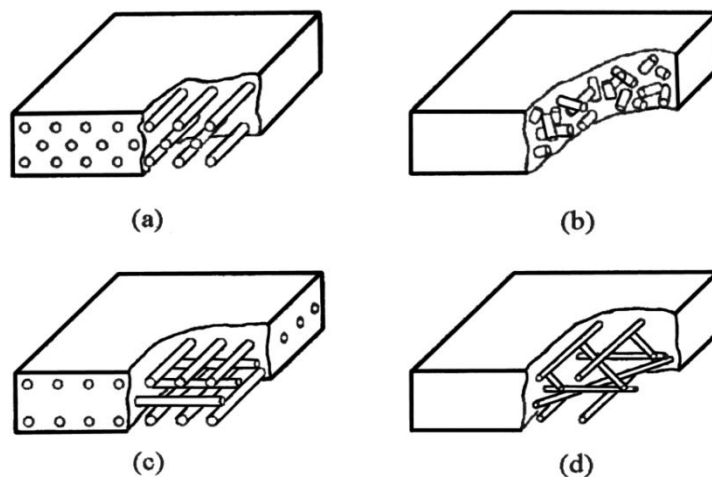
- **typu matrice**
 - s kovovou maticí (MMC – Metal Matrix Composites),
 - s keramickou maticí (CMC – Ceramic Matrix Composites),
 - s polymerní maticí (PMC – Polymer Matrix Composites),
- **druhu dispersní (zpevňující) fáze** - kovová, skleněná, keramická, polymerní, monokrystalická vlákna aj.,
- **tvaru dispersní fáze**
 - částicové (s částicemi malými, nebo velkými),
 - vláknové (s dlouhými (poměr délka/průměr je >100)nebo krátkými (poměr délka/průměr je <100)vlákny),
 - strukturní (vrstvené),
- **podle struktury matrice a dispersní fáze**
 - nanokompozity,
 - mikrokompozity,

- makrokompozity,
- **použití**
 - vysoké pevnosti (při běžných teplotách),
 - žárovevné materiály,
- **speciální kompozitní materiály** (např. elektromagnetické, elektrody pro odporové svařování, vysoce zatěžované elektrické kontakty).

2 SLOŽENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

2.1 Vyztužující vlákna

Materiály ve formě vláken se cíleně jako konstrukční prvky používají zřídka. Zajímavou skupinou materiálů se stávají teprve v kompaktní formě, jako je tomu v kompozitních materiálech. Kompozitní – vlákny vyztužené – plasty se skládají jednak z vláken s vysokou měrnou pevností, případně tuhostí a jednak z rozmanitě přizpůsobivého úložného materiálu – matrice. [4]



Obr. 5. Různé uspořádání vláken [12]

Kontinuální vlákna mohou být skleněná, aramidová, uhlíková, přírodní, polymerní, keramická a kovová.

Vláknové kompozity mají vlákna o průměru 100 až 102 μm . Kompozity mající vlákna o průměru pod 1 μm v podobě krátkých (diskontinuálních) nanovláken, se zařazují mezi nanokompozity.

Ve všech případech je pevnost vlákna výrazně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě, jako důsledek malého příčného průřezu vláken. V tenkých vrstvách jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálu, současně je také při velmi malých příčných rozměrech menší nebezpečnost povrchových vad. Menší nebezpečnost z důvodu, že tenká vlákna mají oproti vláknům většího průměru výrazně menší povrch. [13]

Tab. 1. Vlastnosti různých druhů vláken [12]

Typ vlákna	sklo	aramid	HS - uhlík	HM - uhlík	hliník	ocel
Modul pružnosti v podélném směru E_{\parallel} [MPa]	74 000	130 000	230 000	390 000	75 000	210 000
Modul pružnosti v příčném směru E_{\perp} [MPa]	74 000	5 400	15 000	6 000	75 000	210 000
Modul pružnosti ve smyku $G_{\parallel T}$ [MPa]	30 000	12 000	50 000	20 000	30 000	81 000
Pevnost v tahu S_{\parallel} [MPa]	2 100	3 000	5 000	3 800	500	1 800
Hustota ρ_f [kg/m ³]	2 500	1 500	1 600	1 700	2 700	7 850
Cena [USD/kg]	100 % \$30	800 % \$250	600 % \$185	1800 % \$600	6 % \$2	< 3 % < \$1

Typy produktu z vláken jsou následující:

- **Sekané prameny** (angl. “chopped fibers”). Používají se pro přípravu vstřikovacích a lisovacích směsí, přičemž prameny se nasekávají do potřebných délek.



Obr. 6. Sekané vlákno [21]

- **Mletá vlákna** (angl. “milled fibers”). Mletím jsou získávána pouze krátká vlákna a jen v případě křehkých vláken.
- **Prameny bez zákrutů**.
- **Rovingy (kabílky)** (angl. “tow”). Jde o sdružené prameny mající nulový nebo malý počet zákrutů (méně než 40 zákrutů/m). Jsou používány pro výrobu profilů, navíjení a nakonec výrobu prepregů.

- **Jednoduchá příze** (angl. “yarn”) a **kablovaná příze**. Vytváří se zkrucováním pramenů a jejich sduřováním. Nejčastěji se používá pro výrobu technických tkanin. Návin příze je na kónických cívkách.
- **Rovingové tkaniny** (angl. “fabrics”), tkané z rovingů. Užívány pro pultruzi, kontaktní laminování, navíjení a k výrobě tkaninových prepregů. [13]
- **Tkaniny z příze**. Sloužící jako izolační a filtrační tkaniny a geotextilie.
- **Rohože** (angl. “mat”) - netkané textilie, rouna. Sekaná vlákna jsou v rohoži spojována polymerními pojivy, které jsou rozpustné v rozpouštědlových pryskyřicích. Je-li k výrobě rohoží užito kontinuálních vláken, není proto zapotřebí udržet jejich vzájemnou polohu pojivem. [13]
- **Prepregy** (angl. “prepregs”). Jde o různě široké role (nebo kotouče) obsahující buď paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož, a nebo matrici, která může být polovytvrzená, reaktoplastická či termoplastická. [13]



Obr. 7. Rovingová tkanina [22]



Obr. 8. Rohože [20]

Prepregy jsou užívány k získání špičkových polymerních kompozitních materiálů. Při výrobě prepregu je nanášen reaktoplast na paralelně vedené rovingy. Tkaniny jsou impregnovány převážně roztokem pryskyřice. Pro přípravu je vhodné užít především bezrozpouštědlových pryskyřic, které mohou být epoxidové, kyanoestervé, fenolformaldehydové, benzoxazínové, bismaleinimidové, polychinoxalinové, ftalonitrilové a polyamidové. Prepregy se taktéž připravují z polyesterových či vinylesterových pryskyřic. [13]



Obr. 9. Uhlíkové kompozitní vlákno
Prepreg [24]

Kvalita vláken je závislá na složení a čistotě výchozích surovin a taktéž na jejich struktuře. Stabilní mechanické vlastnosti u dalšího zpracování vláken jsou zajišťovány ochrannými povrchovými povlaky (“sizing”). Tyto povlaky je nutné aplikovat na jednotlivá (elementární) vlákna. Ochranné povlaky nemusí být odstraněny před výrobou kompozitu v případě, pokud jsou schopné vytvořit pevné spojení vlákna a matrice. [13]

2.1.1 Skleněná vlákna

Textilní skleněná vlákna (GF – Glass Fiber) je společným názvem pro tenká vlákna (3,5 až 24 μm) s pravidelným kruhovým průřezem, tažena z roztavené skloviny a používá pro textilní účely.

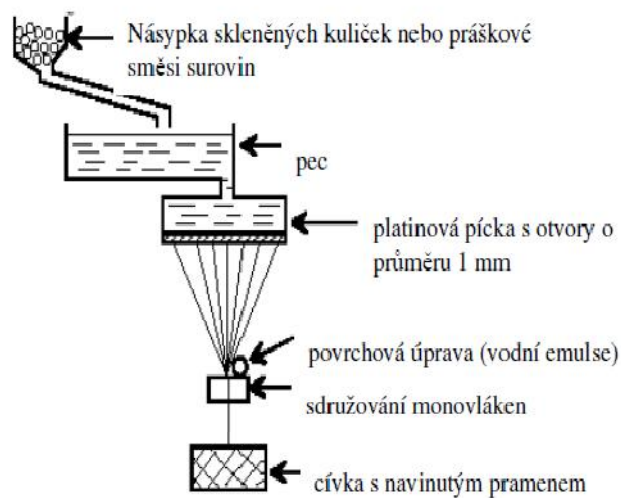
Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou propustností pro záření, proto se označují jako E-vlákna (elektrická) a jejich sklovina jako E-sklovina. Je to nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který postupně jako standardní typ obsadil téměř 90% trhu. [4]

Sklovina s vyšším obsahem SiO_2 , MgO a Al_2O_3 má o 40 až 70 % vyšší pevnost a v USA se označuje jako S-sklovina (S – strength), v Evropě jako R-sklovina (R – resistance) a v Japonsku jako T-sklovina.

Dále se vyrábí C-sklovina s vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám a pevná, vysoce chemicky odolná bezboritá C-sklovina, tzv. ECR-sklovina. Bezborité skloviny mají vyšší dielektrickou konstantu (7,0) než bor obsahující E-sklovina (5,9 až 6,6), a nejsou proto používány např. pro desky tištěných obvodů nebo kosmonautice. [4]

Při výrobě textilních vláken se v průběhu tažení nanáší na tažená vlákna šlichta (lubrikace) ve formě vodní emulze. Úkol šlichty je:

- spojit jednotlivá vlákna,
- chránit povrch vláken,
- přizpůsobit vlákna k dalšímu zpracovatelskému procesu,
- zlepšit vazby mezi organickou pryskyřicí a anorganickým vláknem.



Obr. 10. Výroba skleněných vláken [13]

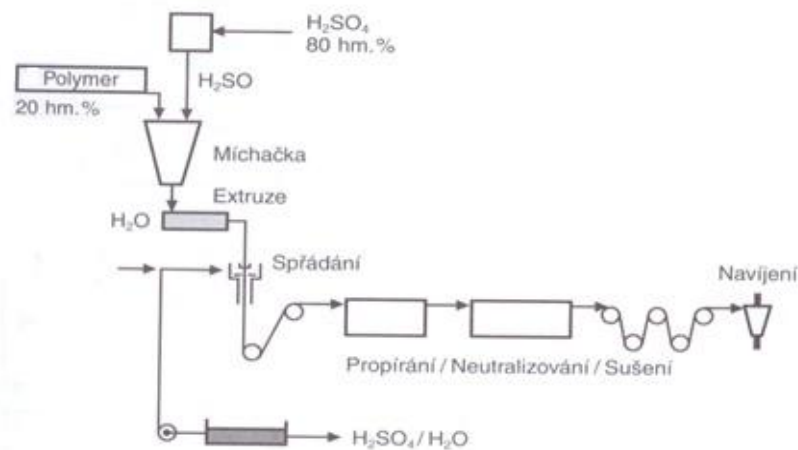
Vlastnosti skleněných vláken

- Skleněné vlákno je izotropní. Znamená to tedy, že jsou jeho vlastnosti v podélném a příčném směru totožné.
- Modul pružnosti v tahu (E-modul) skleněných vláken je přibližně stejně velký jako u hliníku a činí asi jednu třetinu hodnoty oceli.
- Pevnost v tahu je vyšší než u většiny organických i anorganických vláken a je většinou podstatně vyšší než u oceli.
- Tepelné vlastnosti vláken jsou lepší než u jiných materiálů. Ani dlouhodobé působení teploty při 250°C nesnižuje mechanické vlastnosti.
- Skleněná vlákna jsou nehořlavé, ohnivzdorná. [4]

2.1.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientované podle osy vlákna, předností vláken je vysoká pevnost a tuhost.

Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V laminátu lze využít až 70% jejich skutečné pevnosti. Nejvíce se užívá jako náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, jako výztuž pro pneumatiky a nakonec pro balistické aplikace. [4,25]



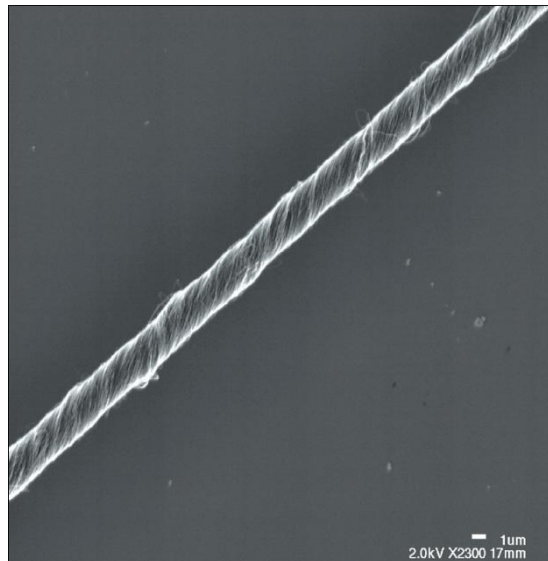
Obr. 11. Výroba aramidových vláken [13]

Vlastnosti aramidových vláken

- Jsou silně anizotropní, tj. vlastnosti ve směru vlákna se liší od vlastnosti v příčném směru. Hodnota E-modulu kolmé k vláknu je daleko nižší než ve směru vlákna.
- Jde o nejlehčí vyztužující vlákno, z čehož plyne vysoká měrná pevnost v tahu.
- Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken je nižší než mez pevnosti v tahu.
- Vlákna jsou hydrofilní.
- Adheze vláken k matrici je nižší než u ostatních vláken.
- Vytvrzené konstrukční prvky z aramidových kompozitů se obtížně obrábějí. [4]

2.1.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru jsou nejprve karbonizovány. Přitom se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou, a tím se zvyšující grafitizací se zlepšují mechanické vlastnosti. [4]



Obr. 12. Uhlíkové vlákno [15]

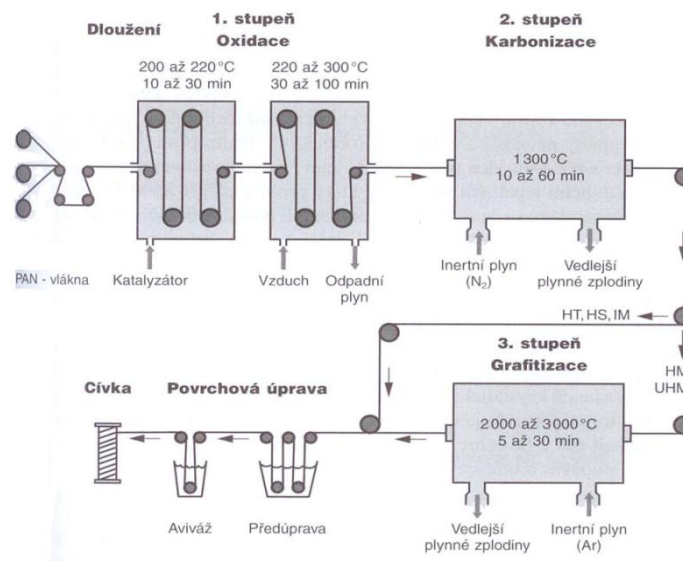
Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou tři materiály:

- celulóza – vlákna však mají méně dokonalou strukturu, užívají se převážně jako izolační materiál pro vysoké teploty,
- polyakrylonitril (PAN) – užíván od r. 1980 stále nejčastěji, vlákna z něj vyrobená jsou považována za standardní vlákna,
- smola – výroba vláken ze smoly je nákladná, ale cena je stále příznivá vzhledem k ceně výchozí suroviny. Vlákna mají velmi vysokou hodnotu E-modulu a velice dobré tepelné a elektrické vlastnosti.

Světová kapacita výroby uhlíkových vláken v r. 2004 byla 35 600 tun, z toho 13 700 tun v USA, 7 100 tun v Evropě, 12 800 tun v Japonsku a 2 000 tun na Taiwanu. [4]

Výrobou je možné získat celou řadu vláken od vysoce pevných, s vysokým modulem pružnosti, středním modulem pružnosti a extrémně vysokým modulem pružnosti.

Uhlíkové vlákno je nejvíce používané k vyztužení kompozitních materiálů, zvláště u materiálu známého jako uhlíkový laminát. Tento druh materiálu se používá při výrobě části letadel, závodních vozidel (Formule 1), sportovního vybavení jako jsou závodní kola, listů větrných generátorů, a dalších součástí. [11]



Obr. 13. Výroba uhlíkových vláken – PAN [13]

Vlastnosti uhlíkových vláken

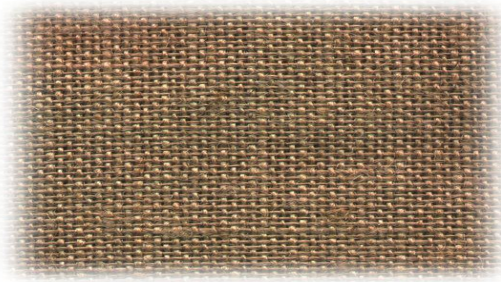
- vlákna mají oproti syntetickým vláknům progresivní deformační chování,
- vysoká pevnost i hodnoty E-modulu až do teploty 500°C,
- nízká hustota,
- vysoká korozní odolnost,
- dobrá tepelná a elektrická vodivost,
- snášelivost s tělesnými tkáněmi,
- uhlíková vlákna jsou ve srovnání se skleněnými vlákny silně anizotropní,
- uhlíková vlákna jsou za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se snadno lámou,

- při delším skladování dochází k vytvrzení apretační povrchové vrstvy a vlákna ztrácejí ohebnost,
- dobrý průchod pro záření, neodráží radarový paprsek,
- vlákna mají vysokou odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání. [4]

2.1.4 Přírodní vlákna

Pro vyztužování plastů jsou ze všech přírodních vláken vhodná pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu. Mezi ně patří: len, konopí, sisal, juta, bavlna.

Jejich výhodou je odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Pozoruhodné jsou i pevnostní v tahu. Vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou pro lehké konstrukce. [4]



Obr. 14. Jutová tkanina [27]

Vlastnosti přírodních vláken

- nízká hustota,
- malá abrazivitu při mechanickém opracování,
- výhodná likvidace spalováním,
- závislost vlastností vláken na podmínkách jejich růstu,
- citlivost na působení vlhkosti,
- omezená volba matrice vzhledem k nebezpečí rozkladu vláken při vysoké teplotě zpracování (odolnost do 200°C),
- nákladná předběžná úprava pro zlepšení vazby s matricí,
- omezená délka vláken.

Mezi nejrozšířenější druhy přírodních vláken patří len (světová spotřeba 650 000 tun/rok) a juta (2 700 000 tun/rok). [4]

2.1.5 Polymerní vlákna

Mezi základní vlastnosti polymerních vláken patří:

- malá hustota,
- středně vysoká pevnost, ale vynikající měrná pevnost (pevnost vydělená hustotou),
- malá tuhost, ale vynikající měrná tuhost,
- většinou poměrně velké prodloužení při přetržení. [2]

Nejznámějším moderním představitelem polymerních vláken je kevlar.

Kevlarová vlákna jsou pokrokovou technologií, která se zrodila v americké chemické společnosti DuPont. Technologie kevlaru kombinuje pevnost materiálu společně s jeho nízkou hmotností, čímž mu dává široké uplatnění od průmyslu až po běžné použití. [25]



Obr. 15. Kevlarová tkanina [19]

Vlastnosti kevlaru:

- pevnost okolo 2,8 GPa,
- vynikající poměrná pevnost – pětinasobek oceli,
- deformace při lomu poněkud menší než u skla, ale větší než u grafitu,
- při dlouhodobém zahřívání nad 175°C kevlarová vlákna degradují,
- má záporný koeficient teplotní roztažnosti,

- vlákna jsou v zásadě chemicky odolná,
- vlákna degradují účinkem UV záření za přítomnosti kyslíku. [2]

2.2 Matrice – pojivo

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systémem vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek.

Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken:

- přenos namáhání na vlákna,
- převedení namáhání z vlákna na vlákno,
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku,
- ochrana vlákna před vlivy okolí,

Zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální a příp. i chemické vazby mezi vláknem a maticí se nanese na vlákno apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin. [4]

Jiné složení vláken i matrice, druh vláken, průměr vláken, výrobní postup atd. bude vyžadovat prvek namáhaný statisticky nebo dynamicky, za nižších nebo vyšších teplot, v suchém nebo ve vlhkém prostředí. Ve všech případech je třeba určovat obě součásti kompozitu, aby bylo dosaženo jejich optimálního synergického spolupůsobení a potřebné životnosti. [1]

Matrice dělíme na:

- polymerní matrice,
- kovové matrice,
- keramické matrice.

2.2.1 Polymerní matrice

Pro polymerní matrice kompozitu se mohou používat jak reaktoplasty, tak termoplasty. Z reaktoplastů jde v podstatě o celou řadu pryskyřic, které musíme volit podle vlastností, ceny a podle použití v různých odvětvích výroby. U vlastností jde zejména o chemickou odolnost, nehořlavost, dobrou tepelnou odolnost, houževnatost a další. [5]

Mezi nejznámější patří:

- epoxidová pryskyřice,
- polyesterová pryskyřice,
- vinylesterové pryskyřice.

Výběr těchto pryskyřic pro matrice volí konstruktér podle ceny výrobků a podle požadovaných vlastností fyzikálních, chemických a mechanických.

Termoplasty pro kompozity mají oproti reaktoplastům výhodu, protože výrobní proces je kratší a na rozdíl od reaktoplastů nemusíme počítat s vytvrzováním matrice. Z termoplastů je nejlevnější matrice z polypropylenu. Vedle propylenu můžeme volit polyamidy, polyimidy a další. [5]

Tab. 2. Vlastnosti různých druhů pryskyřic [12]

Druh pryskyřice	epoxidové	polyesterové	Fenolové	polyimidové
Modul pružnosti E_m [MPa]	4500	4000	3000	4000-19000
Poissonovo číslo ν_m	0,4	0,4	0,4	0,35
Modulu pružnosti ve smyku G_m [MPa]	1600	1400	1100	1100
Pevnost v tahu σ_{pm} [MPa]	130	80	70	70
Hustota ρ_m [kg/m ³]	1200	1200	1300	1400
Maximální teplota T_{max} [oC]	90-200	60-100	120-200	250-300

Nenasycené polyestery – UP

Patří k nejpoužívanějším pryskyřicím. Lineární nenasycený polyester je připraven reakcí dvou funkčních složek (polypropylenglykolu a kyseliny ftalové, kumaronové, maleinové nebo anhydridu (ftalanhydridu, maleianhydridu)). Vzniklý před polymer je poté rozpuštěn v reaktivním rozpouštědle (obvykle styrenu), ale existují i nestyrenové nenasycené polyesterové pryskyřice, kde reaktivním rozpouštědlem je například některý typ metakrylátu.

Katalyzátorem (iniciátorem) síťovací reakce jsou organické peroxidy (nejčastěji metyletylketonperoxid, MEKP), aktivátorem (urychlovačem) obvykle naftenan kobaltnatý. Volbou vytvrzovacího systému lze dosáhnout širokého rozmezí doby gelace a doby vytvrzení. Polyesterové pryskyřice lze proto použít pro všechny technologie. Viskozitu pryskyřice určuje podíl reaktivního rozpouštědla. Pro technologie vyžadující nízkou viskozitu pryskyřice (0,2 až 0,4 Pa.s) je obsah rozpouštědla volen větší (pro navíjení, injektážní a infúzní technologie (SCRIMP, VIP a RTM), ovšem za cenu menší pevnosti a tepelné odolnosti matrice kompozitu. Přísady zabraňující odpařování rozpouštědla (vosky) jsou účinné pouze tehdy, je-li pryskyřice v klidu, při jejím nanášení je jejich účinek zanedbatelný. [6, 14]

Vinylesterové pryskyřice – VE

Jsou nenasycené estery epoxidových pryskyřic. Vyrábějí se buď z bisfenolu a nebo jako novolakové VE pryskyřice. Obsahují reaktivní rozpouštědlo (obvykle styren). Makromolekula před polymeru VE má méně reaktivních míst než u UP, dvojná vazba je umístěna pouze na koncích řetězce. Důsledkem je menší stupeň zesítnění, vedoucí k větší ohebnosti pryskyřice a větší odolnosti proti tvorbě mikro trhlinek. Kompozity s vinylesterovými pryskyřicemi mají větší mezilaminární smykovou pevnost a větší houževnatost než kompozity s nenasycenými polyestery.

Pryskyřice má ve srovnání s UP také:

- lepší odolnost proti korozi,
- vyšší teplotu skelného přechodu (větší tepelnou odolnost),
- vyšší cenu,
- pomalejší reakci při vytvrzování. [6, 14]

Epoxidové pryskyřice – EP

Jsou nejvšestrannější reaktoplasty pro konstrukční použití. V závislosti na chemické struktuře pryskyřice a použitém tvrdidlu a případných modifikujících složkách mají nejširší rozsah vlastností. Mají dobrou houževnatost (v porovnání s ostatními reaktoplasty), odolnost proti únavě a tečení, výbornou adhezi k vláknům, uspokojivou teplotní odolnost, výtečnou chemickou odolnost, dobré elektrické vlastnosti a malé smrštění při vytvrzování. V důsledku polárnosti (přítomnosti hydroxylových skupin) jsou navlhavé, takže za přítomnosti vody je nutné počítat se značným zhoršením teplotní odolnosti i u pryskyřic s vysokou teplotou skelného přechodu (tetrafunkční epoxidy) v důsledku plastifikačního účinku vody. [6]

Viskozita epoxidových pryskyřic v nevytvrzeném stavu je větší než u UP a VE. Vytvrzovací reakce u EP je stupňovité povahy, probíhá velmi pomalu, takže obvykle nevznikají problémy s exotermickou povahou vytvrzovacího procesu (s výjimkou tlustostěnných dílů). Při vytvrzování epoxidové pryskyřice neuvolňují vedlejší produkty (jako např. fenolické pryskyřice), takže k získání kompozitu bez dutin (bublin) není zapotřebí vysokého tlaku. V případech, kdy je žádoucí vytvrzovací proces naopak zkrátit, lze použít urychlovačů (obvykle BDMA - benzyldimethylamin). [6, 14]

Epoxidové pryskyřice pro vakuovou infúzi – VIP

Formulace epoxidových pryskyřic pro VIP dovoluje bez autoklávu vyrábět rozměrné a kompozitové díly s malým podílem mikroskopických dutin (pod 1 %) a kontrolovaném podílu pryskyřice/vláknem. Nové epoxidové pryskyřice pro VIP dovolují použít levné formy a jsou schopné se vytvrdit za pokojové (dvousložkové systémy) nebo mírně zvýšené teploty (jednosložkové systémy).

Požadavky epoxidové pryskyřice pro VIP jsou:

- viskozita menší než 500 mPas při pokojové teplotě,
- minimální životnost (doba do začátku vytvrzování) 1,5 hodiny,
- lomová houževnatost větší než 1 MPa m^{1/2},
- modul pružnosti v tahu větší než 3,1 GPa. [14]

2.3 Vytvrzování a stupeň vytvrzování

Vytvrzování je podstatnou věcí při zpracování reaktivních pryskyřic. Pryskyřice je zcela vytvrzena až když zreagují všechny reaktivní skupiny.

- V praxi je velmi obtížné určit, kdy dojde ke 100%-nímu stupni vytvrzení pryskyřice, protože se nikdy vzájemně nesejdou všechny složky zesíťení. Tvorba vazeb může být překryta tepelným rozkladem.
- V praxi neexistuje vhodná metoda pro přímé kvantitativní určení počtu a rozdělení míst vhodných pro zesíťování. Např. měření tepelného toku (reakčního tepla) metodou diferenciální snímání kalorimetrie (DSC), dávají pouze údaj o stupni konverze. [4]

Úplné vytvrzení pryskyřice je tedy definováno nejvyšší možnou teplotou skelného přechodu, nebo nejvyšším možným počtem zesíťení a nebo nemožností dalších reakcí, která byla prokázána vhodnými zkušebními metodami. [4]

Pro kvantifikaci úplného stupně vytvrzení se používá nejčastěji stanovení zbytkového reakčního tepla pomocí DSC, kdy se zahřívá několik miligramů pryskyřice. Z tepelného toku mezi vzorkem a referenční látkou lze měřit reakční teplo nebo entalpii. Stupeň vytvrzení získáme ze vztahu: [4]

(1)

$$SV_{DSC} = \frac{\Delta H_R}{\Delta H_{celk}}$$

kde:

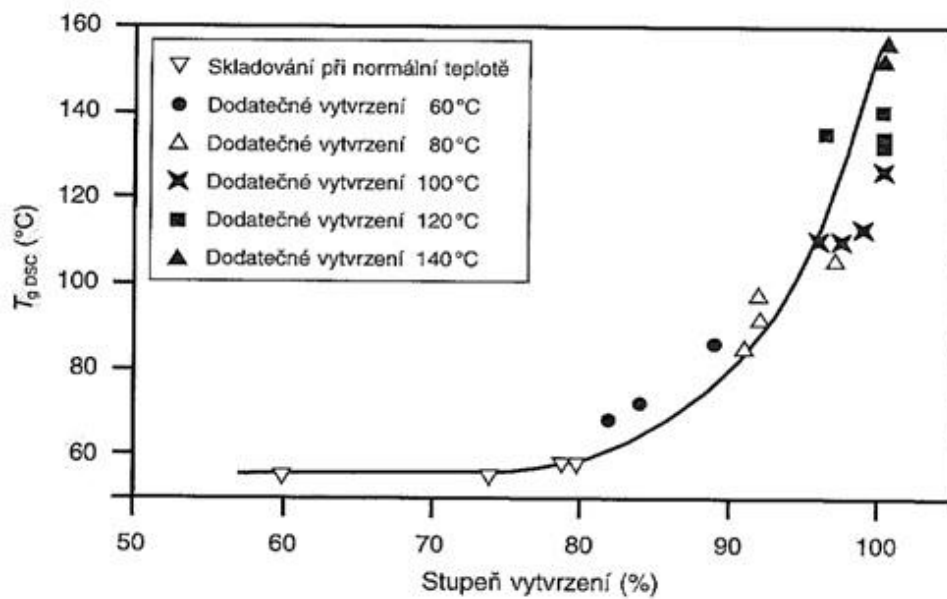
SV_{DSC} – stupeň vytvrzení stanovený metodou DSC,

ΔH_R – zbytková reakční entalpie (J/g),

ΔH_{celk} – celková entalpie reakce (J/g).

2.3.1 Teplota skelného přechodu T_g a chemický stupeň vytvrzení

Graf zkonstruovaný na základě hodnot teplot skelného přechodu T_g , zjištěných pomocí DSC, a příslušných hodnot stupně vytvrzení, získaných z měření zbytkové entalpie. [4]

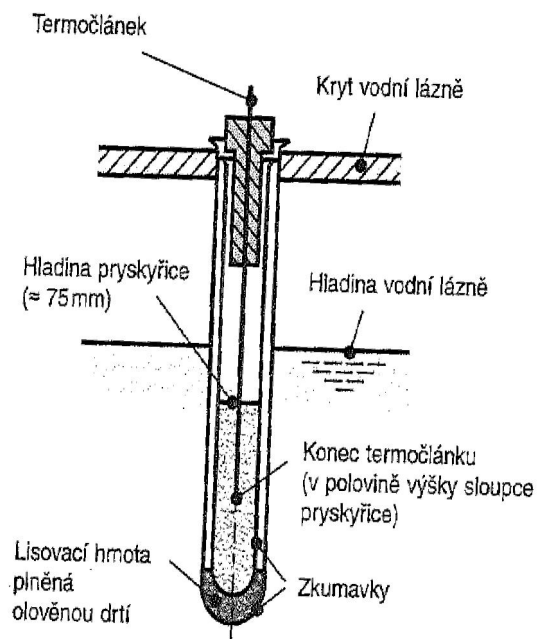
Obr. 16. Závislost teploty T_g na stupni vytvrzení [4]

Metodou DSC není možné sledovat pokračování závěrečné vytvrzovací reakce, protože reakci malého množství volných vazeb v této fázi značně brání omezená pohyblivost celých síťových oblastí. [4]

2.3.2 Exotermní reakce

K exotermii (vývinu tepla) dochází při tvorbě chemických vazeb mezi molekulami výchozích materiálů, při které se uvolňuje teplo. Graf závislosti teploty na čase slouží často ke sledování závislosti průběhu vytvrzování na teplotě. [4]

V tomto případě se aplikuje vytvrzování za studena (pokojová teplota). Zkumavka naplněná zkoušenou hmotou do výše 7 až 8 cm se umístí do vodní lázně o teplotě 25 °C. Teplota se sleduje v závislosti na čase pomocí termočlánku. Výchozím bodem vytvrzovací křivky je čas, ve kterém se smíchá iniciátor, urychlovač a pryskyřice a vlivem rozpadu peroxidu započne polymerační reakce. Působením exotermního reakčního tepla stoupá teplota, což urychluje vytvrzování. [4]



Obr. 17. Určování vzestupu teploty
v průběhu vytvrzování [4]

Závislost vzestupu teploty na čase je v podstatě u všech pryskyřic podobná. Podle druhu pryskyřice se liší i normované zkušební podmínky. Uvolněné množství tepla je závislé na druhu pryskyřice, použitých monomerech, množství a druhu katalyzátoru a urychlovače, obsahu plniv a výztuží a na okolní teplotě. [4]

3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ

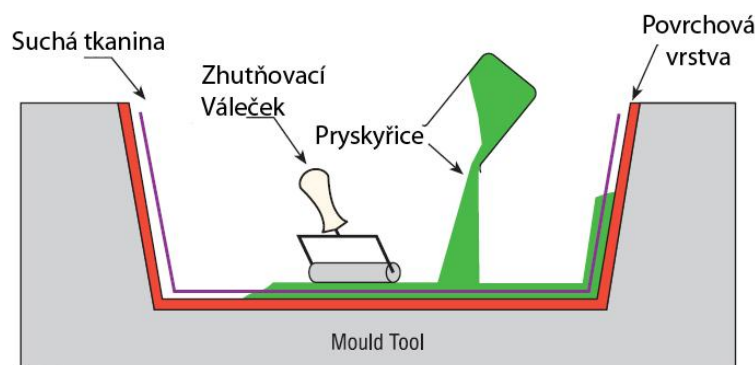
3.1 Ruční laminace

Řadíme ji k tzv. otevřeným technologiím a jedná se o nejstarší, nejjednodušší a víceméně nejrozšířenější technologii v současné době. Forma (negativní či pozitivní matrice) se nejprve naseparuje a poté je na ni většinou nanesen nebo nastříkán gelcoat.

Gelcoat – jedná se o speciálně formovanou, většinou probarvenou a nevyztuženou povrchovou vrstvu o tloušťce 0,3-1 mm, která je nanášena buď ručně nebo stříkáním. Zajišťuje ochranu vůči okolnímu prostředí (vodě, chemickým mediím, povětrnostním podmínkám).

Po necelém vytvrzení gelcoatu jsou kladeny jednotlivé vrstvy výztuže, které jsou prosycovány iniciovanou pryskyřicí za pomoci nanášecího válečku nebo štětce. Přebytečné pryskyřice a vzduchových bublin se zbavíme vytlačáním rýhovanými válečky.

Laminát se vytvrzuje za pokojové teploty většinou bez působení aplikace tlaku, pouze v případě, kdy je zapotřebí vytvořit sendvičovou konstrukci stěny vyplněním lehkých jádrových materiálů (pěnou či voštinou apod.) se použije přítlaku vakuem pod separační folií. Pro zajištění vyšší teplotní odolnosti je někdy nutné provést vytvrzování při vyšší teplotě za současného dodržení programu postupného zvyšování teploty. [3, 18]



Obr. 18. Ruční laminace [17]

Výztuže: Výztuže mohou být ve formě skleněných vláken, uhlíkových vláken, aramidových vláken či jiných syntetických nebo přírodních vláken v různých formách. Nejčastěji jsou používány jako tkaniny různé hmotnosti, rohože (konstrukční nebo povrchové).

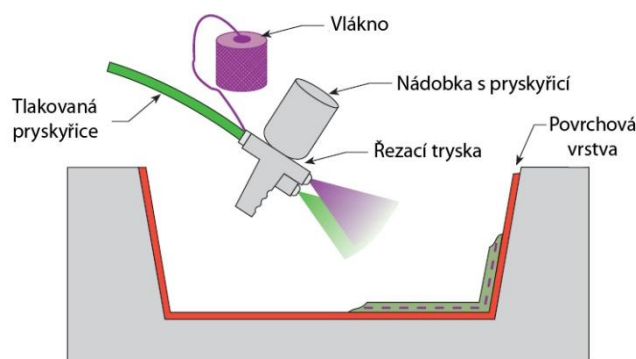
Pryskyřice: Nejvíce se používají epoxidové nebo polyesterové pryskyřice. Druh jak pryskyřice a iniciátoru, tak tužidla je třeba volit podle potřebné doby zpracování při výrobě, dle požadavků na teplotní a chemickou odolnost, pevnostní charakteristiky, nebo speciální požadavky (nízké smrštění pro stavbu forem, snížená hořlavost, apod.) pokaždé s ohledem na finální použití výrobku.

Ruční kladení je technologií vhodnou pro malé i velkorozměrové výrobky od jednoduchých až po dosti tvarově složité výrobky při nižší až střední sériovosti (až do 1000 kusů) a vzhledem k nízkým nákladům a nenáročnosti, také pro výrobu prototypů. [18]

3.2 Stříkání

Je to strojní technologie, která se nanáší pneumaticky na formu speciální pistolí současně iniciovaná pryskyřice a sekany roving. Nanáší se převážně ručně, lze je také mechanizovat a řídit počítačem. Formy jsou levné, stříkání je prakticky stejné jako ruční kladení, formy jsou většinou z kompozitů.

První je aplikována – nástřikem nebo ručně – gelcoatová vrstva. Samotné stříkání se provádí v několika vrstvách „mokrý do mokrého“ v závislosti na požadované tloušťce výrobku. Každá vrstva nanesené směsi se zhutňuje štětinovými nebo rýhovanými válečky různé velikosti a tvaru, při tom se vytlačí vzduchové bubliny. [18]



Obr. 19. Stříkání [17]

Výztuže: Skleněný roving, není to obvykle ale i jiné kontinuální vlákno, např. speciální roving Spheretex, kde se jedná o voluminezní roving skládaný základními skleněnými vlákny mezi kterými jsou zakomponovány mikrokuličky expandovaného polymeru.

Pryskyřice: Nejčastěji polyesterových pryskyřic izoftalového, tereftalátového nebo ortoftalového typu.

Stříkání je technologie, která je vhodná pro výrobu středních až velkorozměrových méně složitých výrobků. Dále se používá na nanášení laminátové směsi na rub polymethylmetakrylátových sanitárních výrobků (umyvadla, vany, sprchové kouty) pro zvýšení jejich pevnosti a tvarové stability. Stříkání je vhodná technologie pro sériovou výrobu díky možnosti snadného, efektivního a rychlého nanášení velkého množství materiálu. Velkou nevýhodou je vyšší množství odpadu a relativně vyšší vstupní finance na stříkací zařízení a musí se používat odsávací boxy spojené se systémem likvidace styrenových par z odtahu, dále vyšší obsah pryskyřice a to zapříčiní výrazně nižší mechanické vlastnosti.

Stříkání je metoda, která se řadí rovněž k tzv. otevřeným metodám a je nutné je provádět ve volném a odvětrávaném prostoru – stříkacích boxech a to především z důvodu, že pro tuto metodu se převážně používají polyesterové pryskyřice, obsahující styren. [18]

3.3 Navíjení

Při technologii navíjení se výztuž, převážně skleněná, ale také uhlíkové nebo aramidové pramence impregnované pojivem ovíjejí na jádro (trn) ve tvaru výrobku. Navíjením se vyrábí kompozitní dutá tělesa – nádrže, trubky, a nádoby různého i proměnného tvaru a velikosti.

Pohyb ukládacího ramene podél osy za současné rotace trnu a poloha ukládacího oka dovolují přesné kladení vláken v několika osách a umožňují vytváření i relativně složitých tvarů. Je to metoda, která je plně řízena počítači.

V naváděcím a impregnačním zařízení se výztuži udává určité předpětí, které zapříčiní přesné uložení na jádro. Poměrem rychlosti otáčení trnu a posunem ukládacího zařízení lze nastavovat a regulovat úhel návínů od 90° (obvodový návín) přes křížový návín s různým navíjecím úhlem až po 0°, např. trubek a osových výztužení hřídel. Díky vyjímatelným

a rozebíratelným trnům lze tzv. integrálním navíjením získat kompletní nádoby včetně drenu a vrchlíků pouze s malými polárními otvory. [18]

Výztuže: Nejčastěji pramence – skleněný roving o různém texu, uhlíkové pramence pro náročné aplikace.

Pojiva: Polyesterové pryskyřice možných typů, epoxidy nebo vinylestery. Pro skladování pitné vody a potravin je zapotřebí hotové nádrže tepelně dotvrzovat, aby se dosáhlo co nejvyššího stupně vytvrzení a minimálního obsahu volného styrenu.

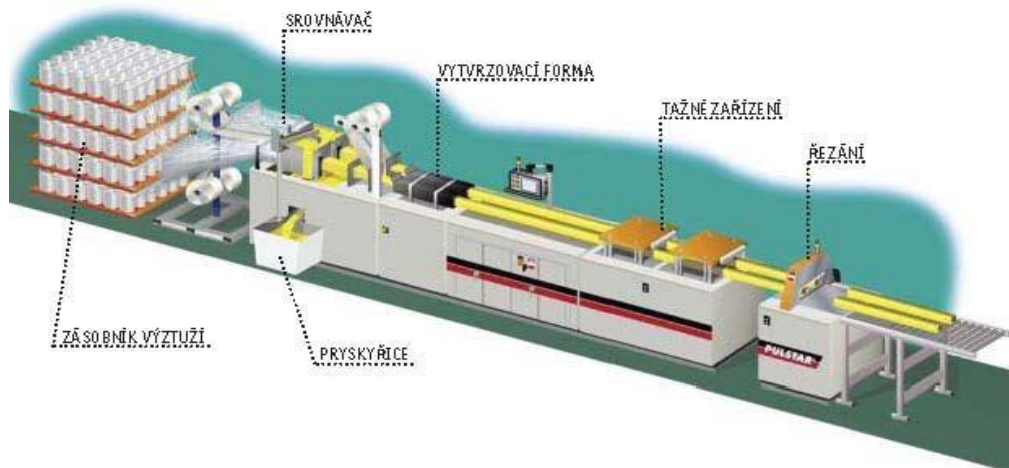
Navíjení je technologie, která je jednou z nejprogressivnějších technologií pro výrobu dutých těles z kompozitních materiálů. Finanční náročnost je dána cenou navíjecího stroje a náklady na navíjecí trny. Nejčastěji se navíjením vyrábí trubky od průměru 150 mm do 3000 mm a nádrže od 1 m, 2 až do 100 m². [18]

3.4 Pultruze

Touto technologií můžeme vyrábět velmi efektivně kontinuálním způsobem duté, plné nebo tvarové profily s vysokým obsahem výztuže (až do 80%). Výztuž, nejčastěji skleněné, anebo uhlíkové nebo i jiné pramence po případně v kombinaci se stuhami z rohoží nebo tkanin pro získání příčného vyztužení. Dále pak prochází lázní s iniciovanou pryskyřicí. Dále je prosycování a pak ždímání přebytečné pryskyřice. Po těchto úkonech je vtahována do tvarovacích a vytvrzovacích průvlaků (forem), tato dutina odpovídá vnějšímu tvaru vyráběných profilů. Modifikací této technologie je tlakové prosycování suché výztuže až v počáteční sekci formy.

K průvlaků dochází buď působením sdíleného tepla (formy jsou vyhřívány topným médiem nebo elektricky) nebo vyvinutým tepla účinkem vysokofrekvenčního pole k vytvrzení. Profil je odtahován regulovatelnou rychlostí hydraulickými čelistmi nebo pásovými elementy a na konec dělen na požadovanou délku.

Variantou prosté pultruze je tzv. pulforming, kdy se během semikontinuálního procesu táhne prosycená výztuž, která je v dalším kroku v dvoudílné vyhřívané formě udělen konečný tvar, např. listové eliptické pero-průžina s proměnným průřezem po délce. [18]



Obr. 20. Pultruze [23]

Výztuže: Převážně skleněný roving, méně pak uhlíkové pramence, tkané stuhly a pásy z různých vláken nebo rohože, které mají těžko rozpustné pojivo, povrchové rohože, případně s potiskem.

Pojiva: Epoxidové, vinylesterové nebo nízko viskózní polyesterové pryskyřičné systémy, které se vytvrzují rychle za zvýšených teplot (80-160°C). Pojiva převážně obsahují vnitřní separátory, aditiva pro zlepšení hladkosti povrchu a usnadňující probarvení, pigmenty a plniva např. pro snížení hořlavosti.

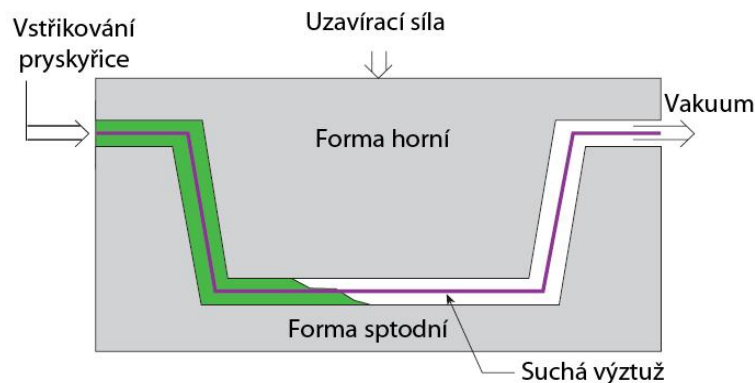
Tato technologie je vhodná pro kontinuální výrobu profilů od velmi tenkých a jednoduchých (1 mm pásy pro vyztužení hokejek a lyží) až po velmi složité a rozměrné (šíře a výška několik desítek cm, tloušťka stěny až 15 mm). [18]

3.5 RTM – resin transfer moulding

Používají se formy, které jsou kovové, robustní konstrukce nebo polymerbetonové, aby snesly vysoké vnitřní tlaky. Forma, která je opatřené gelcoatem, se vyskládá suchá výztuž podle konstrukčního návrhu. Při velké sériové výrobě se vkládají tzv. předlisky z výztužného materiálu. Vyztužující materiál, ať už na bázi skleněných nebo jiných vláken, musí mít strukturu, která nám zaručí snadný tok pryskyřičného systému, aby se dosáhlo úplného prosycení v krátkém čase. Forma je potom uzavřena vrchním dílem podobně tuhé konstrukce a zajistí se rychloupínacím systémem.

Do vstřikovacího otvoru se umístí injektážní pistole, kterou se přivádí pojivo ze speciálního strojního zařízení – vysokotlaké pumpy se zpřaženým regulovatelným směšováním iniciátoru. Pojivo se vstřikuje tak dlouho, než nezačne vytékat pojivo z kontrolních otvorů na okrajích formy, což nám značí, že výztuž je zcela prosycena v celém objemu dílce.

Pojivový systém volíme tak, aby vytvrzovací reakce s využitím 41xodermu proběhla v řádu 10-20 minut. [18]



Obr. 21. RTM [17]

Výztuže: Prošívané rohože nebo rohože z nekonečného vlákna (např. typ Unifilo) a speciální komplex skleněná rohož+vnitřní řídká rohož ze syntetických vláken typu Rovicore nebo Combiflow, povrchové rohože o nízké gramáži.

Pojiva: Převážně polyesterové pryskyřice se zabudovaným urychlovačem, v řadě případů ve směsi, která obsahuje levné plniva (uhličitan vápenatý, aluminiumtrihydrát) pro snížení nákladů a úpravu vlastností, např. snížení hořlavosti, speciální typy tzv. Class A se sníženým smrštěním pro automobilové díly k přímému nasazení bez dalších povrchových úprav. [18]

Vysokotlaké RTM je díky krátkým výrobním operacím a reprodukovatelné kvalitě vhodná technologie pro vyšší série – několik stovek až tisíců kusů. Je potřeba počítat s vysokou investicí na vstřikovací zařízení a s náklady na středně finančně náročné formy. Náklady na protikus formy lze snížit použitím tzv. distančních voskových folií o různé tloušťce odpovídající tloušťce výrobku, odpadá tak výroba druhého modelu. [18]

3.6 Vakuové lisování

Vakuové lisování se aplikuje, pokud chceme mít vyšší obsah výztuže, nebo je potřeba odsávat přebytečnou pryskyřici. To se provádí pro zvýšení mechanických vlastností. Tato technologie se také volí i pro lepší zakomponování tuhých sendvičových materiálů – pěny nebo voštiny. Pro prosycení měkkých sendvičových materiálů, se musí zvolit nižší podtlak.

Prosycená výztuž se pokládá stejně jako u laminace ruční. Na poslední vrstvu výztuže se pokládá odtrhová tkanina, která nám po odformování oddělí pomocné materiály od výrobku. Takovto povrch je dále připraven na další operace (laminování, lepení). Dále se pokládá perforovaná separační folie a odsávací rohož. Jako poslední se pokládá pružná vakuová folie nebo pryžová plachetka, která nám uzavře a utěsní formu. [18]

Evakuace vzduchu a přítlak se vyvozuje relativně malým pod tlakem cca 0.3-0.9 bar. Vytvrzování ve formě probíhá nejčastěji při pokojové teplotě, ale pokud použijeme prepregy je potřeba, zajistit požadovanou teplotu vytvrzování, toho dosáhneme díky vytápěné komory nebo vyhřívaného tunelu. [18]

Výztuže: Pásky a tkaniny na bázi skleněných, uhlíkových nebo syntetických vláken všeho druhu. Jejich kombinace nebo tzv. hybridní (směsné) výztuže různé gramáže.

Pojiva: Epoxidové nebo polyesterové pryskyřice.

Pro náročnější aplikace se používá tzv. prepregů, tj. výztuží před impregnovaných vhodnými pryskyřicemi, které se vytvrzují za zvýšených teplot. Tkaninové prepregy se vyznačují vysokým obsahem výztuže. Musíme však počítat s omezenou skladovatelností jen pár dnů až týdnů v závislosti na typu pojivového systému a skladovací teplotě (při -18°C až 12 měsíců). [18]

Vakuové lisování je technologie, která se používá pro malé až střední série. Tato technologie nevyžaduje vysoké náklady vyjma investice do vakuové pumpy. Velká výhoda je oboustranně hladké výrobky včetně sendvičových struktur. Tyto struktury mají vysoký obsah výztuže s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. [18]

3.7 Vakuová infúze

Podobná jako technologie RTM light, jen s tím rozdílem že se nepoužívá injekční zařízení.

Má tři modifikace:

- **Vakuové prosycování s pružnou vrchní částí formy.** Podobně jako u RTM light s odsávacími kanálky. Spodní část formy je tuhá, vrchní část, převážně kompozitní, má určitou pružnost, která reguluje přítlak, uzavírací sílu a prosycování zajišťuje vakuum 0.6-0.8 bar.
- **Vakuové prosycování pod pružnou folií.** Tato metoda má dost společného s lisováním pomocí vakua. Spodní část formy je klasického typu jako pro ruční kladení. Druhá část formy není, místo ní se používá pružná folie, která je k okrajům formy připevněna těsnícími pásky. Iniciované pojivo se přisává ze zásobníku, v případě velkorozměrných dílců se rozvádí perforovanými trubičkami až do vzdálenějších míst. Vakuum se aplikuje na obvodu formy pomocí kanálku, vytvořeného těsnícími profily.
- **Metoda SCRIMP.** Je velmi podobná druhé metodě, jenom rozvod pryskyřice je zajišťován speciální sítkou, umístěnou na celý povrch suché výztuže. Závěr tvoří opět pružná folie. [16, 18]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 TECHNOLOGIE VAKUOVÁ INFUZE POD PRUŽNOU FÓLIÍ

Cílem této diplomové práce je studium technologických parametrů při vakuové infuzní technologii. Budeme zkoumat propustnost živice multiaxiálními tkaninami, sledovat teplotu a následně budeme na vyrobených vzorcích provádět mechanické vlastnosti, které v poslední kapitole vyhodnotíme a porovnáme.

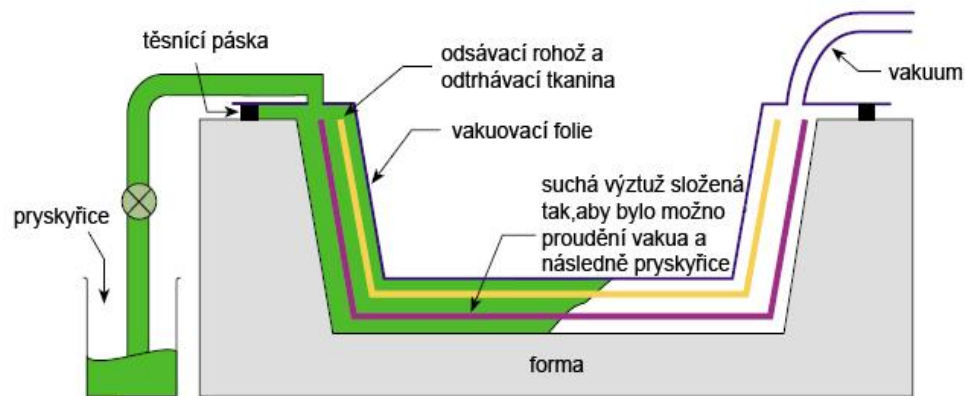
Cíle diplomové práce můžeme shrnout do následujících bodů:

1. Osvojení principů a zákonitosti vakuových infuzních technologií (návrh skladby, materiálového složení, včetně vhodného výběru pryskyřice s ohledem na její vizkozitu, prozkoumání vhodnosti využití multiaxiálních výztuž).
2. Vakuová infuze – výroba vzorků včetně sledování teploty v průběhu infuzního procesu v předem stanovených oblastech (oblast vtoku, oblasti mezi jednotlivými laminami multiaxiální výztuže), sledování času zaplnění dutiny formy.
3. Příprava vzorků pro stanovení tahových a ohybových vlastností, dle norem ČSN ISO 527-4 a ČSN ISO 178 s ohledem na zkoumané oblasti. Realizace rázové zkoušky dle normy ČSN ISO 6603 s ohledem na zkoumané oblasti.
4. Vyhodnocení experimentálně získaných dat a diskuse výsledku.

4.1 Vakuová infuze

V této kapitole bude podrobně popsána technologie vakuová infuze. Bude zde popsán princip vakuové infuze, výhody a nevýhody a také jednotlivé použité materiály (pomocné materiály a potřebné komponenty).

Vakuová infuze má tři modifikace. Pro tuto diplomovou práci byla vybrána modifikace vakuové prosycování pod pružnou fólií. Je to technologie, která se používá pro výrobu kompozitních, ale i sendvičových struktur.



Obr. 22. Vakuová infuze [16]

Proč se využívá vakuum při výrobě kompozitních materiálů:

- Zlepšujeme kvalitu výrobků – zlepšujeme poměr matrice a výztuže, čím snižujeme váhu výrobku, zlepšujeme povrchovou úpravu výrobků, snižujeme obsah dutin v kompozitních materiálech.
- Urychlujeme výrobní proces – možnost spojení více výrobních operací do jednoho, používáme suchý výrobní proces, rozdíl tlaku se využívá na rozvod matrice ve výztuži.
- Používáme uzavřené technologie – snížením úniku emisi VOC (Volatile Organic Compounds) látek po dobu výroby, zlepšujeme hygienu pracovního prostředí a práce.

Výhody vakuové infuze:

- vysoká kvalita,
- možnost výroby velkoplošných výrobků,
- možnost výroby silnostěnných výrobků v jednom kroku,
- vyšší pevnost dílů,
- menší spotřeba pryskyřice při výrobě než u ruční laminace,

Nevýhody vakuové infuze:

- složitý proces, vysoké náklady na vyladění technologie,

- náročnost na přesnost technologických kroků,
- potřeba erudovaných pracovníků,
- know – how znalosti.

Princip technologie:

Vakuová infuze využívá podtlak pro distribuci živice v položených vrstvách výztuže. Výztuže jsou na sucho položené do dutiny formy. Na výztuže se pokládají další pomocné materiály a nakonec uzavřené a utěsněné vakuovou fólií. Živice je nasávána prostřednictvím systému hadiček a pomocí distribučního média do připravené výztuže.

4.1.1 Komponenty a pomocné materiály pro vakuovou infuzi

Při vakuové infuzi je potřeba několik komponentů pomocných materiálů. Počet druhů komponentů a pomocných materiálů volíme podle tvaru a typu výrobku.

Vakuová fólie (Vacuum Foil)

Vakuová fólie je pružná, průhledná a umožňuje aplikovat vakuovou infuzi. Vakuová fólie nám uzavírá formu. Fólie nám vytváří tlak na horní části plochy výrobku, tlak je rovnoměrný. Vakuová fólie zakryje výrobek a všechny pomocné materiály.

Vakuová fólie je flexibilní a pevná v tahu. Při zakrývání formy volíme velikost fólie o 30% až 40% větší než rozměry formy. Vybrané vlastnosti fólie vidíme v tab. 3.

Tab. 3. Vybrané vlastnosti vakuové fólie

Materiál:	PE/ PA/ PTFE
Tloušťka fólie:	0,08 mm
Podtlak:	0,3 – 0,9 bar
Šířka	1 m – 4,57 m



Obr. 23. Vakuová fólie [26]

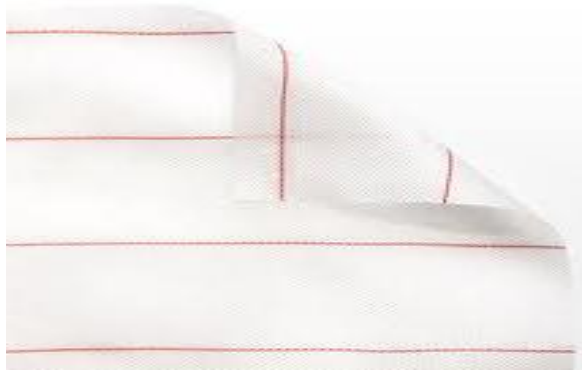
Odrhová tkanina (Peel-Ply):

Vytváří na povrchu výrobku čistý a texturovaný povrch. Tento povrch je připravený pro další technologické operace (lepení, lakování nebo další kladení laminátu). Pokládá se přímo na výrobek, nebo-li na zformovaný materiál výrobku.

Nejčastěji Nylonová tkanina, při dokončení vakuové infuze odtrhová tkanina oddělí od povrchu výrobku ostatní pomocné materiály a zanechá čistý povrch výrobku. Hlavní vlastnosti odtahové tkaniny jsou popsány v tab. 4.

Tab. 4. Vybrané vlastnosti odtahové tkaniny

Materiál:	PA66/PE
Maximální teplota použití:	160 – 210°C
Hmotnost:	50 – 125 g/m ²
Šířka role:	1,47m/ 1,50m/ 1,56m/ 1,64m/ 1,74m

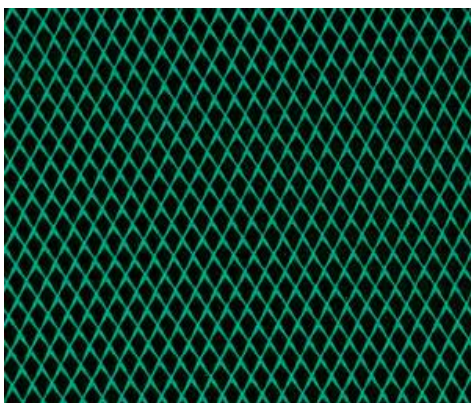


Obr. 24. Odrhová tkanina [26]

Distribuční médium – rozvodná síť (Distribution media)

Rozvodná síť zabezpečuje lepší rozvod živice, protože jinak by byl rozvod živice zabezpečen pouze působením tlakem. Rozvodná síť urychluje tok pryskyřice do suché tkaniny, díky další vrstvě materiálu, který zvyšuje propustnost na povrch laminátu. [28]

Jsou různé druhy rozvodu pryskyřice. První je povrchový rozvod, kde se používá rozvodová tkanina. U druhého způsobu u tzv. mezi laminárního rozvodu, kde se používají speciální 3D tkaniny. Rozvodných sítí je mnoho druhů, volí se podle toho, jaké materiály použijeme na vakuovou infuzi, pak podle toho jaká se použije pryskyřice, podle teploty zpracování a také hmotnosti výrobku.



Obr. 25. Greenflow [26]



Obr. 26. Resiflow [26]

Rozváděcí kanál (Resintrak)

Rozváděcí kanál je pletená technická páska, která pomáhá lepšímu toku a rozvodu pryskyřice při vakuové technologii. Rozváděcí kanál je vyroben ze 100% polyesteru a má svůj specifický tvar a upletení, pro lepší rozvod pryskyřice. Díky svému specifickému upletení dochází k urychlení procesu a lepšímu zatečení pryskyřice do méně přístupných částí výrobku. [28]

Rozváděcí kanál může obsahovat také oboustranou lepicí pásku, která slouží pro upevnění rozváděcího kanálu na kolmou stěnu, tento výrobek má technický název Airhold 10 CBS od firmy AIRTECH.

Tab. 5. Vlastnosti Resintraku od firmy Airtech

Tloušťka:	3 mm
Šířka:	43 mm
Délka:	25 m

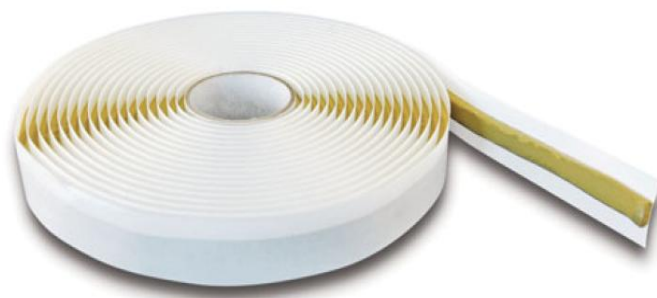


Obr. 27. Rozváděcí kanál firmy Airtech [26]

Těsnící pásy

Těsnící páska vytváří vzduchotěsný spoj mezi formou a vakuovou fólií. Má vysokou přilnavost a může se použít až do teplot 204°C.

Nejčastěji se používá těsnící páska (žlutá) typ AT-200Y od firmy AIRTECH.



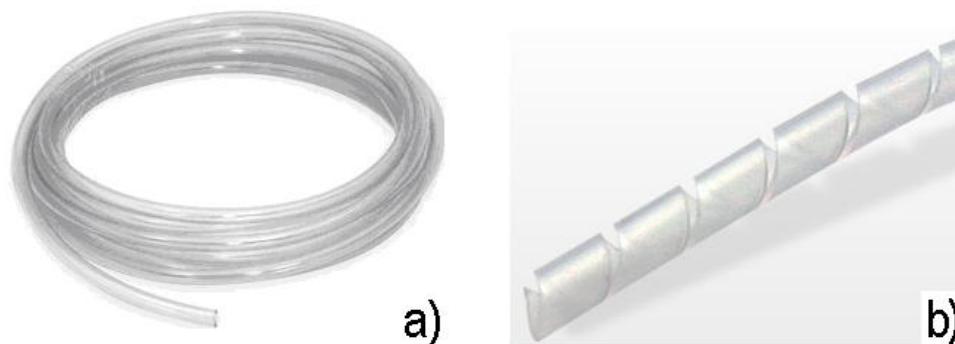
Obr. 28. Těsnící páska (žlutá) AT-200Y [26]

Hadice pro vytvoření vakua a pro dopravu pryskyřice

Hadice se používá pro vytvoření vakua a pro dopravu pryskyřice, a také se používá pro odvod přebytečné pryskyřice. Nejvíce je užívána hadice o průměru 10 – 12,5mm. Podle katalogu od firmy AIRTECH se může hadice používat do teploty 121°C.

Spirálová hadice se používá tam, kde je horší přístup obyčejnou hadicí pro přívod pryskyřice. Používá se také na vytváření vakua a odvodu přebytečné pryskyřice, přebytečná pryskyřice odtéká pomocí spirálových hadiček do připraveného rezervoáru.

Podle materiálových listů firmy AIRTECH jsou dva druhy hadic a to podle použití maximální teploty, a to: nylonová-NTF do teploty 177°C a polyethylenová-PE do teploty 121°C.



Obr. 29. a) přívodní hadice, b) spirálová hadice [26]

Konektor RIC (resin infuion connector)

Konektor RIC od firmy AIRTECH slouží k propojení přívodu pryskyřice a uzavřené a utěsněné formy. Toto propojení je efektivní a levné, používá se pro nízkoteplotní aplikace do teploty 80°C. Konektor je vyroben s polyetylenem – UHMW. V tab. 6 můžeme vidět různé typy konektorů a šířkou připojení. [26]

Tab. 6. Typy konektorů firmy Airtech

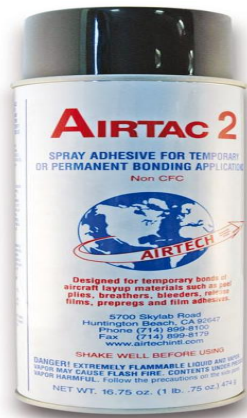
Produkt	Koncovka	Spirála trubice připojení
RIC 12	½ palce	½ palce
RIC 58	5/8 palce	5/8 palce
RIC 34	¾ palce	¾ palce



Obr. 30. RIC konektor [26]

Fixační lepidlo (AIRTAC 2)

Jde o sprej, který obsahuje fixační lepidlo. Slouží k zafixování jednotlivých vrstev skelné tkaniny pro lepší manipulaci. Dále pro zafixování pomocných materiálů (odtrhová tkanina, rozváděcí kanál, rozvodná síť). Slouží k zafixování potřebných materiálů a pomocných materiálů ve svislé nebo vodorovné poloze.



Obr. 31. Fixační lepidlo [26]

Vakuová vývěva

Vakuová vývěva je zařízení, které odsává vzduch nebo různé plyny z uzavřené formy a tím vytváří vakuum. Díky vakuové vývěvě a vzniklého vakua se nasává pryskyřice ze zásobníku do formy výrobku. Vakuová vývěva vytvoří potřebné vakuum 0,8 – 1 bar.



Obr. 32. Vakuová pumpa (vývěva) [26]

Rezervoár (Airtech RB451)

Rezervoár Airtech RB451 je vakuová nádrž, která je určena pro shromažďování přebytečné pryskyřice. Rezervoár má 3 přívody podtlaku, aby bylo možné provést několik infuzí najednou. Každý vstup je vybaven bezpečnostním ventilem. Jednotka je vybavena vakuo-

vým regulátorem pro snížení podtlaku a detekce úniku. Rozměry a technické parametry vidíme v tabulce 7.

Tab. 7. Rozměry rezervoáru Airtech RB451

Velikost nádrže:	10 litrů
Průměr tanku:	30 cm
Výška nádrže s držadlem:	46 cm
Zdrojem podtlaku:	¼ palce vnější NPT
Vstup pryskyřice:	3/8 palce NPT
Max. provozní teplota:	50°C



Obr. 33. Rezervoár Airtech
RB451 [26]

Rezervoár (vakuová nádrž) typu Airtech RB451 je vybavená vstupem na měřidlo podtlaku, který má stupnici o rozsahu 0 – 1,2 bar.



Obr. 34. Měřidlo podtlaku [26]

4.2 Zkoušky mechanických vlastností vzorků

Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů (vyrobených vzorků) jsme zkoumali tahovou a ohybovou zkouškou na trhačím stroji Zwick 1456. Tahová zkouška má rychlostní rozsah v intervalu $0.5 \div 500$ mm/min. V našem případě se jednalo o rychlost 10mm/min., měření jednotlivých vzorků se konalo při normální (pokojové) teplotě.



Obr. 35. Trhačka Zwick 1456

Tahová zkouška je normalizovaná zkouška podle ČSN EN ISO 527-4, zkušební tělíska mají rozměry podle normy ČSN EN ISO 527-4. Tahová zkouška patří k statickým metodám k vyhodnocení pevnosti v tahu, modulu pružnosti a Poissonova čísla daného materiálu. Zkušební tělíska byly pevně upnuty do čelistí stroje a na daný vzorek působí postupně se zvyšující síla, až do doby, kdy se poruší vzorek.

U ohybové zkoušky se jednalo o tzv. tříbodový ohyb, taktéž normalizovaný podle ČSN EN ISO 178. Také mezi statické metody a vyhodnocuje pevnost v ohybu a modul pružnosti. Zkoušený vzorek je umístěn na dvě podpěry a poté je zatěžován silou ve středu vzorku. Dochází k úplnému porušení vzorku nebo je vzorek stále deformován, než vyklouzne z podpěr. Tento výsledek nám ukáže, zda je vzorek křehký nebo houževnatý.

4.2.1 Vyhodnocování naměřených výsledků

Při statistickém vyhodnocení výsledku měření byly použity následující vztahy:

Aritmetický průměr: „ \bar{x} “ (výběrový) s n jednotlivých výsledku x_i ($i = 1, 2, 3 \dots n$) je suma výsledku dělená jejich počtem n :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Rozptyl: „ s^2 “ Je vhodný pro zjišťování řady n hodnot náhodného výběru se suma čtverců odchylek jednotlivých hodnot od aritmetického průměru dělí tzv. počtem stupňů volnosti $f = n - 1$.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

Směrodatná odchylka: „ s “ Absolutní hodnota druhé mocniny.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (4)$$

Střední kvadratická chyba aritmetického průměru: „ $\bar{\sigma}$ “ Využití pro hodnocení přesnosti měření se vychází ze střední kvadratické chyby „ σ “ podělenou mocninou s **n** měření.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

4.3 Zkouška pomocí Padostroje

Na rázovou zkoušku jsme použili padostroj Zwick/Roell HIT 230F, který máme ve školních laboratořích. Zkouška je podle ČSN EN ISO 6603, rozměry vzorku jsou 100 × 100 mm. Při rázové zkoušce jsme vyhodnocovali maximální sílu F_{\max} a maximální energii W . V každé oblasti vzorku jsme nařezali jednu zkušební destičku.



Obr. 36. Zwick/Roell HIT 230F

5 VÝROBA VZORKŮ

5.1 Použité materiály pro výrobu vzorků

5.1.1 Polyesterová pryskyřice AROPOL G 105 E

AROPOL G 105 E je netixotropní, před urychlená, nízko viskózní, nenasyčená polyesterová pryskyřice na bázi ortoftalové kyseliny.

Pryskyřice AROPOL G 105 E je zejména doporučována pro vstřikování do formy a tvarování ve formě za studena.

Při výrobě laminátů silnějších než 7 mm se doporučuje použít 1,3% Trigonoxu 75. Doba želatinace je totožná jako při použití 1% MEK peroxidu avšak s nižší exothermou.

Pro dosažení velmi rychlého vytvrzení tenkých laminátů lze z poloviny nebo úplně nahradit MEK peroxid AAP - acetyl aceton peroxidem, např. Trigonox 44B.

Tab. 8. Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice AROPOL G 105 E [P I]

Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice AROPOL G 105 E	Nominální hodnota	Jednotka	Zkušební metoda
Číslo kyselosti	19	mgKOH/g	ISO 2114
Viskozita při teplotě 23°C Brookfield (RVT, sp2, 10 rpm)	180	mPas	ISO 2555
Viskozita při teplotě 23°C Cone & Plate	180	mPas	ISO 2884
Obsah styrenu	41	%	SFS 4864
Hustota	1,1	kg/dm ³	ISO 2811
Doba želatinace při 23°C (1% MEK-peroxid)	13	min.	INTERNÍ D006
Vrchol exothermy při 23°C (1% MEK-peroxid)	120	°C	INTERNÍ D006

Tab. 9. Vlastnosti vytvrzené pryskyřice AROPOL G 105 E [P I]

Vlastnosti vytvrzené pryskyřice AROPOL G 105 E	Nominální hodnota	Jednotka	Zkušební metoda
Tvrdość	45	Barcol	ASTM D2583
Tvarová stálost za tepla (HDT; 1,81 MPa)	66	°C	ISO 75 Metoda A
Pevnost v ohybu	90	MPa	ISO 178
Modul pružnosti v ohybu	4100	MPa	ISO 178
Pevnost v tahu	55	MPa	ISO 527
Modul pružnosti v tahu	3600	MPa	ISO 527
Prodloužení při přetržení	2,0	%	ISO 527
Absorpce vody			
24 hod	19	mg	ISO 62-80
28 dní	90	mg	ISO 62-80

5.1.2 Polyesterová pryskyřice NORPOL 420-100

NORPOL 420-100 je středně reaktivní, orthoftálová polyesterová pryskyřice pro injekční vstřikování. NORPOL 420-100 neobsahuje urychlovač a není thixotropizována.

Tab. 10. Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice NORPOL 420-100 [P II]

Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice NORPOL 420-100	Nominální hodnota	Jednotka	Zkušební metoda
Viskozita Kužel-Deska	180-210	mPa.s	ISO 2884-1974
Hustota	1,10	g/cm ³	ISO 2811-1974
Číslo kyselosti	22	mgKOH/g	ISO 2114-1974
Obsah styrenu	43±	% hm.	-
Bod vzplanuti	34	°C	ASTM D 3278-73
Doba želatinace: -1% Norpol 1 -1% Co urychlovač (1%)	20-30	min.	-
Skladovatelnost	6	měsíc	

Tab. 11. Vlastnosti vytvrzené pryskyřice NORPOL 420-100 [P II]

Vlastnosti vytvrzené pryskyřice NORPOL 420-100	Nominální hodnota	Jednotka	Zkušební metoda
Obsah skla	-		
Pevnost v tahu	70	MPa	ISO 527-1993
E-modul v tahu	3700	MPa	ISO 527-1993
Protažení	3,5	%	ISO 527-1993
Tvarová stálost za tepla	67	°C	ISO 75-1993
Pevnost v ohybu	140	MPa	ISO 178-1993
E-modul v ohybu	3600	MPa	ISO 178-1993
Rázová houževnatost	12	mJ/mm ²	ISO 179-1982

Hodnoty uvedené v tabulce byly dosaženy na laminátu vyztuženém standardní práškově pojenou rohoží, ruční laminací, aby se dosáhlo hodnot, srovnatelných s ostatními typy polyesterových pryskyřic.

5.1.3 Skelná tkanina SAERTEX

Vybrané vlastnosti skelné tkaniny SAERTEX můžeme vidět v tabulce.

Tab. 12. Vlastnosti skelné tkaniny SAERTEX [P III]

Konstrukce	Váha [g/m ²]	Tolerance [+/-%]	Materiál	Hustota [g/cm ³]
-45°	476	5	E-Glass	900
90°	29	5	E-Glass	300
+45°	476	5	E-Glass	900
Sešívání:	6	5	PES 76 dtex	

5.2 Zkušební tělíska

Zkušební tělíska budou nařezány ze čtyř vyrobených vzorků. Každý vzorek bude rozdělen na tři oblasti a v každé oblasti se nařezou zkušební tělíska.

Pět tělísek bude použito na zkoušku v tahu, pět tělísek na zkoušku v ohybu. Jedno tělísko na rázovou zkoušku.

5.2.1 Zkušební tělísko na zkoušku v tahu

Zkušební tělísko na zkoušku v tahu bylo zvoleno ve tvaru destičky o rozměrech 120×10 mm. Počet těchto tělísek je 5 v každé oblasti vzorkové desky.



Obr. 37. Zkušební tělísko na tah

5.2.2 Zkušební tělísko na zkoušku v ohybu

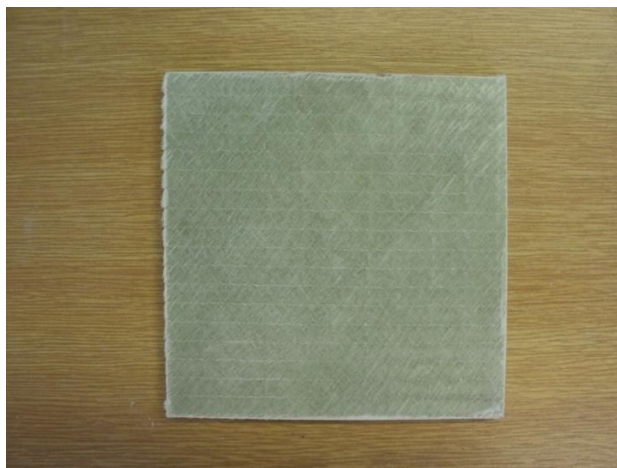
Zkušební tělísko na zkoušku tříbodového ohybu bylo zvoleno ve tvaru destičky o rozměrech 80×10 mm. Počet těchto tělísek je 5 v každé oblasti vzorkové desky.



Obr. 38. Zkušební tělísko na ohyb

5.2.3 Zkušební tělísko na rázovou zkoušku

Zkušební tělísko na rázovou zkoušku bylo zvoleno ve tvaru destičky o rozměrech 100×100 mm. Počet tělísek je 1 v každé oblasti vzorkové desky.



Obr. 39. Zkušební tělísko na rázovou zkoušku

5.3 Vzorek 1

První vzorek je ve tvaru desky o rozměrech 550×300 mm. Deska je složena s osmi vrstev multiaxiální tkaniny a je použita pryskyřice AROPOL G 105 E. Celkové složení vzorku je popsáný v tabulce 13.

Tab. 13. Složení vzorku 1

VZOREK 1	
Počet vrstev tkaniny	8 vrstev
Materiál tkaniny	Multiaxiální tkanina SAERTEX (980g/m^2)
Hmotnost tkaniny	1300 g
Odrhová tkanina (Peel-Ply)	1 ks
Rozvodná síť (Green flow)	1 ks
Resintrak	1 ks
Vakuová fólie	1 ks
Pryskyřice	Polyesterová AROPOL G 105 E (1300g)
Tvrdidlo	Butanox 2% (32g)

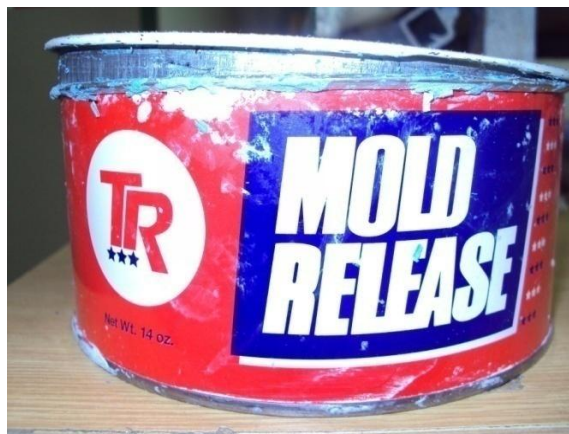
Vakuová infuze 100%	ANO
Vakuová infuze 100% [min.]	5:00
Začátek gelace 100% [min.]	9:00

Pro náš experiment byla použita forma ze školních dílen. Forma není přímo pro technologii vakuové infuze, ale pro výrobu našich vzorku dostačující. Povrch formy musí být pevný a hladký. Formu můžeme vidět na obrázku 40.



Obr. 40. Forma pro výrobu vzorků

Jako první operace je příprava formy. Jak už jsem se zmínil, povrch formy musí být pevný, hlavně hladký a bez nějakých nečistot. Abychom dosáhly hladkého a čistého povrchu formy, použijeme separační pastu MOLD RELEASE. Separací prostředek můžeme vidět na obrázku 41.



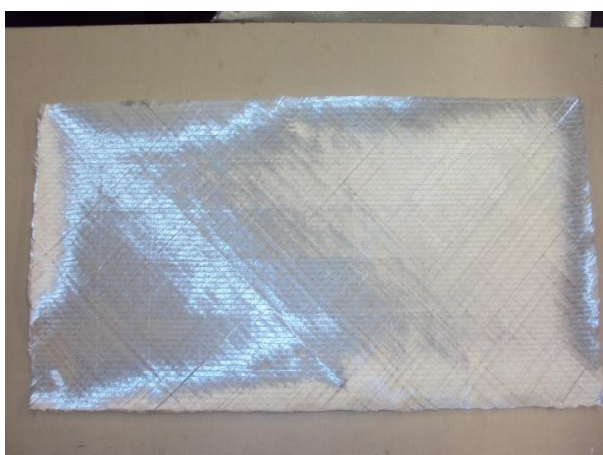
Obr. 41. Čistící pasta MOLD RELEASE

Separáční prostředek se na povrch formy nan s  had r kem a krouživým pohybem rozt r  po povrchu formy. Po nanesen  na povrch se nechá pasta na pět minut oschnout. Po pěti minutách co pasta zaschne se krouživým pohybem začne povrch formy leštit. Tento krok se provádí minim ln  dvakrát. Detail o i t n  formy vidíme na obrázku 42.



Obr. 42. Detail vyle t n  formy

Po o i t n  povrchu formy začneme pokládat skelnou tkaninu na formu. U tohoto vorku jsme d vali osm vrstev. Před vlo en m dal s  vrstvy se povrch tkaniny nast r kal fixačním lepidlem AIRTAC 2. Lepidlo n m zafixuje vrstvy tkaniny k sobě, aby vše drželo při sobě.



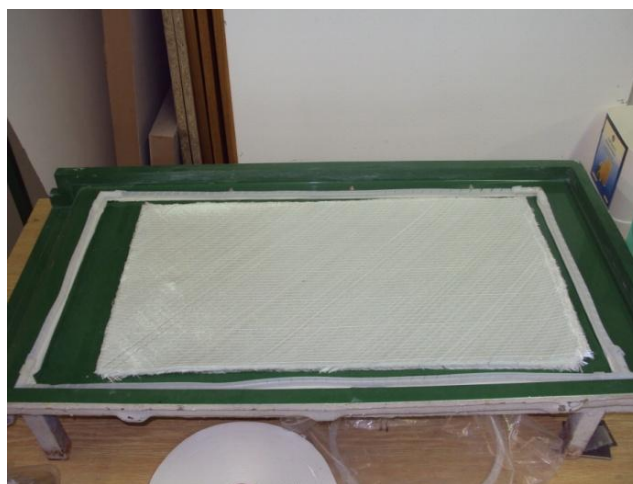
Obr. 43. Jedna vrstva tkaniny



Obr. 44. Tkanina položena ve formě

Na obrázku 43 vidíme nařezanou skelnou tkaninu na požadovanou velikost, kterou budeme klást do formy. Na obrázku 44 vidíme položené a zafixované vrstvy tkaniny.

Po nanesení vrstev tkaniny do formy, se začnou do formy pokládat pomocné materiály. Jako první pokládáme bílou pásku AIRHOLD 10 CBS. Páska se pokládá kolem vzorku po obvodě formy. Tato páska slouží k přichycení spirálové hadice, která slouží jako odvod přebytečné pryskyřice z výrobku. Pro spojení spirálové hadice se používají polyethylenové „L“ kolínka, které se vkládají do rohů. Pro přímý odvod pryskyřice ze systému do rezervoáru se připojí polyethylenové „T“ kolínko.



Obr. 45. Spojení spirálové hadice s L a T kolínky

Jako další se pokládá odtrhová tkanina (Peel-Ply), ta se pokládá jako první pomocná tkanina přímo na vzorek. Tato tkanina pak při odformování oddělí ostatní pomocné materiály od vzorku. Odtrhová tkanina nesmí přesahovat přes spirálové hadice, aby později, kdy po obvodu bude nalepená žlutá páska pro uchycení vakuové fólie se nevytvářeli při prosycování bubliny.



Obr. 46. Pohled na odtrhovou tkaninu

Jako další vrstva se přímo na odtrhovou tkaninu pokládá rozvodná síť (nebo-li distribuční médium). Slouží pro lehčí a rychlejší rozvod pryskyřice po vzorku. Rozměry rozvodné sítě jsou o málo větší než rozměry vzorku. Pro náš vzorek jsme použili rozvodnou tkaninu typu Greenflow.

Na rozvodnou tkaninu se pokládá rozváděcí kanál, pokládá se v podélném směru uprostřed vzorku. Rozváděcí kanál má na jedné straně oboustrannou lepicí pásku, díky které se rozváděcí kanál přichytíme k rozvodné síti.

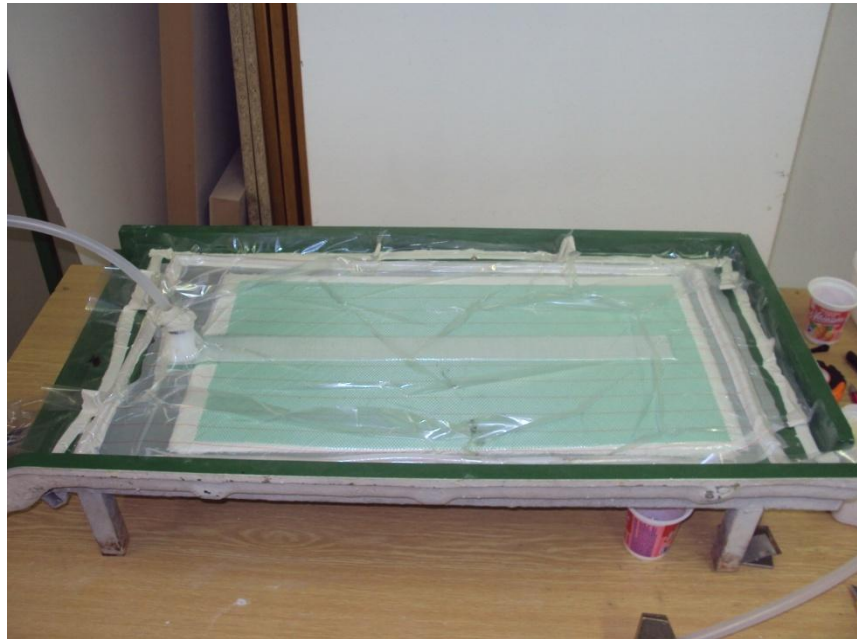
A na konec se připojí RIC konektor, který nám bude sloužit jako vtok pryskyřice do systému. Polohu u vzorku 1 jsme zvolili na kraji.



Obr. 47. Položení Greenflow, Resinrak a RIC konektoru

Posledním krokem je uzavření formy pružnou vakuovou fólií. Vakuová fólie musí být o cca 30% větší než obvod formy. Pokud by vakuová fólie neměla dostatečně rozměry, došlo by k roztržení vakuové fólie. Musí být bez porušení, bez trhlin a děr, aby se dosáhlo 100% těsnosti pro vytvoření vakua.

Vakuová fólie se k formě připojí pomocí žluté pásky AT-200Y Sealant Tape. Fólie musí být volná, aby při vakuování pokryla celý vzorek ve všech místech. Žlutá páska se nalepí po obvodě formy, na ni připevňujeme vakuovou fólii. Žlutá páska se nesmí dotýkat a přilepit k odtahové tkanině, mohlo by dojít ke vzniku bublin ve vzorku nebo úniku vzduchu z formy. Po obvodě se na fólii dělají tzv. ucha, pro lepší uzavření a utěsnění vzorku.



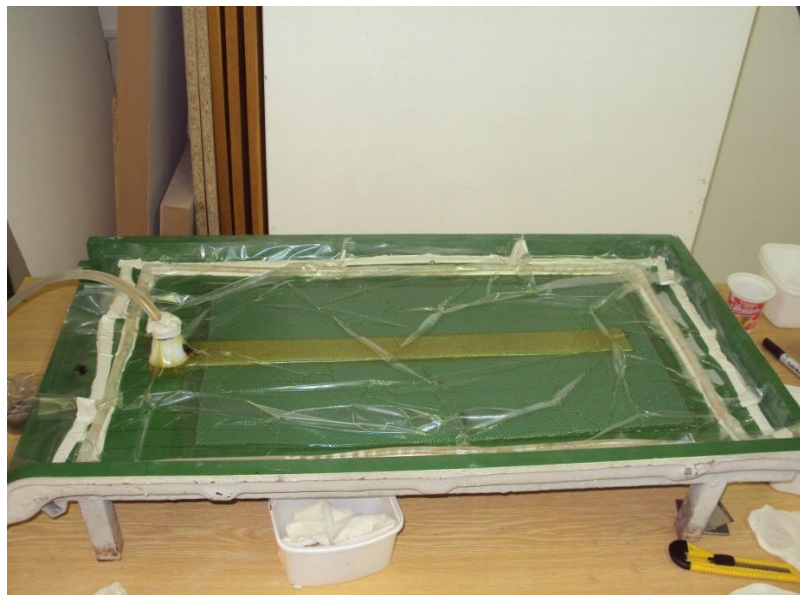
Obr. 48. Pohled na uzavřenou formu pružnou vakuovou fólií

Na obrázku 48 na levé straně můžeme vidět hadici, která přivádí pryskyřici do systému přes RIC konektor. Spojení přívodní hadice a RIC konektoru se musí důkladně utěsnit a k tomu nám pomůže žlutá lepicí páska. K takto připravené a uzavřené formě připojíme rezervoár a k rezervoáru připojíme vakuovou pumpu. Pomocí vakuové pumpy vyzkoušíme těsnost formy a poslechem zjišťujeme, jestli někde neuniká vzduch.

Pokud vzduch nikde neuniká, musíme uvnitř formy dosáhnout podtlak. Při zapnutí vakuové pumpy vysáváme vzduch z formy, čekáme, až podtlak bude mít hodnotu 0,9 bar. Pokud se určitou dobu drží podtlak na této hodnotě, můžeme začít přivádět pryskyřici ze zásobníku do systému.

Než začneme přivádět pryskyřici do systému, tak ji promícháváme s butanolem, a čekáme, než začne lehce želatinovat. Pak ji začneme přivádět do systému. Množství a časy gelace pryskyřice jsou v tabulce 13. Jakmile začne pryskyřice vnikat do rezervoáru, tak přívod pryskyřice zastavíme.

Teplota při vytvrzování je velmi důležitý faktor. Plného vytvrzení se dosáhne až při vyšších teplotách, kterých dosáhneme v teplotních komorách, ale teplota se nesmí zvýšit nad danou hodnotu pryskyřice, mohli by se zhoršit mechanické vlastnosti výrobku. V našem případě vytvrzování vzorku probíhá za pokojové teploty, formu jsme od formovali vždy po 24 hodinách. Po odformování se povrch vzorku nijak nepracovával.



Obr. 49. Pohled na prosycený vzorek

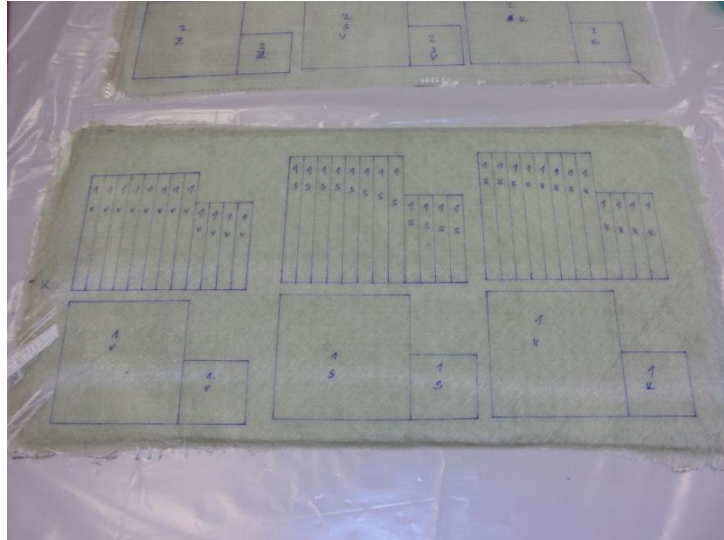
Technologický postup:

Výrobní postup u dalších vzorků je obdobný jako u prvního vzorku jen se přidává vrstva navíc, proto pro zjednodušení u ostatních vzorků nebudeme podrobně popisovat technologický postup, ale jen se odkážeme na technologický postup v tabulce 14.

Tab. 14. Technologický postup výroby vzorků

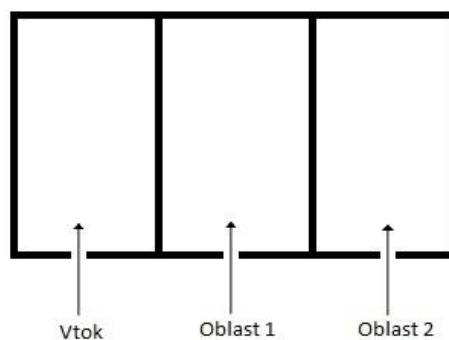
Krok 1	Příprava formy – nanesení separačního prostředku
Krok 2	Pokládání jednotlivých vrstev, které zafixujeme fixačním sprejem AIRTAC 2
Krok 3	Po obvodu naskládané tkaniny položíme bílou pásku AIRHOLD 10 CBS a na pásku připevníme „L“ a „T“ kolínka.
Krok 4	Pokládáme pomocné materiály – odtrhová tkanina, rozvodná síť, rozvodný kanál
Krok 5	Uzavření a za vakuování formy pomocí vakuové fólie

Vzorkovou desku o rozměrech 550 × 300 mm jsme rozdělili na tři oblasti. A z každé oblasti jsme nařezali vzorkové tělíska na zkoušku na tah, na ohyb, rázovou zkoušku. Ty to oblasti mezi sebou porovnáme.



Obr. 50. Deska připravena na vyřezání tělísek

Na dalším obrázku máme schéma rozdělení vzorkové desky, pro lepší orientaci v tabulkách naměřených hodnot a jejich správné přiřazení. Desky jsme nařezali ve firmě Form. U prvního vzorku jsme zvolili usazení RIC konektoru tedy vtoku na kraji desky, takže cesta prosycení do oblasti 2 bude nejdelší co jsme možná projeví v prosycení vzorku.

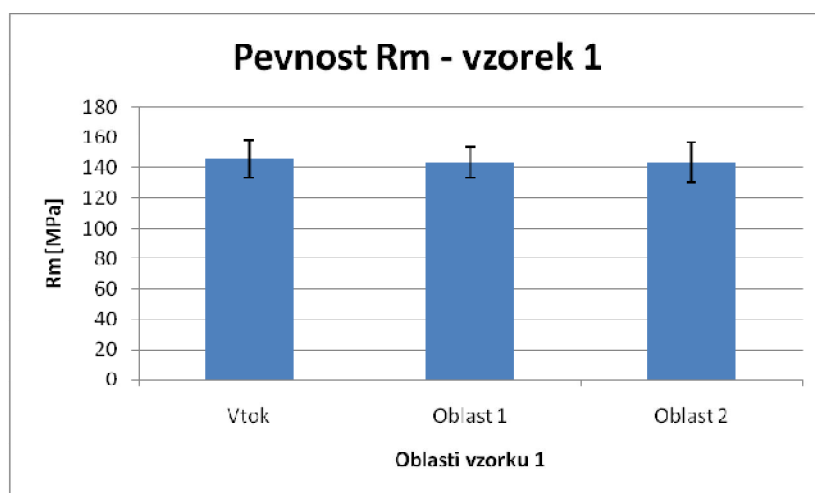
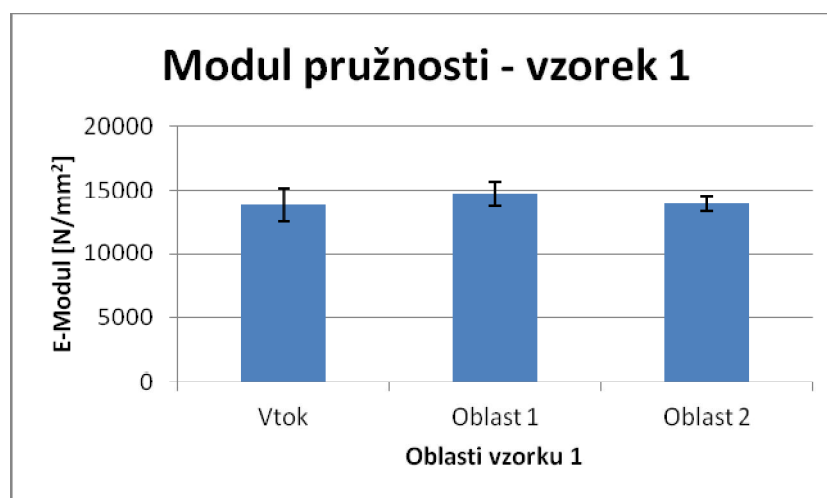


Obr. 51. Rozdělení desky

5.3.1 Naměřené hodnoty po tahové zkoušce

Tab. 15. Naměřené hodnoty po tahové zkoušce v oblastech vzorku 1

	R _m	s	V _x	E-Modul	s	V _x
	MPa			N/mm ²		
Vtok	145,77	12,29	8,43	13836,34	1279,49	9,25
Oblast 1	143,83	10,01	6,96	14700,99	929,67	6,32
Oblast 2	143,79	12,8	8,9	13925,29	645,29	4,63

Obr. 52. Porovnání pevnosti R_m v tahu - vzorek 1

Obr. 53. Modul pružnosti E v tahu - vzorek 1

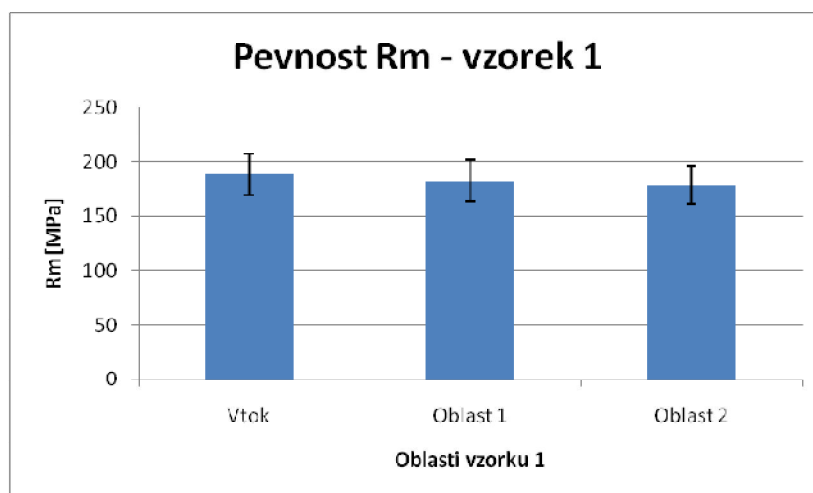
Obrázek 52 nám ukazuje pevnost po tahové zkoušce vzorku 1. Jak jsme předpokládali, největší pevnost byla naměřena u vtoku, a to 145,77 MPa. Jako druhá největší pevnost byla naměřena v oblasti 1 a to 143,83 MPa. Nejmenší pevnost byla naměřena v oblasti 2, a to 143,79MPa. Rozdíl mezi oblastí 1 a 2 je ale minimální.

Maximální hodnota modulu pružnosti po tahové zkoušce vidíme na obrázku 53, kde největší hodnota modulu pružnosti byla naměřena v oblasti 1 a to 14 700,99 N/mm². Druhá největší hodnota modulu pružnosti naměřená u oblasti 2 a to 13 925,29 N/mm². Nejmenší hodnota modulu pružnosti byla u vtoku 13 836,34 N/mm².

5.3.2 Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce

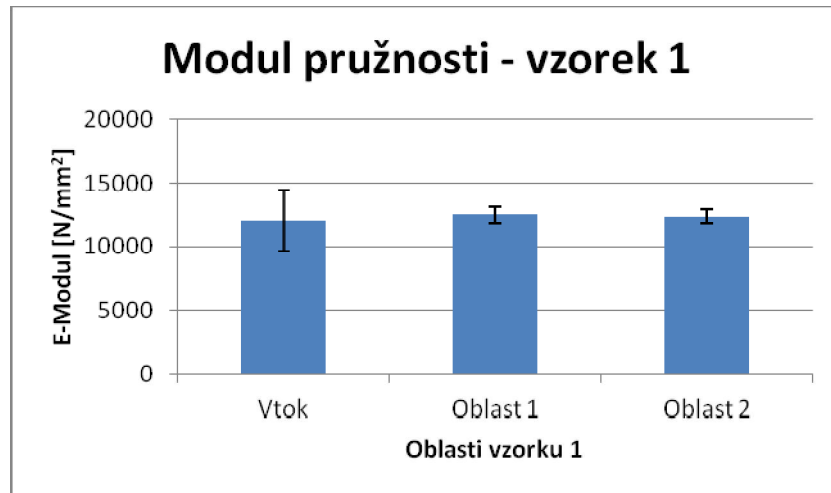
Tab. 16. Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce v oblastech vzorku 1

	R _m MPa	s	V _x	E-Modul N/mm ²	s	V _x
Vtok	188,86	18,75	9,93	12018,54	2387,55	19,87
Oblast 1	182,98	19,64	10,73	12488,74	671,63	5,38
Oblast 2	178,57	17,44	9,77	12362,05	585,8	4,74



Obr. 54. Porovnání pevnosti R_m v ohybu - vzorek 1

Maximální pevnost po ohybové zkoušce byla naměřená u vtoku 188,86 MPa. Druhá největší pevnost v oblasti 1, a to 182, 98 MPa. A nejmenší pevnost po ohybu byla naměřena v oblasti 2, a to 178,57 MPa. Je to patrné z obrázku 54.



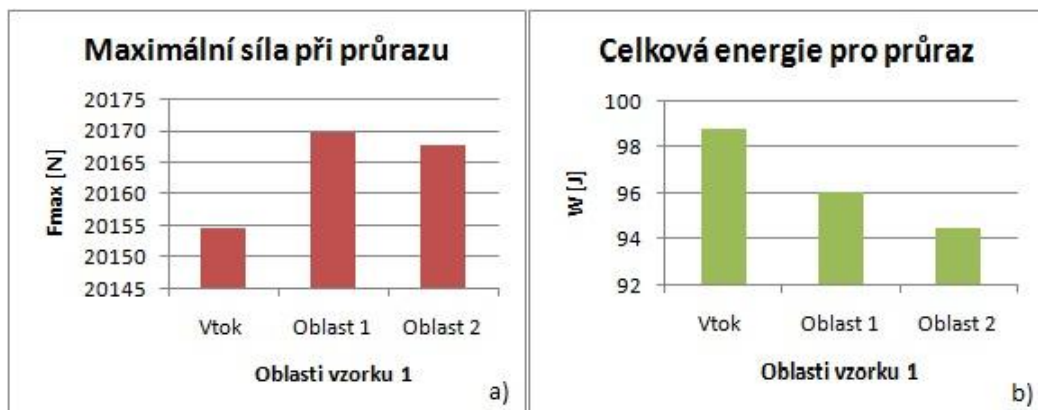
Obr. 55. Modul pružnosti E v ohybu - vzorek 1

Nejvyšší hodnota modulu pružnosti po ohybu byla naměřena v oblasti 1 (12 488,74 N/mm²). Jako druhá hodnota modulu pružnosti naměřená v oblasti 2 (12 362,05 N/mm²). Nejmenší hodnota modulu pružnosti naměřena u vtoku (12 018,54 N/mm²).

5.3.3 Naměřené hodnoty po rázové zkoušce

Tab. 17. Výsledky po rázové zkoušce

	Fmax	W	Závaží	Výška
	N	J	kg	mm
Vtok	20154,38	98,76	23,17	1056
Oblast 1	20169,87	96,02	23,17	1056
Oblast 2	20167,76	94,39	23,17	1056



Obr. 56.a) Maximální síla průrazu, b) Celková energie pro průraz

Při rázové zkoušce jsme naměřili maximální sílu při průrazu v oblasti 1 (20 169,87 N). Dále v oblasti 2 (20 167,76 N), a nejmenší síla byla u vtoku (20 154,38 N).

Celková energie při průrazu byla největší u vtoku (98,76 J), nejmenší celková energie naměřena v oblasti 2 (94,39 J).

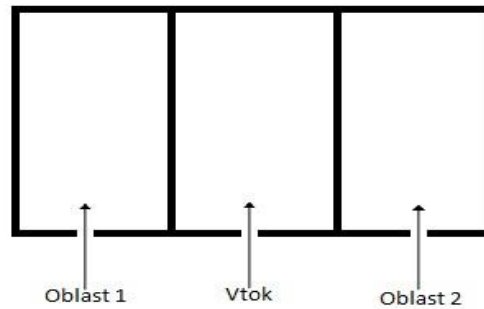
5.4 Vzorek 2

Postup výroby vzorku 2 je podle technologického postupu, který je popsán v tabulce 14. Rozdíl je jen v tom, že jsme měli možnost připojení termočlánku pro sledování teploty při vytvrzování. Složení vzorku 2 a použité materiály jsou popsány v tabulce 18.

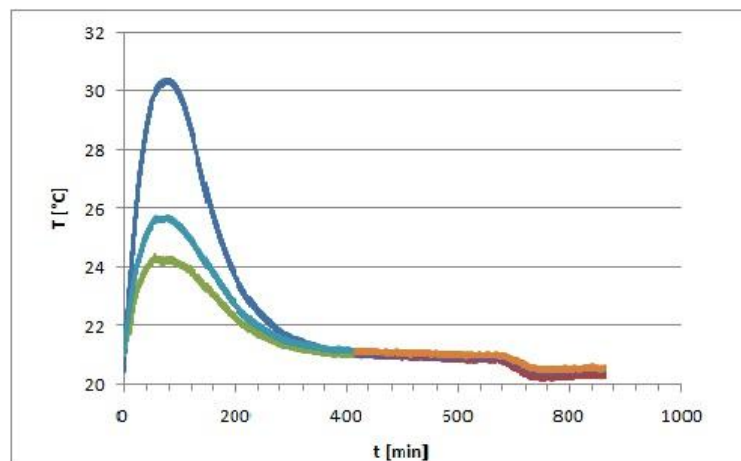
Tab. 18. Složení vzorku 2

VZOREK 2	
Počet vrstev tkaniny	5 vrstev
Materiál tkaniny	Multiaxiální tkanina SAERTEX (980g/m ²)
Hmotnost tkaniny	800 g
Odrhová tkanina (Peel-Ply)	1 ks
Rozvodná síť (Green flow)	1 ks
Resintrak	1 ks
Vakuová fólie	1 ks
Pryskyřice	Polyesterová NORPOL 420-100 (800g)
Tvrdidlo	Butanox 1,5% (22g)
Vakuová infuze 100%	ANO
Vakuová infuze 100% [min.]	3:00
Začátek gelace 100% [min.]	12:00

Na obrázku 57 máme schéma rozdělení vzorkové desky. Pro lepší orientaci v tabulkách naměřených hodnot a jejich správné přiřazení. U vzorku 2, 3 a 4 jsme zvolili usazení RIC konektoru tedy vtoku do středu desky.



Obr. 57. Rozdělení desky 2, 3 a 4



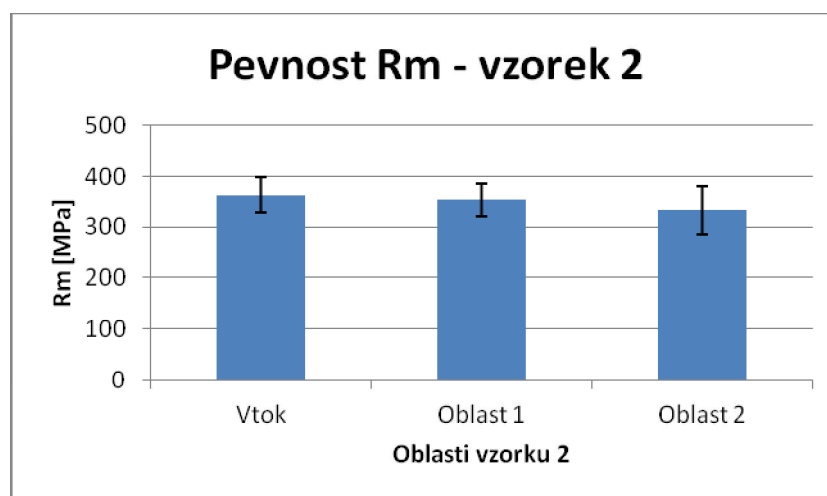
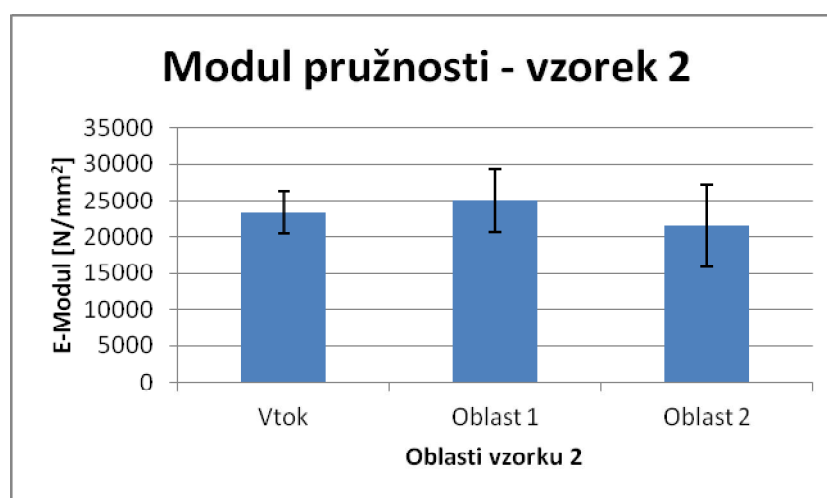
Obr. 58. Teplota při vytvrzování u vzorku 2 (---vtok, ---oblast 1, ---oblast 2)

U druhého vzorku jsme měli možnost připojit ke vzorku termočláanky pro sledování teploty při prosycování a vytvrzování. Největší teplota byla naměřena, jak jsme očekávali v oblasti vtoku ($30,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) a díky této teplotě byla největší pevnost v oblasti vtoku. V oblasti 1 a oblasti 2 se teplota pohybovala kolem $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dokončovací vytvrzování probíhalo za pokojové teploty. Termočlánek v oblasti vtoku byl vložen na povrchu, termočlánek oblasti 1 na třetí vrstvu multiaxiální tkaniny a třetí termočlánek v oblasti 2 byl vložen na první vrstvu multiaxiální tkaniny.

5.4.1 Naměřené hodnoty po tahové zkoušce

Tab. 19. Naměřené hodnoty po tahové zkoušce v oblastech vzorku 2

	R _m	s	V _x	E-Modul	s	V _x
	MPa			N/mm ²		
Vtok	363,72	34,89	9,59	23331,78	2901,25	12,43
Oblast 1	353,25	33,69	9,54	25013,08	4336,34	17,34
Oblast 2	333,11	48,78	14,64	21608,2	5644,18	26,12

Obr. 59. Porovnání pevnosti R_m v tahu - vzorek 2

Obr. 60. Modul pružnosti E v tahu - vzorek 2

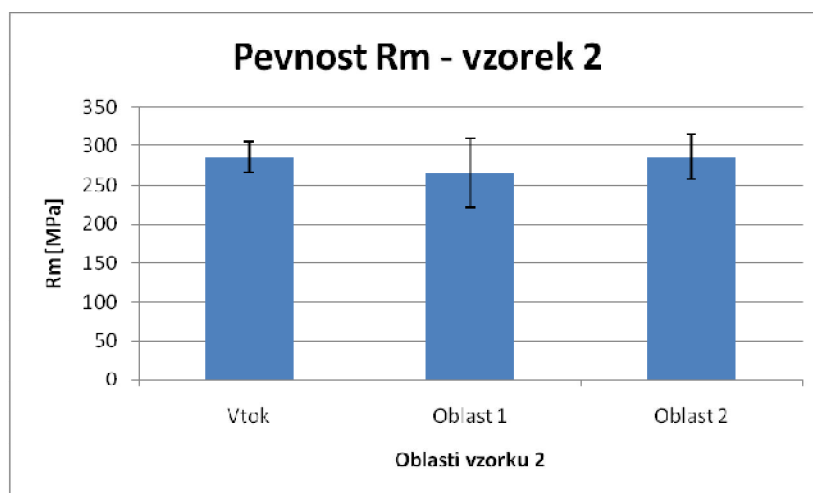
Maximální pevnost po tahové zkoušce byla dosažena ve vtoku (363,72 MPa) a to díky tomu, že největší teplota byla dosažena ve vtoku. Nejmenší pevnost v tahu byla dosažena v oblasti 2 (333,11 MPa).

Největší hodnota modulu pružnosti byla dosažena v oblasti 1 (25 013,08 N/mm²), nejmenší hodnota byla dosažena v oblasti 2 (21 608,2 N/mm²). V oblasti 2 byla dosažena hodnota modulu pružnosti (21 608,2 N/mm²).

5.4.2 Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce

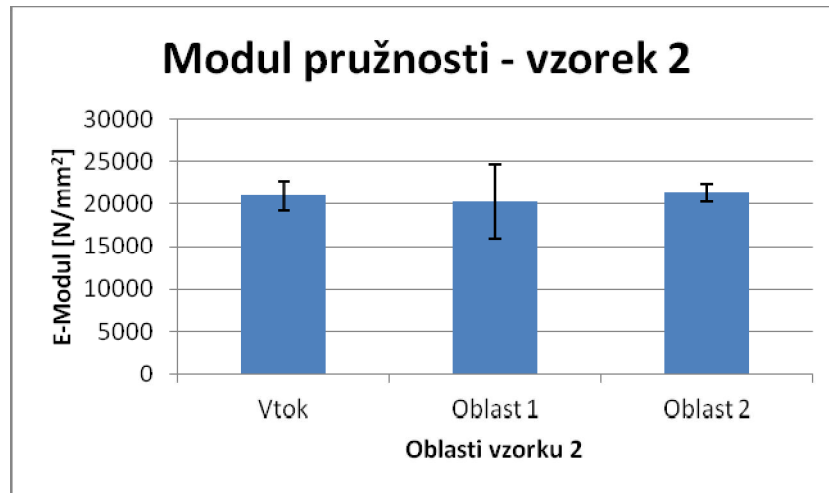
Tab. 20. Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce v oblastech vzorku 2

	R _m	s	V _x	E-Modul	s	V _x
	MPa			N/mm ²		
Vtok	286,14	18,84	6,58	21015,37	1715,12	8,16
Oblast 1	265,19	44,37	16,73	20280,79	4323,18	21,32
Oblast 2	286,72	27,73	9,67	21347,05	1114,72	5,22



Obr. 61. Porovnání pevnosti R_m v ohybu - vzorek 2

Maximální pevnost po ohybové zkoušce byla dosažena v oblasti 2 (286,72 MPa), jako druhá nejvyšší pevnost dosažena ve vtoku (286,14 MPa). Nejmenší pevnost po ohybu byla dosažena v oblasti 1 (265,19 MPa).



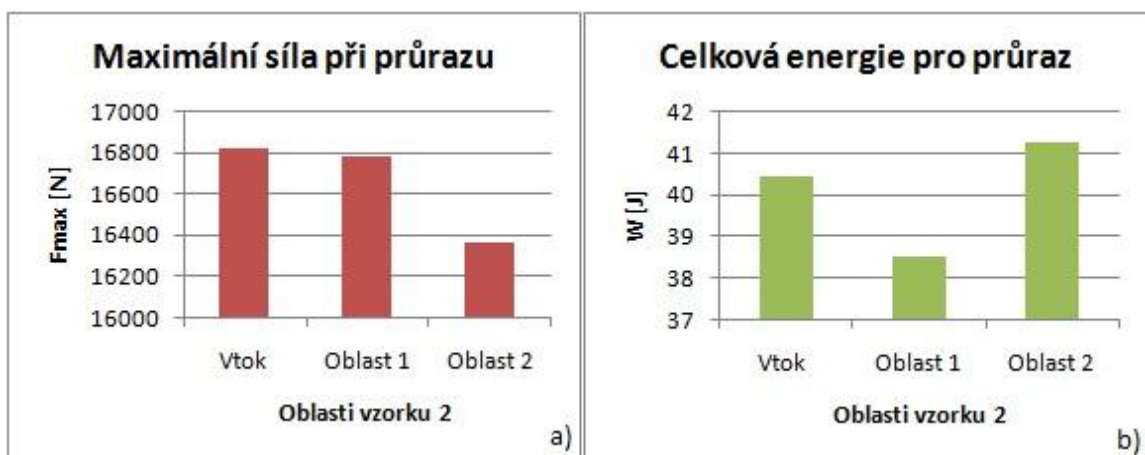
Obr. 62. Modul pružnosti E v ohybu - vzorek 2

Maximální hodnota modulu pružnosti po ohybové zkoušce u vzorku 2 byla dosažena v oblasti 2 (21 347,05 N/mm²). Jako druhá nejvyšší hodnota modulu pružnosti ve vtoku (21 015,37 N/mm²), nejmenší hodnota byla dosažena v oblasti 1 (20 280,79 N/mm²).

5.4.3 Naměřené hodnoty po rázové zkoušce

Tab. 21. Výsledky po rázové zkoušce

	Fmax	W	Závaží	Výška
	N	J	kg	mm
Vtok	16827,18	40,47	23,17	1056
Oblast 1	16781,24	38,49	23,17	1056
Oblast 2	16359,74	41,26	23,17	1056



Obr. 63.a) Maximální síla při průrazu, b) Celková energie pro průraz

Rázová zkouška nám ukázala, že největší síla při průrazu byla ve vtoku (16 827,18 N) a nejmenší síla byla dosažena v oblasti 2 (16 359,74 N). Síla při průrazu dosažena v oblasti 1 (16 781,24 N). Celková energie pro průraz byla dosažena v oblasti 2 (41,26 J). Nejmenší celková energie byla dosažena v oblasti 1 (38,49 J).

5.5 Vzorek 3

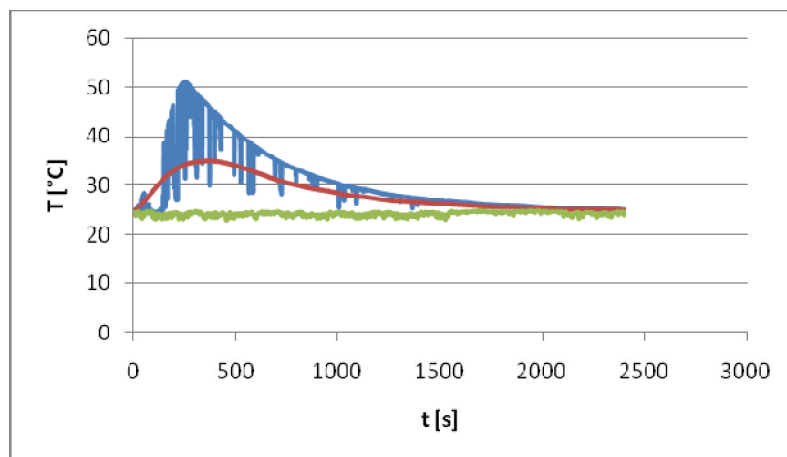
Postup výroby vzorku 3 je podle technologického postupu, který je popsán v tabulce 14. Rozdíl je jen v tom, že jsme měli možnost připojení termočlánku pro sledování teploty při vytvrzování. Složení vzorku 3 a použité materiály jsou popsány v tabulce 22.

Tab. 22. Složení vzorku 3

VZOREK 3	
Počet vrstev tkaniny	5 vrstev
Materiál tkaniny	Multiaxiální tkanina SAERTEX (980g/m ²)
Hmotnost tkaniny	820 g
Odrhová tkanina (Peel-Ply)	1 ks
Rozvodná síť (Green flow)	1 ks
Resinrak	1 ks
Vakuová fólie	1 ks
Pryskyřice	Polyesterová AROPOL G 105 E (800g)
Tvrdidlo	Butanox 2% (26g)
Vakuová infuze 100%	ANO
Vakuová infuze 100% [min.]	4:00
Začátek gelace 100% [min.]	15:00

U třetího vzorku jsme také využili termočlánky pro sledování teploty vytvrzování. Termočlánek ve vtoku byl vložen na povrchu. V oblasti 1 byl termočlánek vložen nad první vrstvu tkaniny a v oblasti dva byl vložen na 3 vrstvu tkaniny.

V tomto případě byla teplota vyšší než u druhého vzorku. Nejvyšší teplota byla opět ve vtoku (50 °C). v oblasti 2 byla teplota 35 °C a v oblasti 1 se držela teplota kolem 25 °C.

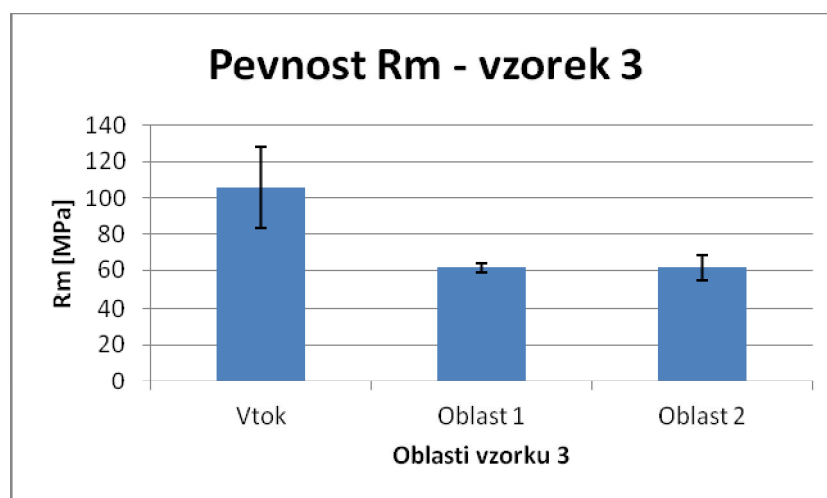


Obr. 64. Teplota při vytvrzování u vzorku 3 (---vtok, --- oblast 1, ---oblast 2)

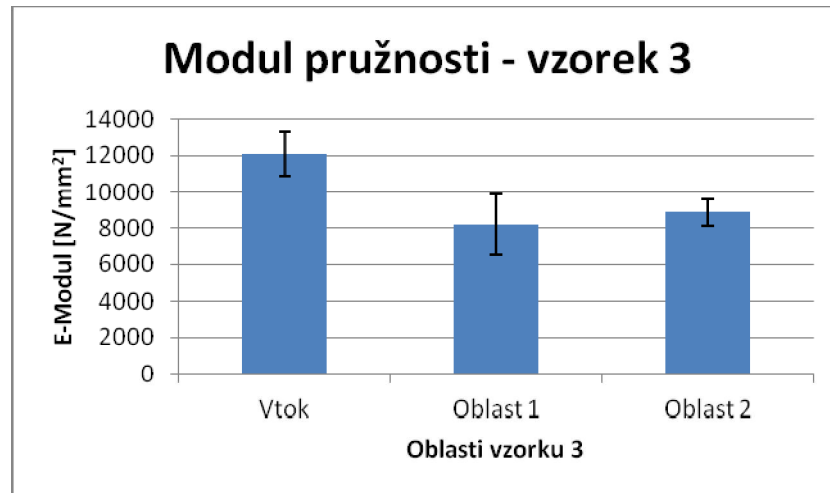
5.5.1 Naměřené hodnoty po tahové zkoušce

Tab. 23. Naměřené hodnoty po tahové zkoušce v oblastech vzorku 3

	R _m	s	V _x	E-Modul	s	V _x
	MPa			N/mm ²		
Vtok	105,72	21,93	20,75	12104,02	1196,57	9,89
Oblast 1	61,29	2,28	3,72	8220,36	1687,69	20,53
Oblast 2	61,72	7,1	11,5	8882,17	757,14	8,52



Obr. 65. Porovnání pevnosti R_m v tahu - vzorek 3



Obr. 66. Modul pružnosti E v tahu - vzorek 3

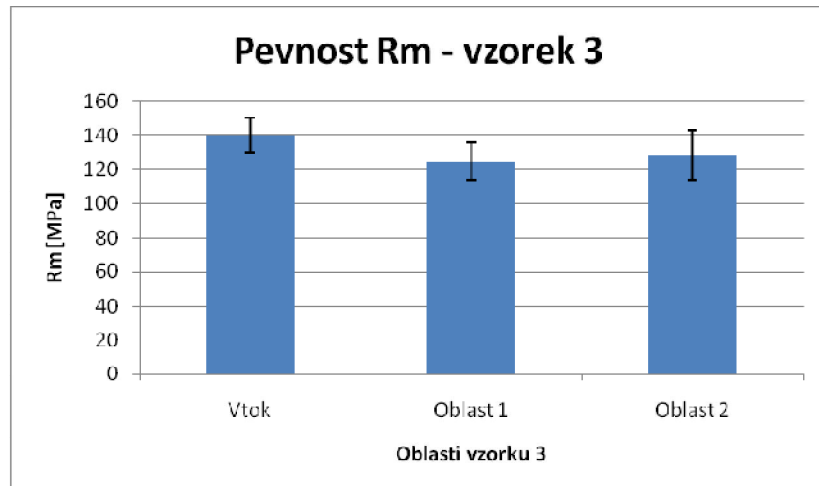
Nejmenší pevnost po tahové zkoušce byla naměřena v oblasti 1 (61,29 MPa). Maximální pevnost byla naměřená ve vtoku (105,72 MPa) a v oblasti 2 byla naměřena pevnost (61,72 MPa). Rozdíl mezi oblastí 1 a oblastí 2 je zanedbatelný.

Minimální hodnota modulu pružnosti po tahové zkoušce byla naměřena v oblasti 1 (8220,36 N/mm²), v oblasti 2 byla naměřená hodnota modulu pružnosti (8882,17 N/mm²). Maximální hodnota modulu pružnosti byla naměřena ve vtoku (12104,02 N/mm²).

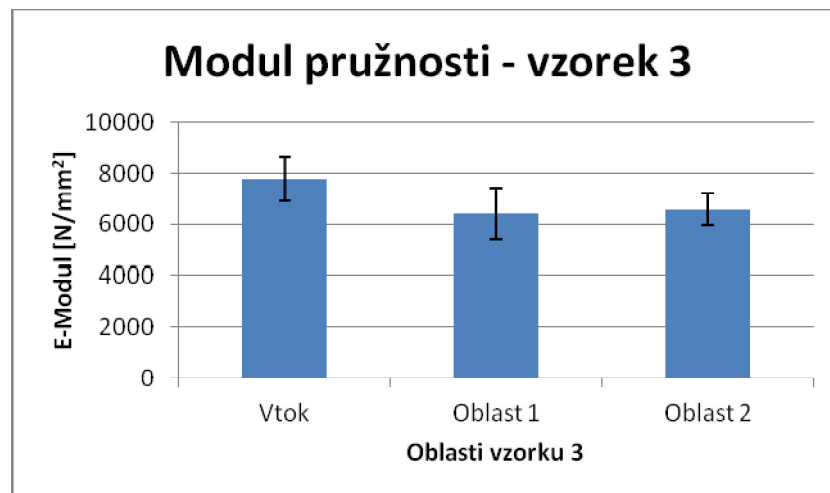
5.5.2 Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce

Tab. 24. Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce v oblastech vzorku 3

	R _m	s	V _x	E-Modul	s	V _x
	MPa			N/mm ²		
Vtok	139,76	10,3	7,37	7761,66	857,58	11,05
Oblast 1	124,81	10,95	8,78	6408,03	1002,44	15,64
Oblast 2	128,19	14,48	11,3	6579,27	632,15	9,61



Obr. 67. Porovnání pevnosti Rm v ohybu - vzorek 3



Obr. 68. Modul pružnosti v ohybu - vzorek 3

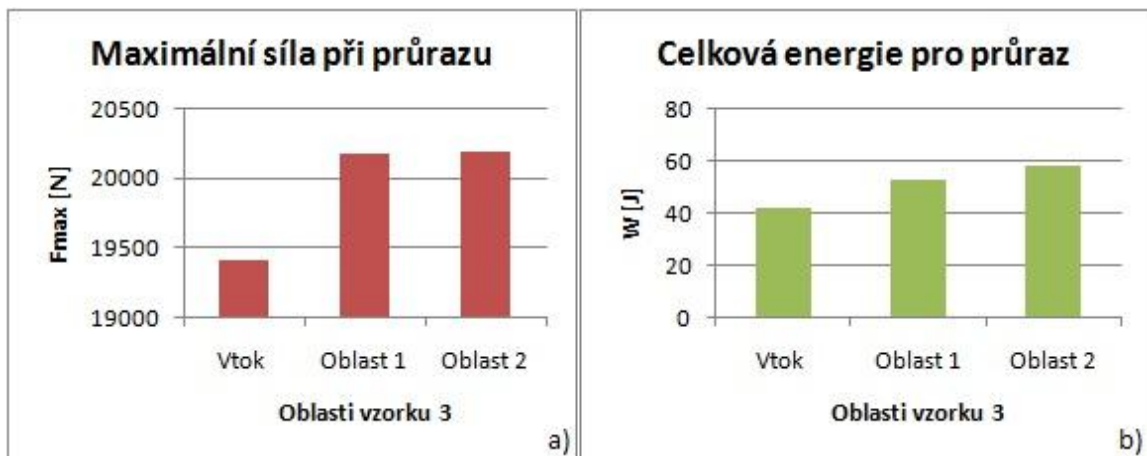
Nejmenší pevnost po ohybové zkoušce byla naměřena v oblasti 1 (124,81 MPa). Maximální pevnost byla naměřena ve vtoku (139,76 MPa) a v oblasti 2 byla naměřena pevnost (128,19 MPa).

Minimální hodnota modulu pružnosti po ohybové zkoušce byla naměřena v oblasti 1 (6408,03 N/mm²), v oblasti 2 byla naměřená hodnota modulu pružnosti (6579,27 N/mm²). Maximální hodnota modulu pružnosti byla naměřena ve vtoku (7761,66 N/mm²).

5.5.3 Naměřené hodnoty po rázové zkoušce

Tab. 25. Výsledky po rázové zkoušce

	Fmax	W	Závaží	Výška
	N	J	kg	mm
Vtok	19407,27	41,56	23,17	1056
Oblast 1	20177,51	52,9	23,17	1056
Oblast 2	20201,37	58,33	23,17	1056



Obr. 69.a) Maximální síla při průrazu, b) Celková energie pro průraz

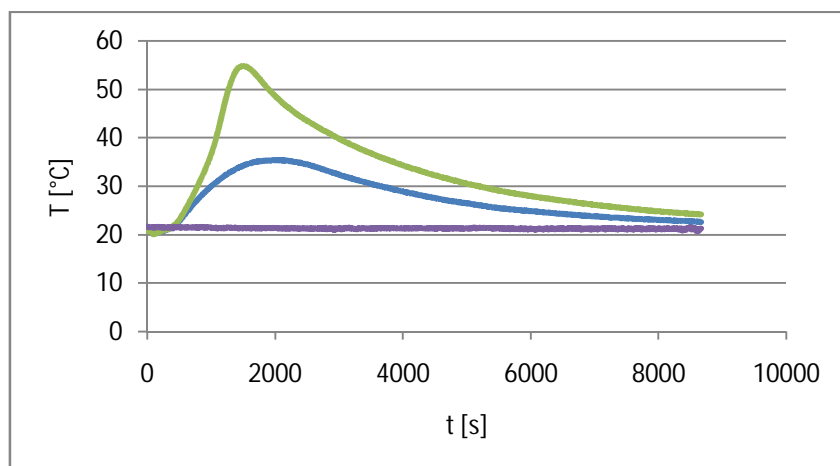
Po rázové zkoušce jsme zjistili, že maximální síla byla v oblasti 2 (20201,37 N), s nepatrným rozdílem byla síla při průrazu v oblasti 1 (20177,51 N). Nejmenší síla při průrazu byla ve vtoku (19407,27 N). Celková energie pro průraz byla největší v oblasti 2 (58,33 J) a nejmenší byla ve vtoku (41,56 J).

5.6 Vzorek 4

Postup výroby vzorku 4 je podle technologického postupu, který je popsán v tabulce 14. Rozdíl je jen v tom, že jsme měli možnost připojení termočlánku pro sledování teploty při vytvrzování. Složení vzorku 4 a použité materiály jsou popsány v tabulce 26.

Tab. 26. Složení vzorku 4

VZOREK 4	
Počet vrstev tkaniny	6 vrstev
Materiál tkaniny	Multiaxiální tkanina SAERTEX (980g/m ²)
Hmotnost tkaniny	960 g
Odrhová tkanina (Peel-Ply)	1 ks
Rozvodná síť (Green flow)	1 ks
Resintrak	1 ks
Vakuová fólie	1 ks
Pryskyřice	Polyesterová AROPOL G 105 E (1300g)
Tvrdidlo	Butanox 2% (26g)
Vakuová infuze 100%	ANO
Vakuová infuze 100% [min.]	5:00
Začátek gelace 100% [min.]	14:00



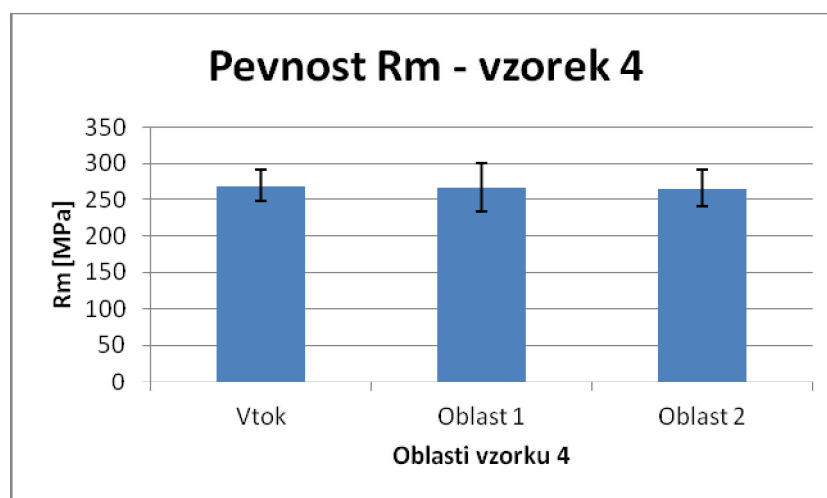
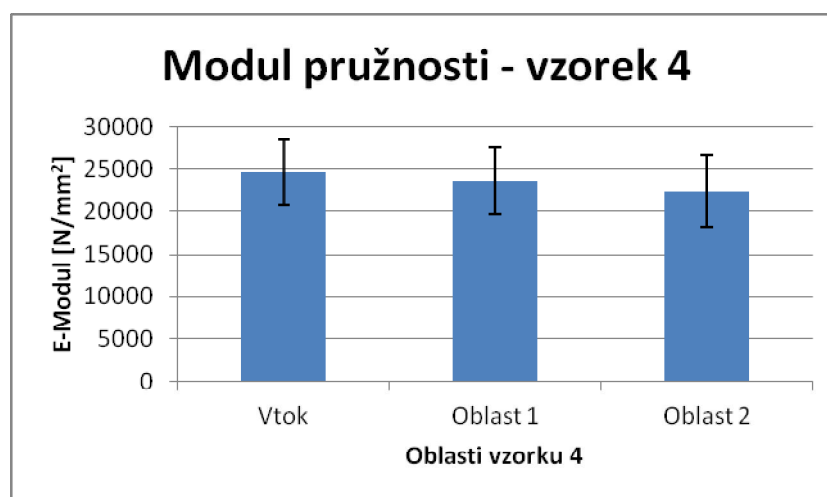
Obr. 70. Teplota při vytvrzování u vzorku 4 (---vtok, ----oblast 2, ----oblast 1)

U čtvrtého jsme také použily termočlánky pro sledování teploty. Termočlánek ve vtoku byl opět na povrchu, v oblasti 1 byl vložen na druhou vrstvu tkaniny a v oblasti 2 vložen na čtvrtou vrstvu tkaniny. Nejvyšší teplota byla zase ve vtoku 54 °C, v oblasti 2 byla teplota 35 °C a v oblasti 1 byla teplota 21 °C.

5.6.1 Naměřené hodnoty po tahové zkoušce

Tab. 27. Naměřené hodnoty po tahové zkoušce v oblastech vzorku 4

	R _m	s	V _x	E-Modul	s	V _x
	MPa			N/mm ²		
Vtok	269,23	21,62	8,03	24595,16	3806,83	15,48
Oblast 1	266,37	33,09	12,42	23631,79	3869,91	16,38
Oblast 2	265,6	25,15	9,47	22442,47	4201,68	18,72

Obr. 71. Porovnání pevnosti R_m v tahu - vzorek 4

Obr. 72. Modul pružnosti E v tahu - vzorek 4

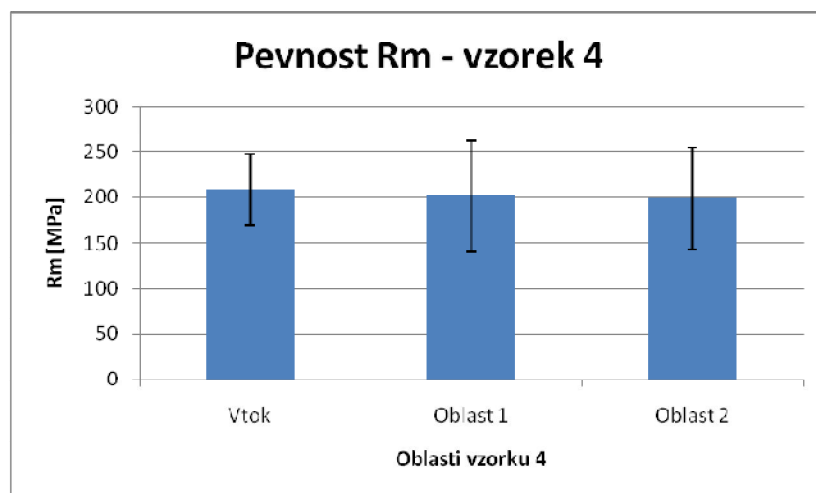
Maximální pevnost po tahové zkoušce byla dosažena ve vtoku (269,23 MPa). Jako druhá nejvyšší pevnost v tahu byla dosažena v oblasti 1 (266,37 MPa) a minimální pevnost byla dosažena v oblasti 2 (265,6 MPa).

Maximální hodnota modulu pružnosti po tahové zkoušce byla dosažena ve vtoku (24595,16 N/mm²). Nejmenší hodnota modulu pružnosti byla dosažena v oblasti 2 (22442,47 N/mm²). V oblasti 1 byla dosažena hodnota modulu pružnosti (23631,79 N/mm²).

5.6.2 Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce

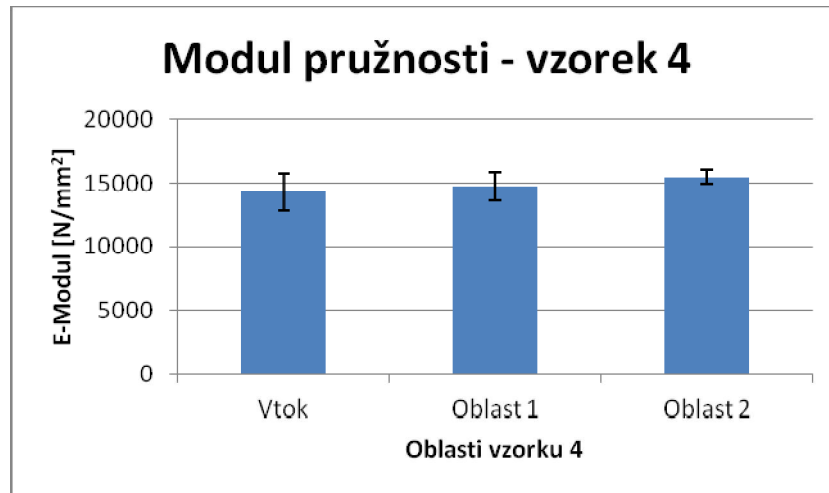
Tab. 28. Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce v oblastech vzorku 4

	R _m	s	V _x	E-Modul	s	V _x
	MPa			N/mm ²		
Vtok	208,37	39,01	18,72	14304,94	1436,86	10,04
Oblast 1	201,56	60,79	30,16	14765,54	1124,91	7,62
Oblast 2	199,13	56,06	28,15	15468,6	569,96	3,68



Obr. 73. Porovnání pevnosti R_m v ohybu - vzorek 4

Maximální pevnost po ohybové zkoušce byla dosažena ve vtoku (208,37 MPa), minimální pevnost byla dosažena v oblasti 2 (199,13 MPa). V oblasti 1 byla dosažena pevnost v ohybu (201,56 MPa).



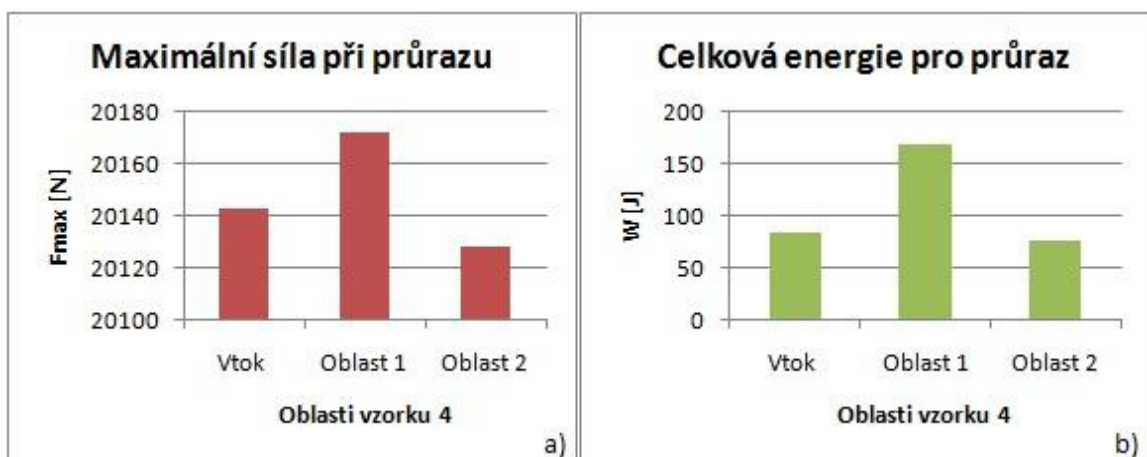
Obr. 74. Modul pružnosti E v ohybu - vzorek 4

Maximální hodnota modulu pružnosti po ohybové zkoušce byla dosažena v oblasti 2 ($15468,6 \text{ N/mm}^2$), minimální hodnota modulu pružnosti byla ve vtoku ($14304,94 \text{ N/mm}^2$). V oblasti 1 byla dosažena hodnota modulu pružnosti ($14765,54 \text{ N/mm}^2$).

5.6.3 Naměřené hodnoty po rázové zkoušce

Tab. 29. Výsledky po rázové zkoušce

	Fmax	W	Závaží	Výška
	N	J	kg	mm
Vtok	20142,56	83,74	23,17	1056
Oblast 1	20171,92	168,34	23,17	1056
Oblast 2	20128,06	75	23,17	1056



Obr. 75.a) Maximální síla při průrazu, b) Celková energie pro průraz

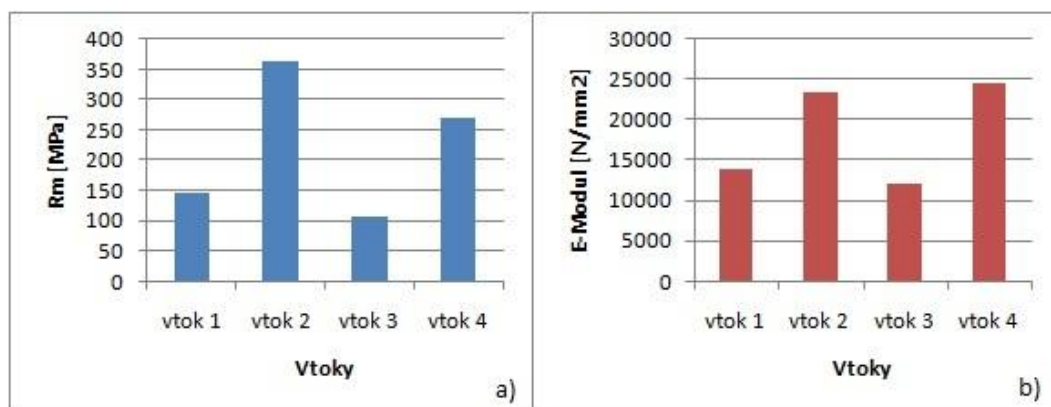
Rázová zkouška nám ukázala, že minimální síla při průrazu byla naměřena v oblasti 2 (20128,06 N), maximální síla při průrazu byla naměřena v oblasti 1 (20171,92 N). Ve vtoku byla naměřená síla (20142,56 N). Rozdíly všech sil v oblastech se minimálně liší.

Celková energie pro průraz byla jako nejnižší v oblasti 2 (75 J). Jako druhá nejvyšší energie byla naměřena ve vtoku (83,74 J), a nejvyšší celková energie pro průraz byla naměřena v oblasti 2 (168,34 J). Všechny vzorky byly proraženy.

6 DISKUSE VÝSLEDKŮ

V předchozí kapitole jsme popisovali přípravu vzorků, na kterých jsme provedli mechanické zkoušky na tah, ohybovou zkoušku a rázovou zkoušku. Výsledky naměřených hodnot byly zaznamenány do tabulek a následně zobrazeny v grafech pro lepší orientaci ve výsledcích. Vyrobili jsme čtyři vzorky, které jsme rozdělili na tři oblasti. V předchozí kapitole jsme porovnávali jednotlivé oblasti každého vzorku. V této kapitole porovnáme a vyhodnotíme vzorkové desky mezi sebou, protože desky byly vyrobeny s rozdílnou vrstvou skelné tkaniny a použita různá pryskyřice. Zde zjistíme, jestli má na lepší mechanické vlastnosti vyšší vliv tkanina nebo pryskyřice. Protože jsme desky měli rozděleny na tři oblasti, pro vzájemné porovnání vyrobených desek vybereme jen jednu oblast. Pro porovnání desek jsme vybrali oblast vtoku, kde byly naměřené hodnoty co se týká pevnosti, nejvyšší.

6.1 Vyhodnocení tahové zkoušky



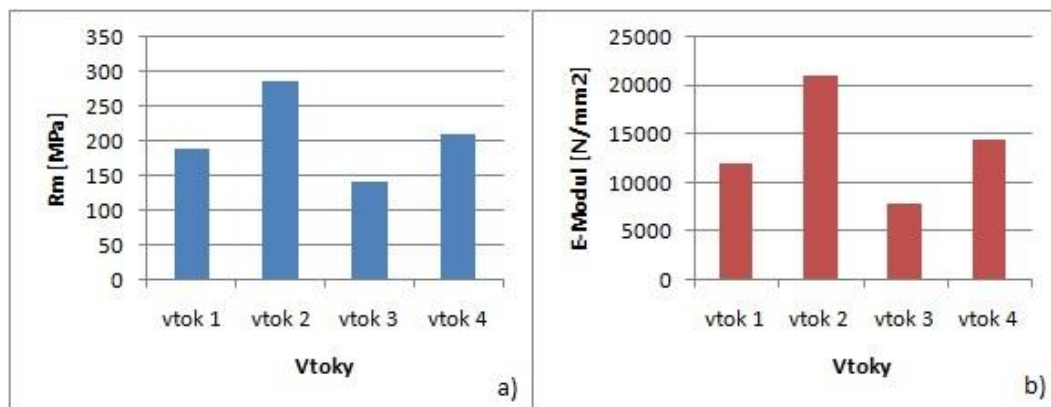
Obr. 76. a) Pevnost po tahové zkoušce mezi vtoky, b) Modul pružnosti po tahové zkoušce mezi vtoky jednotlivých desek

Pro porovnání desek jsme vybrali oblast vtoku, protože zde byly naměřeny nejvyšší hodnoty pro pevnost. A to díky tomu, že v oblasti vtoku byla vždy vyvolána nejvyšší teplota. Čím je vyšší teplota, tím je lepší vytvrzení a potom i vyšší mechanické vlastnosti. Nejvyšší pevnost v tahu měl vtok 2 (363,72 MPa). Druhá nejvyšší hodnota byla naměřena u vtoku 4 (269,23 MPa). Tyto vzorky měly vtok vložený ve středu desky. Na třetím místě byl vtok 1 (145,77 MPa), u této desky byl vtok vložený na kraji desky. Nejmenší hodnotu

pevnosti v tahu měl vtok 3 (105,72 MPa), zde byl vtok vložen ve středu desky. Vše máme graficky znázorněné na obrázku 76a.

Maximální hodnota modulu pružnosti byla naměřena ve vtoku 4 (24595,16 N/mm²), hned za ním zaostává s malým rozdílem vtok 2 (23331,78 N/mm²). Jako třetí nejvyšší hodnota modulu pružnosti byla naměřena ve vtoku 1 (13836,34 N/mm²). Nejmenší hodnotu jsme naměřili ve vtoku 3 (12104,02 N/mm²), všechny hodnoty můžeme vidět na obrázku 76b.

6.2 Vyhodnocení ohybové zkoušky



Obr. 77. a) Pevnost po ohybové zkoušce mezi vtoky, b) Modul pružnosti po ohybové zkoušce mezi vtoky jednotlivých desek

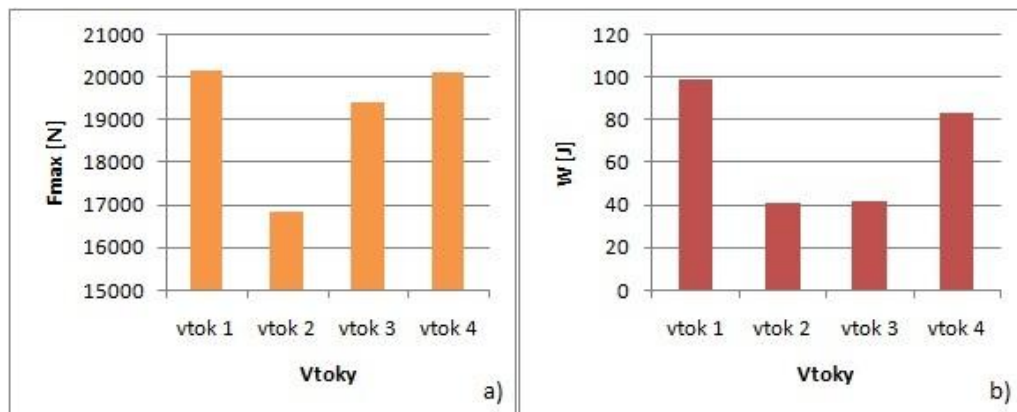
Zde jsme prováděli tříbodový ohyb. Výsledky na pevnost v ohybu neboli pořadí bylo stejné jako u tahové zkoušky. Nejvyšší hodnotu pevnosti jsme dosáhli ve vtoku 2 (286,14 MPa), druhá nejvyšší hodnota pevnosti byla dosažena ve vtoku 4 (208,37 MPa). Další v pořadí jsme dosáhli hodnoty pevnosti ve vtoku 1 (188,86 MPa) a jako nejnižší dosažená hodnota pevnosti v ohybu byla v vtoku 3 (139,76 MPa), vše je patrné na obrázku 77a.

Maximální hodnota modulu pružnosti po ohybové zkoušce je nejvyšší ve vtoku 2 (21015,37 N/mm²), druhá nejvyšší hodnota byla dosažena ve vtoku 4 (14304,94 N/mm²). Jako třetí hodnota modulu pružnosti byla dosažena ve vtoku 1 (12018,54 N/mm²), nejnižší hodnota byla dosažena ve vtoku 3 (7761,66 N/mm²), ukazuje obrázek 77b.

Tahová zkouška a ohybová zkouška nám ukázala, že nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu a ohybu nezávisí jen na počtu vrstev multiaxiální tkaniny, ale i na výběru vhodné pryskyřice. Výsledky ukázaly, že nejvyšší pevnost byla dosažena u vzorku 2, když u vzorku bylo

použito jen pět vrstev výztuže multiaxiální tkaniny. Ani teplota při prosycování a při vytvrzování nebyla nejvyšší, teplota přesahovala lehce 30 °C. U tohoto vzorku byla použita pryskyřice NORPOL 420-100. Druhé nejvyšší mechanické vlastnosti byly dosaženy u vzorku 4, která měla šest vrstev multiaxiální tkaniny a byla použita pryskyřice AROPOL G105 E. Jako třetí nejvyšší pevnost byla dosažena u prvního vzorku, kde bylo použito osm vrstev multiaxiální tkaniny a pryskyřice AROPOL G105 E. Poslední dopadl vzorek třetí, kde bylo použito pět vrstev multiaxiální tkaniny a pryskyřice AROPOL G105 E.

6.3 Vyhodnocení rázové zkoušky



Obr. 78. a) Maximální síla při průrazu mezi vtoky, b) Celková energie pro průraz mezi vtoky jednotlivých desek

Rázová zkouška nám poskytla informace o celkovém množství energie a maximální síle, která je potřebná k proražení námi vyrobené desky. Při rázové zkoušce došlo k proražení všech desek. Maximální síla při průrazu byla dosažena ve vtoku 1 (20154,38 N) a ve vtoku 4 (20142,56 N). Rozdíl těchto sil byl minimální. S velkým rozdílem nejnižší hodnotu síly měl vtok 2 (16827,18 N).

Celková energie potřebná pro průraz byla naměřena ve vtoku 1 (98,76 J), nejmenší celková energie byla naměřena ve vtoku 2 (40,47 J) a ve vtoku 3 (41,56 J). Rázová zkouška nám ukázala, že i když konstrukce desky vykazuje u předešlých zkoušek horší hodnoty, u rázové zkoušky to může být naopak.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá studiem mechanických vlastností a teploty při prosycování a vytvrzování kompozitních materiálů vyrobených vakuovou infuzí pod pružnou fólií. V experimentální části jsme vyrobili čtyři vzorky, na nich jsme sledovali teplotu a později vykonali mechanické zkoušky (tahovou, ohybovou a rázovou). Na výrobu byla použita multiaxiální tkanina SAERTEX a dvě pryskyřice AROPOL G105 E a NORPOL 420-100.

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšší pevnost po tahové a ohybové zkoušce byla dosažena u vzorku 2, a to i když měl jen pět vrstev výztuže, kde byla použita pryskyřice NORPOL 420-100. Druhá nejvyšší hodnota pevnosti byla dosažena u vzorku 4. Zde bylo použito šest vrstev výztuže a použita pryskyřice AROPOL G105 E. Jako třetí nejvyšší pevnost byla dosažena u vzorku 1, kde bylo užito osm vrstev a použita pryskyřice AROPOL G105 E. Nejnižší hodnotu pevnosti jsme dosáhli u vzorku 3, kde bylo použito jen pět vrstev výztuže a pryskyřice AROPOL G105 E.

Tyto výsledky nám ukázaly, že dobré mechanické vlastnosti nezávisí jen na počtu vrstev výztuže, ale i na volbě pryskyřice. V našem případě se ukázalo, že NORPOL 420-100 je mnohem kvalitnější než AROPOL G105 E. Rázová zkouška nám ukázala, že i když vzorky měly dobré pevnostní vlastnosti, po předešlých zkouškách u rázové zkoušky to bylo naopak. Díky tomu nám rázová zkouška určí, který materiál je houževnatý a který křehký.

Velký vliv na mechanické vlastnosti má také teplota. Každá pryskyřice má teplotu danou od výrobce vytvrzováním. Tato teplota se nesmí překročit. V případě jejího překročení by mohlo dojít ke zhoršení vlastností výrobků.

Vakuová infuze je technologie, která je vhodná pro rozměrné výrobky a pro malosériovou výrobu, protože je potřeba mnoho pomocných materiálů. Důležitou věcí u vakuové infuze je volba vtoku. K tomu nám může pomoci simulace vakuového procesu. Simulace infuzního procesu má ve fázi technologické přípravy výroby obrovský význam. Hlavně v případě tvarově složitějších výrobků umožňuje optimalizovat vtokový systém. Jde o simulaci infuzního technologického procesu pomocí metody konečných prvků. Na simulaci můžeme použít dvě metody aplikace RTM-Worx a PAM-RTM. Tyto metody ušetří čas a finance.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL, 1988.
- [2] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály: Druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [3] DOHNALÍK, Zdeněk a Anežka LENGÁLOVÁ. *Technológia: pre 2. a 3. ročník stredných odborných učilišť učebný odbor gumár-plastikár*. Bratislava: Alfa, 1988.
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: SCIENTIA, 2006. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu - 4. část: Polymery a kompozity s polymerní matricí*. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [6] MLEZIVA, Jozef a kol. *Polyestery: Jejich výroba a zpracování*. Vyd. 2. Praha: SNTL, 1978.
- [7] PLUHAŘ, Jaroslav a kol. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989.
- [8] RAAB, Miroslav. *Materiály a člověk: Netradiční úvod do současné materiálové vědy*. Praha: Encyklopedický dům, 1999. ISBN 80-86044-13-0.
- [9] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.

Internetové zdroje:

- [10] Stefanmichna.com. *Fakulta výrobních technologií a managementu* [online]. 2007 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf
- [11] Ateam.zcu.cz. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: http://ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
- [12] Ime.fme.vutbr.cz. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM/11-BUM.ppt>

- [13] KOŘÍNEK, Zdeněk. Volny.cz. *Kompozity* [online]. 2010 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [14] KOŘÍNEK, Zdeněk. Volny.cz. *Kompozity* [online]. 2010 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf>
- [15] Carbonmax.cz. *Carbonmax* [online]. 2007 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.carbonmax.cz/zpracovani-uhlikovych-vlaken.html>
- [16] Ellri.cz. *Ellri* [online]. 2002 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: http://www.ellri.cz/vyroba_na_zakazku/infuze.htm
- [17] Gurit.com. *Gurit* [online]. 2012 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: [http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites\(1\).pdf](http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites(1).pdf)
- [18] Havel-composites.com. *Havel composites* [online]. 2010 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [19] History-of-armor.com. *History of armor* [online]. 2011 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.history-of-armor.com/KevlarArmor.html>
- [20] Lbie.com. *Lbie* [online]. 2012 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.lbie.com/cfm.htm>
- [21] Polyglass.cz. *Polyglass* [online]. 1993-2009 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.polyglass.cz/obchod/roving.htm>
- [22] Polyglass.cz. *Polyglass* [online]. 1993-2009 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.polyglass.cz/obchod/sklotkaniny.htm>
- [23] Prefa-kompozity.cz. *Prefa kompozity* [online]. 2011 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby-tazenych-profilu-prefen>
- [24] Protetika-ortho-aktiv.cz. *Streifeneder* [online]. 2012 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.protetika-ortho-aktiv.cz/produkty/materialy/kompozitni-materialy/carbonfaser-pre-preg-11c1.html>
- [25] Technologie.specwar.info. *Specwar.info* [online]. 2006-2011 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://technologie.specwar.info/kevlar/>

-
- [26] Airtech.lu. *Airtech Europe Sarl* [online]. 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://catalogue.airtech.lu/index.php?lang=EN>
- [27] Wikipedia.cz. *Wikipedie* [online]. 2012 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Juta>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MMC	Kovová matrice (Metal Matrix Composites)
CMC	Keramická matrice (Ceramic Matrix Composites)
PMC	Polymerní matrice (Polymer Matrix Composites)
VOC	Těkavé organické látky (Volatile Organic Compounds)
GF	Skelná tkanina (Glass Fiber)
Gelcoat	Formovaná povrchová vrstva
UP-R	Nenasycené polyestery
VE-R	Vinilesterové pryskyřice
EP-R	Epoxidové pryskyřice
VIP-R	Epoxidové pryskyřice pro vakuovou infuzi
PE	Polyethylen
PA	Polyamid
PA66	Polyamid 66
RTM	Resin Transfer Moulding
E	Modul pružnosti
T	Teplota
T_g	Teplota skelného přechodu
R _m	Pevnost
S	Směrodatná odchylka
V_x	Variační koeficient
SV _{DSC}	Stupeň vytvrzení stanovené metodou DSC
ρ	Hustota
PAN	Polyakrylonitril
n_m	Poissonovo číslo

ČSN	Česká technická norma
ISO	International Standard Organisation
F _{max}	Maximální síla při průrazu
W	Celková energie pro průraz

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Synergický efekt kompozitů [10]	14
Obr. 2. Tahový diagram matrice a kompozitu [10].....	15
Obr. 3. Jevy na rozhraní matrice – vlákno [11]	16
Obr. 4. Rozdělení kompozitních materiálů [11]	16
Obr. 5. Různé uspořádání vláken [12].....	19
Obr. 6. Sekané vlákno [21]	20
Obr. 7. Rovingová tkanina [22]	21
Obr. 8. Rohože [20]	21
Obr. 9. Uhlíkové kompozitní vlákno Prepreg [24].....	22
Obr. 10. Výroba skleněných vláken [13].....	23
Obr. 11. Výroba aramidových vláken [13].....	24
Obr. 12. Uhlíkové vlákno [15].....	25
Obr. 13. Výroba uhlíkových vláken – PAN [13]	26
Obr. 14. Jutová tkanina [27]	27
Obr. 15. Kevlarová tkanina [19]	28
Obr. 16. Závislost teploty T_g na stupni vytvrzení [4].....	34
Obr. 17. Určování vzestupu teploty v průběhu vytvrzování [4]	35
Obr. 18. Ruční laminace [17].....	36
Obr. 19. Stříkaní [17]	37
Obr. 20. Pultruze [23].....	40
Obr. 21. RTM [17]	41
Obr. 22. Vakuová infuze [16]	46
Obr. 23. Vakuová fólie [26].....	48
Obr. 24. Odtrhová tkanina [26].....	49
Obr. 25. Greenflow [26]	49
Obr. 26. Resiflow [26]	49
Obr. 27. Rozváděcí kanál firmy Airtech [26]	50
Obr. 28. Těsnící páska (žlutá) AT-200Y [26].....	51
Obr. 29. a) přívodní hadice, b) spirálová hadice [26]	51
Obr. 30. RIC konektor [26].....	52
Obr. 31. Fixační lepidlo [26]	53
Obr. 32. Vakuová pumpa (vývěva) [26].....	53
Obr. 33. Rezervoár Airtech RB451 [26].....	54
Obr. 34. Měřidlo podtlaku [26].....	55

Obr. 35. Trhačka Zwick 1456.....	55
Obr. 36. Zwick/Roell HIT 230F.....	57
Obr. 37. Zkušební tělísko na tah.....	61
Obr. 38. Zkušební tělísko na ohyb.....	61
Obr. 39. Zkušební tělísko na rázovou zkoušku.....	62
Obr. 40. Forma pro výrobu vzorků.....	63
Obr. 41. Čistící pasta MOLD RELEASE.....	63
Obr. 42. Detail vyleštěné formy.....	64
Obr. 43. Jedna vrstva tkaniny.....	64
Obr. 44. Tkanina položena ve formě.....	65
Obr. 45. Spojení spirálové hadice s L a T kolínky.....	65
Obr. 46. Pohled na odtrhovou tkaninu.....	66
Obr. 47. Položení Greenflow, Resintrak a RIC konektoru.....	67
Obr. 48. Pohled na uzavřenou formu pružnou vakuovou fólií.....	68
Obr. 49. Pohled na prosycený vzorek.....	69
Obr. 50. Deska připravena na vyřezání tělísek.....	70
Obr. 51. Rozdělení desky.....	70
Obr. 52. Porovnání pevnosti R_m v tahu - vzorek 1.....	71
Obr. 53. Modul pružnosti E v tahu - vzorek 1.....	71
Obr. 54. Porovnání pevnosti R_m v ohybu - vzorek 1.....	72
Obr. 55. Modul pružnosti E v ohybu - vzorek 1.....	73
Obr. 56.a) Maximální síla průrazu,b) Celková energie pro průraz.....	73
Obr. 57. Rozdělení desky 2, 3 a 4.....	75
Obr. 58. Teplota při vytvrzování u vzorku 2 (----vtok, ---- oblast 1, ----oblast 2).....	75
Obr. 59. Porovnání pevnosti R_m v tahu - vzorek 2.....	76
Obr. 60. Modul pružnosti E v tahu - vzorek 2.....	76
Obr. 61. Porovnání pevnosti R_m v ohybu - vzorek 2.....	77
Obr. 62. Modul pružnosti E v ohybu - vzorek 2.....	78
Obr. 63.a) Maximální síla při průrazu,b) Celková energie pro průraz.....	78
Obr. 64. Teplota při vytvrzování u vzorku 3 (----vtok, ----oblast 1, ----oblast 2).....	80
Obr. 65. Porovnání pevnosti R_m v tahu - vzorek 3.....	80
Obr. 66. Modul pružnosti E v tahu - vzorek 3.....	81
Obr. 67. Porovnání pevnosti R_m v ohybu - vzorek 3.....	82

Obr. 68. Modul pružnosti v ohybu - vzorek 3.....	82
Obr. 69.a) Maximální síla při průrazu,b) Celková energie pro průraz.....	83
Obr. 70. Teplota při vytvrzování u vzorku 4 (----vtok, ----oblast 2, ----oblast 1).....	84
Obr. 71. Porovnání pevnosti R_m v tahu - vzorek 4.....	85
Obr. 72. Modul pružnosti E v tahu - vzorek 4.....	85
Obr. 73. Porovnání pevnosti R_m v ohybu - vzorek 4.....	86
Obr. 74. Modul pružnosti E v ohybu - vzorek 4.....	87
Obr. 75.a) Maximální síla při průrazu,b) Celková energie pro průraz.....	87
Obr. 76. a) Pevnost po tahové zkoušce mezi vtoky, b) Modul pružnosti po tahové zkoušce mezi vtoky jednotlivých desek.....	89
Obr. 77. a) Pevnost po ohybové zkoušce mezi vtoky, b) Modul pružnosti po ohybové zkoušce mezi vtoky jednotlivých desek.....	90
Obr. 78. a) Maximální síla při průrazu mezi vtoky, b) Celková energie pro průraz mezi vtoky jednotlivých desek.....	91

Seznam tabulek

Tab. 1. Vlastnosti různých druhů vláken [12]	20
Tab. 2. Vlastnosti různých druhů pryskyřic [12]	30
Tab. 3. Vybrané vlastnosti vakuové fólie	47
Tab. 4. Vybrané vlastnosti odtahové tkaniny	48
Tab. 5. Vlastnosti Resintraku od firmy Airtech.....	50
Tab. 6. Typy konektorů firmy Airtech	52
Tab. 7. Rozměry rezervoáru Airtech RB451	54
Tab. 8. Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice AROPOL G 105 E [P I]	58
Tab. 9. Vlastnosti vytvrzené pryskyřice AROPOL G 105 E [P I].....	59
Tab. 10. Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice NORPOL 420-100 [P II]	59
Tab. 11. Vlastnosti vytvrzené pryskyřice NORPOL 420-100 [P II].....	60
Tab. 12. Vlastnosti skelné tkaniny SAERTEX [P III]	60
Tab. 13. Složení vzorku 1	62
Tab. 14. Technologický postup výroby vzorků	69
Tab. 15. Naměřené hodnoty po tahové zkoušce v oblastech vzorku 1	71
Tab. 16. Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce v oblastech vzorku 1	72
Tab. 17. Výsledky po rázové zkoušce.....	73
Tab. 18. Složení vzorku 2.....	74
Tab. 19. Naměřené hodnoty po tahové zkoušce v oblastech vzorku 2	76
Tab. 20. Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce v oblastech vzorku 2	77
Tab. 21. Výsledky po rázové zkoušce.....	78
Tab. 22. Složení vzorku 3.....	79
Tab. 23. Naměřené hodnoty po tahové zkoušce v oblastech vzorku 3	80
Tab. 24. Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce v oblastech vzorku 3	81
Tab. 25. Výsledky po rázové zkoušce.....	83
Tab. 26. Složení vzorku 4.....	84
Tab. 27. Naměřené hodnoty po tahové zkoušce v oblastech vzorku 4	85
Tab. 28. Naměřené hodnoty po ohybové zkoušce v oblastech vzorku 4	86
Tab. 29. Výsledky po rázové zkoušce.....	87

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I – Materiálový list pryskyřice AROPOL G105 E

PŘÍLOHA P II – Materiálový list pryskyřice NORPOL 420-100

PŘÍLOHA P III – Materiálový list multiaxiální tkaniny SAERTEX

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST AROPOL G105 E

Ashland Composite Polymers

AROPOL

Technický list
CPD 22072002
Bezpečnostní list skupina "R1001"

AROPOL™ G 105 E

POPIS VÝROBKU

AROPOL G 105 E je netixotropní, předurychlená, nízkoviskozní, nenasyčená polyesterová pryskyřice na bázi ortoftalové kyseliny.

APLIKACE

Pryskyřice AROPOL G 105 E je zejména doporučována pro vstřikování do formy a tvarování ve formě za studena.

Při výrobě laminátů silnějších než 7 mm se doporučuje použít 1,3% Trigonoxu 75. Doba želatiny je totožná jako při použití 1% MEK peroxidu avšak s nižší exothermou.

Pro dosažení velmi rychlého vytvrzení tenkých laminátů lze z poloviny nebo úplně nahradit MEK peroxid AAP - acetyl aceton peroxidem, např. Trigonox 44B.

VLASTNOSTI

Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice AROPOL G 105 E	Nominální hodnota	Jednotka	Zkušební metoda
Číslo kyselosti	19	mg KOH/g	ISO 2114
Viskozita při teplotě 23°C Brookfield (RVT, sp2, 10 rpm)	180	mPas	ISO 2555
Viskozita při teplotě 23°C Cone & Plate	180	mPas	ISO 2884
Obsah styrenu	41	%	SFS 4864
Hustota	1,1	kg/dm ³	ISO 2811
Doba želatiny při 23°C (1% MEK-peroxid)	13	min.	INTERNÍ D006
Vrchol exothermy při 23°C (1% MEK-peroxid)	120	°C	INTERNÍ D006

Vlastnosti vytvrzené pryskyřice AROPOL G 105 E	Nominální hodnota	Jednotka	Zkušební metoda
Tvrdość	45	Barcol	ASTM D2583
Tvarová stálost za tepla (HDT; 1,81 MPa)	66	°C	ISO 75 Metoda A
Pevnost v ohybu	90	MPa	ISO 178
Modul pružnosti v ohybu	4 100	MPa	ISO 178
Pevnost v tahu	55	MPa	ISO 527
Modul pružnosti v tahu	3 600	MPa	ISO 527
Prodloužení při přetržení	2,0	%	ISO 527
Absorpce vody			
24 hod (vzorek 50x50x4mm)	19	mg/vzorek	ISO 62-80
28 dní (vzorek 50x50x4mm)	90	mg/vzorek	ISO 62-80

OSVĚDČENÍ A SCHVÁLENÍ

Pryskyřice AROPOL G 105 E je schválena společností Lloyd's Register a Det Norske Veritas pro stavbu člunů.

MANIPULACE A POUŽITÍ

Materiál doporučujeme skladovat při stabilní teplotě do 20°C ve vnitřních prostorech, mimo dosah přímého slunečního záření. Delší skladování nebo skladování za jiných, než doporučených podmínek, může ovlivnit vlastnosti nevytvrzené pryskyřice, např. viskozitu, dobu želatinace. Před použitím doporučujeme pryskyřici řádně promíchat. Doba skladování pryskyřice AROPOL G 105 E je šest (6) měsíců.

K tomuto výrobku je přiřazen Bezpečnostní list třída "R1001". Uživatel je zodpovědný za seznámení se s bezpečnostními instrukcemi a instrukcemi pro manipulaci před použitím výrobku.

OSVĚDČENÍ O KVALITĚ

Výrobky jsou vyráběny a distribuovány firmou Ashland Finland Oy plně v souladu se systémem řízení jakosti a požadavky norem ISO 9001 (2000), ISO 14001 (1996) a normy pro ochranu zdraví a bezpečnost práce OHSAS (1999). Systém je certifikován firmou Det Norske Veritas.

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST NORPOL 420-100

Technický informační list NORPOL 420-100

POPIS

NORPOL 420-100 je středně reaktivní, orthoftalová polyesterová pryskyřice pro injekční vstřikování.

NORPOL 420-100 neobsahuje urychlovač a není thixotropizována.

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI V KAPALNÉM STAVU PŘI 23°C

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Zkušební metoda
Viskozita			
-Kužel-Deska	180-210	mPa.s(cP)	ISO 2884-1974
Hustota	1,10	g/cm ³	ISO 2811-1974
Číslo kyselosti	22	mg KOH/g	ISO 2114-1974
Obsah styrenu	43±2	% hm.	-
Bod vzplanutí	34	°C	ASTM D 3278-73
Doba želatinace :			
-1% Norpol 1			
-1% Co urychlovač(1%)	20-30	min.	-
Skladovatelnost	6	měsíce při teplotě do 23°C	

VLASTNOSTI VÝROBKU VE VYTVRZENÉM STAVU

Vlastnost	Čistá prys.	Skleněná rohož		Jednotka	Zkušební metoda
Obsah skla	-	25-35	35-40	% hm.	ISO 1172-1975
Pevnost v tahu	70	110	160	MPa	ISO 527-1993
E-modul v tahu	3700	8000	10300	MPa	ISO 527-1993
Protažení	3,5	2,0	2,2	%	ISO 527-1993
Tvarová stálost za tepla	67	-	-	°C	ISO 75-1993
Pevnost v ohybu	140	155	215	MPa	ISO 178-1993
E-modul v ohybu	3600	7200	10000	MPa	ISO 178-1993
Rázová houževnatost	12	-	-	mJ/mm ²	ISO 179-1982

Hodnoty uvedené v tabulce byly dosaženy na laminátu vystuženém standardní práškově pojenou rohoží, ruční laminací aby se dosáhlo hodnot, srovnatelných s ostatními typy polyesterových pryskyřic.

Bezpečnostní údaje

Vše je uvedeno v Bezpečnostním listě, se kterým je nutno se před prvním použitím výrobku seznámit.

Označení nebezpečí

Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou označovány jako **X_n** – **Zdraví škodlivý**.

POZNÁMKA

Údaje v tomto informačním listu byly získány laboratorními zkouškami v technickém odboru Jotun Polymer A/S. Všechny grafy jsou na bázi průměrných hodnot s rozptylem přibližně +10%. Uvedené informace jsou podle našeho nejlepšího vědomí správné a mají sloužit jako vodítko pro uživatele, nezakládají však žádnou právní zodpovědnost.

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST TKANINA SAERTEX



SAERTEX® GmbH & Co. KG

Brochterbecker Damm 52

D-48369 Saerbeck

phone: ++49/2574/902-0

fax: ++49/2574/902-209

e-mail: info@saertex.com

DATASHEET

STYLE NO.

S32EX010-00980-01270-283000

DESCRIPTION OF STYLE

BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC

CONSTRUCTION	AREAL-WEIGHT [g/m ²]	TOLERANCE [+/-%]	MATERIAL	LINEAR DENSITY tex
-45°	476	5	E-Glass	900
90°	29	5	E-Glass	300
+45°	476	5	E-Glass	900
STITCHING:	6	5	PES 76 dtex	

BINDER: Warp

GAUGES: 5

WIDTH: 1270

mm or in tapes

TOTAL AREAL WEIGHT: 988

g/m²

TOTAL TOLERANCE: 5,0

%

Threads of stabilization in 0° (E-Glass 34tex)