



Vláknenné materiály v konstrukci lyže

Bakalářská práce

Studijní program: B3107 – Textil

Studijní obor: 3106R016 – Textilní technologie, materiály a nanomateriály

Autor práce: **Jiří Magál**

Vedoucí práce: prof. RNDr. David Lukáš, CSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering ■

Fibrous materials in the construction of ski

Bachelor thesis

Study programme: B3107 – Textil

Study branch: 3106R016 – Textile Technologies, Materials and Nanomaterials

Author: **Jiří Magál**

Supervisor: prof. RNDr. David Lukáš, CSc.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří Magál**
Osobní číslo: **T14000407**
Studijní program: **B3107 Textil**
Studijní obor: **Textilní technologie, materiály a nanomateriály**
Název tématu: **Vláknenné materiály v konstrukci lyže**
Zadávací katedra: **Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedte literární průzkum.
2. Navrhněte postup výroby vzorku pro testování pevnosti(delaminace) skleněných pásů používaných jako výztuž lyže.
3. Navrhněte testy vyrobených skleněných pásů vytvrzených epoxidovou pryskyřicí obsahující nanovláknna.
4. Provedené experimenty a jejich výsledky komentujte/diskutujte.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **40-60 dle potřeby**

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

Seznam odborné literatury:

1. Routledge Handbook of Sports Technology and Engineering, Edited by: Franz Konstantin Fuss, Aleksandar Subic, Martin Strangwood, Rabindra Mehta, Print ISBN: 9780415580458.

2. Bhagwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman, Vláknové kompozity, DT 531.8:677.499.004.12P075.8), Typové číslo: L13-C3-IV-41f/28935, Vydání první Praha 1987

Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. David Lukáš, CSc.**

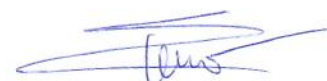
Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání bakalářské práce: **13. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **4. května 2018**



Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka



prof. RNDr. David Lukáš, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 13. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.


Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 26.4.2018

Podpis: 

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce panu Prof. RNDr. Davidu Lukášovi CSc., za neocenitelné rady, připomínky, odborné vedení a trpělivost při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Kunderovi za možnost vyrobit skelné pásky v jeho provozovně. Petr Kundera byl současně můj konzultant a poskytl mi odborné rady ohledně materiálů použitých v konstrukci lyže. A také bych rád poděkoval firmě Sporten za ukázkou a prohlídku výroby lyží.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá konstrukcí lyží a zejména delaminací skelných pásků použitých v konstrukci lyže. Cílem práce bylo provést literární průzkum a po té navrhnout postup výroby vzorku pro testování delaminace skelných pásků používaných jako výztuž lyže. Dále pak navrhnout testy vyrobených skelných pásků vytvrzených epoxidovou pryskyřicí obsahující nanovlákná v podobě uhlíkových nanotrubic. Na závěr jsou uvedeny experimenty a jejich výsledky. Potřebné informace jsem čerpal z monografie zabývající se vlákennými materiály, delaminací a monografií zabývající se vývojem sportovní technologie. Na základě těchto monografií a po konzultacích jsem navrhl postup výroby vzorků a jejich způsob testování delaminací. Práce obsahuje rozbor delaminačních testů několika vzorků. Popsány jsou materiály, které byly pro výrobu skelných pásků použity a dále je popsána delaminace těchto vzorků. Delaminační odolnost zkoušených materiálů se shodně zlepšila jak u prvního testu Insert, tak i u následného testu Pre-crack kdy došlo k 1,5-násobnému zvýšení odolnosti po přidání uhlíkových nanotrubic do pryskyřice, která byla pro výrobu použita. V této práci je také zmíněna důležitost konstrukce lyže pro běžecké lyžování. Práce je příspěvkem k návrhu konstrukce lyží.

Klíčová slova:

Lyže, delaminace, skelný pásek, konstrukce lyží, vlákenné materiály, nanotrubičky, interlaminární houževnatost.

Annotation

The bachelor thesis deals with the construction of skis and especially delamination of glass strips used in the construction of skis. The aim of this work is literary research and then design of a process for the production of samples for testing the delamination of glass strips used for the reinforcement of skis. In addition, tests of epoxy resin cured fiberglass tapes containing nanofibers in the form of carbon nanotubes are proposed. Finally, the experiments and their results are presented. Necessary information is from monographs dealing with fiber materials, delamination and a book dealing with the development of sports technology. Based on these monographs and after the consultations, my proposal for the procedure for the production of samples and the way of its testing by delamination is described. The work includes analysis of delamination tests of several samples. Also disclosed are materials that are used to make glass strips, and delamination of these samples is described. The delamination resistance of the tested materials is similarly better for both the first Insert test and the subsequent Pre-crack test, where a 1,5-fold increase in resistance is obtained after adding carbon nanotubes to the resin used for production. This work also mentions the importance of skis construction for cross-country skiing. Work is a contribution to the cross-country skis construction.

Keywords:

ski, delamination, glass strip, ski construction, fibrous materials, nanotubes, interlaminar toughness.

OBSAH

1	Úvod.....	9
2	Historie lyžování	10
2.1	Historie lyžování ve světě.....	10
2.2	Sportovní použití lyží	11
2.3	Historie lyžování v českých zemích	12
3	Obecné informace o sportovním průmyslu a lyžování.....	13
3.1	Sportovní průmysl	13
3.2	Testování sportovního vybavení.....	14
3.3	Historie běžeckých lyží	15
3.4	Kompozity ve sportovním vybavení.....	16
3.5	Chytré, neboli smart lyže.....	18
3.6	Konstrukce běžeckých lyží a vlastní poznatky ke konstrukci lyží	19
4	Výroba skleněných pásů použitých v konstrukci lyže	23
4.1	Obecné poznatky výroba skelného vlákna	23
4.2	Obecné poznatky výroby polyesterového vlákna obaleného ethylvinylacetátem	28
4.3	Výroba skleněných pásů použitých při výrobě lyží.....	30
4.3.1	Materiál	30
4.3.2	Příprava osnovy.....	30
4.3.3	Tkaní.....	31
4.3.4	Finální úprava kalandrováním.....	32
5	Matrice	34
5.1	Popis a základní rozdělení matrice	34
5.2	Epoxidová pryskyřice použitá pro výrobu vzorků	35
6	Kompozitní materiály.....	35
6.1	Popis kompozitů	35
6.2	Výroba kompozitů	36
6.2.1	Ruční kladení.....	36
6.2.2	Výroba vakuovým prosycováním	37
6.2.3	Výroba vytvrzování v autoklávu	37
6.2.4	Navíjení	38
6.2.5	Metoda lisování se vstřikem pryskyřice	39

6.2.6	Metoda lisování se vstřikem matrice.....	39
7	Delaminace v kompozitech	40
7.1	Jednotlivé druhy poškození materiálů	40
7.1.1	Delaminace.....	40
7.1.2	Porušení podélným tahovým namáháním	41
7.1.3	Porušení příčným tahovým namáháním.....	42
7.1.4	Porušení příčným tlakovým namáháním.....	43
7.1.5	Porušení namáháním působícím ve smykové rovině	44
7.2	Popis ortotropních vrstev kompozitů.....	47
7.3	Experimentální měření rychlosti uvolňování deformační energie	47
8	Příprava vzorků pro testování	48
8.1	Příprava matrice a závěrečná výroba vzorků k testování	48
9	Testování vyrobených vzorků a výsledné hodnoty	50
9.1	Popis průběhu testování interlaminární lomové houževnatosti.....	50
9.2	Měření delaminační odolnosti, vzorku bez nanotrubic	53
9.2.1	Měření nenatrženého vzorku metoda Insert	53
9.2.2	Měření natrženého vzorku metodou Pre-crack	55
9.2.3	Delaminační odolnost, metoda Insert a Pre-crack v jednom grafu	57
9.3	Měření delaminační odolnosti vzorku s nanotrubicemi	57
9.3.1	Měření nenatrženého vzorku metodou Insert.....	57
9.3.2	Měření natrženého vzorku metoda Pre-crack.....	59
9.3.3	Delaminační odolnost, metoda Insert a Pre-crack v jednom grafu	61
9.4	Delaminační odolnost, porovnání vzorků bez nanotrubic a s nanotrubicemi.....	61
10	Závěr.....	62
	Použitá literatura	64
	Seznam obrázků	66
	Seznam tabulek	68

Seznam použitých symbolů a zkratk

CNT	Uhlíkové nanotrubičky
KSČ	Komunistická strana Československa
ABS	Akrilonitrilbutadienstyren
EVA	Ethylenvinylacetát
PEVA	polyethylenvinylacetát
PES	Polyester
PET	Polyethyléntereftalát
PVC	Polyvinilchlorid
PTFE	Polytetrafluoretylen
HDPE	Vysokohustotní polyetylen
UHMWPE	Polyetylen s ultra-vysokou molekulovou hmotností
NNN	Nová nordická norma
SNS	Salomon Nordic System
UV	Ultrafialové záření
USA	Spojené státy americké
NL	Je bod, ve kterém se křivka závislosti napětí na otevření (posunu) stane nelineární
VIS	Je bod, ve kterém je delaminace viditelná vizuálně.
G_d	Rychlost uvolňování energie
G_{IC}	Hodnota interlaminární lomové houževnatosti (delaminační odolnost)

1 Úvod

Posledních 20 let jsem se intenzivně věnoval běhu na lyžích. Jednou z klíčových záležitostí pro úspěch běžce na lyžích je optimální mechanika lyže, proto jsem se za celé toto období většinou zabýval konstrukcí lyží, strukturou skluznic a mazáním lyží. Osobně jsem v minulosti prováděl testy závodních běžeckých lyží pro firmu Sporten. Na základě výsledků testů, jsem předával poznatky, které vedly k vylepšení konstrukce lyží.

Lyže časem ztrácí původní konstrukční vlastnosti vlivem opakovaného mechanického zatěžování a působením velkých teplotních rozdílů, což má za následek i delaminaci jednotlivých vrstev lyže.

Předložená bakalářská práce se zabývá konstrukcí lyží a výrobou skelných pásků použitých v konstrukci lyží, následným testem delaminace těchto skelných pásků a porovnáním po přimíchání nanotrubic do epoxidové pryskyřice u zkoušených vzorků. V práci je také popsána historie vývoje lyží, postup výroby skelných pásků a měření konstrukce lyží.

První kapitola popisuje historii lyžování ve světě a v Českých zemích, první zmínky o prehistorických lyžích a využití lyží v různých oblastech života. Druhá kapitola shrnuje obecné informace o sportovním průmyslu, historii běžeckých lyží a také, jak důležitý vliv má samotná konstrukce lyže na jízdní vlastnosti. Na konci kapitoly popisují vlastní zkušenosti ohledně konstrukce lyže. V třetí kapitole jsou popsány materiály pro výrobu skleněných pásů použitých v konstrukci lyže, které jsem měl možnost sám připravit. Ve čtvrté kapitole popisují matrice a epoxidovou pryskyřici použitou pro výrobu vzorků určených pro testování delaminace. V páté kapitole jsou popsány kompozity a jejich výroba. Další kapitola popisuje delaminaci a druhy porušování materiálu a poznatky, které již byly k problematice delaminace popsány. Poslední kapitola se zabývá samotným testem delaminace a následným porovnáním a interpretací výsledných testů jednotlivých vzorků bez nanotrubic a s uhlíkovými nanotrubicemi. Testy prokázaly vyšší delaminační odolnost u vzorků s uhlíkovými nanotrubicemi.

Cílem práce bylo provést literární průzkum, navrhnout postup výroby skelných pásků používaných jako výztuž lyže a navrhnout testy vyrobených skelných pásků vytvrzených epoxidovou pryskyřicí obsahující nanovlákná. Tento cíl práce byl splněn. Práce obsahuje informace, které čtenáři poskytnou přehled o historii lyžování a vývoji lyží a také o výrobě skelného pásku, který se v konstrukci lyže používá. Dále jsem v práci uvedl své vlastní zkušenosti ohledně konstrukce lyží, kterou považuji za jeden z nejdůležitějších parametrů.

2 Historie lyžování

V této kapitole je popsána historie vývoje lyžování.

2.1 Historie lyžování ve světě

Dnešní doba prezentuje vnímání lyžařského sportu především jako rekreační sport. Lyže nebo také ski, ale byly na počátku především používány jako dostupný a rychlý pohyb zasněženou krajinou. První dochované malby vyjadřující jejich použití je z doby před 5000 lety ve skandinávských zemích, kdy šlo především o vylepšení sněžnic. Namísto dnes používaných materiálů, používali lidé dlouhé stehenní kosti zvířat, které po upevnění na nohy pomocí kožených řemíků umožnily zrod prvním lyžím. Nicméně již před 2000 lety byly vyrobeny lyže, které se podobaly těm, jaké známe dnes. Dokladem o vzhledu prehistorických lyží jsou archeologické vykopávky, objevy v rašeliništích nebo jeskynní malby. Historicky nejstarší objevená malba je skalní malba lyžaře z ostrova Rodoy v Norsku vyhotovená cca 2500 let př. n. l na Obr. 1. [1]



Obr. 1. Skalní kresba lyžaře z Rodoy v Norsku zhotovená cca 2 500 let př. n. l.. [2]

Nejstarším objeveným pozůstatkem je lyže nazvaná shodně jako naleziště v Hottingu ve Švédsku tzv. Hottingská lyže. Je přibližně 110 cm dlouhá a 20 cm široká a odhad jejího stáří je více než 4 tisíce let. Obr. 2. [2]



Obr. 2. Hotingská lyže. [2]

Pojem „ski“ má původ v norštině a znamená druh dopravy. V minulosti nebylo časté, že by předměty běžného života vznikly nebo byly vylepšeny díky válečným konfliktům. Teprve v bitvě o Oslo ve 13. století použili norští vojáci lyže k průzkumu nepřátelských táborů. V zasněžených severských zemích se lyže postupně stávaly dopravním prostředkem lékařů, duchovních, porodních asistentů a dalších lidí. Lyže ve středověku se vyráběly ze dřeva a byly zhruba 2,3 m dlouhé, 5 cm tlusté a 13 cm široké. [3]

V průběhu 19. století v Norsku a Švédsku nastal významný průlom, a z lyžování se stal sport. Z těchto zemí se na začátku 20. století rozšířil po velké části evropského kontinentu a také do Severní Ameriky. [3]

Již v šestém století se Procopius zmínil o „skriffinnar“ (klouzajících Finech), což je považováno za první písemnou zmínku o lyžování. Skandinávci zpočátku používali lyže jako dopravní prostředek, ale také k boji a lovu. V té době se používaly obvykle lyže rozdílných délek. Ta kratší sloužila k odrazu a měla ze spodu připevněnou kožešinu, delší lyže byla hladká a využívána pro skluz. Nejpravděpodobněji taková jízda vypadala jako jízda na koloběžce. Lyžaři v té době místo holí používali jen jedinou dlouhou tyč, kterou drželi v obou rukou. Lze se domnívat, že dlouhá tyč sloužila i k udržení rovnováhy. [3]

Ve středověku začínají lyže sloužit mimo využití při lovu, také k zábavě a k trávení volných chvil za dlouhých zimních období. V 17. století ve švédsko-norské válce zařadila norská armáda pro vojenské oddíly jako součást výstroje i lyže. Ani ruské vojenské oddíly nezůstaly pozadu a v boji proti Napoleonovi v roce 1812 u Borodina použily lyže. V roce 1866 zařadila ruská vojenská učiliště do výcviku i jízdu na lyžích. [1]

Jedinou oblastí ve střední Evropě, kde bylo zavedeno lyžování je Kraňsko (dnešní Slovinsko). Tady byly lyže využívány sedláky při práci, k dopravě a pro zábavu již v 17. století, jak zmiňují zápisy knížete Weicharda z Valvasoru, místodržícího v Kraňsku. Do konce 17. století bylo lyžování dostupné pouze v severních částech Ruska a v dnešní Skandinávii. Do Severní Ameriky se lyže dostávají na začátku 19. století vlivem skandinávských emigrantů. Američané našli pro lyže využití hlavně v době zlaté horečky kolem roku 1849. Po roce 1939 se lyžování dostává do povědomí jako sportovní disciplína. [1]

2.2 Sportovní použití lyží

Pohyb a jízda na lyžích je historicky jedna z nejstarších sportovních disciplín. Stejně jako i některé další vytrvalostní disciplíny, které vycházely z každodenních životních potřeb. Kroniky uvádí, že první profesionální lyžařská soutěž v běhu, skoku a slalomu proběhla již v roce 1767 v Norsku. Všechny soutěže lyžař absolvoval na jednom páru lyží. Převážnou část závodníků tvořili členové armády, která byla součástí lyžařské společnosti. [4]

První skutečné závody v běhu na lyžích se datují do roku 1843 v norském městě Tromsø. Laponec, který vyhrál závod na 5 km v čase 29 minut, používal k odrážení dvě hole. Už v tomto období se začínalo vylepšovat lyžařské vybavení a lyžařské dovednosti. Lyže

se postupně stávají součástí zábavy majetnějších vrstev lidí a následně slouží i pro zábavu prostého lidu. Lyže sloužily i k vojenským účelům, což přetrvává i v současnosti především v severských zemích a v Alpských oblastech. [2]

Lyžování se dokonce roku 1924 stalo nedílnou součástí prvních zimních olympijských her konaných v Chamonix. Po druhé světové válce se již příznivci tohoto sportu dají počítat v milionech. I přes velkou oblibu běžeckého lyžování se však jen málo změnilo na konstrukci lyže jako takové. Lyže se pořád vyráběly ze dřeva, především z ořechového či jasanového. Dále došlo k vylepšení lyží ocelovými hranami pro lepší skluz a ovladatelnost. Vzhledem ke snižujícím se zásobám dřeva byli výrobci nuceni experimentovat s novými materiály. Zcela běžnými se tak v padesátých letech 19. století staly lyže kovové. Na kovové lyže, ale bylo nemožné nanést vosk, takže s nimi lidé často zapadávali do mokrého sněhu. Hliník na výrobu lyží byl poprvé použit americkým lyžařem Howardem Head. Na dřevěné jádro pomocí lepidla a za vyšších teplot nalisoval hliníkovou vrstvu. Velkým problémem bylo namrzání hliníkové skluznice, což způsobovalo nalepování sněhu na skluznici lyží a ty se pak nedaly dobře použít. O pár let později pak Head vyrobil lyže z lehkého a ohebného plastu s kovovými hranami. První pár těchto lyží byl i přes vyšší cenu velmi populární mezi občasnými lyžaři i odborníky především pro velmi snadnou ovladatelnost. Nadšení z plastů, jaké můžeme pozorovat v průmyslovém designu té doby, se během 60. let plně přeneslo i do lyžování. U lyží se využívala kombinace plastu a kovu, ale nastoupila i skelná vlákna „fiberglass“ jak vyplývá z názvu mnoha lyží. [5]

2.3 Historie lyžování v českých zemích

Na přelomu 19. století byl sport především pro vzdělanější a movitější vrstvy znakem pokroku. S rozvojem průmyslu a mezinárodního obchodu se lyžování rozšířilo ze Skandinávie i do dalších zemí včetně Čech. [2]

Vůbec prvním, kdo se projel v našich zemích na lyžích v zimě v roce 1880, byli synové měšťského rady Krause z Görlitz, kteří přijeli za významné pozornosti ke krkonošské Petrově boudě. V roce 1885 se po ukončení působnosti v norské armádě, v podhůří Krkonoš na Jelení Hoře, zabydlel jistý kapitán ve výslužbě Otto Vorweg. Bouda v té době patřila Polsku. Jeho výlety na lyžích na českou stranu Krkonoš byly i námětem pro článek v novinách pod titulkem „Poutník po Krkonoších“, který byl uveřejněn v roce 1891 a významně přispěl k rozšíření lyžování v českých zemích. Vorweg byl velmi zdatný lyžař a v Rokytnici organizoval lyžařské kurzy. [6]

První, kdo přivezl lyže do Čech, byl hrabě Jan Harrach. V roce 1892 je poskytl svým lesním dělníkům, aby se snáze dostali do zasněžených částí hor. Lyžování se záhy rozšířilo mezi všechny vrstvy obyvatelstva žijícího v horách. Nejvýraznějším střediskem spojeným s českým lyžováním se stalo město Jilemnice. Dodnes je prohlašováno za „kolébku českého lyžování“. Místní lyžaři zde v roce 1894 založili první samostatné lyžařské sdružení v českých zemích a na Slovensku - „Český krkonošský spolek Ski.“ [6]

Podle písemných dokumentů byl prvním výrobcem lyží v Čechách označen kořenovský stolař Rössler, kterému se podařilo vyrobit první lyže již v roce 1889. V roce 1890 se v kronikách objevují zápisy o dalších výrobcích lyží v českých horách. [6]

Za dalšího významného průkopníka lyžování lze považovat i Josefa Rösslera-Ořovského, který si první lyže objednal omylem, když si chtěl pro svůj bruslařský klub v Praze objednat brusle. Nakonec si k bruslím právě přobjednal dva páry lyží, které ho zaujaly. Zajímavé je, že lyže byly dne 5. ledna 1887 procleny jako dřevo. Ještě ten den večer se na lyžích poprvé projel na Václavském náměstí, kde sjížděl společně s bratrem od muzea k Můstku. Byla to vůbec první veřejná jízda v Česku. [7]

Poprvé se lyžařské závody v Čechách uskutečnily v roce 1893 v Kozinci u Jilemnice. Významný den pro české lyžování je také 19. leden 1896, kdy ve Stromovce proběhl první závod o mistrovství Království českého. [7]

První lyže na Moravě vyrobil truhlářský mistr Adolf Slonek v Rokytně u Nového Města na Moravě, jeho firma pak byla za dob vlády KSČ sloučena do národního podniku Sport a po transformacích po pádu režimu se přejmenovala na společnost Sporten, a. s., která je největším výrobcem lyží u nás a vyrábí lyže i pro známé světové značky. [8]

3 Obecné informace o sportovním průmyslu a lyžování

V této kapitole jsem čerpal z literatury [9]. Na konci kapitoly popisují zajímavé poznatky ohledně konstrukce lyží, které jsem mohl z vlastní dlouholeté praxe poznat.

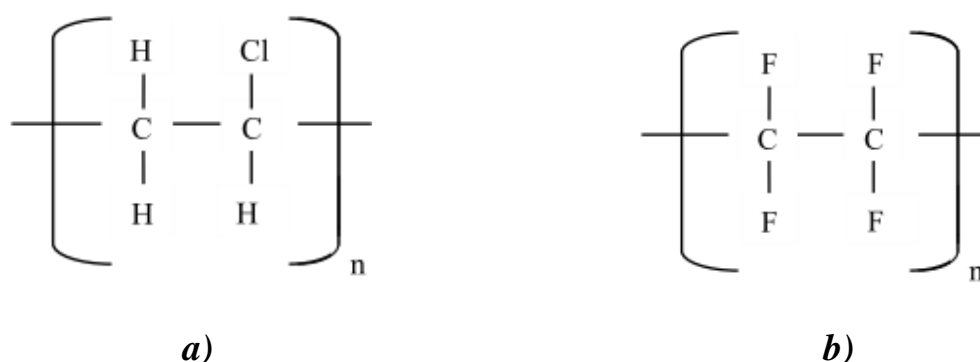
3.1 Sportovní průmysl

Sportovní průmysl především zahrnuje výrobu sportovního oblečení, sportovní obuvi a sportovního vybavení. Tento dynamický celosvětový průmysl se v průběhu let výrazně rozrostl a neustále se snaží uspokojovat rostoucí poptávku po nových a vylepšených sportovních produktech. Podle zprávy průzkumu trhu, spotřeba sportovního zboží v globálním měřítku trhu, byla více než 250 miliard amerických dolarů, s procentním členěním hodnoty prodeje podle kategorie výrobků: 45,45% sportovní oblečení, 33,93% sportovní vybavení a 20,62% sportovní obuvi. Zatímco světový trh se sportovním zbožím je velký a rostoucí, většina příjmů z prodeje je v nejvíce ekonomicky rozvinutých zemích. Rozvíjející se trhy ve východní Evropě, Asii a Jižní Americe pomalu dobíhají. [9]

Nové inovace sportovních produktů jsou rychle vyvíjeny a uváděny na trh tak, aby vyhovovaly různým potřebám a měnícím se preferencím uživatelů. Pro lepší využití obchodních možností se musel sportovní průmysl vyvíjet a nabízet produkty požadované změnou životního stylu a požadavkem na stále kvalitnější produkty. Výsledkem toho je

v průběhu let zvýšená spotřeba sportovních produktů, kratší životní cykly těchto produktů a s tím související problém ukládání odpadů. [9]

Mnoho inovací v oblasti sportovních produktů je spojeno s aplikací nových materiálů a procesů a rychlým šířením pokročilých technologií vyvinutých jinými průmyslovými odvětvími. Nové materiály a postupy používané ve sportovních produktech však s sebou nesou potenciální rizika pro životní prostředí např. goretex (teflon) PTFE. Při inovaci sportovních produktů v minulosti nastal problém, jak odstranit odpad v podobě sportovního náčiní například z lyžařské obuvi, sportovního oblečení a obalů z materiálů z polyvinylchloridu (PVC) a obuví používající rozpouštědla na bázi ropy a další potenciálně škodlivé sloučeniny, jako je fluorid sírový ve vzduchových mezerách, pro tlumení nárazů. [9] Na Obr. 3 jsou znázorněny struktury polymerů PVC a PTFE.



Obr. 3. Znázornění struktury polymerů (a) – PVC, (b) – PTFE.

Také kompozity, jako jsou polymery vyztužené uhlíkovými vlákny, které se typicky používají v tenisových raketách, hokejkách, lyžích a jiných sportovních potřebách, zahrnují zvláště technologické výzvy na konci své životnosti, protože nemohou být snadno recyklovány za přijatelnou cenu. Stejně tak není možné levně recyklovat zařízení vyrobené ze sklolaminátových kompozitů. Pokroky v oblasti sportovních produktů vedly neúmyslně k dalšímu zatížení životního prostředí a společnosti jsou na konci životnosti těchto produktů nuceny vypořádat se s rostoucím množstvím odpadů. Recyklace je ve většině případů prováděna drcením a následným spalováním těchto nadrcených kompozitů. [9]

3.2 Testování sportovního vybavení

Návrh nových sportovních náčiní zahrnuje výzkum a inovaci. Inovativní sportovní produkty musí být vědecky testovány, přičemž je třeba v procesu vývoje zahrnout vhodné zkušební metody. Kromě toho je nezbytné provést rozsáhlé testování s elitními sportovci, neboť zkušenosti a odbornost sportovců je neocenitelná, protože svými zkušenostmi dokážou rozpoznat jemné rozdíly v chování náčiní a poskytují hodnotnou zpětnou vazbu pro optimalizaci produktu. Vynechání důležitého aspektu technologie při výrobě sportovního náčiní může mít za následek nesouměrný, ne-li vadný výrobek. [9]

3.3 Historie běžeckých lyží

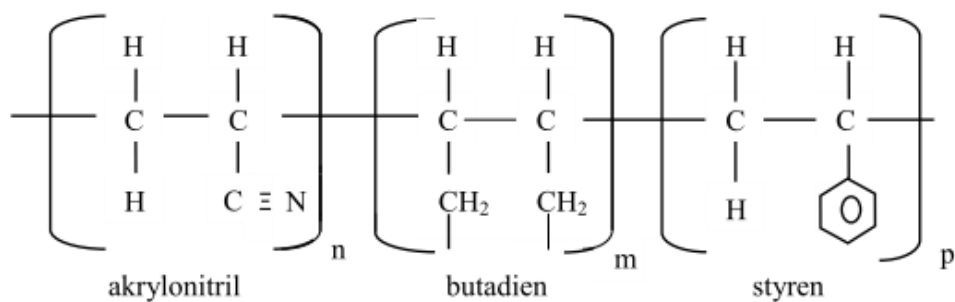
Existují dva archeologické nálezy lyží. Tyto pravděpodobně patří k nejstarším nálezům ve světě. Takzvaný aalvtriskskidan, byl nalezený ve městě Vasterbotten ve Švédsku v roce 1924. [9]

V moderní historii vznikl předchůdce dnešního typu lyží v Telemarku v Norsku v polovině devatenáctého století. Na rozdíl od mnoha jiných stylů lyžování, lyže Telemark byly dlouhé a tenké s bočními řezy. Koncem devatenáctého století se lyže Telemark staly standardem pro rostoucí lyžařský průmysl. [9]

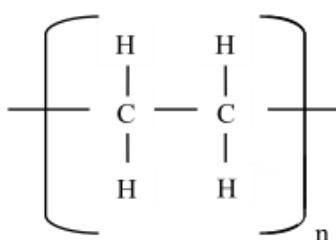
Další v lyžařském vývoji byly laminované lyže. Jednalo se o vrstevnaté lyže, které obsahovaly dno s hikorového dřeva s vrchní částí z jasanu nebo borovice, ty byly představeny kolem roku 1932. Kombinace poskytla výhody lehkosti a trvanlivosti s další výhodou torzní síly. Po počátečním úspěchu této dvouvrstvé lyže to byla jen otázka času, než byly vyvinuty třívrstvé nebo vícevrstvé lyže. V roce 1951 tvoří laminované lyže 90 procent výroby všech lyží. [9]

Koncem šedesátých a začátkem sedmdesátých let začali výrobci lyží s výrobou laminátových lyží a lyží se skleněnými vlákny a syntetickou základovou vrstvou. Vývoj lyžařské skluznice se jednoznačně pohyboval směrem ke zvýšení trvanlivosti a hydrofobicity. Krok od dřevěné lyžařské skluznice k plastové byl velmi významný. Povrch hydrofilní se změnil na hydrofobní lyžařský povrch. V době dřeva byla aplikována vrstva borového dehtu pro zvýšení hydrofobicity dřevěného povrchu. [9]

V průběhu vývoje lyžařské skluznice bylo v chronologickém pořadí při výrobě použito: smrkové dřevo, hikorové dřevo, hikorové dřevo se syntetickými hranami akrylonitril butadien styren (ABS) s hustotou $1,04 \text{ g/cm}^3$ teplotou tání 145°C a s tepelnou odolností od -20°C do 105°C , který je odolný vůči mechanickému poškození, je tuhý a houževnatý. Dále pak vysokohustotní polyetylen (HDPE) s molekulovou hmotností 500.000 g/mol , hustotou $0,95 \text{ g/cm}^3$ a krystalinitou 80%, odolný při teplotách od -50°C do 110°C a nakonec polyetylen s ultra-vysokou molekulovou hmotností (UHMWPE) s molekulovou hmotností $4.500.000 \text{ g/mol}$, hustotou $0,97 \text{ g/cm}^3$ a krystalinitou 90%, pevný a odolný při nízkých teplotách a není vhodný pro použití při teplotách nad 90°C . [9, 10, 11] Na Obr. 4 jsou znázorněny struktury polymerů ABS a PE.



a)



b)

Obr. 4. Znárodnění struktury polymerů (a) – ABS, (b) – PE.

Mistrovství světa v roce 1974 ve Falunu ve Švédsku bylo rozhodujícím momentem v historii běhu na lyžích. Thomas Magnusson ze Švédska se stal prvním mistrem světa na laminátových lyžích a norský lyžař Magne Myrmo se stal posledním mistrem světa na dřevěných lyžích.

Zdokonalování lyžařských tratí zapříčinilo potřebu vývoje lyžařské konstrukce a geometrie. Těžší lyžařské tratě vyžadovaly kratší, užší lyže s tvrdší klenbou. Dnešní lyžování by nikdy nebylo na takové úrovni, kdyby lyžařské tratě nebyly uměle upravovány. Moderní běžecské lyže mají výhodu jen na sněhu s upravenou stopou. Například průkopník techniky bruslení, americký lyžař Bill Koch by nikdy nemohl vyvinout takovou techniku, kdyby lyžařská dráha nebyla dost obtížná a dostatečně široká. Na druhou stranu skate (bruslařský styl) spustil vývoj bruslařských lyží. [9]

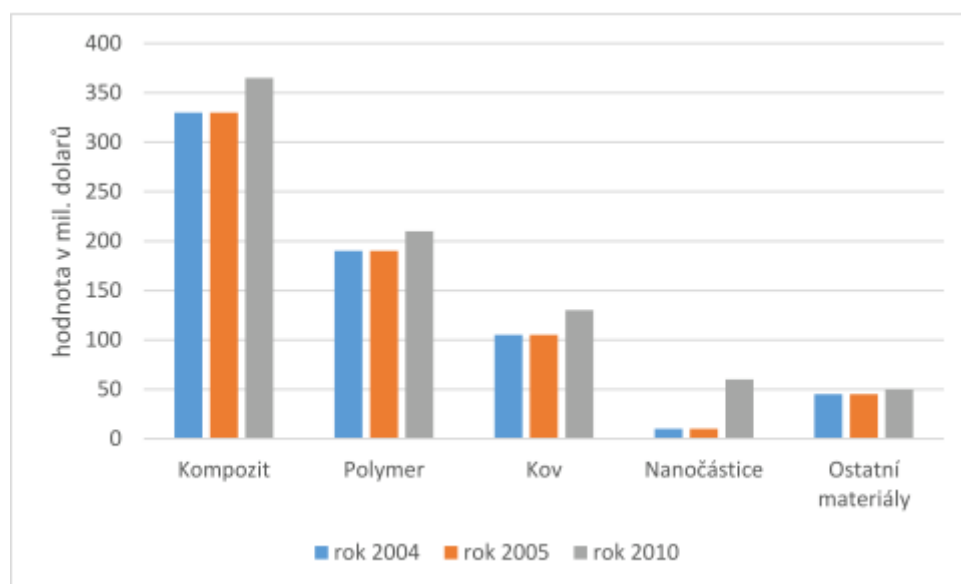
3.4 Kompozity ve sportovním vybavení

Vlákno-polymerové kompozity se používají k výrobě široké škály sportovních potřeb díky kombinaci fyzikálních a mechanických vlastností, které sportovcům umožňují zlepšit jejich výkon. Kompozity mají několik klíčových výhod oproti jiným materiálům, jako jsou kovové slitiny. Především nižší hmotnost, vyšší tuhost a pevnost a lepší tlumení vibrací a lepší přenos síly do skluzu. Kompozity se běžně používají při výrobě různých sportovních náčiní, jako jsou například kriketové přilby, rukojeti hokejek, snowboardy, lyžařské hole, prkna na

windsurfing, luky pro lukostřelbu, jízdní kola, tenisové rakety, golfové hole, apod. Kompozity se dnes využívají při výrobě drtivé většiny sportovního náčiní.

Použití sportovního náčiní vyrobeného s využitím karbonových kompozitních materiálů může znamenat konkurenční výhodu při dosahování lepších výkonů v daném sportu.

Obr. 5 ukazuje objem amerických dolarů pro různé skupiny pokročilých materiálů - kompozity, kovové slitiny, polymery a další materiály.



Obr. 5. Hodnota v amerických dolarech pro různé skupiny materiálů. [9]

Produkce sportovního náčiní vyrobeného s využitím kompozitů představuje asi 50 procent celého trhu a její současný roční obrat činí přibližně 370 milionů dolarů. Cena kompozitů je téměř dvojnásobná v porovnání s cenou druhé nejpoužívanější skupiny pokročilých materiálů, polymerů, a téměř trojnásobná v porovnání s cenou třetí nejpoužívanější skupiny pokročilých materiálů, kovů. Očekává se, že tržní dominantní pozice kompozitů zůstane po mnoho let navzdory probíhajícímu vývoji nových materiálů, jako jsou např. polymery vyšší pevnosti. Obr. 5 také ukazuje, že se nepředpokládá, že v příštích několika letech se podstatně zvýší využití kompozitních materiálů a dalších moderních materiálů. Předpokládaná roční míra růstu kompozitního využití je jen několik procent, a to především díky saturaci na největších trzích, jako je golf, tenis a cyklistika. Nicméně používání nanomateriálů, které jsou přidány do kompozitních nanočástic ke zlepšení mechanických vlastností, roste fenomenálním tempem díky rychlému nasazení ve výrobě závodních jízdních kol, lyží, basebalových pálek a dalšího sportovního náčiní. Zatímco použití materiálů jako jsou kompozity, polymery a kovy se má v příštích pěti letech zvýšit o několik procent ročně, je roční míra růstu použití nanočástic nad 200 procent. [9]

Kompozity jsou používány v různých formách ve sportovních zařízeních, protože jedna z jejich konkurenčních výhod oproti plastům a kovům je, že díky pečlivému designu a výrobě mohou být jejich vlastnosti přizpůsobeny konkrétnímu sportu. Kompozity se používají ve dvou základních formách: monolitické lamináty a sendvičové materiály. Monolitické

kompozity se skládají z polymerní matrice vyztužené částicemi, whiskery nebo vlákny. Většina sportovního vybavení je vyrobena z termosetové pryskyřice nejčastěji epoxidové nebo polyesterové pro polymerní matrici, i když termoplasty (jako je polykarbonát) se používají příležitostně, když je vyžadována vysoká houževnatost. Většina kompozitních sportovních zařízení je vyztužena nekonečnými vlákny - uhlíkem (grafitem), sklem, aramidem - které poskytují nejvyšší tuhost a pevnost. Příklady produktů vyráběných z monolitických kompozitů jsou golfové hole, lyžařské hole, luky, šípky, oštěpy a skokanské tyče v atletice. [9]

Kompozity jsou konstruovány s tenkými vrstvenými lamináty, které obalují lehký jádrový materiál, jako je pěnový polymer nebo syntaktická pěna pro odlehčení sportovního vybavení. Sportovní vybavení vyrobené pomocí sendvičových kompozitů zahrnuje rámy pro jízdní kola, snowboardy a rukojeti pro hokejky a baseballové pálky. [9]

Monolitické a sendvičové kompozitní materiály se již mnoho let používají ve sportovním vybavení a jejich dominantní postavení je zakořeněno na trhu. Nejvýznamnějším vývojem v současném používání kompozitů je přidání nanočástic, u nichž se očekává, že rozšíří jejich aplikace materiálů. Na polymerovou matrici se přidávají nanočásticové hlinité částice nebo uhlíkové nanotrubičky pro zlepšení tuhosti, pevnosti a houževnatosti. Nanočásticemi vyztužené kompozity jsou v současné době používány v nejnovějších lyžích, baseballových pákách a rámu jízdních kol a jak bylo uvedeno, u jejich využití se předpokládá zvýšení o více než 200% ročně, protože proniknou i do jiných sektorů sportovního průmyslu. [9]

Kompozitní sportovní vybavení, jako jsou golfové hole, závodní kola a tenisové rakety, se vyrábějí ve stovkách tisíc kusů ročně. Environmentální dopad používání kompozitních materiálů v produktech vyráběných hromadně představuje problém udržitelnosti této technologie pro odvětví sportovních potřeb. Kompozity se vyrábějí za použití energeticky náročných procesů, které vytvářejí značné množství skleníkových plynů. Vyrábějí se za použití neobnovitelných zdrojů a vyžadují použití chemických látek a činidel škodlivých pro životní prostředí. Kompozity nejsou snadno recyklovány a při likvidaci nedochází k jejich biologickému rozkladu. [9]

Textilní materiály se používají ve většině sportovního vybavení např.: sjezdové lyže, snowboardy, hokejky, přilby, běžecké hole, kola, tenisové rakety, chrániče a další vybavení.

3.5 Chytré, neboli smart lyže

Parametrem výkonu v lyžování je rychlost. Při lyžování z kopce je zdrojem ztráty energie a tím i rychlosti aerodynamický odpor a kinetické tření. Aerodynamický odpor je minimalizován polohou a výběrem optimálního oděvu. Tření je minimalizováno správnou přípravou a vlastnostmi spodního povrchu lyží, takzvaných skluznic. Na druhou stranu však druhý zdroj tření zachycuje kinetickou energii a rychlost sportovce. Ve standardním odbočovaném otočení ostrý okraj rotující lyže sklouzává přes povrch sněhu a vytváří další tření. Ve vyřezávané zatáčce se však lyže ohýbají, a jestliže středy otáčení lyží mají přesně

stejnou polohu jako jejich středy zakřivení, okraj lyže se sklouzne podél drážky vytvořené špičkou lyže. [9]

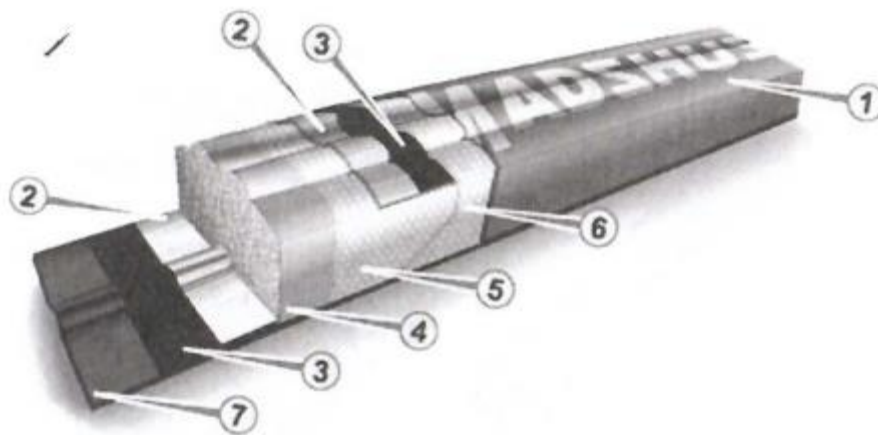
3.6 Konstrukce běžeckých lyží a vlastní poznatky ke konstrukci lyží

V konstrukci lyže jde především o plné využití energie přenesené sportovcem do lyže. Jde o elastickou deformaci. V základě může vše, co lze elasticky deformovat, také ukládat a vracet energii. Jestliže je struktura nebo materiál neviskózní, pak je návrat energie ideálně 100 procentní. Obecné požadavky na optimální návrat energie jsou však složitější. Pro efektivní využití vrácené energie musí být síly vyvíjeny na správném místě, ve správném směru, ve vhodném čase a se správnou frekvencí. To vysvětluje, proč elastická deformace sama o sobě nemusí zaručit úplný návrat energie. Například základní frekvence běžecké protézy neodpovídá frekvenci kroku běžce a běžec vstoupí do fáze letu v okamžiku, kdy je protéza maximálně odkloněna, pak se vůbec nevrací žádná energie. Typické příklady zvýšení výkonu ve sportech založené na energetickém návratu sportovního vybavení zahrnují:

- elastické a bodově pružné sportovní povrchy, které se deformují a vracejí energii sportovci
- klenby sportovního materiálu (zařízení), které zlepšily návrat energie, vyvinuté během minulého století, umožnily vyšší skoky např. skok o tyči. [9]

Před rokem 1910 byly tyče vyrobeny z masivního dřeva, bambusu před rokem 1939 a konečně z kovu (hliníku, oceli) a kompozitních vláken (sklolaminát v 60. letech a uhlíkových vláken). Nepříznivé třecí síly ovlivňují snadnost posuvu při sportování, což mohou potvrdit z několikaleté vlastní zkušenosti, a proto je kluzné tření v zimních sportech důležité. Důležitá je také struktura kluzné plochy. Tato struktura může být dále upravena chemickými prostředky, jako jsou vosky a parafíny a dnes hydrofobními skluznými plochami jako je polyetylen s ultra vysokou molekulovou hmotností a teflon. Další důležitou věcí jsou hrany kluzných ploch a jejich tvarování. [9]

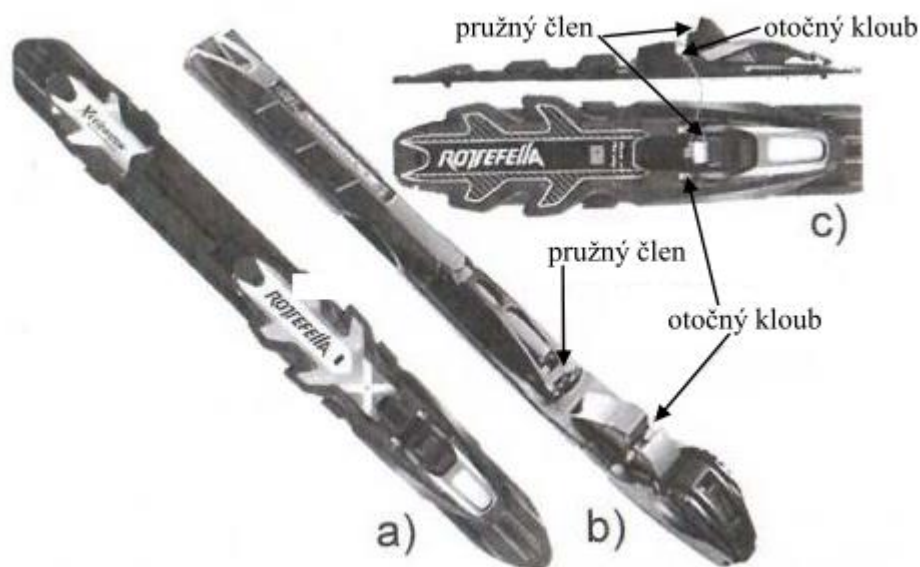
Stavbu moderních běžeckých lyží je možné rozdělit do dvou skupin: sendvičová konstrukce a triaxiální konstrukce. Sendvičová konstrukce je obvyklá konstrukce běžeckých a sjezdových lyží, skládající se z různých vrstev vlákněných kompozitů a dalších jádrových materiálů. Triaxiální konstrukce nebo také triaxiální opletení, se skládá z jádra zcela obklopeného vláknovou kompozitní vrstvou, jak vidíme na Obr. 6. U triaxiálně tkaného sklolaminátu jsou skelná vlákna utkána pod úhlem 45° , 0° a -45° , což zaručí lehkost a zvýšenou torzní tuhost. [9]



Obr. 6. Triaxiální uhlíková konstrukce: 1 – horní povrch lyže; 2 - lineární sklolaminát; 3 - jednosměrné uhlíkové vlákno; 4 - jádra; 5 - triaxiálně tkaný sklolaminát; 6 - skleněný závoj; 7 – skluznice. [9]

Obvykle běžecké lyže obsahují jedno jádro vyrobené z buněčné hmoty, buď voštinové struktury (vzduchové jádro) nebo syntetické pěny. Všechny moderní běžecké lyže mají lyžařskou skluznici UHMWPE. [9]

Lyžařské vázání je nedílnou součástí každé lyže a po několika staletích různých provedení vázání na běžky, dnes existují pouze dva výrobci a dva systémy vázání za a) NNN (nová nordická norma) vyráběná firmou Rottefella AS a za b) SNS (Salomon Nordic System) vyráběná firmou Salomon SAS, jak vidíme na Obr.7. Oba dva druhy vazby jsou konstruovány podobným způsobem: otočný kloub s lyžařskou botou a pružný člen, který zajišťuje pružné spojení s lyží. [9]



Obr. 7. Systémy vázání (a) - Rottefella AS, (b) - SNS Salomon Nordic Systém. [9]

K dispozici jsou ruční i automatické verze lyžařských vázání. Automatické verze jako vázání Rottefella Touring 3 (NNN) a vázání Salomon SNS Auto mají významné nevýhody, protože mohou být zablokovány ledem a neotevřeny v nouzových situacích. [9]

Vlastní poznatky ohledně konstrukce běžeckých lyží

Jedním z nejdůležitějších kroků při výběru lyží pro profesionální běžce na lyžích je výběr vhodné konstrukce. Vzhledem k velkému rozvoji a růstu počtu zájemců především o dálkové lyžařské závody roste i poptávka po dobrých lyžích u takzvaných hobby lyžařů, a to zejména u lyží pro použití při závodech. Proto je důležité lyže před pořízením kvalitně proměřit a na základě měření zvolit ty správné lyže. Přístroj na měření vyrobených lyží je znázorněn na Obr. 8.



Obr. 8. Zařízení pro zjištění tvrdosti, délky a výšky voskovací komory lyží - celkový pohled.



Obr. 9. Zařízení pro zjištění tvrdosti, délky a výšky voskovací komory lyží – detail.

Při tomto měření se dá dobře rozeznat, na který druh sněhu je lyže vhodné použít a pro jakou váhovou kategorii jsou určeny. Především pro klasické lyže, tzn. lyže, na které se maže pod patu stoupací vosk je konstrukce lyže rozhodující. Z takto určené tvrdosti lyže je možné určit, kolik vrstev vosku lze na lyže namazat, tak aby lyže dobře stoupaly do kopce a přitom je samotný vosk nebrzdil po odlehčení při sjezdu nebo při jízdě soupaž po rovině. Dále se u klasických lyží určuje délka mazací zóny pro stoupací vosky tuhé a částečně tekuté takzvané klistry.

U lyží na bruslařský styl jsme z měření schopni určit, jestli lyže bude spíš na přemrzlý sníh a tvrdou a dobře upravenou trať nebo na mokry sníh a hodně měkkou a rozježděnou trať.

Tvrdost, pružnost a váhu lyží ovlivňují materiály použité při výrobě tak i samotný výrobní proces a to především nastavení dvouetážového lisu firmy Langzauner a teplota, za které jsou jednotlivé vrstvy zapečeny. Teplota pečení se pohybuje okolo 110°C. Přesnou teplotu a délku pečení lyží, lyžařské firmy tají. Při tomto procesu výroby se dá ovlivnit pružnost a tvrdost lyže. Na Obr. 10. vidíme kladení jednotlivých vrstev při výrobě lyží.



Obr. 10. Kompletace jednotlivých vrstev materiálu lyží a ukázka použití skelné tkaniny jako jedné z vrstev v lyži.

Nejdůležitější část výroby lyže je nastavení parametrů stroje na zabezpečení jednotlivých vrstev lyže Obr. 11.



Obr. 11. Dvouetážový lis firmy Langzauner.

Přímo od výrobců lyží jsem získal informaci, že je skoro nemožné vyrobit konstrukčně identické lyže i při dodržení všech technologických postupů. Vždy budou mezi jednotlivými lyžemi nepatrné rozdíly v tvrdosti. Sebelépe dobře nastrukturovaná a ve finále i namazaná lyže není zárukou dobré skluznosti, rychlosti a stoupavosti, pokud je lyže nevhodně konstrukčně vyrobena.

4 Výroba skleněných pásů použitých v konstrukci lyže

Skelnou tkaninu jsem vyrobil po konzultacích s P. Kunderou v jeho provozovně.

4.1 Obecné poznatky výroba skelného vlákna

Příprava skleněných vláken je celkem snadná. Obvykle je použito tavné zvlákňování a dloužení za tepla rychlostí až 2km/min. [12] Využívají se zvlákňovací trysky s 200-400 otvory. Finální vlákno je nakonec podrobena povrchové úpravě, které přilepí jednotlivé fibrily (5-20 μm) a omezuje porušení vláken způsobené povrchovými vadami. [12]

Přímé tavení skla má řadu nevýhod. Zejména je potřebná vysoká teplota, která zapříčiní částečné těkání některých elementů skla. Kvůli vysoké viskozitě taveniny dochází také k problémům s její homogenizací. K odstranění takových potíží se používá sol/gel metoda.

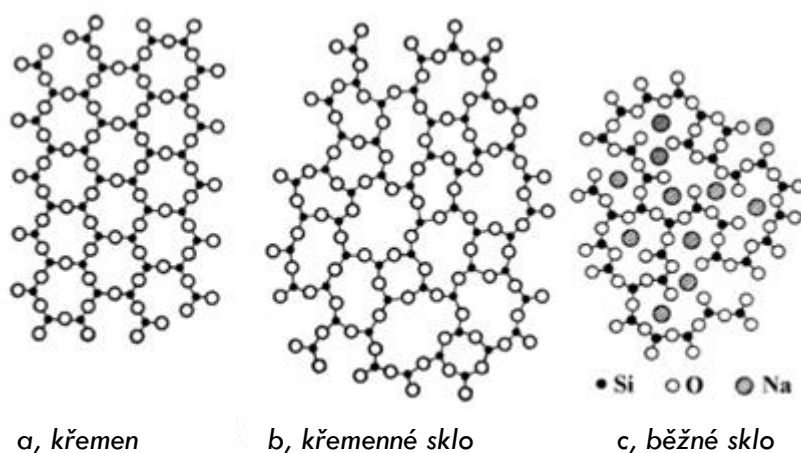
Sol je vlastně koloidní suspenzí tak malých částic, že nedochází k jejich sedimentaci. Velikost částic v solu je od 1 do 100 nm. Gel je suspenze, kde je kapalné médium tak viskózní, že se materiál chová jako pevná látka. Tepelným zpracováním dojde ke zkompaktnění struktury a vzniku skleněných vláken. Počáteční materiál pro přípravu solu je SiCl_4 , který reaguje s etylalkoholem za vzniku tetraetoxysilanu $[\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4]$. Pro přípravu gelu se pak používá buď destabilizace (zvýšením teploty nebo přidávkem elektrolytu) nebo hydrolyzy a polykondenzace. Ohřevem gelových vláken za současného dloužení se získávají vlákna skleněná. Skleněná vlákna se většinou vyrábějí z E-skel. [13]

Struktura skleněných a horninových vláken

Sklo je amorfní látka, která zpravidla vznikne zatuhnutím taveniny bez krystalizace. Výchozí stavební jednotkou skleněných a horninových vláken jsou tetraedry $(\text{SiO}_4)^{4-}$. Sklo obsahuje i jiné oxidy než SiO_2 . Skleněná a horninová vlákna se rozdělují podle obsahu oxidů na typy znázorněné v Tab. 4.1. Je to jedno z nejrozšířenějšího dělení [13]. Struktura skla postrádá pravidelné uspořádání na větší vzdálenosti, odpovídající několikanásobku rozměrů elementárních stavebních jednotek. [13]

Nejčastější druh skla soustavy $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ v roztaveném stavu je disociován na kationty Ca^{2+} , Na^+ a křemičitanové anionty $(\text{SiO}_4)^{4-}$. Zchlazením takto disociované soustavy dojde k polymeraci aniontů do trojrozměrné pevné sítě, která nemá pravidelné uspořádání na rozdíl od krystalické mřížky. Kationty jsou umístěny v dutinách křemičitanové sítě Obr. 12. Vazba tetraedrů $(\text{SiO}_4)^{4-}$ je dána nepravidelnou strukturou skelného SiO_2 přes společné rohy, a ne přes hrany a plochy, jako je u pravidelné struktury. Pravidelná struktura skla zaujímá menší objem než nepravidelná [14].

Struktura skla – skelná síť na rozdíl od krystalů nemá pravidelné uspořádání na delší vzdálenost. Struktury jsou znázorněny na Obr. 12.



Obr. 12. Plošné znázornění rozdílů mezi (a) - strukturou křemene, tj. krystalického SiO_2 , (b) - skelného SiO_2 , (c) - sodnokřemičitého skla. [15]

Rozdíly sklených vláken

Vlákná ze skloviny C s vyšším podílem alkálií jsou v prostředí s kyselinou hůře rozpustná, jsou méně pevná, jejich teplota tání je nižší a s rostoucí teplotou se jim zhoršují mechanické vlastnosti, v samotné vodě se však alkalické prvky rychle vyluhují. [16]

D sklo se využívá především pro elektro zařízení. Jde o dielektrická vlákna pouze s malým činitelem ztráty a malými hodnotami relativní permitivity. [16]

Vlákná z E sklovin, tedy bezalkalické vápenato-hlinito-křemičité sklo, jsou sklo s eutektickým složením. Mají vynikající mechanické a také elektrické vlastnosti, jako např. velký povrchový odpor, relativně malou permitivitu pouze při drobných dielektrických ztrátách, nejnižší teplotu tavení a docela dobrou hydrolytickou odolnost, t.j. odolnost proti rozkladu v horké vodě. Bez oxidu boru se jedná o chemicky odolnější skla. [16]

Vlákná ze skloviny E-CR, bez oxidu boru. V tomto případě se jedná o korozivzdorné sklo s vyšší pružností, hustší, vyšší teplotou zvláknění a vyšší odolnost vůči kyselému prostředí. Oproti běžnému E sklu mají horší relativní permitivitu. [16]

Vlákná ze skloviny AR se využívají především pro zásaditá prostředí. Tato vlákna jsou v tomto prostředí odolná, a tudíž mají své uplatnění jako příměs pro výrobu ekologických eternitových střešních krytin nebo jako složka do betonových materiálů. Tato vlákna lze velmi dobře nahradit E sklem. [16]

Vlákná ze skloviny S s větším podílem oxidu křemíku a hliníku a bez oxidu boru, mají vyšší teplotu tavení, což ovlivňuje jejich cenu. Jejich využití spočívá především v kompozitech s epoxidovou matricí. Tato vlákna ve srovnání s vlákny E vykazují větší tahovou pevnost a modul pružnosti v tahu. [16]

Vlákná ze skloviny S-1 neobsahují oxid boru a jsou velmi pevná.

Vlákná ze skloviny R bez obsahu oxidu boru jsou též pevná, nicméně ve srovnání s vlákny S je jejich modul pružnosti menší. [16]

Naopak vlákna ze skloviny S-1 HMTM(vysoký modul) mají oproti vláknům S-2 větší modul pružnosti než vlákna S-2. Také jsou bez obsahu oxidu boru. [16]

Vlákná ze skloviny S-3 UHM (extra vysoký modul), opět neobsahují oxid boru a vyznačují se velkým modulem pružnosti v tahu. Tento typ skla našel velké uplatnění v medicínské oblasti. [16]

Vlákná ze skloviny L mají v sobě oxid olova, které zvyšuje hlavně nepropustnost materiálu, a proto se využívá ve velké míře v lékařských a vědeckých zařízeních. [16]

NDT sklo není vhodné pro výrobu vláken. Používá se pro výrobu dotykových obrazovek, např. notebooky, mobilní telefony a pro výrobu předních skel do automobilů, jelikož povrch tohoto skla je odolný vůči škrábancům. Chemická temperace, kterou se tento typ skla vyrábí, způsobuje tlakové pnutí na povrchu skla, což zajišťuje jeho odolnost proti poškrábání. [16]

Z H-skla jsou vyráběny dutá skleněná vlákna s menší hustotou oproti plným vláknům s vysokou pevností. Tato vlákna mají několik vynikajících vlastností, jejich předností jsou zejména vysoké akustické a tepelné schopnosti, elasticita, pevnost, velmi dobře tlumí energetické rázy, což je předurčuje k využití např. při výrobě radarových krytů nebo letadlových antén. Využívají je i výrobci sportovního náčiní. Konkrétně výrobce lyží Head uvádí, že díky využití těchto vláken jsou jejich lyže jedny z nejlehčích lyží na trhu. [16]

L-Glass™ je novým typem skla s malou relativní permitivitou a ztrátovým činitelem, které se používá hlavně při výrobě vysokofrekvenčních elektrických obvodů a leteckých radarů. [16]

Křemenná vlákna se vyrábí rozemletím krystalického křemene a jeho roztavením při teplotě tání ca 1600 - 1725°C. Mají, oproti aramidovým polymerním vláknům při vysokých proudových frekvencích, menší činitel ztráty, ale jejich relativní permitivita je nízká. Teplotní šoky snášejí velmi dobře, protože má malý součinitel teplotní délkové roztažnosti. Dobře propouští UV paprsky a jejich adsorpce vlhkosti se rovná nule. Teplota měknutí u křemenného skla je ca 1300°C, ale s vyšší teplotou nezkapalňuje. Využívá se pro výrobu tepelně – izolačních rohoží a tkanin, desky plošných spojů, kryty letadlových radarů. Voštiny s křemennými vlákny se vyznačují vynikající prostupností elektromagnetických vln. [16]

Vlákna S-Q jsou mezistupněm mezi ostatními skleněnými vlákny a křemennými vlákny. Obsahují minimálně 95 a více % Q-Fiber SiO₂, jsou využívána pro výrobu tepelných filtrací a izolace. [16]

Chalkonegidové nebo tellurové sklo, které obsahuje prvky jako selen, germanium, arzen, síru, jod a galium, dobře přenáší infračervené paprsky, využito např. u noktovizorů nebo prostředků pro noční vidění a má velký absolutní index lomu světla. Hodí se pro laserovou techniku a optická vlákna. [16]

Skleněná vlákna odolávají ohni a řadě chemikálií. Přítomnost vlhkosti ve vláknech však silně snižuje jejich pevnost. K absorpci vlhkosti dochází zejména u čerstvě zvlákněných skel. Jejich další nevýhodou je nízká odolnost vůči statickému dlouhodobému namáhání (statická únava). Bod měknutí se pohybuje kolem 700°C a maximální teplota pro dlouhodobé použití je 450°C. [12]

Skleněná vlákna se používají především jako zesílení do kompozit, izolační materiály, filtrační textilie a nehořlavé a bytové textilie. Jejich výhodou je dostatečně nízká jemnost umožňující použití technik (tkaní) pro výrobu plošných a prostorových útvarů. [12]

Procentuální složení obsahu oxidů u různých druhů skelných vláken je uvedeno v Tab. 4.1.

Tab. 4.1. Složení různých druhů skelných vláken podle obsahu oxidů. [13]

Oxidy	Složení [%]					
	A-Sklo	C-sklo	D-Sklo	E-Sklo	R-Sklo	ECR-Sklo
SiO ₂	63 – 72	64 - 68	72 - 75	52 – 56	55 - 65	54 – 62
Al ₂ O ₃	0 – 6	3 - 5	0 - 1	12 – 16	15 - 30	9 – 15
B ₂ O ₃	0 – 6	4 - 6	21 - 24	5 – 10	0	0
CaO	6 – 10	11 - 15	0 - 1	16 – 25	9 - 25	17 – 25
MgO	0 – 4	2 - 4	0	0 – 5	3 - 8	0 – 4
Na ₂ +K ₂ O	14 – 16	7 - 10	0 - 4	0 – 2	0 - 1	0 – 2
Ostatní oxidy	0 – 1	0 - 1	0 - 1	0 – 1	0 - 1	0 – 1

Přehled vlastností různých druhů skelných vláken je uveden v Tab. 4.2.

Tab. 4.2. Vlastnosti různých druhů skelných vláken. [13]

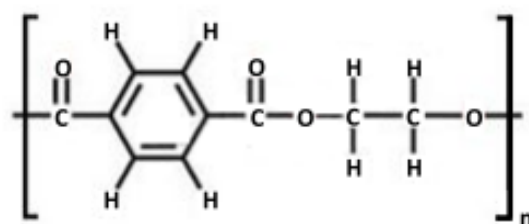
Vlastnosti	A - sklo	C - sklo	D - sklo	E – sklo	R - sklo	ECR - sklo
Hustota [g·cm ⁻³]	2,44	2,52	2,11	2,58	2,54	2,72
Pevnost v tahu [MPa]	3310	3310	2415	3445	4135	3445
Yongův modul pružnosti [GPa]	68,9	68,9	51,7	72,3	85,5	72,3
Tažnost [%]	4,8	4,8	4,6	4,8	4,8	4,8

Použití skleněných vláken

1. Výztuže – kompozity (pryskyřice), automobilový průmysl, přední a zadní čela autobusů, kabiny nákladních a zemědělských strojů, blatníky motocyklů, výroba jachet a sportovních lodí, bazény + nádrže na pískovou filtraci, kanalizační trubky a šachty (Hobas), výroba stožárů (vlajkové), sportovní potřeby, malá a sportovní letadla + modely, dlahy a zubní náhrady ve zdravotnictví, válce pro papírnické stroje (povrch), průmyslový nábytek (sedačky).
2. Tepelně izolační materiály - izolační tělesa v elektroprůmyslu, izolace elektrických kabelů, těsnění kamen a pecí, isolační zástěny pro svařování, přechodové izolační díly tepelného potrubí, vodící pásy pro kondenzaci polymerních materiálů, isolační vrstva ochranných oděvů hasičů.
3. Výztuže stavebnictví – výztuž izolačních fasád (perlinková tkanina), výztuž podlah, výztuž asfaltových povrchů, výztuž stavebních izolačních dílů a desek (PUR desky, střešní krytiny) výztuž brusných kotoučů.

4.2 Obecné poznatky výroby polyesterového vlákna obaleného ethylvynilacetátem

V celosvětové spotřebě vláken představují polyestery největší část (47,5%) a využití najdou od oděvních textilií přes technické až ke speciálním textiliím. Polyesterová vlákna jsou definována jako vlákna obsahující více než 85% hmotnostních procent esterů aromatických kyselin především kyseliny teraftalové. Další druhové typy polyesterových vláken (s větším počtem metylénových skupin mezi aromatickými jádry) nahrazují některé nežádoucí jevy klasických polyethyltereftalátových (PET) vláken. [12, 17] Na Obr. 13. je znázorněna struktura polymeru PET.



Obr. 13. Znázornění struktury polymeru – PET.

Polyesterová vlákna se lehce modifikují a tvarují. Je možné záměrně měnit elasticitu, srážlivost, žmolovitost a barvitelnost.

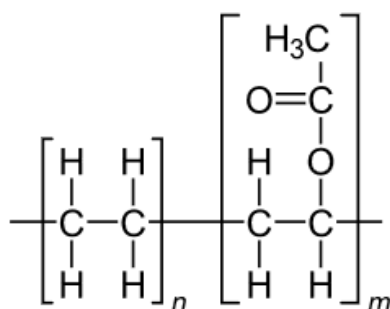
Klasická PES vlákna tj. polyethylentereftalátová vlákna (PET) jsou produkt polykondenzace kyseliny tereftalové a etylénglykolu. PET má teplotu tání 267°C a hustotu 1,37 g/cm³. [17]

Při výrobě PES vláken je nejdříve polymerní tavenina protlačena otvory ve zvlákňovací trysce. Následuje deformace kapalného paprsku průtahem u trysky a postupné tuhnutí ve zvlákňovací šachtě. Fázová přeměna na tuhé vlákno probíhá ochlazením pod teplotou tání. Běžná rychlost zvlákňování je 400 – 1500m/min. Výsledkem je přeorientované (smrštivé), prakticky amorfní nedloužené vlákno. To je v nestabilním stavu s malou orientací řetězců a v čase velmi rychle křehne, Je možné provést omezení lesku matování částicemi TiO₂ o koncentraci 0,05 až 2,5%. [12]

Následuje tahová deformace – dlužení vlákna, kdy nastává orientace řetězců a polymerních segmentů do směru osy vlákna a krystalizace. Dlužení probíhá za tepla při 75 - 90°C (ve vodě), dlužící poměr 3 -5. Výsledkem je dlužené vlákno s fibrilární strukturou. PET lze dlužit také za studena – s krčkem, ale vznikají mikrotrhliny. [12]

Poslední operací, při které se dokončuje vznik vlákenné struktury, je ustálení (fixace struktury) vláken vlivem ohřevu (relaxace vnitřních napětí a rekrystalizace). U výrobce se dluží standardně beznapětově při teplotách 130 - 180°C. U spotřebitele, kde se vyžaduje především stabilizace struktury se fixuje za napětí 180 - 210°C (dochází k rekrystalizaci). [12]

Ethylenvinylacetát (EVA) molekulová hmotnost Mn 130.141 g/mol, také známý jako poly(ethylen-vinylacetát) (PEVA), je kopolymer ethylenu a vinylacetátu. Hmotnostní podíl vinylacetátu se obvykle pohybuje od 10 do 40 %, přičemž zbytek tvoří etylen [18]. Na Obr. 14. je znázorněna struktura polymeru EVA.



Obr. 14. Znázornění struktury polymeru – EVA.

EVA je elastomerní polymer, který je měkký a pružný. Tyto vlastnosti jsou rozdílné od termoplastu v tom, že materiál je zesíťovaný. Takový polymer má výbornou čistotu a lesk, nízkoteplotní houževnatost, odolnost proti stresu, trhlinám, vyšším teplotám, má nepromokavé vlastnosti a odolnost vůči UV záření. [18]

V biomedicínském inženýrství je EVA materiál hojně využíván. Polymer se rozpustí v organickém rozpouštědle (např. dichlormethan). Do kapalného roztoku jsou přimíseny práškové léky a plniva (interní cukr). Aby bylo dosaženo homogenní směsi, rychle se spolu smísí. Polymer se pak nalije do formy a při teplotě $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ se lyofilizuje, dokud se z polymeru nestane pevná látka. Polymer není biologicky rozložitelný v těle, ale je zcela inertní a způsobuje malou nebo žádnou reakci po implantaci. Eva pěna našla jako výplň uplatnění v různých druzích sportů. Jsou to např. cyklistická sedla, hokejové rukavice a helmy, lyžařské boty, vodní lyže, rybářské pruty atd. [18]

4.3 Výroba skleněných pásů použitých při výrobě lyží

V této kapitole se budu zabývat výrobou skelných pásů, kterou jsem měl možnost provést s pomocí Ing. Petra Kundery v jeho provozovně a vlastním popisem postupu při výrobě.

4.3.1 Materiál

Osnova: Přásta narovnaných skleněných vláken Advantex® R25HX22 1200tex (fa 3B – Norway)

Lubrikace vhodná k použití v polyesterových a epoxidových pryskyřicích.

Známe i jiné výrobce, jako například Adfors (dříve VERTEX), který vyrábí jemnější vlákno 22 – 300tex). Další známé firmy Owens corning, PPG, Vetrotex, Johns Manville (dříve Skloplast Trnava) a plno dalších firem.

Útek: Tepelně lepené impregnované vlákna, příze z nekonečných vláken HM 3013 (fa EY Technologies – USA)

Jádrová niť PES 5 tex (0,005 g/m)

Nános „Ethylen vinyl acetat“ 0,03 g/m

Bod tání $105\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tyto typy tavných nití se používají jako výztuž papírových obalů, výztuž lepicích pásků, pro podkladové vrstvy střešních krytin a kompozitních materiálů.

Tato firma vyrábí široký sortiment tavných nití. Jako jádrovou niť používají skleněné, PES, aramid nebo karbonové vlákno. Nános k lepení používají EVA, PES nebo PVC. [19]

Krajová niť: multifilament PES 280 dtex (fa – Filotex – Germany) [20]

4.3.2 Příprava osnovy

Jelikož se jedná o silná vlákna, není osnovní materiál nasnován, ale přímo odvíjen z cívky ke stávku. Osnovní materiál je dodáván ve formě vlákna navinutého na cívku a obalen streč folií, k udržení celistvosti cívky. Vlákno je odvíjeno samovolně ze středu cívky. Cívky jsou

umístěny v cívečnici na deskách a vlákno je vedeno přes keramické vodiče do zadního paprsku stávku. Vlákno nesmí být během vedení ničím narušeno, protože pak dochází k rozvláknění a utržení vlákna při tkání. Vlákno je spojováno textilním lepidlem nebo vhodnějším způsobem vzduchovou pistolí, která proudem vzduchu splete konce vlákna.

4.3.3 Tkání

Tkání je prováděno na tkacím stroji Muller Frick typ NF 45 2 x 130mm Obr. 15. Osnovní nitě jsou navedeny přes nerezové brzdící tyče do nitěnek a následně do tkacího paprsku. Specifikace tkaniny je uvedena v bodě 4.3.1. Paprsek je uchycen v čelistech před tkací rovinou. Útková niť je vedena přes pryžový řemínek, který dle nastavení pohonu podá přesnou délku útkového vlákna. Pro udržení napětí je útek veden přes napínací pružinky. V případě použití skleněného vlákna jsou na pružinkách keramické kroužky, kterými prochází skleněné vlákno. Útek je zanášen ve smyčce zleva doprava (nebo obráceně), a na pravé straně je zajištěn provázáním s krajovou nití perlinkovou pletáfskou vazbou. Existují 4 varianty provázání, každá má svá specifika a jsou vhodná pro různé materiály. Na levé straně je v poslední či předposlední třetině paprsku nastaven háček, který při přirazu paprsku zajistí útkovou niť proti uvolnění při otvírání prošlupu. U silných pásků, které musí být pevně napnuty, se tyto háčky nepoužívají, taktéž u vyšších dostav to není nutné a vhodné (narušují osnovní nitě). Dostava osnovy pro tkání je 53/100 mm a dostava útku je 22/100 mm. [21]

Tkání je znázorněno na obrázku Obr. 15. s výstupem hotového skelného pásku.



Obr. 15. Tkání vzorku na osnovním stávku Muller Frick typ NF 45 2 x 130mm.

4.3.3.1 Systém I – bez krajové nití

Vhodný pro lehké materiály, útková nit' musí být hladká, nejlépe dostatečně skaná.

Přednosti – pásek obsahuje pouze 2 materiály (osnova a útek) 100 % skleněné vlákno a kraj není zesílený pomocnou nití.

4.3.3.2 Systém II – s krajovou nití

Tento systém jsem použil u výroby skelného pásku.

Je taktéž vhodný pro lehké tkaniny, kdy je útek společně s krajovou nití provázán, a dochází k zajištění kraje proti páráni. Při přetrhu či přestřížení pásku může dojít k částečnému rozpletení krajové nitě, ale většinou se jedná o technické pásy vhodné k laminaci, proto to není až tak zásadní problém. Většinou lze toto místo opravit lepidlem či ručním zapožitím. Vhodné je pro tkaní s útkovou tavnou nití, která zafixuje kraj pásku. Jako krajová nit se většinou používá polyesterová nit a to typ provířený či multifilamentární.

4.3.3.3 Systém III – s krajovou nití+útková nit'

Je to spojení systému I a II. Kraj je provázán jak krajovou nití, tak útkovou nití. Dochází k neparatelnému provázání. Dvě krajové nitě zvyšují okraj pásku, proto se používá u specifických pásků s vyšší tloušťkou a se slabší útkovou nití. Většinou se používají při výrobě jednosměrných pásků, s vysokým podílem osnovního materiálu a slabým útkovým vláknem.

4.3.3.4 Systém IV – s krajovou a zajišťovací nití

Jsou použity v podstatě dvě krajové nitě, které jsou různým způsobem provázány s útkovou nití. Dochází pak k pevnému zajištění proti páráni kraje pásku. Používá se při výrobě bezpečnostních pásů aut a zajišťovacích popruhů nákladů a břemen.

4.3.4 Finální úprava kalandrováním

Pro tepelnou fixaci tavné nitě je použit ohřívač vzduchu od firmy LEISTER napojený na dmychadlo Leister.

Ohřívač Leister : LHS 41S s tryskou 70x10mm

Dmychadlo Leister/robust 1200l/min.

Dmychadlo je napojeno na dva ohřívače. Stávek je konstruován na výrobu dvou pásků současně. Ohřívače, jsou umístěny ze spodní strany pod úhlem cca 30 stupňů k pásku a 7cm před kalandrovací rovinu. Při rychlosti výroby 1m/min. je natavený pásek cca za maximálně 4 sekundy stlačen mezi kalandrovací válce. Štěrbina mezi válci je nastavena dle tloušťky materiálu, musí být taková, aby zmáčkla tavné nitě, ale nerozdrtila podélné skleněné vlákno.

Štěrbina je nastavena dle dilatačních plechů. Dilatační plechy jsou od tloušťky 0,05 – 1,0mm, odstupňovány po 0,05mm. Sada dle DIN 1544F/2008. Pro naši výrobu dostačující.

Nastavená tloušťka mezi kalandrovacími válci je 0,2mm.

Kalandrovací válce: materiál kov, průměr 150mm s teflonovým povrchem.

Teflon typ Xylan® 8843, otěruvzdorný, odolný do teploty 210 °C stupňů (fa Whitford).

Kalandrování na Obr. 16. se používá k lepšímu zafixování tavných nití. Pásek je prostorově stabilnější a lépe se zpracovává. Ve výrobě se protahuje pásek přes tzv. lepičku (váleček ponořený v pryskyřici), a právě tato úprava kalandrováním nezpůsobuje nalepení pásku na váleček a má i pozitivní vliv na další manipulaci s páskem namočeným v pryskyřici.

Úprava skelného pásku kalandrem Obr. 16.

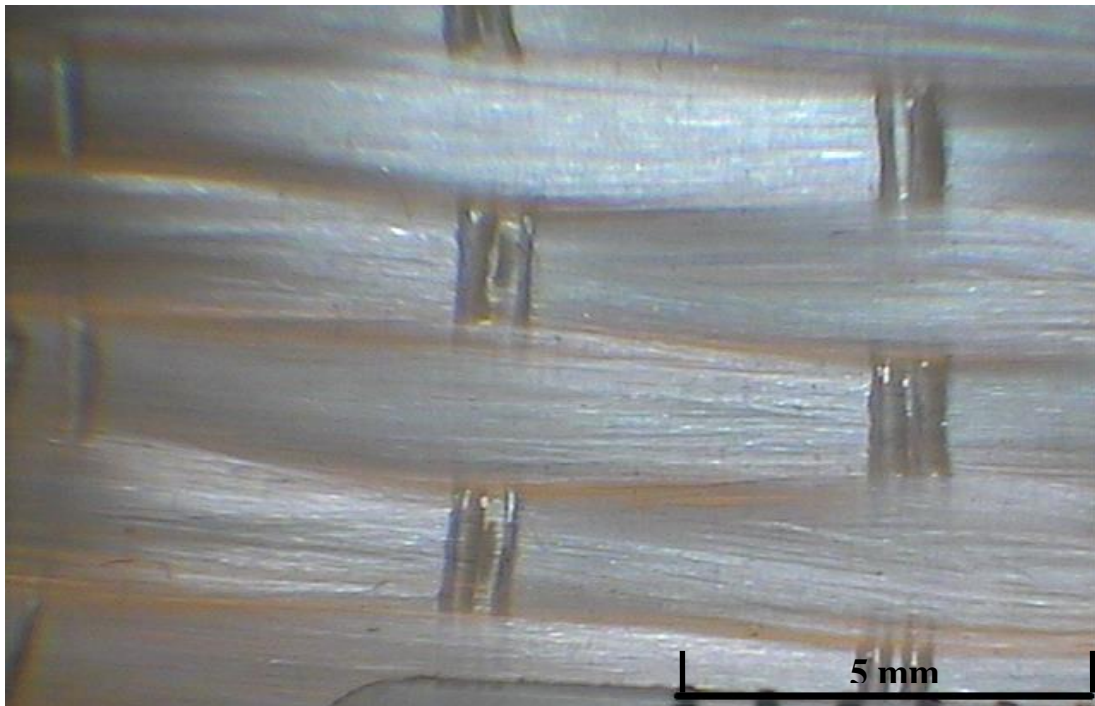


Obr. 16. Natavení tavné nitě ohříváčem Leister LHS 41S před kalandrováním.

Teploty k natavení tavné nitě jsou nízké (90°C – 110°C za 2 až 5 sekund je pásek lepidlý), proto už cca 15 – 20cm za tavnou rovinou je pásek stabilní, nelepivý a lze ho bez problémů po slepení vrstev navinout na papírovou či plastovou dutinku.

Následně je rolička pásků po navinutí požadovaného množství zabalena do folie. Je nutné zachovat čistotu pásku, protože nečistota či mastnota má negativní vliv na další zpracování a kvalitu produktů z těchto pásků.

Skelný pásek po kalandrování zobrazený pod mikroskopem Bel photonics na Obr. 17.



Obr. 17. Hotová skelná tkanina pod mikroskopem Bel photonics.

5 Matrice

V této kapitole je vysvětlen pojem matrice a jsou popsány hlavní typy matric. Dále je v této kapitole podrobněji popsána epoxidová pryskyřice, kterou jsem použil při výrobě vzorku pro tetování a také samotná příprava pryskyřice.

5.1 Popis a základní rozdělení matrice

Matrice je pojivo výztuže použité ve vláknových kompozitech. Mezi hlavní funkce matrice patří: udržení správné pozice vláken, ochrana vláken před povrchovým poškozením, pomáhá distribuovat napětí, zajišťuje interlaminární pevnost a dává materiálu potřebné fyzikální a chemické vlastnosti.

Matrice se rozděluje na termoplasty a termosety. Termoplasty lze opakovaně zpracovávat jako např. PP, PE, PVC, PET. Termosety nelze opakovaně zpracovávat, jsou ale pevnější např. epoxidová pryskyřice, polyamidová pryskyřice, polyesterová pryskyřice, bakelit. Matrici tvoří čtyři hlavní druhy pryskyřic, které se používají pro výrobu kompozitních materiálů. Jsou to epoxidové, polyesterové, fenolové a polyamidové. Jako nejběžnější matrice je používána epoxidová pryskyřice vzhledem k její dobré přilnavosti k vláknům. Je odolná proti vnějším vlivům a velmi dobře se zpracovává, a proto jsem ji použil pro výrobu vzorků. [22]

5.2 Epoxidová pryskyřice použitá pro výrobu vzorků

Epoxidová pryskyřice je polymerní materiál syntetického původu. Patří mezi tzv. reaktoplasty. Jedná se o pryskyřičné látky s více než jednou epoxidovou vazbou. Ty vynikají velmi dobrou adhezí k celé řadě materiálů a po vytvrzení dalšími podstatnými vlastnostmi: chemickou odolností, tvarovou stálostí včetně malého smrštění při vytvrzení a dalšími vlastnostmi typickými pro syntetické pryskyřice – tvrdostí a dobrou tepelnou odolností zvláště v porovnání s termoplasty. [23]

U zkoušených vzorků byla použita epoxidová pryskyřice s názvem CHS EPOXY 520 od výrobce Spolchemie Ústí nad Labem.

Epoxidový index E.I.: $5.2 - 5.4 \text{ mol.kg}^{-1}$ (počet epoxidových ekvivalentů v 1g pryskyřice)

Epoxidový ekvivalent EEW: 190 g.mol^{-1} (takové množství pryskyřice, které obsahuje jeden epoxidový ekvivalent, tzn. jednu epoxidovou skupinu)

Dále bylo použito tvrdidlo Telalit 0600 od výrobce Spolchemie Ústí nad Labem

Hydroxylový ekvivalent H.E.W.: 62 g.mol^{-1} (takové množství pryskyřice, která obsahuje jeden hydroxylový ekvivalent, tzn. jednu hydroxylovou skupinu)

Materiál CHS EPOXY 520 byl mísen s tvrdidlem Telalit 0600 v poměru 100 : 33.

Dále byly do směsi přidány vícestěnné uhlíkové nanotrubičky typ Pristine Onex MW 1003 dále jen CNT, od výrobce Glonatech o průměru 20 – 45 nm a délce $\geq 10 \text{ nm}$. [24]

6 Kompozitní materiály

Tato kapitola popisuje pojem kompozit a nejrozšířenější druhy výroby kompozitů.

6.1 Popis kompozitů

Kompozitem se nazývá soustava alespoň dvou nebo i více materiálů, ze kterých alespoň jeden, musí být pevný s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi. Tato soustava zároveň musí dosáhnout vlastností, které by ani jedna ze složek nemohla dosáhnout samostatně či jednoduše součtem. [25]

Kompozitní materiály mají uplatnění v různorodých oblastech průmyslu. Především jsou použity tam, kde potřebujeme docílit nízké váhy a vysoké pevnosti (automobilní a letecký průmysl, sportovní pomůcky apod.). [26]

Na Obr. 18. je znázorněno dělení kompozitních materiálů podle tvaru a uspořádání výztuže.



Obr. 18. Různé druhy kompozitních materiálů. [26]

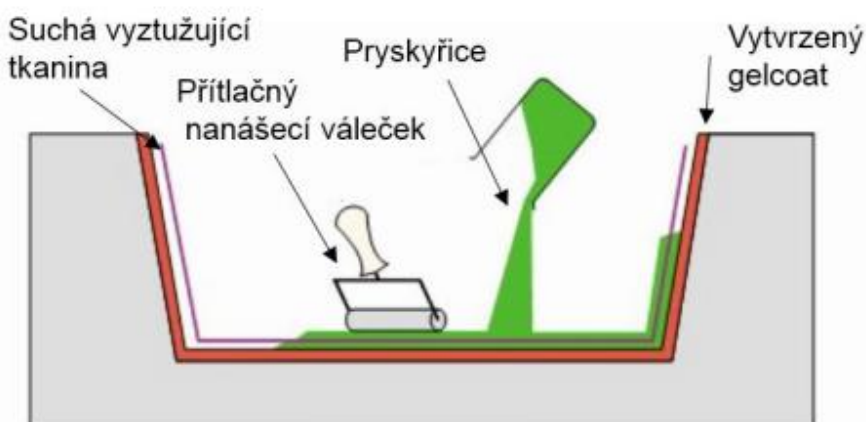
6.2 Výroba kompozitů

Nabízí se velké množství způsobů výroby kompozitů, níže jsou uvedeny ty nejrozšířenější postupy.

6.2.1 Ruční kladení

Tento způsob se řadí mezi jednu z nejstarších metod výroby a je zároveň i způsobem výroby, který byl použit při výrobě kompozitních vzorků, které byly v této práci testovány. Při tomto způsobu se výztuž i pryskyřice nanáší manuálně. Kvalita povrchu takto vyrobeného kompozitu vyhovuje pouze z jedné strany, což velmi omezuje návrhy výrobků vyrobených touto metodou. Po nanesení výztuže a následné saturaci pryskyřicí je výrobek nutné nechat volně vytvrdit.

Výroba kompozitu ručním kladením je znázorněna na Obr. 19. Povrch formy je upraven separačním činidlem. Do formy je nalita pryskyřice a poté položena výztuž, na kterou je nanášena další vrstva pryskyřice a ta je válečkem vtlačena do výztuže a přitom jsou vytlačeny vzduchové bubliny. [26]

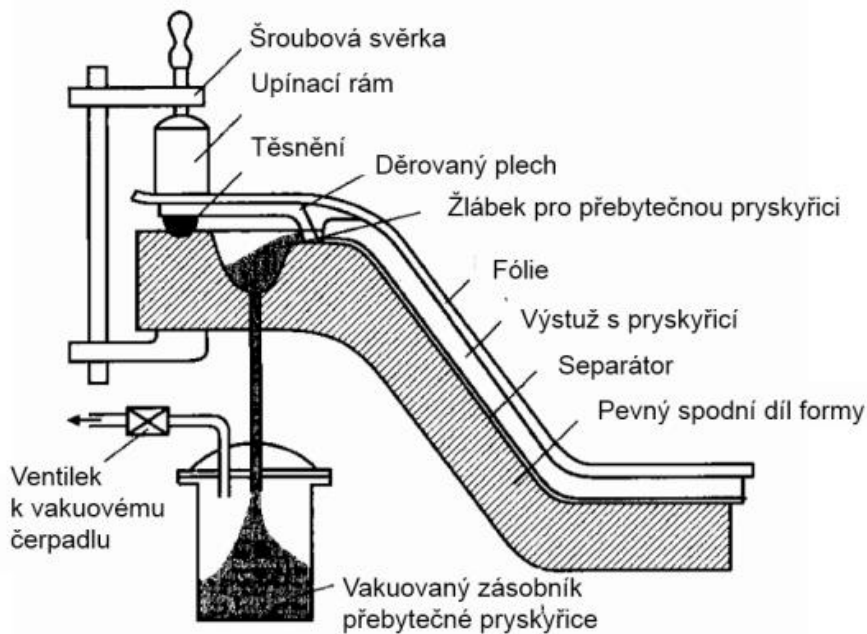


Obr. 19. Výroba kompozitu ručním kladením. [26]

6.2.2 Výroba vakuovým prosvycováním

Tento způsob je vlastně vylepšená metoda ručního kladení, přičemž u tohoto způsobu je v poslední části výroby na povrch výrobku nanášena tenká vzduchově nepropustná vrstva. Poté se nechá na formu působit vakuum a vytlačí se bubliny.

Výroba kompozitu vakuovým prosvycováním je znázorněna na Obr. 20. Po ručním nakladení, je film položen přes volný povrch kompozitního dílce. Prostor formy je vakuován a film je ručně dotlačen na kompozit. Přebytečný vzduch je vytlačen. Po vytvrzení je film stržen a výrobek dokončen. [25]

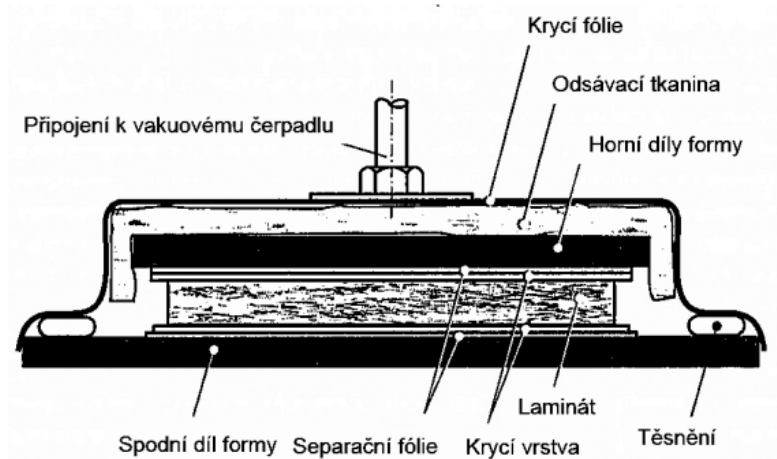


Obr. 20. Nízko tlaká (vakuová) technologie výroby prosvycováním používající jednoduchou formu. [26]

6.2.3 Výroba vytvrzování v autoklávu

Metoda autokláv je opět vylepšením výrobního postupu popsaného v bodu 6.2.2. U tohoto postupu se výrobek vytvrzuje v uzavřené nádobě pod teplem a tlakem.

Výroba kompozitu vakuovým prosvycováním je znázorněna na Obr. 21. Laminát je připraven ve formě a poté je přenesen do autoklávu. Při působení tepla a tlaku je kompozit vytvrzen. [25]

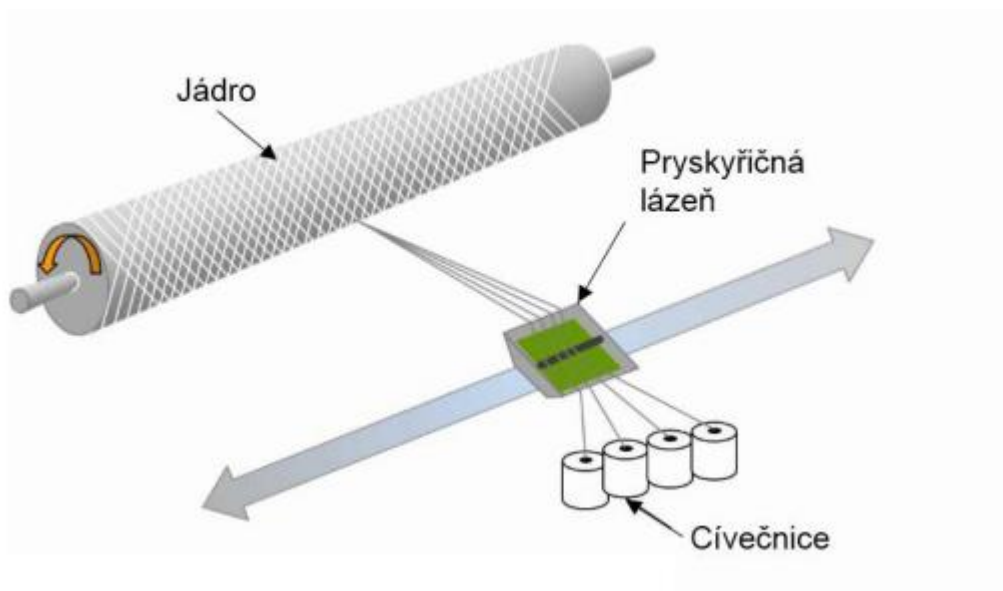


Obr. 21. Výroba kompozitu v autoklávu. [26]

6.2.4 Navíjení

Tato metoda spočívá v návíně kontinuálního pramene vláken napuštěných pryskyřicí na točící se vřeteno, jak je znázorněno na Obr. 22. Tento způsob výroby umožňuje přesně uspořádat a natočit vlákna, a tudíž zajistit jejich přesné parametry.

Při výrobě tohoto kompozitu je do rotačního zařízení upnuto jádro, které je buď vyjímatelné, nebo se po skončení procesu stane součástí výrobku. Na jádro jsou navinuty výztuže, za předem naprogramovaného předpětí, složení, orientace atd. Kompozit se dopéká i s jádrem a vytvrzení probíhá při neustálé rotaci. [26]

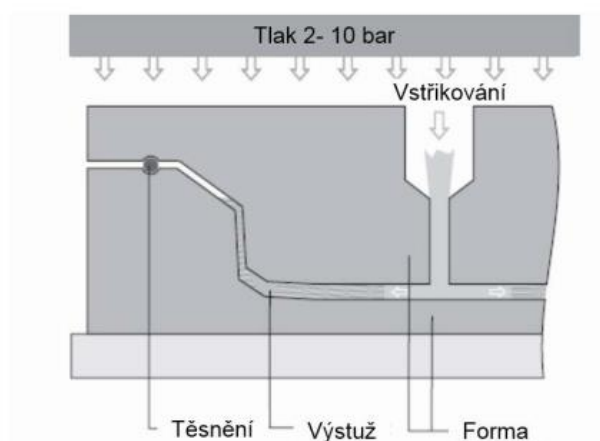


Obr. 22. Schéma navíjecího stroje. [26]

6.2.5 Metoda lisování se vstřikem pryskyřice

Při metodě lisování se vstřikem pryskyřice (RTM) je potřebné pracovat s uzavřenou formou, do jejíž dutiny se vkládá tkanina, následně se pod tlakem vstřikuje pryskyřice. Pracuje se s formou v pokojové teplotě, ale dutina je vyhřátá na 40 - 60 °C. [26]

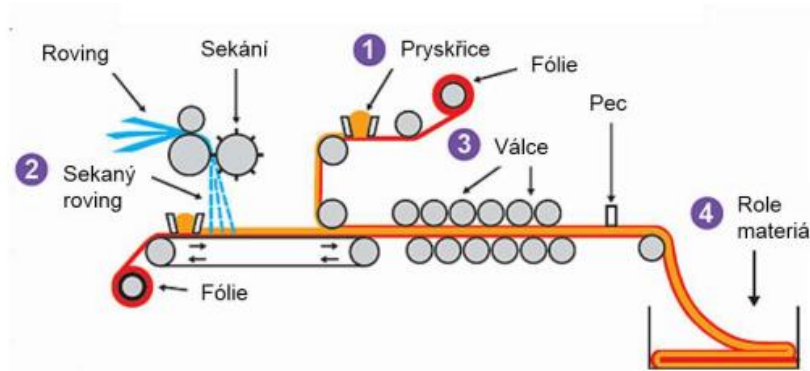
Při této výrobě jsou obě strany formy navoskovány a do formy je vložena suchá výztuž. Do uzavřené formy je vstříknuta pryskyřice pod tlakem. Po naplnění formy začne pryskyřice vytékat odtokovými otvory ven a forma je uzavřena po dobu vytvrzení. [26] Takovýto způsob výroby je zobrazen na Obr. 23.



Obr. 23. Schematické znázornění vysokotlakého stroje RTM. [26]

6.2.6 Metoda lisování se vstřikem matrice

Při metodě lisování se vstřikem matrice (SMC) pracujeme s vlastnostmi vláken v délce 2 až 50 mm. Výroba probíhá smícháním jednotlivých částí, jako jsou pryskyřice, modifikátory a plniva a následným nanesením na rohož. Z výztuže, je nanesena další vrstva a poté z obou stran jsou přiloženy fólie. Sendvič projde válci a pryskyřice je vtlačena do rohože. Dále je pás protažen pecí, jak vidíme na Obr. 24. [26]



Obr. 24. Schematické znázornění výroby technologií SMC. [25]

7 Delaminace v kompozitech

V této kapitole bakalářské práce jsem čerpal z [27] a popisuji delaminaci v laminátových kompozitech, kterou se tato práce zabývá.

7.1 Jednotlivé druhy poškození materiálů

Tato část bakalářská práce popisuje problematiku delaminace a druhy poškození materiálu.

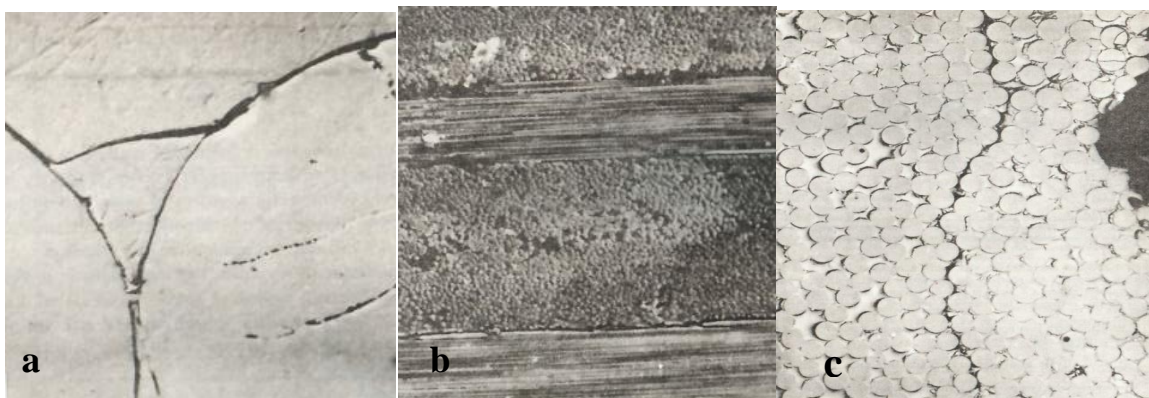
7.1.1 Delaminace

Delaminace, která je popsána v této bakalářské práci, je oddělení dvou vzájemně slepených materiálů. Narušením materiálového elementu přestane tento materiál dobře splňovat svoji funkci. V některých případech již nepatrná deformace způsobuje porušení, zatímco v jiných dochází k porušení při lomu nebo úplném oddělení částí materiálu. V kompozitech je běžné, že k vnitřnímu porušení materiálu dojde daleko předtím, než se objeví pozorovatelné makroskopické změny ve vzhledu nebo chování kompozitů. Vnitřní poškození lze sledovat v mnoha podobách odděleně nebo ve spojení. [27]

Typy vnitřního poškození jsou:

1. přetržení vláken, 2. vznik mikrotrhlin v matrici, 3. oddělení vláken od matrice a 4. oddělování vrstev v laminovaných kompozitech (delaminace) [27].

Mikrofotografie na Obr. 25. ukazuje některé druhy vnitřního porušování materiálu. Účinek vnitřních poškození na makroskopickou reakci materiálu je pozorovatelný až tehdy, když je hustota vnitřních poškození (poruch) dostatečně velká.



Obr. 25. Procesy vnitřního porušování materiálu (a) - vznik mikrotrhlin, (b) – mikrotrhliny v průběhu namáhání, (c) – oddělení vláken od matrice. [27]

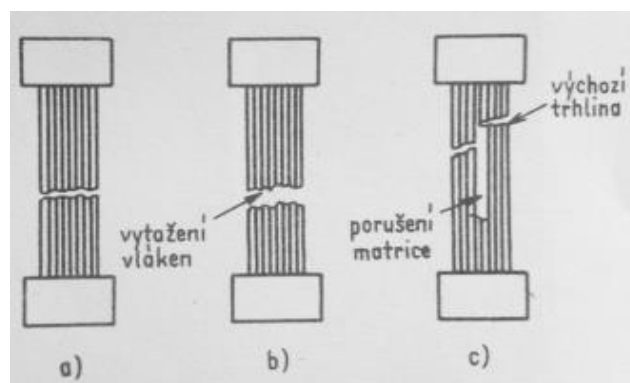
Ve většině případů se před makroskopickým poškozením mění významně makroskopické vlastnosti materiálu. Za lomové napětí jednosměrného kompozitu považujeme takové napětí, při kterém dojde k odchýlení závislosti napětí na deformaci od lineárního průběhu, nebo takové napětí, při kterém dojde k lomu. V prvním případě je vrstva kompozitu považována za neporušenou, když napětí přesáhne mez úměrnosti, a následující deformační křivka se nedá předvídat z původních vlastností vrstvy. Podle druhé definice porušování kompozitu je možné používat kompozit do jeho extrémních hodnot pevnosti za předpokladu, že vybereme přiměřený součinitel bezpečnosti. Velké množství jednosměrných kompozitů vykazuje lineární závislost mechanických vlastností téměř až do jejich lomu. V těchto případech obě definice porušení poskytují stejnou hodnotu lomového napětí. [27]

7.1.2 Porušení podélným tahovým namáháním

V kompozitech s jednosměrovými křehkými vlákny, které jsou podrobeny rostoucímu tahovému podélnému zatížení, se porušení projeví v jejich nejtenčích příčných průřezech přetržením vláken. Se zvětšujícím se zatížením se zvyšuje počet vláken, které se přetrhly. Proces přetržení vláken nelze ovlivnit – je zcela náhodný. Při vzrůstu počtu přetržených vláken se průřezy kompozitu stávají příliš slabými, aby vydržely zvýšení napětí, čímž dojde k celkovému lomu kompozitu. Na rozhraní přetržených vláken dojde k přerušení vazeb vlivem koncentrace napětí na konci vláken, což zapříčiní oddělení části kompozitu. Vyskytují se případy, kdy se můžou trhliny vzniklé podél vláken porušením přilnavosti mezi maticí a vláknem kumulovat. Působením podélného tahového napětí v jednosměrovém kompozitu může dojít k porušení těmito způsoby:

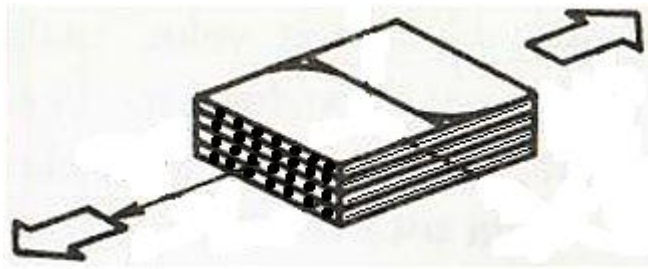
1. křehké porušení
2. křehké porušení s vytažením vláken
3. křehké porušení s vytažením vláken a) smykovým porušením na rozhraní vláken a matrice, b) porušením složek (lomu matrice mimo vlákna). [27]

Tyto výše uvedené mechanismy jsou znázorněny na Obr. 26.



Obr. 26. Mechanismus porušení matrice jednosměrného kompozitu při podélném namáhání (a) - křehké porušení, (b) - křehké porušení s vytažením vláken, (c) – křehké porušení s oddělením složek porušením matrice. [27]

Mechanismus porušení matrice při podélném namáhání ve směru vláken je znázorněn na Obr. 27.

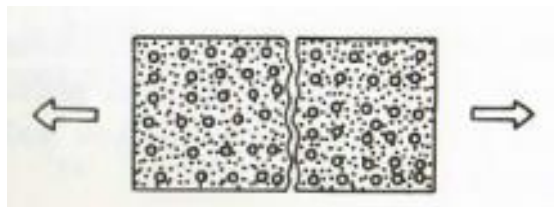


Obr. 27. Mechanismus porušení matrice při podélném namáhání. [27]

7.1.3 Porušení příčným tahovým namáháním

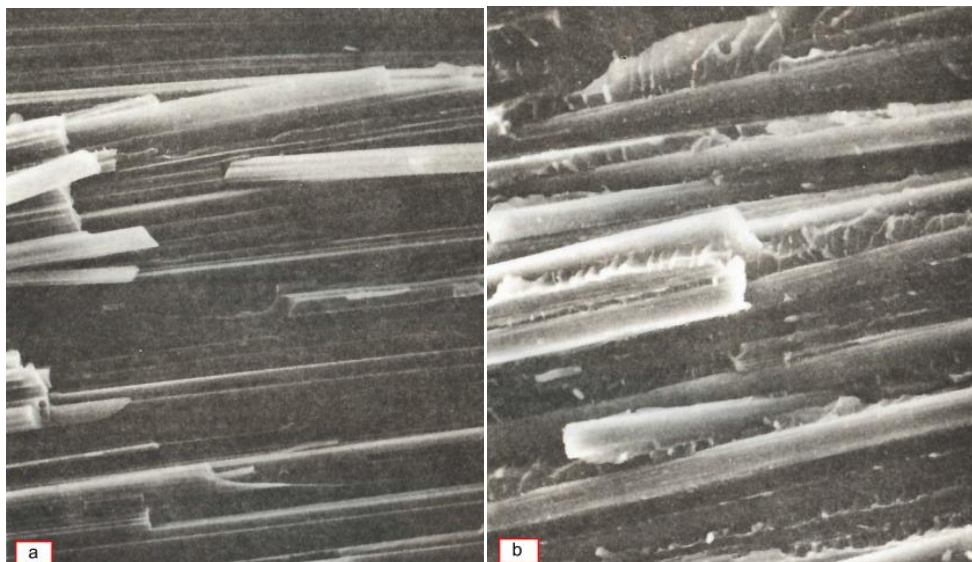
Vlákna kolmá na směr zatížení působí v podstatě tak, že vytvářejí koncentrace napětí na mezifázovém rozhraní a v matrici. Proto příčinou porušení jednosměrného kompozitu při jeho příčném tahovém zatížení je příčné porušení tahem matrice nebo rozhraní mezi vlákny a matricí. V některých případech může dojít i k příčnému porušení vláken, jsou – li vysoce orientovaná a málo pevná v příčném směru. Při příčném porušování kompozitu působením příčného tahového napětí Obr. 28. se mohou uplatnit tyto mechanismy:

1. porušení tahovým napětím matrice,
2. oddělování složek nebo štěpení vláken. [27]



Obr. 28. Mechanismus porušení matrice při příčném namáhání. [27]

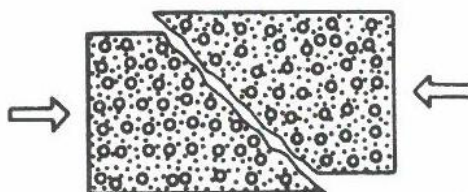
Tahovým porušováním matrice s oddělením složek se rozumí porušení mezipovrchových vazeb mezi vlákny a matricí. Obr. 29. a, b ukazují lomové plochy kompozitu vyztužených uhlíkovými vlákny s vysokým modulem pružnosti nebo uhlíkovými vlákny s vysokou pevností. [27]



Obr. 29. a, b Mikrofotografie jednosměrového kompozitu podrobeného příčnému tahovému zatížení znázorňující (a) - lomovou plochu kompozitu z uhlíkových vláken s vysokou hodnotou modulu pružnosti, (b) - lomovou plochu kompozitu z uhlíkových vláken s vysokou pevností v tahu, detailní záběr z Obr. 31. [27]

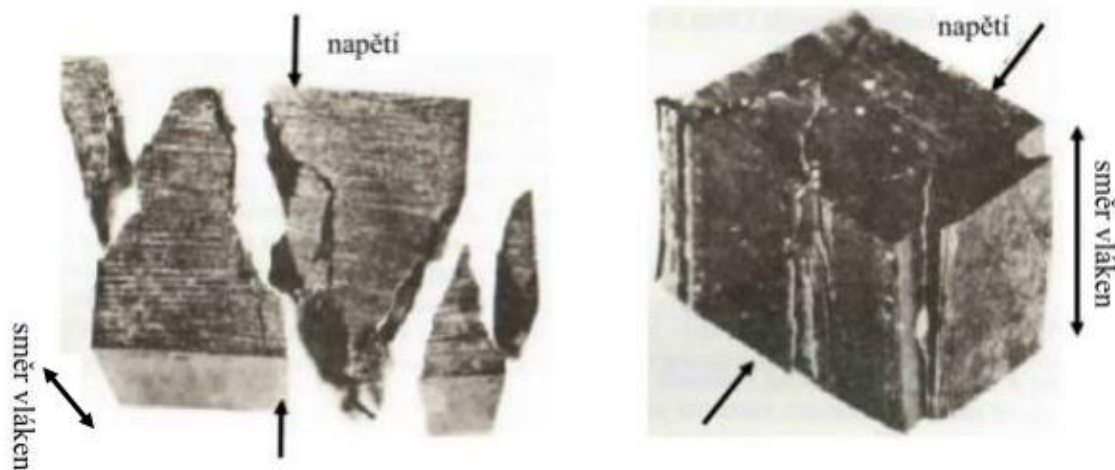
7.1.4 Porušení příčným tlakovým namáháním

Jednosměrné kompozity vystavené příčnému tlakovému namáhání se obvykle porušují smykovým porušením matrice, které je zpravidla doprovázené separací složek nebo vláken. Metoda tohoto porušování je zobrazena na Obr. 30., v němž některé části porušeného povrchu byly vytvořeny separací složek.



Obr. 30. Porušení vzniklé smykovým oddělením složek. [27]

Zkoumání polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny naznačuje, že při namáhání kompozitu v příčném směru dochází ke smykovému porušení ve směru kolmém na vlákna. Fotografie dvou porušených vzorků na Obr. 31. názorně ukazuje takové porušení kompozitu.

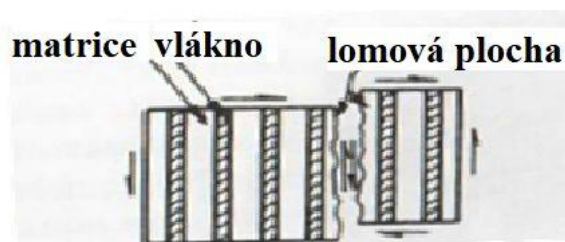


Obr. 31. Smykové porušení jednosměrného kompozitu vytvořeného vyztužením polymeru uhlíkovými vlákny. Fotografie dvou porušených vzorků názorně ukazuje takové porušení kompozitu. [27]

Porušení kompozitu předchází narušení vazeb mezi vlákny a matricí. Příčná pevnost při stlačování je nižší než podélná pevnost při stlačování. V případě, že zamezíme deformaci ve směru kolmém na rovinu určenou směrem zatížení a osami vláken, je pravděpodobné dosažení příčné pevnosti podobné s podélnou pevností v tlaku. Vzrůst pevností lze stanovit, protože k porušení dochází smykem vláken, jejichž pevnost je větší než pevnost matrice a než pevnost vazeb mezi vlákny a matricí. Nejen při smykovém, ale i při tahovém porušení vláken, je patrné, že příčná pevnost při stlačení kompozitu stoupá s rostoucím podílem vláken v kompozitu. [27]

7.1.5 Porušení namáháním působícím ve smykové rovině

V případě namáhání působícím ve smykové rovině může dojít k porušení kompozitu smykovým porušením matrice, oddělením složek nebo kombinací obou předchozích způsobů porušení. Způsoby porušení mohou tedy nastat uplatněním těchto mechanismů: 1. smykovým porušováním matrice, 2. smykovým porušováním matrice s oddělováním složek a 3. oddělováním složek. Tento způsob porušení je znázorněn na Obr. 32., v němž lomová plocha může obsahovat rovněž i části s rozrušeným rozhraním.



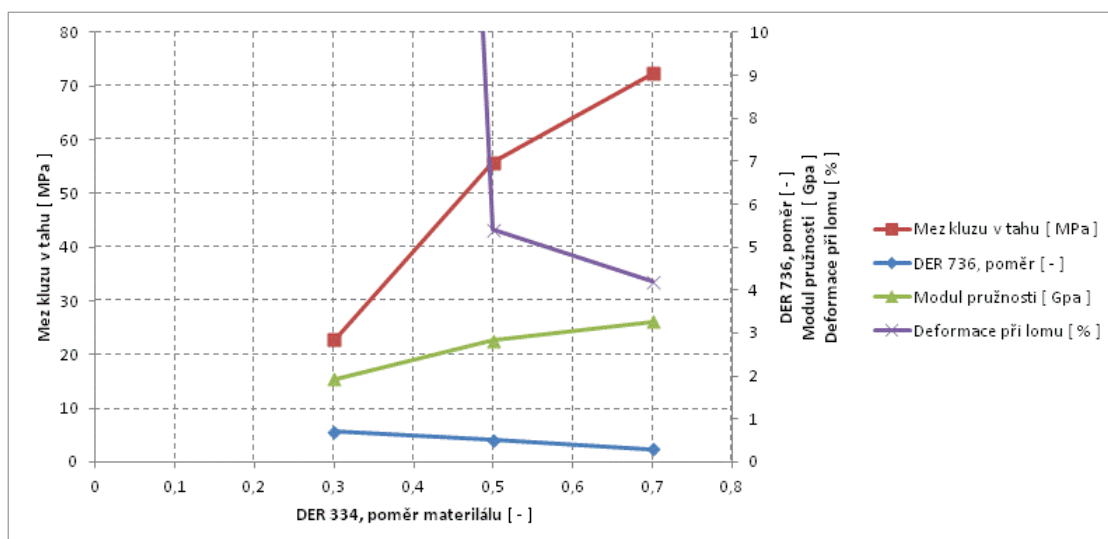
Obr. 32. Lomová plocha obsahující části s rozrušeným rozhraním. [27]

Výsledky měření houževnatosti kompozitů z epoxidových pryskyřic vyztužených rohožemi ze skelných vláken mísením křehké epoxidové pryskyřice (DER 334) a poddajné epoxidové pryskyřice (DER 736) v různých poměrech jsou v Tab. 7.1. Tyto studie provedl Gaggar a Broutman. [20]

Tab. 7.1. Vlastnosti směsí matricových materiálů. [27]

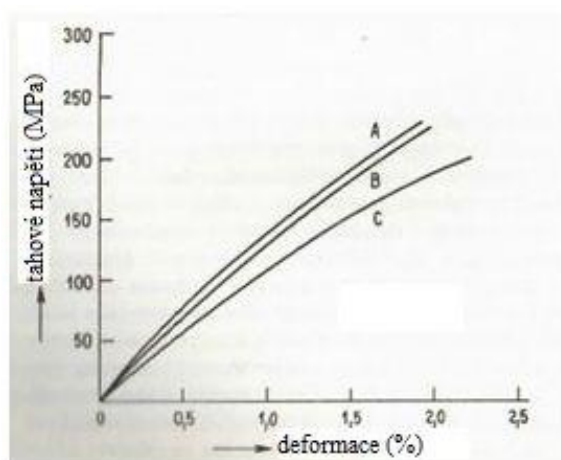
Materiál matrice	Mez kluzu v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Deformace při lomu [%]
A 70% DER 334 30% DER 736	72,3	3,27	4,2
B 50% DER 334 50% DER 736	55,8	2,82	5,4
C 30% DER 334 70% DER 736	22,7	1,93	> 80

Na Obr. 33. jsou znázorněny vlastnosti kompozitů z epoxidových pryskyřic vyztužených rohožemi ze skelných vláken mísením křehké epoxidové pryskyřice (DER 334) a poddajné epoxidové pryskyřice (DER 736) v různých poměrech. Mez kluzu v tahu a modul pružnosti stoupá s vyšším obsahem křehké epoxidové pryskyřice v matrici. Deformace při lomu klesá s vyšším obsahem křehké epoxidové pryskyřice v matrici. [27]



Obr. 33. Tahové křivky napětí – deformace pro kompozity s třemi různými matricovými materiály. Vlastní zpracování podle Tab. 7.1. na základě dat z [27].

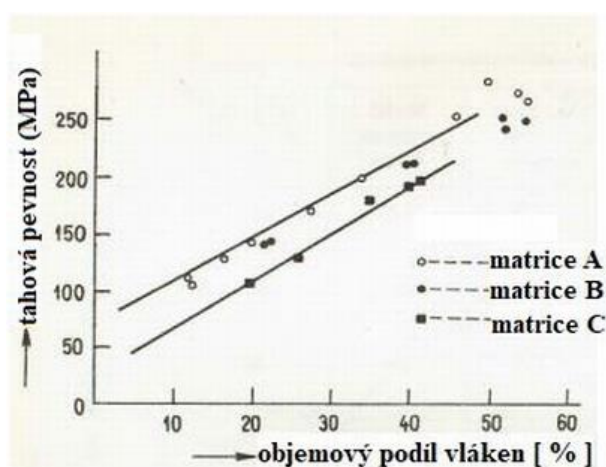
Na Obr. 34. jsou znázorněny deformace v závislosti na tahovém napětí pro matrice s různým poměrem mísení křehké a podajné epoxidové pryskyřice. [27]



Obr. 34. Tahové křivky napětí – deformace pro kompozity s třemi různými matricovými materiály. [27]

Kompozit z houževnaté pryskyřice označené jako směs matrice C vykazuje nižší pevnost a modul, ale mírně vyšší deformaci při lomu v porovnání s kompozity s křehkou matricí, viz matrice A a B. Rozdíl mezi deformacemi při lomu všech tří kompozitů a také rozdíl mezi jejich pevnostmi a moduly je však skutečně nevýznamný v porovnání s rozdíly v odpovídajících vlastnostech příslušných matricových materiálů.

Důvodem malého mezního protažení kompozitu s houževnatou matricí je snížená možnost přetváření vláken. V kompozitu je matrice vystavena prostorovému působení napětí, i když kompozit sám je namáhán osově. Účinek tříosé tahové napjatosti způsobuje, že se houževnatá matrice porušuje při velmi nízkých deformacích. Proto jsou – li do matrice přidána vlákna, deformace při lomu drasticky klesá. Kompozity s houževnatou nebo křehkou matricí se zřejmě porušují stejným mechanismem. Tahová pevnost jako funkce objemového podílu vláken je ukázána na Obr. 35. [27]



Obr. 35. Tahová pevnost v závislosti na objemovém podílu vláken. [27]

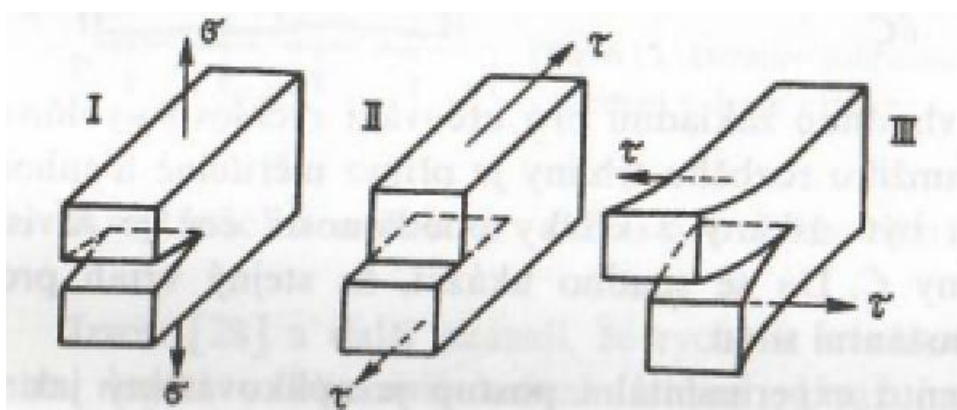
Maximální tahová pevnost kompozitu s křehkou maticí se objevuje při objemovém podílu vláken přibližně 50%; nad touto hodnotou následuje lehké snížení pevnosti v důsledku obtíží při zpracování směsi pro kvalitní kompozit s vysokým plněním vláknou. Zlepšená pevnost kompozitu s křehkou maticí vyplývá z vyšší pevnosti matrice, která má zřetelný vliv v případě kompozitů s náhodně orientovanými vlákny. [27]

7.2 Popis ortotropních vrstev kompozitů

Jediná vrstva laminátového kompozitu takzvaná lamina se nazývá obecně vrstva kompozitu či laminátu, nebo jedním slovem laminát. Laminát může mít minimální tloušťku 0,13 mm v případě neimpregnované vrstvy, nebo 6 mm v případě tkaných vložek. Obvykle obsahuje jedinou výztužnou vrstvu, jednosměrovou či vícesměrovou. Jediná lamina je obvykle příliš tenká, aby se jí dalo použít přímo k jakékoli technické aplikaci. Proto se spojuje dohromady více vrstev, vytvářejících novou strukturu, nazývanou laminát. Vlastnosti jednotlivých lamin a jejich orientace jsou voleny tak, abychom získali při konstrukci laminátu jeho požadované vlastnosti. Vlastnosti laminátu lze určovat ze znalosti vlastností jej vytvářejících lamin. Chování laminátu je pak určeno chováním jednotlivých lamin. Analýza a konstrukce laminátu tedy vyžaduje úplnou znalost vlastností a projevů lamin. [27]

7.3 Experimentální měření rychlosti uvolňování deformační energie

Je všeobecně známo, že existují tři možné způsoby zatěžování či šíření trhliny viz Obr. 36. Libovolný konkrétní typ rozvoje trhliny může být složen z těchto tří základních způsobů. Dále se soustředíme pouze na měření rychlosti deformační energie při rozevírání okrajů trhliny. Oba zbývající způsoby zatěžování lze analyzovat podobným způsobem [27].



Obr. 36. Základní způsoby zatěžování trhliny I, tahové napětí (σ), II, smykové napětí (τ) podélné III, smykové napětí (τ) příčné. [27]

8 Příprava vzorků pro testování

Mnou vyrobená skelná tkanina byla dodaná do Synpa Pardubice a dále zpracována pracovníky v Synpu.

8.1 Příprava matrice a závěrečná výroba vzorků k testování

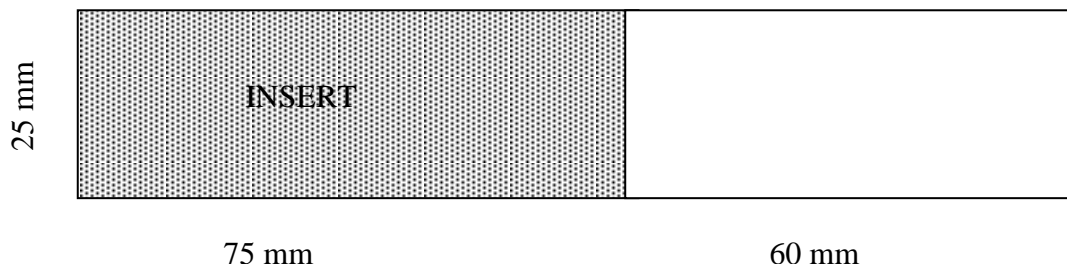
Čistá epoxidová pryskyřice CHS EPOXY 520 byla smíchána s tvrdidlem Telalit 0600 v poměru 100 : 33 v kádince. Čistá epoxidová směs byla před použitím zbavena bublin aplikací vakua v exsikátoru po dobu 5 minut. [24]

Uhlíkové nanotrubic (CNT) byly smíseny s CHS EPOXY 520 vyhřátou na 40°C pomocí skleněné tyčinky (4 g Pristine Onex MW 1003 + 100 g CHS EPOXY 520). Poté proběhla dispergace pomocí dissolverového míchadla o průměru 50 mm, obvodová rychlost 1 – 2 m.s⁻¹ po dobu 20 minut. Nakonec byla směs homogenizována v třecím tříválci. Vzdálenost mezi válci byla postupně snižována z 80 µm na 20 µm. Homogenizace proběhla 5x, rychlost válců byla nastavena na 200 ot/min. Takto připravená směs Epoxy + CNT byla mísená s tvrdidlem Telalit 0600 v poměru 100 : 33. Směs s nanotubicemi byla před použitím zbavena bublin aplikací vakua v exsikátoru po dobu 5 minut. [24]

Sklo o rozměru 10 x 15 cm bylo impregnováno karnaubským voskem a vyleštěno do sucha. Na sklo byl vložen rámeček ze silikonového těsnění, vnější rozměr 10 x 15 cm; vnitřní rozměr otvoru 8 x 13 cm. Do rámečku byly postupně vkládány tkaniny a prosycovány čistou epoxidovou směsí, a nebo směsí s nanotubicemi pomocí válečku. Jedná se o tzv. ruční kladení, jak je uvedeno v bodu 6.2.1 této práce. Celkem bylo použito 6 vrstev tkaniny. Mezi třetí a čtvrtou vrstvou tkaniny byl vložen pečicí papír o tloušťce 0.1 mm a délce 8 cm, aby byl po nařezání těles pro stanovení interlaminární houževnatosti zajištěn požadovaný rozměr viz Obr. 40. Množství směsi k prosycení tkaniny bylo voleno tak, aby vytvořený kompozitní dílec měl výšku 4 mm. [24]

Takto připravené dílce byly poté vloženy do sušárny a tvrzeny dle následujících podmínek: výhřev z 25°C na 140°C po dobu 6 hodin, výdrž 2 hodiny na 140°C, výhřev na 180°C po dobu 2 hodiny, výdrž 2 hodiny při 180 °C a pozvolné chlazení v sušárně na pokojovou teplotu. [24]

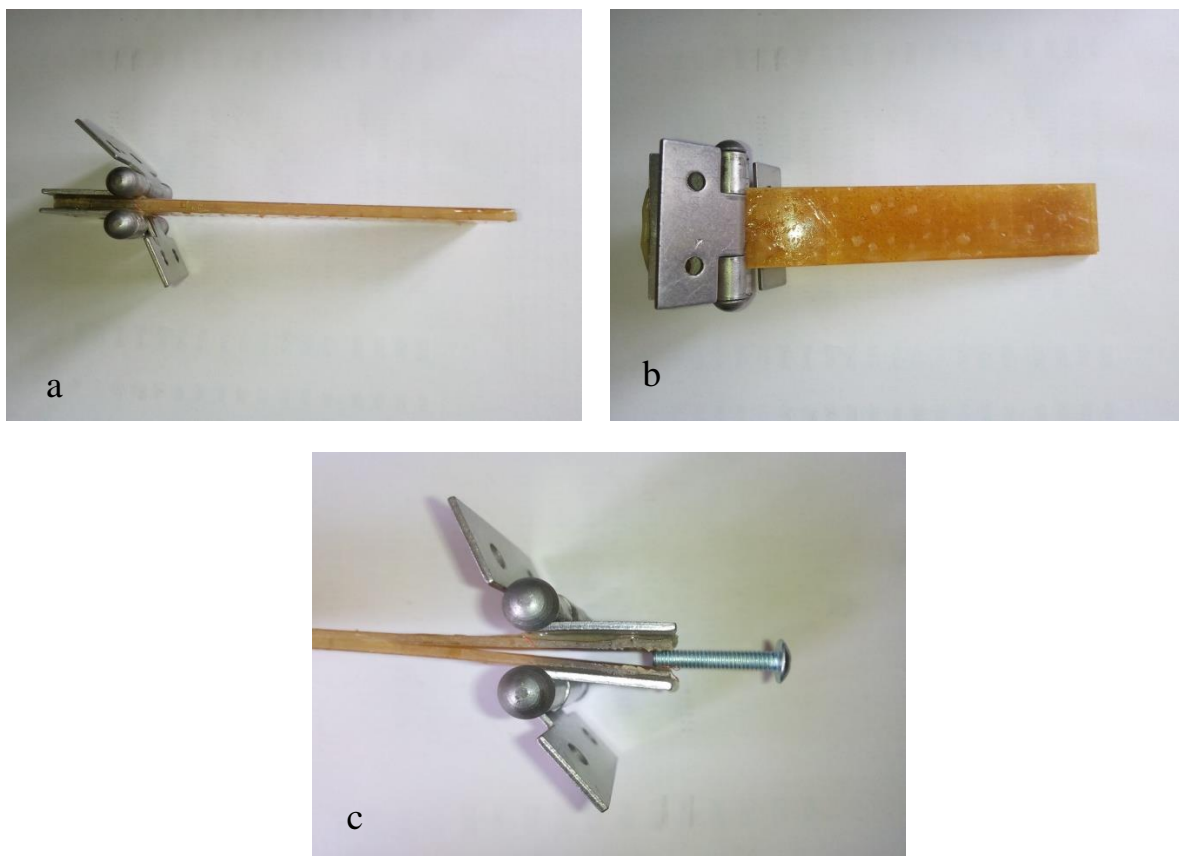
Poté byla z kompozitního dílce nařezána tělesa o rozměrech 135 x 25 mm tak, aby část, v níž je vložena vrstva pečicího papíru, tvořila 75 mm délky tělesa jak je vidět na Obr. 37. Díky nepřilnavosti epoxidového systému k tomuto papíru umožnila rozevření tělesa při testování. [24]



Obr. 37. Rozměr zkušebních těles pro stanovení interlaminární houževnatosti. [24]

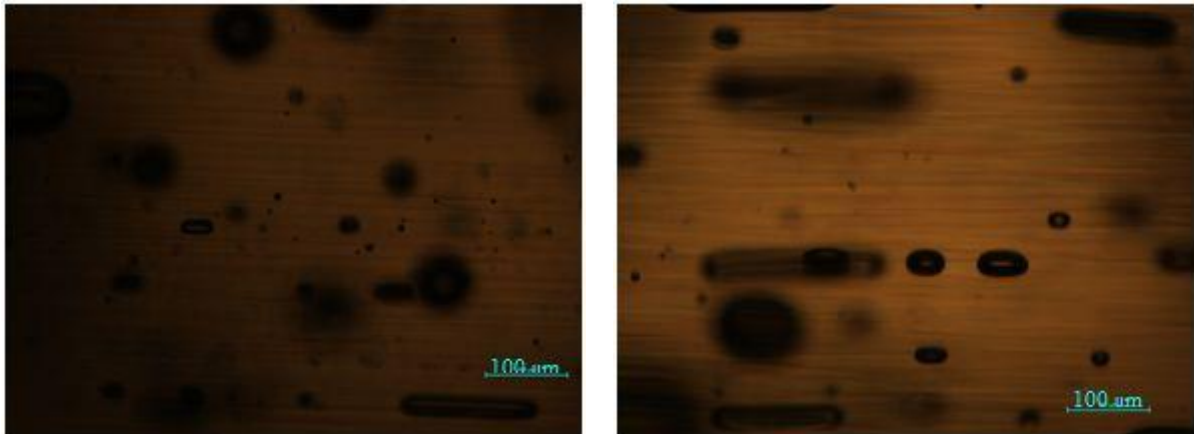
Panty, které slouží k připevnění zkoušeného vzorku do čelistí trhačky, byly širší než šířka zkoušeného vzorku a byly nalepeny dle Obr. 40. Povrch vzorku byl zdrsňen použitím smirkového papíru a poté očištěn acetonem. Stejně tak byly zdrsňeny a očištěny i panty. Panty byly přilepeny použitím lepicího systému CHS EPOXY 520 a Telalit 2608. Drátek o průměru 0,15 mm byl použit k zajištění stejné tloušťky slepu pantů ke zkoušenému vzorku. Vzorky s nalepenými panty byly vytvrzeny v sušárně po dobu 1 hodiny při teplotě 90°C. [24]

Vyrobené vzorky ze skelné tkaniny s nalepenými panty na Obr. 38. jsou připraveny k testování delaminace.



Obr. 38. Fotografie připraveného vzorku k testování delaminace a - boční pohled, b - znázorňuje celkový pohled shora, c - znázorňuje rozevření vzorku po vyndání pečícího papíru, pro lepší ilustraci je do mezery zasunutý šroub.

Strukturu vzorku se znázorněním kavit, které jsem spočítal při postupném prosvětlování vzorku pod mikroskopem Nikon eclipse LV100 vidíme na Obr. 39.



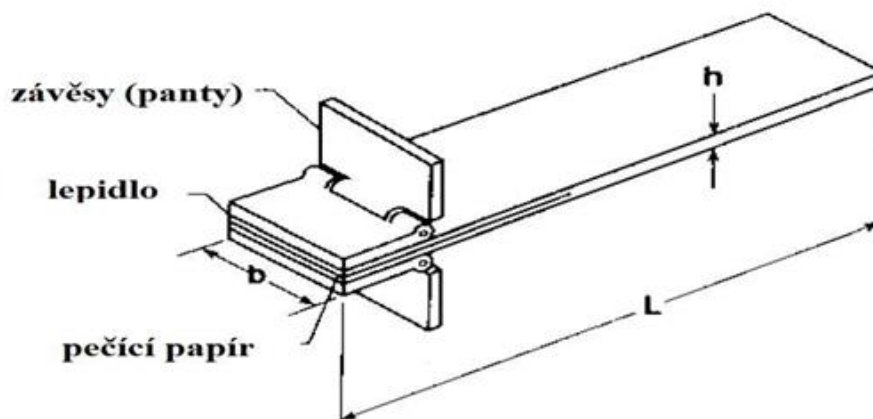
Obr. 39. Znáznornění kavit ve vrstvě zkoušeného vzorku postupným prosvětlováním vzorku pod mikroskopem Nikon eclipse LV100 ve dvou různých hloubkách, kterých bylo ve zkoušeném vzorku okolo $60/\text{mm}^2$ o průměrné velikosti kavit $70 \mu\text{m}$ dle mých výpočtů.

9 Testování vyrobených vzorků a výsledné hodnoty

Cílem testu bylo porovnat vliv obsahu uhlíkových nanotrubic na interlaminární houževnatost kompozitního dílce v porovnání s čistou epoxidovou maticí.

9.1 Popis průběhu testování interlaminární lomové houževnatosti

Testování interlaminární lomové houževnatosti kompozitních vzorků proběhlo podle normy ASTM D 5528. Zatížení bylo přenášeno pomocí pantů. Připevněné panty ke vzorku podle normy ASTM D 5528 znázorňuje Obr. 40. [28]

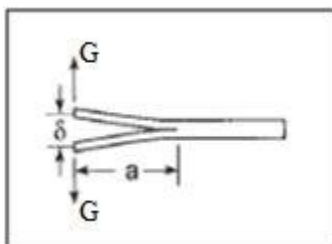


Obr. 40. Typické uspořádání vzorku pro testování s nalepenými panty. [28]

Rychlost uvolňování energie G_d , je ztrátová energie dU , ve zkušebním vzorku vztažená na jednotku šířky vzorku b při navýšení délky delaminace, da , u delaminace rostoucí za konstantního napětí jak je znázorněno v rovnici 1.

$$G_d = - \frac{1}{b} \frac{dU}{da} , \quad (1)$$

kde G_d je rychlost uvolňování energie jednotkové šířky [$J.m^{-2}$] při změně délky trhliny a , dU znamená diferenciální změnu pružné (deformační) energie vzorku, b značí šířku vzorku [mm], da je diferenciální nárůst délky delaminace [mm].



Obr. 41. Princip testování zkušebních vzorků. [28]

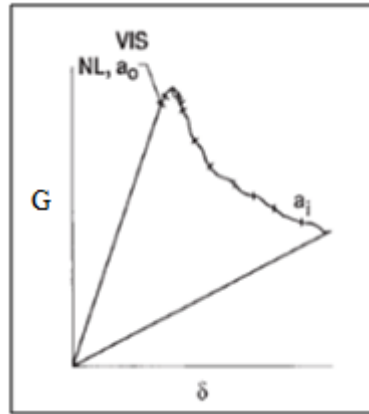
$$G = \frac{F}{a} , \quad (2)$$

kde G [N/m] je aplikované napětí, F [N] je působící síla, a [mm] je délka delaminace, δ je velikost rozevření vzorku, jak vidíme na Obr. 41.

Rovnice 2 zohledňuje šířku daného vzorku. Slouží k porovnání vzorků ze stejného materiálu, ale různých šířek.

Na obrázku Obr. 42. vidíme zvětšování rozevření tělesa δ a délka delaminace a ($a_0, a_1, a_2..a_i$). Po aplikaci síly se trhlina nejprve nezvětšuje a zůstává na délce a_0 . Dochází pouze ke zvětšování rozevření tělesa δ . Poté, co aplikovaná síla překročí mezní bod **NL**, začne se prodlužovat trhlina a velikost rozevření tělesa δ se zvětšuje pomaleji.

Režimem otevření trhliny je lomový režim, ve kterém se delaminující plochy otvírají směrem od sebe.



Obr. 42. Záznam delaminace při aplikaci zátěže. [28]

Kde G [N/m] je aplikované napětí, δ [m] je posunutí nebo taky rozevření trhliny, **NL** je bod, ve kterém se křivka závislosti napětí na otevření (posunu) stane nelineární, **VIS** je bod, ve kterém je delaminace viditelná vizuálně.

Vyhodnocení je již stanoveno z prvního zatížení vzorku takzvanou metodou Insert dle normy ASTM D 5528 a to po dosažení delaminace 7 mm. Hodnota delaminační odolnosti G_{IC} NL je stanovena v bodě, kdy se závislost stává nelineární. Hodnota delaminační odolnosti G_{IC} VIS byla stanovena v bodě, kdy byla delaminace viditelná vizuálně. Toto testování bylo ukončeno po dosažení delaminace 7 mm. Poté bylo zatížení zrušeno a vzorek se dostal do původní pozice. Zatížení bylo opět aplikováno a byly stanoveny druhé hodnoty nazývané dle normy ASTM D 5528 Pre-crack.

Průběh testování vzorku podle normy ASTM D 5528

Po upnutí vzorku mezi čelisti univerzálního zkoušecího stroje Zwick-Roell postupně zvyšujeme sílu k roztržení kompozitních vzorků. Při prvním natržení vzorku takzvanou metodou Insert, byla zaznamenána hodnota počáteční délka delaminace a_0 a hodnota delaminační odolnosti G_{IC} .

U vzorku č. 1 je to hodnota G_{IC} NL 151 J.m^{-2} a u vzorku č. 2 je to hodnota 113 J.m^{-2} . Je také zaznamenána hodnota G_{IC} VIS, jedná se o vizuální zaznamenání hodnoty u vzorku č. 1 hodnota 221 J.m^{-2} , u vzorku č. 2 hodnota 170 J.m^{-2} . Průměr u hodnoty u vzorků č. 1 a 2 G_{IC} NL je 132 J.m^{-2} a průměr u hodnoty G_{IC} VIS je 196 J.m^{-2} , jak uvádí Tab. 9.1. Pak byly testovány vzorky s nanotrubicemi. Tady je hodnota u vzorku č. 3 G_{IC} 254 J.m^{-2} a u vzorku č. 4 G_{IC} 159 J.m^{-2} . Průměr hodnot je 207 J.m^{-2} . Vizuální hodnota vzorku č. 3 byla G_{IC} 230 J.m^{-2} a vzorku č. 4 byla hodnota G_{IC} 336 J.m^{-2} , průměr byl stanoven na G_{IC} 283 J.m^{-2} , jak je uvedeno v Tab. 9.6. Je zde patrné, že počáteční delaminace je na vyšší hodnotě. Počáteční délka delaminace byla u vzorku č. 1 na hodnotě 45,70 mm, u vzorku č. 2 na hodnotě 47,70 mm, u vzorku č. 3 na hodnotě 48,72 mm a u vzorku č. 4 na hodnotě 48,06 mm. U všech čtyř vzorků probíhá test až do dosažení delaminace 7 mm.

Další měření už natrženého vzorku takzvanou metodou Pre-crack má počátek delaminace vzorku č. 1 na hodnotě 50,70 mm a u vzorku č. 2 na hodnotě 52,47 mm, u vzorku č. 3 na hodnotě 48,72 mm a u vzorku č. 4 na hodnotě 48,06 mm. U metody Pre-crack je taky stanovena hodnota $G_{IC\ NL}$. $G_{IC\ NL}$ je stanovena v bodě, kdy se závislost stává nelineární tedy v bodě, kdy dojde k prasknutí zkoušeného vzorku. U vzorku č. 1 na hodnotě 567 J.m^{-2} a u vzorku č. 2 na hodnotě 572 J.m^{-2} , u vzorku č. 3 na hodnotě 462 J.m^{-2} a u vzorku č. 4 na hodnotě 626 J.m^{-2} . Hodnota $G_{IC\ VIS}$ byla stanovena v bodě, kdy byla delaminace viditelná vizuálně u vzorku č. 1 na hodnotě 614 J.m^{-2} a u vzorku č. 2 na hodnotě 628 J.m^{-2} , u vzorku č. 3 na hodnotě 462 J.m^{-2} a u vzorku č. 4 na hodnotě 626 J.m^{-2} . Test probíhá až do roztržení vzorku do hodnoty 100 mm. Z testu je patrné, že pro počáteční delaminaci je u vzorku s nanotrubicemi potřeba větší napětí. Také v následném testu metodou Pre-crack je potřeba vyvinout větší napětí k dotržení vzorku na hodnotu 100 mm viz Obr. 49.

9.2 Měření delaminační odolnosti, vzorku bez nanotrubic

Do Synpa Pardubice byly dodány skelné tkaniny, které jsem s pomocí mého konzultanta P. Kundery připravil v jeho provozovně. Následně byly pracovníky v Synpu připraveny čtyři vzorky dle postupu tak, jak je uvedeno v bodě 8.1 této práce. Vzorky č. 1 a 2 byly připraveny bez nanotrubic. Na zkoušku delaminace byl použit zkušební stroj Zwick-Roell 5kN, rychlost příčnicku 5 mm/min. Test byl proveden dle normy ASTM D 5528, kde bylo zatížení přenášeno pomocí vlepených pantů viz Obr. 40. Test byl proveden při teplotě 23 °C a relativní vlhkosti 42 %.

9.2.1 Měření nenatrženého vzorku metoda Insert

První byl proveden test Insert materiálově totožných vzorků č. 1 a 2 bez nanotrubic. Tento test Insert probíhá až po dosažení delaminace 7 mm. Poté bylo zatížení zrušeno a vzorek se dostal do původní pozice. Rozměry těchto vzorků a počáteční délka delaminace jsou uvedeny v Tab. 9.1.

Tab. 9.1. Rozměry a počáteční délka delaminace testovaných vzorků č. 1 a 2 bez nanotrubic metodou Insert.

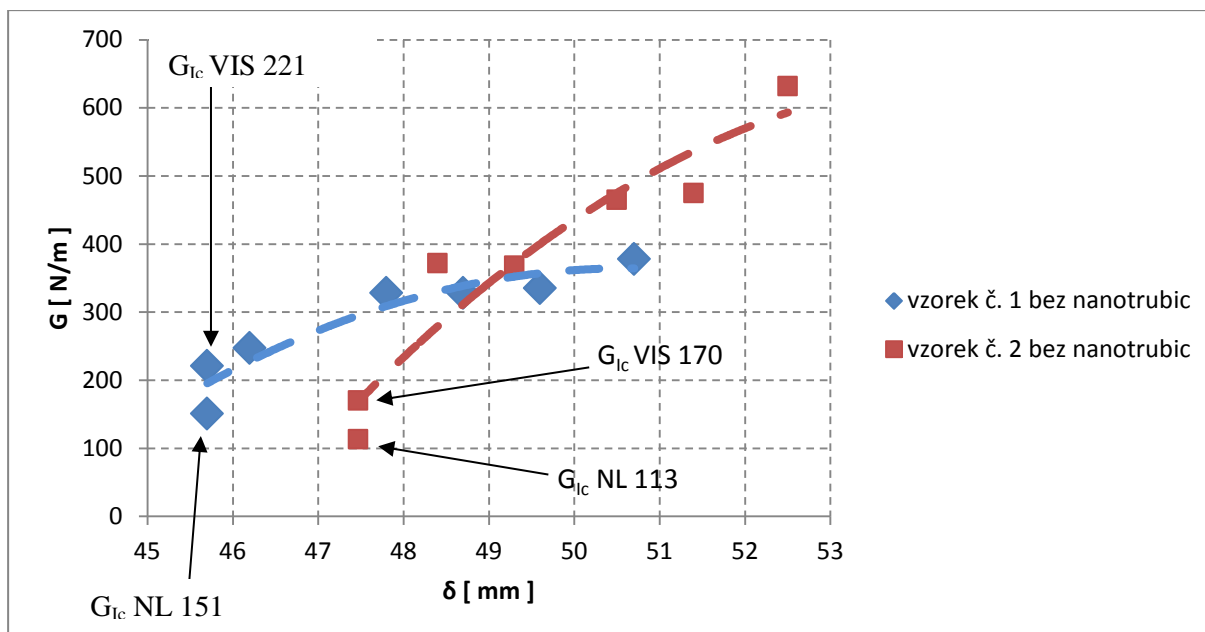
Rozměry těles vzorků	Vzorek 1 [mm]	Vzorek 2 [mm]	Stř. hod. [mm]	Směr. odch. [mm]
Šířka b	24,9	25,15	25,04	0,11
Tloušťka h	4,06	3,98	4,02	0,04
poč. délka delaminace a_0	45,70	47,47	46,60	0,90

Naměřené hodnoty metodou Insert u vzorku č. 1 a 2 jsou uvedeny v Tab. 9.2. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} NL je bod, ve kterém se závislost aplikovaného napětí stává nelineární. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} VIS byla stanovena v bodě, kdy byla delaminace viditelná vizuálně. Test Insert byl ukončen po dosažení delaminace 7 mm.

Tab. 9.2. Výsledky zkoušených vzorků č. 1 a 2 bez nanotrubic metodou Insert. Hodnota G_{Ic} NL je stanovena v bodě, ve kterém se závislost aplikovaného napětí stává nelineární. Je to současně počáteční délka delaminace tedy bod, kdy došlo k prvnímu prasknutí vzorku.

Výsledky	Vzorek 1	Vzorek 2	Stř. hod. [$J.m^{-2}$]	Směr. odch. [$J.m^{-2}$]
G_{Ic} NL – nelineární bod [$J.m^{-2}$]	151	113	132	19
G_{Ic} VIS – viditelný bod [$J.m^{-2}$]	221	170	196	26

Na Obr. 43. je graficky znázorněn průběh testování delaminace vzorků č. 1 a 2 metodou Insert. Rozdíl v počátku delaminace mohlo způsobit posunutí pečícího papíru při výrobě vzorků, který slouží k snazšímu oddělení vrstev při testování.



Obr. 43. Test Insert znázorňuje závislosti aplikovaného napětí G na rozevření δ u vzorku č. 1 a 2 bez nanotrubic. Hodnota delaminační odolnosti G_{ic} je stanovena v bodě počáteční délky delaminace. Tento test Insert je ukončen po rozevření vzorku o 7 mm.

9.2.2 Měření natrženého vzorku metodou Pre-crack

Při následném testu již natržených vzorků č. 1 a 2 bez nanotrubic metodou Pre-crack bylo napětí znovu aplikováno a počátek delaminace vzorku č. 1 byl naměřen na hodnotě 50,70 mm a u vzorku č. 2 na hodnotě 52,47 mm, tedy v bodě, kdy došlo opět k prvnímu prasknutí již natrženého vzorku po aplikaci napětí. Test probíhá až do roztržení vzorku do hodnoty 100 mm. Rozměry a počáteční délka delaminace metodou Pre-crack jsou uvedeny v Tab. 9.3.

Tab. 9.3. Rozměry a počáteční délka delaminace následného testu metodou Pre-crack u vzorků č. 1 a 2 bez nanotrubic.

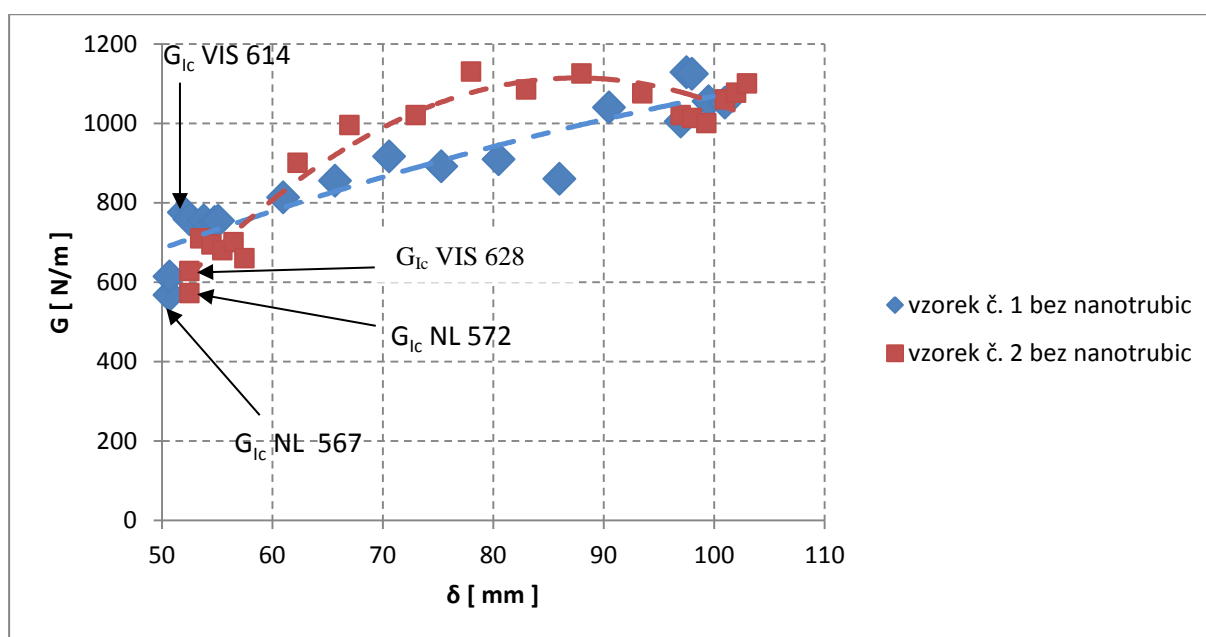
Rozměry těles vzorků	Vzorek 1 [mm]	Vzorek 2 [mm]	Stř. hod. [mm]	Směr. odch. [mm]
Šířka b	24,92	25,15	25,04	0,11
Tloušťka h	4,06	3,98	4,02	0,04
poč. délka delaminace a_0	50,70	52,47	51,60	0,90

Naměřené hodnoty u vzorku č. 1 a 2 jsou uvedeny v Tab. 9.4. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} NL je bod, ve kterém se závislost napětí stává nelineární. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} VIS byla stanovena v bodě, kdy byla delaminace viditelná vizuálně.

Tab. 9.4. Výsledky zkoušených vzorků č. 1 a 2 bez nanotrubic metodou Pre-crack. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} je stanovena opět v bodě počáteční délky delaminace tedy v bodě, kdy došlo k prvnímu prasknutí vzorku po opětovném zatížení.

Výsledky	Vzorek 1	Vzorek 2	Stř. hod. [$J.m^{-2}$]	Směr. odch. [$J.m^{-2}$]
G_{Ic} NL – nelineární bod [$J.m^{-2}$]	567	572	570	3
G_{Ic} VIS – viditelný bod [$J.m^{-2}$]	614	628	621	7

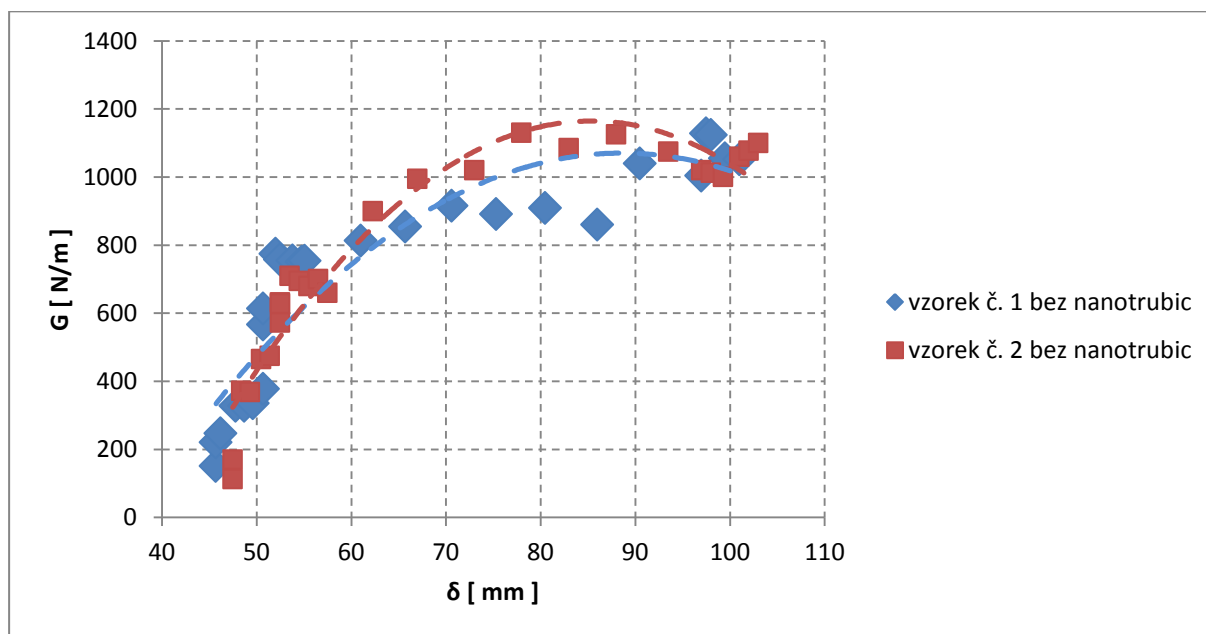
Na Obr. 44. je graficky znázorněn průběh delaminace metodou Pre-crack vzorků č. 1 a 2 bez nanotrubic. Jedná se o následný test již natržených vzorků metodou Insert. Test byl ukončen po dosažení delaminace 100 mm.



Obr. 44. Test Pre-crack vyneseny jako graf závislosti aplikovaného napětí G na rozevření δ vzorek č. 1 a 2. Test byl ukončen po dosažení delaminace na 100 mm.

9.2.3 Delaminační odolnost, metoda Insert a Pre-crack v jednom grafu

Na Obr. 45. jsou spojeny do jednoho grafu obě testovací metody Insert a Pre-crack.



Obr. 45. Závislost delaminační odolnosti vzorků č. 1 a 2 bez nanotrubic, při spojení metody Insert a Pre-crack do jednoho grafu.

9.3 Měření delaminační odolnosti vzorku s nanotrubicemi

Další test byl proveden se vzorky č. 3 a 4. Tyto vzorky obsahovaly v epoxidové pryskyřici nanotrubice o průměru 20 – 45 nm a délce ≥ 10 nm a byly připraveny pracovníky v Synpu Pardubice. Na zkoušku delaminace byl opět použit zkušební stroj Zwick-Roell 5kN, rychlost příčnicku 5 mm/min. Test byl proveden dle normy ASTM D 5528, kde bylo zatížení přenášeno pomocí pantů. Test byl proveden při teplotě 24 °C a relativní vlhkosti 46 %.

9.3.1 Měření nenatřženého vzorku metodou Insert

Opět byl jako první proveden test metodou Insert materiálově totožných vzorků č. 3 a 4 tentokrát s nanotrubicemi. Tento test Insert probíhá až po dosažení delaminace 7 mm. Poté bylo zatížení zrušeno a vzorek se dostal do původní pozice. Rozměry těchto vzorků a počáteční délka delaminace jsou uvedeny v Tab. 9.5.

Tab. 9.5. Rozměry a počáteční délka delaminace vzorků č. 3 a 4 s nanotrubicemi metodou Insert.

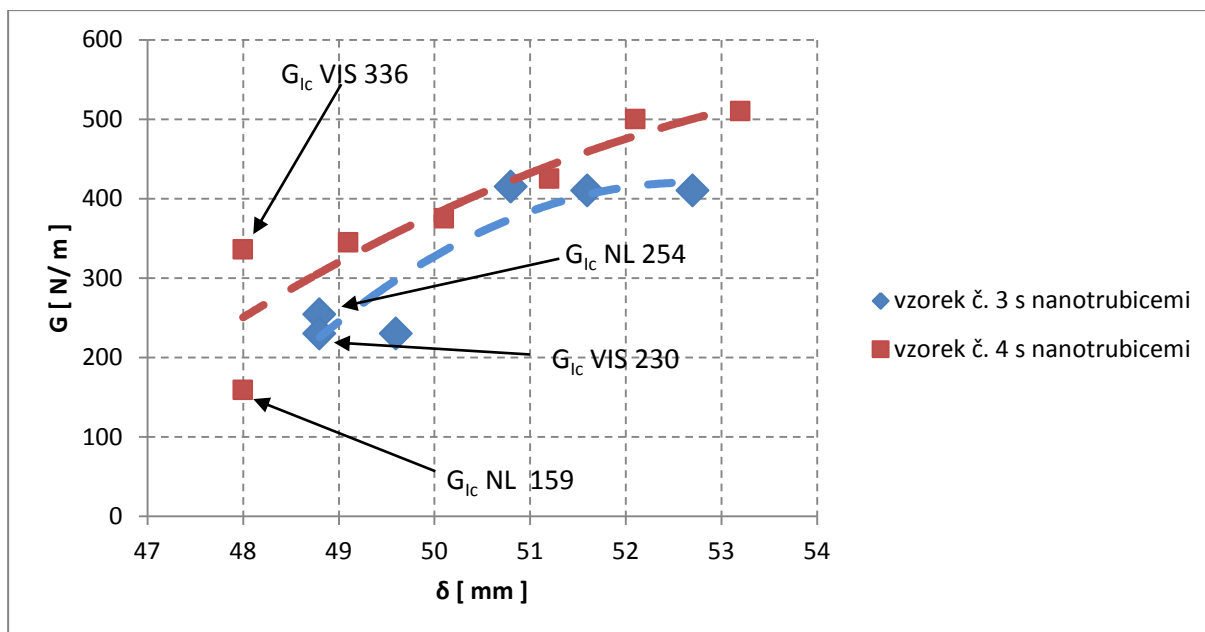
Rozměry těles vzorků	Vzorek 3 [mm]	Vzorek 4 [mm]	Stř. hod. [mm]	Směr. odch. [mm]
Šířka b	24,90	24,89	24,90	0,00
Tloušťka h	4,17	4,08	4,13	0,04
poč. délka delaminace a₀	48,72	48,06	48,40	0,30

Naměřené hodnoty metodou Insert u vzorku č. 3 a 4 jsou uvedeny v Tab. 9.6. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} NL je bod, ve kterém se závislost aplikovaného napětí stává nelineární. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} VIS byla stanovena v bodě, kdy byla delaminace viditelná vizuálně. Test Insert byl ukončen po dosažení delaminace 7 mm.

Tab. 9.6. Výsledky zkoušených vzorků č. 3 a 4 s nanotrubicemi metodou Insert. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} NL je stanovena v bodě, ve kterém se závislost aplikovaného napětí stává nelineární. Je to současně počáteční délka delaminace tedy bod, kdy došlo k prvnímu prasknutí vzorku.

Výsledky	Vzorek 3	Vzorek 4	Stř. hod. [$J.m^{-2}$]	Směr. odch. [$J.m^{-2}$]
G_{Ic} NL – nelineární bod [$J.m^{-2}$]	254	159	207	48
G_{Ic} VIS – viditelný bod [$J.m^{-2}$]	230	336	283	53

Na Obr. 46. je graficky znázorněn průběh delaminace vzorků č. 3 a 4 s nanotrubicemi. Hodnoty delaminační odolnosti G_{Ic} NL u počáteční delaminace jsou v průměru o 57 % vyšší než u vzorků č. 1 a 2 bez nanotrubic.



Obr. 46. Test Insert znázorňuje závislost aplikovaného napětí G na rozevření δ u vzorku č. 3 a 4 s nanotrubicemi. Hodnota delaminační odolnosti G_{ic} je stanovena v bodě počáteční délky delaminace. Tento test Insert je ukončen po rozevření vzorku o 7 mm.

9.3.2 Měření natrženého vzorku metoda Pre-crack

Při následném testu již natržených vzorků č. 3 a 4 s nanotrubicemi metodou Pre-crack bylo napětí znovu aplikováno a počátek delaminace vzorku č. 3 byl naměřen na hodnotě 48,72 mm a u vzorku č. 4 na hodnotě 48,06 mm, tedy v bodě, kdy došlo opět k prvnímu prasknutí již natrženého vzorku po aplikaci napětí. Test probíhá až do roztržení vzorku do hodnoty 100 mm. Rozměry a počáteční délka delaminace metodou Pre-crack jsou uvedeny v Tab 9.7.

Tab. 9.7. Rozměry a počáteční délka delaminace následného testu metodou Pre-crack vzorků č. 3 a 4 s nanotrubicemi.

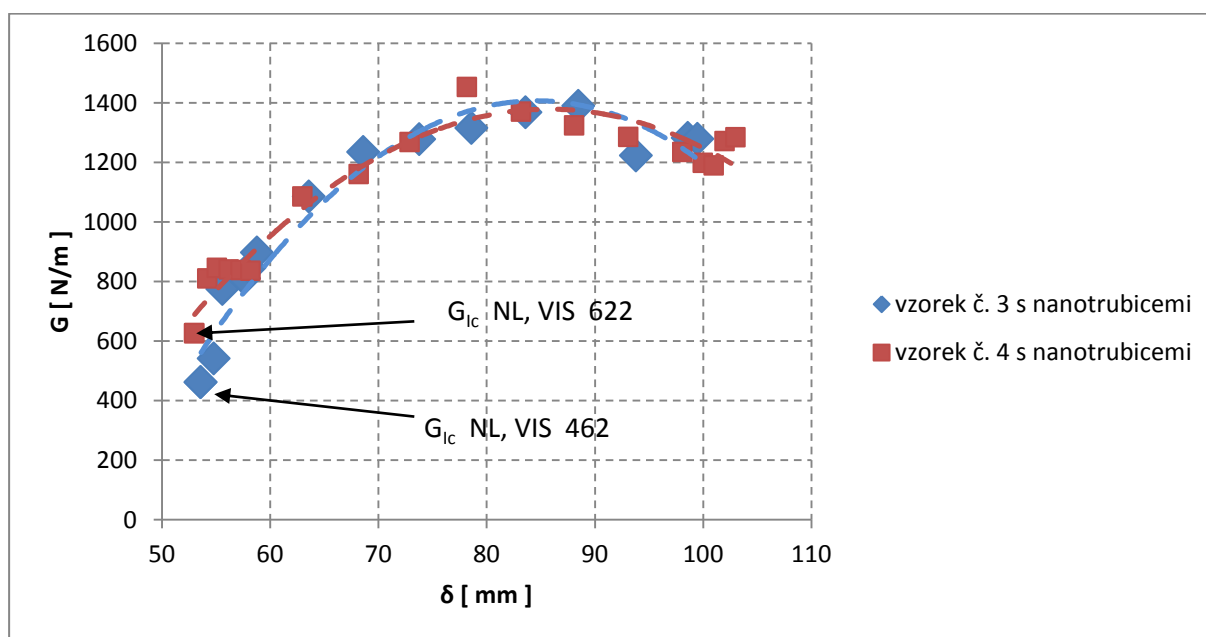
Rozměry těles vzorků	Vzorek 3 [mm]	Vzorek 4 [mm]	Stř. hod. [mm]	Směr. odch. [mm]
Šířka b	24,90	24,89	24,90	0,00
Tloušťka h	4,17	4,08	4,13	0,04
poč. délka delaminace a_0	48,72	48,06	48,40	0,30

Naměřené hodnoty u vzorků č. 3 a 4 jsou uvedeny v Tab. 9.8. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} NL je bod, ve kterém se závislost aplikovaného napětí stává nelineární. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} VIS byla stanovena v bodě, kdy byla delaminace viditelná vizuálně.

Tab. 9.8. Výsledky zkoušených vzorků č. 3 a 4 s nanotubicemi metodou Pre-crack. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} NL je stanovena opět v bodě, ve kterém se závislost aplikovaného napětí stává nelineární. Je to současně počáteční délka delaminace tedy bod, kdy došlo k prvnímu prasknutí vzorku při následném testu.

Výsledky	Vzorek 3	Vzorek 4	Stř. hod. [$J.m^{-2}$]	Směr. odch. [$J.m^{-1}$]
G_{Ic} NL – nelineární bod [$J.m^{-2}$]	462	626	544	82
G_{Ic} VIS – viditelný bod [$J.m^{-1}$]	462	626	544	82

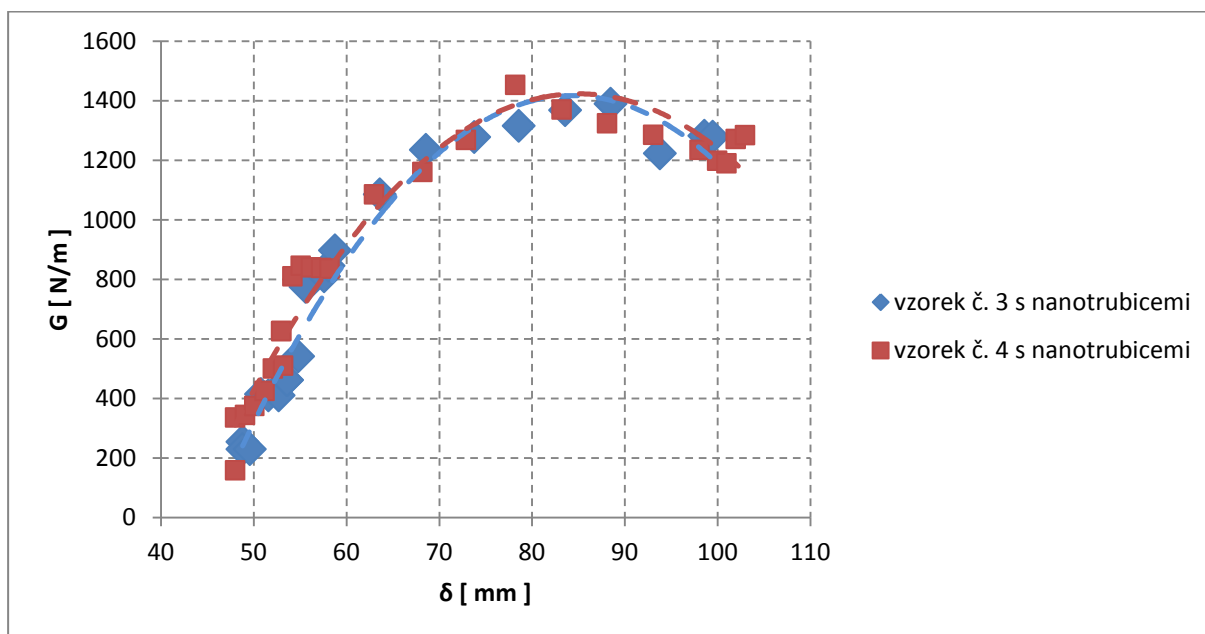
Na Obr. 47. je graficky znázorněn průběh delaminace metodou Pre-crack vzorků č. 3 a 4 s nanotubicemi. Jedná se o následný test již natržených vzorků metodou Insert. Test byl ukončen po dosažení delaminace 100 mm. Hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} VIS byla stejná jako hodnota delaminační odolnosti G_{Ic} NL.



Obr. 47. Test Pre-crack vyneseny jako graf závislosti aplikovaného napětí G na rozevření δ vzorků č. 1 a 2. Test byl ukončen po dosažení delaminace na 100 mm.

9.3.3 Delaminační odolnost, metoda Insert a Pre-crack v jednom grafu

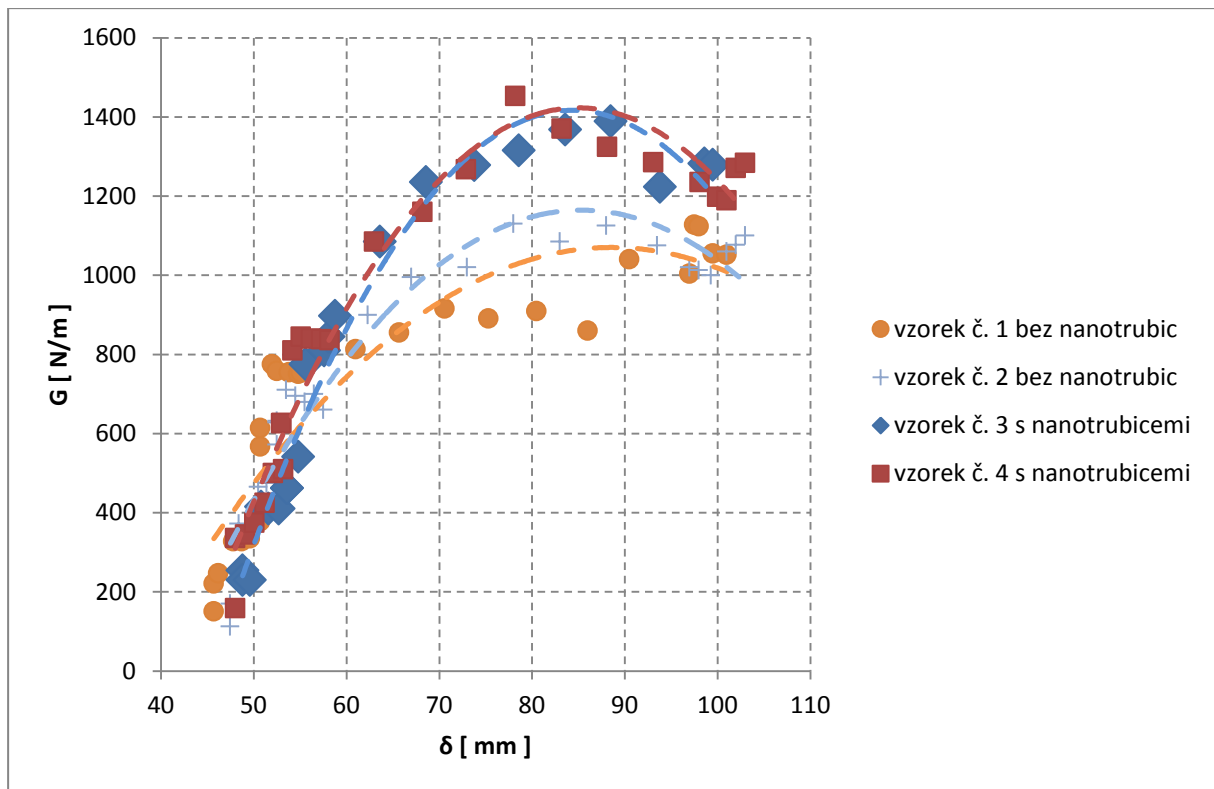
Spojení celého testu delaminace vzorků s nanotrubicemi metodou Insert a Pre-crack do jednoho grafu Obr. 48.



Obr. 48. Závislost delaminační odolnosti vzorků č. 3 a 4 s nanotrubicemi, při spojení metody Insert a Pre-crack do jednoho grafu.

9.4 Delaminační odolnost, porovnání vzorků bez nanotrubic a s nanotrubicemi

Porovnání všech zkoušených vzorků je na Obr. 49. Z grafu je patrné, že vzorky s nanotrubicemi jsou při delaminaci odolnější. Dále si můžeme všimnout snižující se delaminační napětí vlivem geometrie testu.



Obr. 49. Test závislost delaminační odolnosti všech zkoušených vzorků metodou Insert a Pre-crack v jednom grafu. Největší rozdíl mezi vzorky bez nanotubic a s nanotubicemi je patrný v nevyšší hodnotě aplikovaného napětí G , které je u vzorků s nanotubicemi o 27% vyšší než u vzorků bez nanotubic.

10 Závěr

V rámci této práce bylo z důvodu obtížnosti přípravy a finanční náročnosti systému s nanotubicemi měření provedeno na čtyřech vzorcích a dosažené hodnoty interlaminární houževnatosti byly stanoveny z tohoto omezeného souboru vzorků. Pokud by se však braly v potaz maximální dosažené hodnoty nezátížené vlivy různých kavit (následek vzduchových bublin z důvodu vysoké viskozity systému epoxidových pryskyřic a nesnadnosti smáčení výztuže), kterých bylo ve zkoušeném vzorku okolo 60/mm² o průměrné velikosti kavit 70 μm, jsou dosažené maximální hodnoty aplikovaného napětí G v Pre-crack testu u vzorků s nanotubicemi o 27% vyšší, než hodnoty bez nanotubic, jak ukazuje Obr. 49. Dále i dosažená hodnota delaminační odolnosti G_{ic} NL metodou Pre-crack u vzorku č. 4 s nanotubicemi viz Tab. 9.8., která je téměř o 10 % vyšší než hodnota delaminační odolnosti G_{ic} NL u vzorku č. 2 bez nanotubic, jak je uvedeno v Tab. 9.4.

V Tab. 9.9. jsou uvedeny průměrné hodnoty delaminační odolnosti G_{ic} NL a hodnoty delaminační odolnosti G_{ic} VIS dosažených při prvním zatížení těles metodou Insert. Z těchto průměrných hodnot delaminační odolnosti G_{ic} NL je patrné, že u vzorků s nanotubicemi, jsou o 57% vyšší, než vzorků bez nanotubic.

Tab. 9.9. Průměrné hodnoty interlaminární houževnatosti ze stanovení metody Insert a Pre-crack testů (NL – počátek nelineární závislosti aplikovaného napětí na rozevření tělesa; VIS – viditelná počáteční delaminace ve vzorku). Hodnoty v tabulce jsou průměrné hodnoty z Tab. 9.2., 9.4., 9.6., 9.8.

Vzorek	Metoda Insert		Metoda Pre-crack	
	G _{ic} NL [J.m ⁻²]	G _{ic} VIS [J.m ⁻²]	G _{ic} NL [J.m ⁻²]	G _{ic} VIS [J.m ⁻²]
č. 1 a 2 bez nanotrubic	132 ± 19	196 ± 26	570 ± 3	621 ± 7
č. 3 a 4 s nanotrubicemi	207 ± 48	283 ± 53	544 ± 82	544 ± 82

Testy bylo zjištěno, že vzorky s nanotrubicemi mají větší delaminační odolnost než vzorky bez nanotrubic.

Lyže časem ztrácí původní konstrukční vlastnosti vlivem opakovaného mechanického zatěžování a působením velkých teplotních rozdílů, což má za následek i delaminaci jednotlivých vrstev lyže. Tento problém by se mohl vyřešit přidáním nanovláken do epoxidových pryskyřic používaných k výrobě lyží. Domnívám se, že uvedený postup by nejspíš našel využití v programu vývoje sportovních lyží, na které je kladem vyšší požadavek kvality. Bylo by dobré vyzkoušet, jakým způsobem ovlivní směs nanovláken i konstrukci samotné lyže. Vzhledem k dosaženým výsledkům při testování nanovláken v matrici lze předpokládat, že při zachování stejné váhy lyží dojde k výrobě konstrukčně kvalitnějších lyží, což by mohlo být předmětem dalšího výzkumu.

Použitá literatura

- [1] Dygrín J. a kolektiv, Základy lyžování, Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2003, ISBN 80-246-0995-9.
- [2] Nosek M., Historie lyžování [online]. [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <http://pf.ujep.cz/~nosek/bezky/historie.html>.
- [3] Soumar L., Běh na lyžích - výbava, technická příprava, klasika, bruslení, Praha, Grada, 2001, ISBN: 80-247-0015-8.
- [4] Bolek E., Ilavský J., Soumar L., Běh na lyžích, Praha, Grada, 2008, ISBN 978-80-247-1371-7, 176 s.
- [5] Sosna I., Velký příběh lyžařského byznysu. Časopis Snow, leden 2011 číslo 59 [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <https://snow.cz/clanek/2353-velky-pribeh-lyzarskeho-byznysu-ii-vyvoj-lyzi-2>.
- [6] Kotačka O., Počátky lyžování v Čechách [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: http://www.seniortip.cz/?module=article&id_article=1374.
- [7] Preclíková O., První lyže v Čechách [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: http://www.seniortip.cz/?module=article&id_article=1895.
- [8] Lyže - Slonek © 2007, [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <http://slonek.cz/index.php?ln=cz&id=99&cat=c&typ=static>.
- [9] Fuss K. F., Subic A., Strangwood M., Mehta R., Routledge Handbook of Sports Technology and Engineering, 2014, Print ISBN: 9780415580458, 528 s.
- [10] Wikipedie - otevřená encyklopedie, UHMWPE [online]. [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high-molecular-weight_polyethylene.
- [11] Wikipedie - otevřená encyklopedie, ABS [online]. [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene.
- [12] Militký J., Textilní vlákna klasická a speciální. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2012.
- [13] Dwight, D. W.: Glassfiberrein forcements. In: Comprehensive Composite Materials, Amsterdam, Elsevier, 2000, [online]. [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books>.
- [14] Hlaváč, J. Základy technologie silikátů; STNL – nakladatelství technické literatury: Praha, 1981, 516 s.

- [15] Jirásek, J., Vavro, M., Nerostné suroviny a jejich využití. Ostrava. Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3 [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html>.
- [16] Kořínek Z., Vlákna pro kompozity, [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>.
- [17] Mleziva J., Polymery – struktura, vlastnosti a použití, Praha, 1993, Sobotáles, ISBN: 80-901570-4-1.
- [18] Wikipedie - otevřená encyklopedie, Ethylenvinylacetát [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Etylenvinylacet%C3%A1t>.
- [19] EY Technologies [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: www.eytechnologies.com.
- [20] Filotex® [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: www.filotex.com.
- [21] Kolčavová Sirková B., Textilní technologie 1, Liberec, Technická univerzita v Liberci.
- [22] Laš V., Mechanika kompozitních materiálů, Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni.
- [23] Wikipedie - otevřená encyklopedie, Epoxidová pryskyřice [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1_prysky%C5%99ice.
- [24] Varečková D., Test interlaminární houževnatosti. Synpo, Pardubice, 2017.
- [25] Bareš R, Kompozitní materiály, SNTL, Praha, 1988.
- [26] Bouchal P., Technologie výroby a zpracování uhlíkových kompozitů. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, 2014. [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84979.
- [27] Bhagwan D., Agarval Lawrence J., Broutman, Vláknové kompozity, SNTL, Praha, 1987.
- [28] Norma ASTM D 5528, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite.

Seznam obrázků

Obr. 1. Skalní kresba lyžaře z Rodoy v Norsku zhotovená cca 2 500 let př. n. l.....	10
Obr. 2. Hotingskályže.....	10
Obr. 3. Znázornění struktury polymerů (a) – PVC, (b) – PTFE	14
Obr. 4. Znázornění struktury polymerů (a) – ABS, (b) – PE	16
Obr. 5. Hodnota amerických dolarů pro různé skupiny materiálů	17
Obr. 6. Triaxiální uhlíková konstrukce	20
Obr. 7. Systémy vázání	20
Obr. 8. Zařízení pro zjištění tvrdosti, délky a výšky komory lyží - celkový pohled.....	21
Obr. 9. Zařízení pro zjištění tvrdosti, délky a výšky komory lyží – detail.....	21
Obr. 10. Kompletace jednotlivých vrstev materiálu lyží	22
Obr. 11. Dvouetážový lis firmy Langzauner.....	23
Obr. 12. Plošné znázornění rozdílů	24
Obr. 13. Znázornění struktury polymeru – PET.....	28
Obr. 14. Znázornění struktury polymeru – EVA	29
Obr. 15. Tkaní vzorku na osnovním stávku Muller Frick typ NF 45 2 x 130mm	31
Obr. 16. Natavení tavné nitě ohřívačem Leister LHS 41S před kalandrováním.....	33
Obr. 17. Hotová skelná tkanina pod mikroskopem Bel photonics.....	34
Obr. 18. Různé druhy kompozitních materiálů	36
Obr. 19. Výroba kompozitu ručním kladením	36
Obr. 20. Nízkotlaká (vakuová) technologie výroby prosycováním používající jednodílnou formu	37
Obr. 21. Výroba kompozitu v autoklávu.....	38
Obr. 22. Schéma navíjecího stroje	38
Obr. 23. Schematické znázornění vysokotlakého stroje RTM.....	39
Obr. 24. Schematické znázornění výroby technologií SMC	39
Obr. 25. Procesy vnitřního porušování materiálu	40
Obr. 26. Mechanismus porušení matrice jednosměrového kompozitu při podélném namáhání.....	41
Obr. 27. Mechanismus porušení matrice při podélném namáhání.....	42
Obr. 28. Mechanismus porušení matrice při příčném namáhání	42
Obr. 29. Mikrofotografie jednosměrového kompozitu podrobeného příčnému tahovému zatížení.....	43
Obr. 30. Porušení vzniklé smykovým oddělením složek	43
Obr. 31. Smykové porušení jednosměrného kompozitu vytvořeného vyztužením polymeru uhlíkovými vlákny	44
Obr. 32. Lomová plocha obsahující části s rozrušeným rozhraním	44

Obr. 33. Tahové křivky napětí – deformace, modul pružnosti, mez kluzu pro kompozity s třemi různými matricovými materiály	45
Obr. 34. Tahové křivky napětí – deformace pro kompozity s třemi různými matricovými materiály	46
Obr. 35. Tahová pevnost v závislosti na objemovém podílu vláken.....	46
Obr. 36. Základní způsoby zatěžování trhliny	47
Obr. 37. Rozměr zkušebních těles pro stanovení interlaminární houževnatosti	49
Obr. 38. Fotografie připraveného vzorku k testování delaminace	49
Obr. 39. Znázornění kavit ve vrstvě zkoušeného vzorku postupným prosvětlováním vzorku pod mikroskopem Nikon eclipse LV100 ve dvou různých hloubkách	50
Obr. 40. Typické uspořádání vzorku pro testování s nalepenými panty	50
Obr. 41. Princip testování zkušebních vzorků.....	51
Obr. 42. Záznam delaminace při aplikaci zátěže	52
Obr. 43. Test Insert znázorňuje závislosti aplikovaného napětí G na rozevření δ	55
Obr. 44. Test Pre-crack vyneseny jako graf závislosti aplikovaného napětí G na rozevření δ	56
Obr. 45. Závislost delaminační odolnosti vzorků č. 1 a 2 bez nanotrubic, při spojení metody Insert a Pre-crack do jednoho grafu	57
Obr. 46. Test Insert znázorňuje závislost aplikovaného napětí G na rozevření δ u vzorku č. 3 a 4 s nanotrubicemi.....	59
Obr. 47. Test Pre-crack vyneseny jako graf závislosti aplikovaného napětí G na rozevření δ vzorek č. 1 a 2. Test byl ukončen po dosažení delaminace na 100 mm.....	60
Obr. 48. Závislost delaminační odolnosti vzorků č. 3 a 4 s nanotrubicemi, při spojení metody Insert a Pre-crack do jednoho grafu	61
Obr. 49. Test závislost delaminační odolnosti všech zkoušených vzorků metodou Insert a Pre-crack v jednom grafu	62

Seznam tabulek

Tab. 4.1. Složení různých druhů skelných vláken podle obsahu oxidů	27
Tab. 4.2. Vlastnosti různých druhů skelných vláken	27
Tab. 7.1. Vlastnosti směsí matricových materiálů	45
Tab. 9.1. Rozměry a počáteční délka delaminace testování vzorků č. 1 a 2 bez nanotubic metodou insert	54
Tab. 9.2. Výsledky zkoušených vzorků č. 1 a 2 bez nanotubic metodou Insert. Hodnota G_{Ic} NL je stanovena v bodě ve které se závislost aplikovaného napětí stává nelineární. Je to současně počáteční délka delaminace tedy bod, kdy došlo k prvnímu prasknutí vzorku.....	54
Tab. 9.3. Rozměry a počáteční délka delaminace následného testu metodou Pre-crack u vzorků č. 1 a 2 bez nanotubic	55
Tab. 9.4. Výsledky zkoušených vzorků č. 1 a 2 bez nanotubic metodou Pre-crack Hodnota G_{Ic} je stanovena opět v bodě počáteční délky delaminace tedy v bodě, kdy došlo k prvnímu prasknutí vzorku po opětovném zatížení..	56
Tab. 9.5. Rozměry a počáteční délka delaminace vzorků č. 3 a 4 s nanotubicemi metodou insert	58
Tab. 9.6. Výsledky zkoušených vzorků č. 3 a 4 s nanotubicemi metodou Insert. Hodnota G_{Ic} NL je stanovena v bodě ve které se závislost aplikovaného napětí stává nelineární. Je to současně počáteční délka delaminace tedy bod, kdy došlo k prvnímu prasknutí vzorku.....	58
Tab. 9.7. Rozměry a počáteční délka delaminace následného testu metodou Pre-crack vzorků č. 3 a 4 s nanotubicemi	59
Tab. 9.8. Výsledky zkoušených vzorků č. 3 a 4 s nanotubicemi metodou Pre-crack. Hodnota G_{Ic} je stanovena opět v bodě ve kterém se závislost aplikovaného napětí stává nelineární. Je to současně počáteční délka delaminace tedy bod, kdy došlo k prvnímu prasknutí vzorku při následném testu.....	60
Tab. 9.9. Průměrné hodnoty interlaminární houževnatosti ze stanovení metody Insert a Precrack testů (NL – počátek nelineární závislosti aplikovaného napětí na rozevření tělesa; VIS – viditelná delaminace ve vzorku).....	63