

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

DISERTAČNÍ PRÁCE

Alexandr KARGER

Liberec

2003

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



DISERTAČNÍ PRÁCE

Alexandr KARGER

Liberec

2003

**Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra materiálu**

**Obor studia: Strojírenská technologie
Zaměření: Zkoušení materiálů**

OPTIMALIZACE STRUKTURY A ANALÝZA PORUŠENÍ TRUBEK Z KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU

**Alexandr KARGER
KMT**

Školitel: Doc. Ing. Karel DAĐOUREK, CSc. – KMT, TU Liberec

**Počet stran: 114
Počet obrázků: 70
Počet tabulek: 21
Počet vzorců: 35
Počet příloh: 1**

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146073556

KMT

U388.5

Anotace:

Tato práce obsahuje v první části přehled mechanických vlastností a technologií zpracování materiálů používaných v současnosti pro stavbu rámu jízdních kol a jiných sportovních potřeb. Hodnoceny jsou ocelové, hliníkové a titanové slitiny. Cílem není pouze zjištění nejdůležitějších mechanických vlastností, ale především návrh testovací metody, která by svým charakterem vyhovovala firmám, které poskytly testovací materiál. Za tímto účelem je navržena tahová zkouška podélně vyříznutých segmentů trubek upnutých v plochých čelistech, kdy je stanovena závislost úhlu vyříznutí segmentu na mezi pevnosti materiálu.

V další části práce je zpracována analýza vlastností kompozitních materiálů. Ty byly zjištěny výpočetní metodou a experimentálně, ohybovou zkouškou plochých destiček připravených z různých druhů skelných, uhlíkových a kevlarových tkanin se základními druhy polymerních matric. Zjištěné výsledky poskytují přehled vlivu jednotlivých komponent kompozitu, typu tkaniny a skladby vrstev na výsledné vlastnosti a způsob porušení kompozitních materiálů.

V závěrečné části práce jsou využity poznatky ze zkoušek plochých destiček pro navržení technologie výroby a optimálních parametrů kompozitní trubky pro použití pro výrobu sportovních potřeb. Jako optimální, je zvolena a popsána výrobní metoda splétání vláken. Na základě naměřených hodnot je stanoven vliv parametrů splétání na vlastnosti a způsob porušení trubek vyrobených touto technologií.

Protože hodnocené vzorky kompozitních materiálů nevyhovovaly pro dané použití nízkým modulem pružnosti je navržen kombinovaný materiál z titanové slitiny a kompozitního materiálu, který svými parametry vyhovuje použití pro rámy jízdního kola a jiné sportovní potřeby.

Annotation:

The first section of this project contains an overview of the mechanical properties and technologies of the material most widely used today in the production of bicycle frames and other sport equipment. The materials tested were steel, aluminium and titanium alloys, these alloys are primarily used for only the top category of frames. The project's aim was to determine the basic mechanical properties of the tubes and also to develop a suitable testing method for tubes, which would be acceptable to firms that require samples tested. The method used involved the tensile testing of segments cut from the tubes. The results also show the relationship between segment angle and tensile strength for the samples.

The second section contains an analysis of the properties of composite materials. These were mathematically and experimentally determined using bending test of rectangular bars made from basic types of fabric comprising of glass, carbon and Kevlar fibers together with a variety of resins. The outcome of these tests provides the basis for an analysis of how the final properties of the composite samples are influenced by the separate composite components and differences between fabrics. The failure of the composite materials during testing is also outlined.

The final section of the project uses the information gained during the experiments to suggest production technology and optimal parameters for composite tubes used in the manufacture of sporting equipment. The braiding of the fibres to desired shape on a special machine was chosen as the optimal production method. An outline of the influence of matrix, fiber material and braiding parameters to the final properties of the samples is included along with the properties and failure system of the tubes during bending and tensile tests.

Due to low modulus the evaluated composite materials are not suitable for using at many applications on the bicycle frames and other sporting equipment. On purpose to increase modulus but maintain advantages of the composite materials was proposed and tested tube prepared using the method combining a titanium tube and composite material.

Obsah

Úvod

Teoretická část

1.	Materiály trubek pro stavbu jízdních kol a dalších sportovních potřeb	6
1.1	Kovové materiály	6
1.1.1	Oceli	6
1.1.2	Hliníkové slitiny	7
1.1.3	Slitiny titanu	7
1.2	Kompozitní materiály	9
1.2.1	Klasifikace kompozitních materiálů	9
1.2.2	Základní rozdělení kompozitních materiálů	10
1.2.3	Základní charakteristiky matic	12
1.2.3.1	Nenasycené polyestery	12
1.2.3.2	Vinylesterové pryskyřice	13
1.2.3.3	Epoxidové pryskyřice	13
1.2.3.4	Fenolické pryskyřice	14
1.2.4	Základní charakteristiky vláken	14
1.2.4.1	Skelná a minerální vlákna	14
1.2.4.2	Uhlíková vlákna	15
1.2.4.3	Polymerní vlákna	17
1.2.5	Technologie výroby kompozitních trubek a profilů	18
1.2.5.1	Problematika spojená se splétáním vláken	18
1.2.5.2	Navíjení vláken	22
1.2.5.3	Pletení	23
1.2.5.4	Pultruze	24
1.2.5.5	Navíjení tkaniny	25
1.2.5.6	Kompozity s kovovou maticí	26
1.2.6	Porušení kompozitních materiálů	27
	<i>Experimentální výsledky</i>	
2	Hodnocení vlastností nejpoužívanějších kovových trubek	32
2.1	Přehled testovaných trubek	32

2.1.1	Ocelové trubky	32
2.1.2	Trubky z hliníkových slitin	33
2.1.3	Trubky ze slitin titanu	34
2.2	Testování mechanických vlastností	34
2.2.1	Rozbor chemického složení ocelových trubek	34
2.2.2	Tahová zkouška trubek	35
2.2.3	Rozbor vlastností segmentů trubek	36
2.2.4	Měření vlastností mechanických vlastností segmentů trubek	39
2.2.5	Měření modulu pružnosti trubek	41
3	Hodnocení základních vlastností kompozitních materiálů	43
3.1.	Použité matrice	43
3.1.1	Matrice Synolit K0175	44
3.1.2	Matrice ChS Polyester 145	44
3.1.3	Matrice Norpol COR VE 8300	45
3.1.4	Matrice Norpol COR VE 8770	45
3.1.5.	Matrice Norpol 200-800	46
3.1.6	Matrice ChS Epoxy 531	47
3.1.7	Matrice ChS Epoxy 422	47
3.2	Použité výztuže	48
3.2.1	Výztuže ze skelných vláken	48
3.2.2	Výztuže z uhlíkových vláken	49
3.2.3	Hybridní výztuž karbon-kevlar	50
3.3	Zkouška třibodovým ohybem pro laminované vzorky	50
3.3.1	Technologie přípravy vzorků	50
3.3.2	Měření hustoty materiálu	51
3.3.3	Výpočtové charakteristiky vzorků	53
3.3.4	Mechanické vlastnosti laminovaných vzorků	61
3.4	Mechanické zkoušky trubek z kompozitního materiálu	65
3.4.1	Technologie splétání vláken	66
3.4.2	Technologie přípravy vzorků	69
3.4.3	Zkouška plochých vzorků vyrobených technologií splétání vláken	70
3.4.4	Statická zkouška trubek ohybem	71

3.4.4.1	Trubky vyrobené ze skelných vláken	71
3.4.4.2	Trubky vyrobené z uhlíkových vláken	76
3.4.4.3	Trubky Ti3Al2,5V-KOMPOZIT	78
3.4.5	Zkouška jednoosým tahem	79
4	Mechanismus porušení kompozitních materiálů	81
4.1	Mechanismus porušení laminovaných vzorků	81
4.1.1	Keprová vazba	82
4.1.2	Atlasová vazba	85
4.1.3	Plátnová vazba	88
4.1.4	Karbon-kevlarová tkanina	90
4.1.5	Tkaniny ze skelných vláken	93
4.1.6	Vzorky typu „sandwich“	94
4.2	Mechanismus porušení trubek z kompozitního materiálu	96
4.2.1	Porušení při namáhání ohybem	96
4.2.2	Porušení při namáhání tahem	98
4.2.3	Porušení trubek Ti3Al2,5V-KOMPOZIT	100
4.3	Diskuse výsledků	102
5	Závěr	108
	Seznam použitých symbolů a zkratk	110
	Seznam použité literatury	112

Úvod

Kompozitní materiály se staly průmyslovými materiály koncem 40. a zvláště začátkem 50. let 20. století, jejich použití rozšířilo do chemického, leteckého, automobilového, elektrotechnického průmyslu a také na výrobu sportovních potřeb. Využití méně náročných kompozitů používaných pouze z důvodů snížení nákladů v průmyslu stoupá a jejich použití v budoucnosti se bude stále rozšiřovat.

Kompozitní materiály patří mezi materiály s nejúčinnějším využitím potenciálních vlastností hmoty. Použití některých kompozitních materiálů je značně omezeno jejich teplotní odolností a v současné době vyvstává též problém s případnou recyklací. Výsledné vlastnosti kompozitů není snadné určit předem a pro jejich maximální využití je nutné velmi dobře znát vlastnosti všech složek a jejich vzájemné interakce. Kompozitní materiály, pro svou schopnost kombinovat vynikající mechanické vlastnosti s konstrukční přizpůsobivostí a snadné výrobě, předstihly v rychlosti růstu výroby jiné v současnosti vyvíjené materiály.

Tato práce je zaměřena na využití kompozitních materiálů v oblasti výroby sportovních potřeb, zejména rámců jízdních kol, jejichž producenti poskytli potřebné prostředky, zkušenosti a materiál pro testování. Cílem práce je analýza mechanických vlastností a způsobu porušení kompozitu při ohybovém a tahovém namáhání pro trubku, která by svými vlastnostmi vyhovovala použití na výrobky typu vidlice jízdního kola, hokejová hůl, žerd' pádla, stěžeň a podobně, kde se jedná o trubky nebo profily určitých vlastností, integrovaných pomocí dalších dílů do konstrukce celého výrobku.

Cílem předkládané práce je analýza mechanických vlastností a způsobu porušení kompozitu při ohybovém a tahovém namáhání pro trubku, která by svými vlastnostmi vyhovovala použití na výrobky typu vidlice jízdního kola, hokejová hůl, žerd' pádla, stěžeň a podobně, kde se jedná o trubky nebo profily určitých vlastností, integrovaných pomocí dalších dílů do konstrukce celého výrobku.

Přestože je hlavní náplní práce analýza a zkoušení kompozitních materiálů, je nezbytné provést experimenty přednostně na nejpoužívanějších kovových materiálech, které jsou v současné době stále nejběžnější v aplikacích pro sportovní potřeby, zejména pokud hovoříme o výrobě rámců jízdních kol. Provést přednostně zkoušky na kovových materiálech je nutné především proto, aby byly zjištěny základní údaje o těchto materiálech a ty mohly být dále použity pro vývoj odpovídajícího kompozitního

materiálu a pro porovnání vlastností kovových a kompozitních materiálů. Úkolem je také najít rychlou, snadnou a cenově nenáročnou metodu měření mechanických vlastností trubek, což vyplývá z potřeb tuzemských producentů rámu, kteří poskytli potřebný materiál a zařízení pro zkoušky.

Ze znalosti vlastností běžně používaných kovových materiálů je možné posléze vycházet při návrhu struktury kompozitní trubky. Avšak ještě před tím je nutné se zabývat jednou z hlavních nevýhod kompozitních materiálů a to způsobem jejich porušení, který hraje obzvlášť důležitou roli při aplikaci na sportovní vybavení, kdy při náhlém porušení dílu hrozí vážné zranění uživatele. Dalším cílem této práce je tedy analyzovat způsoby porušení kompozitního materiálu. K tomu by mělo být využito porovnání experimentálního měření s výsledky výpočetní analýzy laminovaných vzorků. Úkolem není pouze popsat mechanismy porušení kompozitních materiálů, ale také analyzovat vliv jednotlivých složek materiálu a uspořádání vláken na rozsah a průběh porušení a navrhnout matematický model výpočtu pro takovýto typ vzorku.

Dalším z úkolů práce je optimalizace technologie výrobního procesu trubky z kompozitního materiálu tak, aby bylo dosaženo požadovaných materiálových vlastností trubky při minimalizaci výrobních nákladů a dosažení jednoduchosti a variability výroby.

V poslední fázi by mělo být využito všech dosažených výsledků pro vlastní optimalizaci a návrh struktury trubky z kompozitního materiálu vhodné pro použití na výrobu již zmiňovaných sportovních potřeb. Některé závěry práce by měly být přínosem zejména pro tuzemské výrobce kompozitních trubek a profilů, kde stále ještě není dostatek odborných publikací tohoto zaměření.

1 Materiály trubek pro stavbu jízdních kol a dalších sportovních potřeb

Tato práce se zabývá problematikou struktury a způsobů porušení kompozitních materiálů celkově, experimenty a cíl výzkumu jsou zaměřeny na návrh trubky pro použití při stavbě rámu jízdního kola a dalších sportovních potřeb.

1.1 Kovové materiály

1.1.1 Oceli

Ocel je jednoznačně nejpoužívanějším materiálem pro stavbu rámu cyklistických kol, který se od roku 1887, kdy se rozběhla výroba bezešvých Mannesmannových trubek přežívá bez větších změn do současnosti. Pro další sportovní potřeby jako například pádla, hokejové hole, stěžně, tenisové rakety atd. má ocel v současné době pouze minimální využití.

Ocel je velice přizpůsobivý materiál, nejčastěji se leguje chromem, molybdenem, manganem, vanadem a křemíkem. Je pevná, tažná, pružná, levná a dobře se zpracovává, což je výčet vlastností, které ji činí stále nejrozšířenějším materiálem při výrobě cyklistických rámu.

Až do osmdesátých let byly téměř výhradně pro rámy jízdních kol používány slitiny oceli pouze nízko legované chromem a z malé části některými dalšími prvky především manganem a molibdenem, všechny běžně používané slitiny tedy měly přibližně stejné mechanické parametry, jediný způsob jak ovlivnit hmotnost a tuhost rámu byla změna rozměrů trubek.

Ke změně došlo až s příchodem materiálu s firemním označením NivaCrom obsahujícím kromě chromu především podíl niobu a vanadu, jež je o 30-40% pevnější než levnější chromové oceli a umožnil změnu tloušťky stěny trubky z původně běžných 0,9mm na koncích a 0,6mm uprostřed trubky (dále jen 9/6/9) na 7/4/7. Materiál NivaCrom byl později následován podobnými materiály firemních označení Reynolds 853 a ThermaCrom, které kromě dobrých mechanických vlastností vynikají též zvýšením pevnosti v oblasti svarového spoje dvou trubek (tzv. air hardening steel) [1].

1.1.2 Hliníkové slitiny

V současnosti jsou hliníkové slitiny běžným materiálem používaným ke stavbě především cyklistických rámu, hokejových holí, stěžňů a levnějších verzí tenisových raket a žerdí pádel. Jejich rozšíření bylo umožněno především díky dokonalému zvládnutí technologie jejich svařování a tepelného zpracování. Právě náročnější výrobní technologie činí konstrukce z hliníkových slitin dražší než ocelové. V posledních letech se však stále zdokonaluje jejich výrobní proces, což přináší jejich rozšíření mezi široké vrstvy uživatelů.

Pro výrobu sportovních potřeb se převážně používají profily různých průřezů, nejběžněji zhotovených ze slitin série 6000 a 7000 dle značení podle ASTM. Cyklistické rámy běžné produkce jsou vyráběny převážně ze slitin 7005 a 7020 [2]. Jedná se o slitiny soustavy Al-Zn-Mg. Jejich největší předností je, že jsou samovytvrditelné nemusejí se po svařování následně tepelně zpracovávat, což výrazně ovlivňuje jejich cenu. Jejich pevnost se pohybuje nad 400 MPa a tažnost okolo 10%, což zároveň umožňuje jejich snadné tváření a profilování podle namáhání trubek v jednotlivých místech průřezu.

Nejpoužívanější slitinou pro většinu ostatních sportovních potřeb je slitina 6061, vyžadující tepelné zpracování po svařování. U této slitiny je nutné finální tepelné zpracování vytvrzováním. Právě proces tepelného zpracování zvyšuje cenu těchto výrobků, ale jejich mechanické vlastnosti pak převyšují slitiny 7020.

Firma Columbus z Itálie v posledních letech úspěšně vyrábí sadu trubek vyvinutou speciálně pro cyklistiku ze slitiny Al-Mg. Tato slitina se nevytvrzuje, má dobrou svařitelnost. Zlepšení jejich mechanických vlastností na úroveň ostatních hliníkových slitin je dosaženo pomocí patentovaného způsobu jejich tažení, profilace a deformačního zpevnění podle zatížení v jednotlivých částech trubek.

1.1.3 Slitiny titanu

Po tom, co velká část výrobců vojenské techniky byla nucena přejít na útlumový program a začít hledat nová odbytiště se začaly objevovat firmy, vyrábějící sportovní potřeby z titanových slitin z polotovarů získaných právě od těchto výrobců. Titanové slitiny jsou vysoce pevné, nekorodují, nedegradují po absorpcích rázů, nemění své vlastnosti v čase a to vše při nízké hmotnosti.

Právě pro tyto vlastnosti jsou titanové slitiny velice žádány pro letecké a zbrojní aplikace, ale samozřejmě i v jiných oblastech. Vysoká náročnost zpracování, a to jak v oblasti tváření, svařování a obrábění staví titanové slitiny mezi materiály, u kterých je nutné dokonalé zvládnutí těchto technologií. U svařování titanových slitin je kromě zkušenosti a dovednosti svářeče důležité dokonalé krytí svařované oblasti ochranou atmosférou inertního plynu. Tepelně ovlivněné pásmo se nesmí dostat do styku se vzduchem, neboť vysoká afinita titanu ke kyslíku, dusíku a vodíku vede k jeho nasycování těmito prvky a k nepříznivým vlivům na mechanické vlastnosti. Toto je základní podmínka, se kterou musí pracovat všichni výrobci titanových rámů a komponentů. Nejlepší se odlišují právě tím, jak jsou schopni dodržet technologické podmínky ve výrobě. Toto vše naznačuje, že spektrum výrobců, kteří titan aplikují ve veloprůmyslu, ale i pro výrobu potřeb pro jiné sporty je velice omezené [3].

Pro výrobu cyklistických rámů z titanových slitin není jen důležité zvládnutí technologie zpracování, ale také schopnost konstruovat rámy z takového materiálu. Vysoká pevnost spolu s vysokou pružností je kombinace vlastností, kdy na rozdíl od ostatních materiálů nestačí konstruovat rám jen z pevnostního hlediska, kdy konstrukce s dostatečnou pevností je značně pružná a tím nepoužitelná pro praktické použití v cyklistice. Naopak preference tuhosti rámu přináší značné navýšení hmotnosti. Právě optimální vyvážení těchto vlastností je nejdůležitějším faktorem rámu z titanové slitiny.

Z titanových slitin zatím nebyl vyvinut materiál speciálně pro cyklistiku nebo jiné sporty. Jedná se o normalizované polotovary, určené pro použití na nejrozličnější aplikace, které si každý výrobce upravuje dalším zpracováním, zejména ztenčováním, tvarováním a protlačováním. Trubky se tak stávají až o jednu čtvrtinu pevnější [3].

Téměř výhradně se u tvářených trubek používá slitina Ti3Al2,5V. Tato slitina je pro svoji korozní odolnost řazena do korozi-vzdorných materiálů. Používá se především v leteckém průmyslu a to zejména na části leteckých motorů, trubky, korozi-vzdorné nádoby, ale právě také pro sportovní náčiní jako golfové hole, tenisové rakety a cyklistické součástky.

Pro různé obráběné součásti se používá slitina Ti6Al4V. Ačkoliv tato slitina poskytuje vyšší poměr pevnosti k hmotnosti je její použití minimální, protože se dá jen velmi těžko tvářet do trubek, protože má o 30% nižší tažnost než Ti3Al2,5V. Dle [2] v

současnosti neexistuje výrobce bezešvých tažených trubek ze slitiny Ti6Al4V v rozměrech, které by odpovídaly potřebám cyklistického průmyslu.

Jediná firma, která v současnosti používá slitinu Ti6Al4V pro stavbu rámu je americká firma Lite Speed, která z této slitiny produkuje patentované trubkové sady, jejichž výrobu začíná již od titanových tyčí, které jsou válcovány, svařeny a následně tepelně zpracovány, jedná se tedy o švové trubky. Značnou nevýhodou těchto trubek je jejich snížená únavová pevnost, způsobená změnami struktury v oblasti sváru. Navíc textura válcovaného plechu nemůže být z výrobního hlediska tak snadno kontrolována jako je tomu u tažené trubky [2]. Dalšími nevýhodami slitiny Ti6Al4V je její nižší modul pružnosti ve smyku oproti Ti3Al2,5V a vyšší náklady na obrábění.

1.2 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou nejnovějšími materiály používanými pro výrobu sportovních potřeb. V současnosti jsou již kompozitní materiály součástí výrobního programu velkých firem vyrábějící různé sportovní potřeby typu hokejových holí, rámu jízdních kol, stěžňů apod., v České Republice se však výrobou těchto dílů zabývá pouze několik menších firem bez většího technického zázemí. Sportovní náčiní z kompozitních materiálů je již běžně sériově vyráběno, ale jeho cena jej zatím předurčuje pouze pro špičkové použití. V převážné většině se pro tuto výrobu používají uhlíková vlákna a polymerní pryskyřice.

Hlavní výhodou kompozitních materiálů je jejich příznivý poměr pevnosti a hmotnosti, jejich nevýhodou je křehkost a odolnost proti nárazu. V současnosti většina vývoje v oblasti kompozitních materiálů směřuje k způsobům navíjení a protkávání vláken v závislosti na konkrétním zatížení trubky a především ke zdokonalování a zlevňování výrobních technologií.

1.2.1 Klasifikace kompozitních materiálů

Vlastnosti kompozitů jsou silně ovlivňovány vlastnostmi svých materiálových složek, jejich distribucí a interakcí mezi nimi. Výsledné vlastnosti kompozitu může dávat součet vlastností složek podle jejich objemových podílů, nebo jsou dány vzájemným synergickým působením složek, takže zajišťují kompozitu vlastnosti, které

nemohou být přiřítány prostému součtu vlastností složek podle jejich objemových podílů. Při popisu kompozitu jako materiálového systému je nutné specifikovat jednotlivé vlastnosti materiálů složek, ale i jejich geometrii vyztužení vzhledem k systému. Geometrie může být popsána tvarem, velikostí a distribuční hustotou [4].

Orientace vyztužení ovlivňuje izotropii materiálu. Pokud jeden rozměr vyztužovacích částic je výrazně větší než ostatní rozměry a jsou-li tyto částice přednostně orientovány v jednom směru, pak se kompozit chová jako anizotropní materiál. Jestliže jsou vyztužovací částice orientovány nahodile, nebo tvar a rozměry těchto částic jsou ve všech směrech přibližně stejné, pak můžeme předpokládat, že kompozit se bude chovat v podstatě jako izotropní materiál. V některých kompozitech je anizotropie vlastností žádoucí a pomáhá tak snižovat náklady na výrobu a konstrukci dílů [5].

Soudržnost kompozitu jako kompaktního celku je závislá na druhu vzájemného silového působení mezi matricí a disperzí. Síly mezi matricí a disperzí mají podstatu chemickou nebo fyzikální. Výrobně náročnějším typem je vazba chemická, protože při probíhající chemické reakci mezi částicemi matrice a disperze může dojít k ovlivnění částic disperze do takové hloubky, že to výrazně ovlivní (při mikroskopických rozměrech disperze) výsledné vlastnosti kompozitu. Výhodou chemické vazby je, že dosahuje nejlepších mechanických vlastností ze všech druhů vazeb. Pokud jsou síly mezi matricí a disperzí přenášeny vzájemným zaklíněním, tak můžeme odhadnout výsledné vlastnosti kompozitu lépe než u chemické vazby, ale jsou kladeny vyšší nároky na tvar disperze a schopnost matrice tento tvar kopírovat. Nejžádanějším typem přenosu sil mezi matricí a disperzí je pomocí fyzikálních vazeb, především adhezními silami. Adhezní síly působí na vzdálenost $0.5\ \mu\text{m}$ a pomocí nich lze dosáhnout pevnosti až 7 GPa. Nedostatečná soudržnost kompozitu vlivem malých adhezních sil může být způsobena nedostatečně čistým povrchem styku obou fází, pnutím na rozhraní fází, špatnou smáčivostí nebo vzlínavostí matrice (v případě, že alespoň jedna složka je kapalná) [5].

1.2.2 Základní rozdělení kompozitních materiálů

Rozdělit kompozitní materiály je možno podle různých hledisek. Zpravidla se jako základní udává rozdělení dle následujících kritérií:

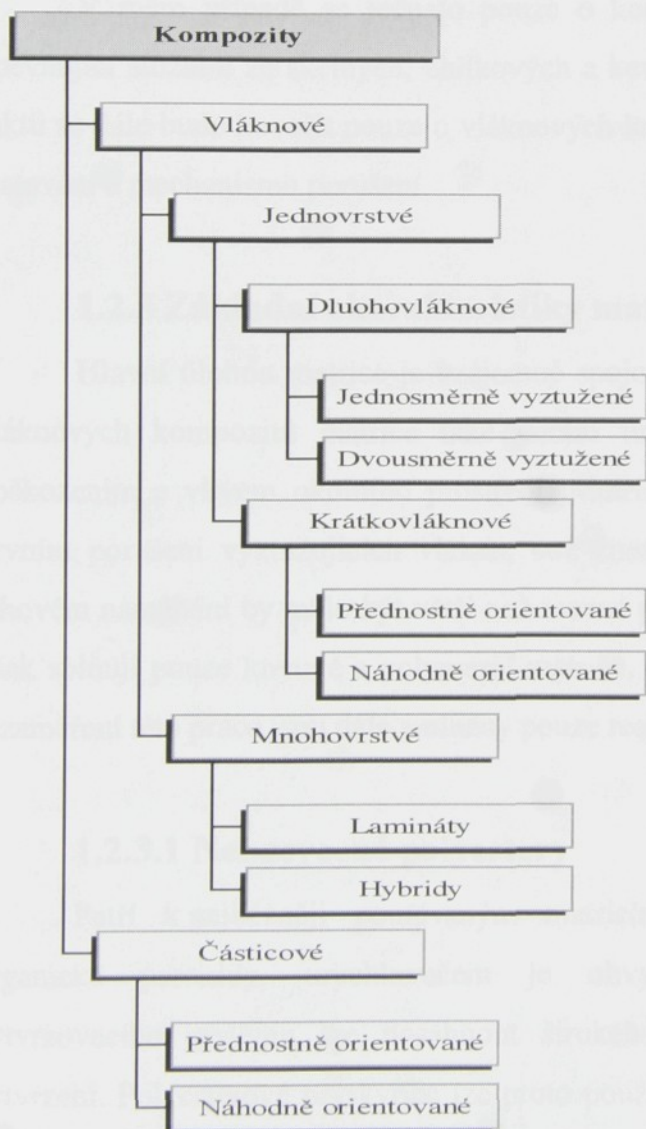
1. Podle materiálu matrice :

- kovové matrice (hliník ,titan a jejich slitiny)
- keramické, skleněné a silikátové matrice
- polymerní matrice (termoplastové, reaktoplastové, elastomerní)

2. Podle druhu vyztužovacích částic :

- vyztužené skleněnými částicemi
- vyztužené minerálními částicemi
- vyztužené uhlíkovými částicemi
- vyztužené keramickými částicemi
- vyztužené kovovými částicemi
- vyztužené polymerními částicemi
- vyztužené whiskery

Výsledný tvar nebo použitý kompozit se pak liší geometrickou úpravou konfigurací obou složek a podle toho mluvíme např. o kompozitech viz. obr. 1.



Obr.1. Rozdělení kompozitních materiálů [5]

Pojmy k obr. 1

lamináty - vícevrstvé kompozity, které mají materiály složek stejné v každé vrstvě

hybridy - vícevrstvé kompozity skládající se z vrstev s různými vlastnostmi

vláknové kompozity - kompozity zpevněné částicemi u nichž jeden rozměr je výrazně větší než ostatní rozměry

částicové kompozity - kompozity zpevněné částicemi se všemi rozměry přibližně stejnými (s výjimkou destiček)

dlouhovláknové kompozity - kompozity vyztužené vlákny, jejichž délka výrazně ovlivňuje vlastnosti kompozitu

jednovrstvové kompozity - kompozity zhotovené z jedné nebo více samostatných vrstev se stejnou orientací a vlastnostmi [4] [5].

V mém případě se jednalo pouze o kompozity s reaktoplastovou matricí se zpevňující složkou ze skelných, uhlíkových a kevlarových vláken. Vzhledem k tomuto faktu se dále bude hovořit pouze o vláknových kompozitech, jejich technologii výroby, testování a mechanismu porušení.

1.2.3 Základní charakteristiky matric

Hlavní úlohou matrice je vzájemně spojovat diskontinuální vyztužující fázi. U vláknových kompozitů matrice také chrání tuhá, pevná, ale křehká vlákna před poškozením a vlivem okolního prostředí. Matrice si musí udržet funkci pojiva i po prvním porušení vyztužujících vláken, což znamená, že její mezní prodloužení při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení výztuže. Tento požadavek však splňují pouze kovové a polymerní matrice, nikoliv matrice keramické. Vzhledem k zaměření této práce jsou dále zmíněny pouze reaktoplastové matrice.

1.2.3.1 Nenasycené polyestery

Patří k nejběžněji používaným matricím. Iniciátorem síťové reakce jsou organické peroxidy, urychlovačem je obvykle naftenát kobaltnatý. Volbou vytvrzovacího systému lze dosáhnout širokého rozmezí doby želatinace a doby vytvrzení. Polyesterové pryskyřice lze proto použít pro všechny technologie. Viskozitu pryskyřice určuje podíl reaktivního rozpouštědla. Pro technologie vyžadující nízkou

viskozitu pryskyřice je objem rozpouštědla volen větší, ovšem za cenu nižší pevnosti a teplotní odolnosti matrice a větších emisí rozpouštědla při vlastním zpracování.

Nemodifikované polyesterové pryskyřice mají velké smrštění při vytvrzování (7–8%), jsou křehké a snadno v nich vznikají mikrotrhlíky. Polyesterové pryskyřice dobře smáčí skelná vlákna, ale pevnost vazby matrice – skelné vlákno je menší než např. u epoxidových pryskyřic. Ideální vlastnosti pro středně sériovou až hromadnou výrobu mají pryskyřice bez těkavých látek, dodávaných v podobě pasty nebo tuhé látky, s časem vytvrzování do pěti minut, které za teploty vytvrzování mají zpočátku menší viskozitu, tedy nevyžadují při lisování velké tlaky [6].

1.2.3.2 Vinylesterové pryskyřice

Jsou to nenasyčené estery epoxidových pryskyřic. Makromolekula předpolymeru má méně reaktivních míst s dvojnou vazbou umístěných na koncích řetězce. Důsledkem je menší stupeň zesítnění, což vede k větší ohebnosti pryskyřice a tím je získána vyšší odolnost proti vzniku mikrotrhlínek [7]. Ve srovnání s polyesterovými pryskyřicemi mají také

- lepší odolnost proti korozi
- vyšší teplotu skelného přechodu
- vyšší cenu
- pomalejší reakci při vytvrzování

Kompozity z vinylesterových pryskyřic mají větší mezilaminární smykovou pevnost a větší houževnatost. Pro běžné technologie je nutné zvyšovat podíl styrénu, což je spojeno s vyššími náklady na zajištění zdravotně nezávadného pracovního prostředí [6].

1.2.3.3 Epoxidové pryskyřice

Mají nejvšestrannější konstrukční použití. V závislosti na chemické struktuře pryskyřice a použitém tvrdidlu a případných modifikujících reaktivních složkách mají nejširší rozsah vlastností. Mají dobrou houževnatost (v porovnání s ostatními termosety), odolnost proti únavě a creepu, výbornou adhezi k vláknům, výtečnou chemickou odolnost, výborné elektrické vlastnosti a malé smrštění. Viskozita v nevytvrzeném stavu je větší než u polyesterových pryskyřic (nevýhodné z hlediska zpracování). V důsledku polárnosti jsou navlhavé [6].

1.2.3.4 Fenolické pryskyřice

Vyznačují se velmi dobrou rozměrovou stálostí i za zvýšených teplot. Mohou přenášet zatížení i při teplotách nad T_g v důsledku vysoké hustoty zesítení. Jsou nehořlavé a při expozici v plameni nevyvíjejí kouř. Čistě fenolické pryskyřice jsou křehké a za normální teploty jsou v tuhém stavu. Vyrábějí se z fenolu a formaldehydu kondenzační reakcí. Při výrobě prepregů se vychází z roztoků fenolických pryskyřic nebo z emulzí [8].

1.2.4 Základní charakteristiky vláken

Pro vyztužování matric se používá široké spektrum vláken a materiálů. Kromě přírodních vláken jako bavlna, celulósa, azbest se používají vlákna kovová nebo slitinová, whiskery z keramických a metalických materiálů, skleněná a minerální vlákna, a také vlákna polymerní [4].

1.2.4.1 Skelná a minerální vlákna

Většina skelných vláken se vyrábí rychlým tažením z taveniny. Tavenina je tažena rychlostí až $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, čímž vznikají vlákna o průměru 3.5 až 20 μm . Obvykle je taženo 51 až 408 vláken (fibril), která vytvářejí pramenec, který je základní jednotkou pro výrobky z vláken.

Původní pevnost vláken je vyšší než pevnost vláken v pramenci, protože jednotlivá vlákna na sebe působí navzájem velmi abrazivně. Proto je každé vlákno před vytvářením pramence lubrikováno. Existuje mnoho druhů lubrikací. Dočasná lubrikace (např. škrobová) se po ukončení výroby odstraní, naopak trvalé lubrikace se aplikují pro jejich ochranou funkci a funkci vazebného činidla k matrici.

Hlavní charakteristikou skelných vláken je jejich pevnost, která je ovlivňována mnoha faktory jako např. povrchovými chybami, adsorbovanou vodou, chemickými úpravami povrchu, průměrem vláken atd. Obzvláště výrazně je ovlivňována povrchovými chybami. Většina skleněných vláken se vyrábí z tzv. E-skla s vysokým elektrickým odporem a dobrými tvářecími charakteristikami. Vlákna z E-skla mají slabou chemickou odolnost proti kyselinám, alkáliím, ale dobře odolávají vodě a CaCl_2 .

Vlákna vyráběná z ostatních druhů skel se od E-skla liší především ve specializaci jejich použití. Vlákna se vyrábějí z A-skla, které se používá také na výrobu lahví, z C-

skla, které má větší odolnost proti kyselinám, D-skla, které má nízkou dielektrickou konstantu, M-skla, s vysokým modulem a pevností a vlákna z taveného křemene, který má zvýšenou odolnost proti měknutí při vyšších teplotách a nízkou hustotu [6].

1.2.4.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou anorganická, získávají se strukturální přeměnou výchozích organických materiálů (vláken nebo smol) pomocí pyrolýzy. Podle podílu uhlíku a teploty používané při pyrolýze se uhlíková vlákna dělí na :

- částečně karbonizovaná uhlíková vlákna, karbonizovaná při teplotě 3500°C a obsahující až 90% uhlíku
- karbonizovaná uhlíková vlákna, karbonizovaná při teplotě 900 - 1600°C a obsahující 91 - 98% uhlíku

Jako výchozích materiálů (tzv. prekurzorů) se pro přípravu uhlíkových vláken využívá tří druhů základních surovin :

- **Viskózová vlákna** - jejich využití je historicky nejstarší. Výrobní postup zahrnuje dehydrataci a rozklad při teplotě do 400°C, karbonizaci při teplotě do 1500°C a grafitizaci za současného dloužení při teplotě nad 2800°C. V dnešní době se od nich jako suroviny pro výrobu uhlíkových vláken upouští, protože poskytují nízký výtěžek uhlíkových vláken. Po grafitizaci zůstane pouze 15 - 20% hmoty původního vlákna.
- **PAN vlákna** - jsou nejpoužívanější surovinou, v současné době slouží k přípravě 90% uhlíkových vláken. Většina dnes vyráběných uhlíkových vláken se vyrábí právě z dloužených PAN vláken v podobě kabelu, obsahujícího 1000 - 4000 elementárních vláken. Maximální pevnosti dosahují při tepelné úpravě kolem 1400°C, při vyšších teplotách dochází k poklesu jejich pevnosti. U nejlepších vláken se používá dloužení při grafitizaci (teplota nad 2500°C), čímž se získají vlákna s vysokým modulem pružnosti. Výtěžnost uhlíkových vláken je přibližně 55% [9].
- **Smoly (pryskyřice)** - v posledních letech roste podíl uhlíkových vláken vyráběných ze smol různého původu a chemického složení. Používají se především smoly zbylé po destilaci ropy a černouhelného dehtu. Mají dobrý výtěžek uhlíku a jsou levné, obtížně se však zvláknují. Vlákna z mezofázových smol jsou velmi dobře grafitovatelná a vysokomodulových vláken lze dosáhnout již při teplotě 1800°C. Při vyšších teplotách mluvíme o vláknech UHM (ultra high modulus). Nelze však z nich získat vlákna vysokopevnostní stejných

parametrů jako mají vlákna na bázi PAN. Vlákna ze smol dosahují modulu pružnosti až 880 GPa. Výtěžnost uhlíkových vláken může být až 90% [10].

Výrobní postup (zahrnuje u všech uvedených surovin tři základní fáze). Nejprve jsou výchozí vlákna tepelně stabilizována. Lineární polymery se spojují v plošné útvary. Vlákna jsou podrobena účinkům oxidačních a dehydratačních činidel při teplotách 200 - 400^o C a stávají se nehořlavými a netavitelnými. Proces probíhá velmi složitě a je časově nejnáročnější částí přípravy uhlíkových vláken, trvá řádově jednotky až desítky hodin.

Druhou fází procesu tvoří tzv. karbonizace, při níž se za teplot 800 - 1900^oC uvolňují zplodiny obsahující vodík, kyslík a dusík. Operace se provádí ve velmi čistém inertním prostředí a výsledná vlákna obsahují 92 - 99% uhlíku.

Třetí fáze představuje dokončovací úpravy zahrnující např. grafitaci při 2500 - 3000^oC, oxidační povrchovou úpravu a nanášení ochranných povrchových vrstev - tzv. *sizing*. Takto upravená vlákna mají své základní vlastnosti, které se již v průběhu zpracování do kompozitů prakticky nemění.

Vyráběná vlákna mají velmi malý průměr (5 - 13 μ m). Proto se z jednotlivých vláken vytvářejí pramence o počtu 1000 - 40 000 monofilů. Nejčastěji se vyrábějí pramence s 3000, 6000 nebo 12 000 monofily. Dále se vyrábějí krátká vlákna do 1 mm nebo sekaná vlákna od 0,25 do 6,25 mm.

Vyrobená uhlíková vlákna bývají podrobena dodatečné úpravě povrchu za účelem omezení absorpce vlhkosti a plynů na povrch čerstvě vyrobených vláken, odstranění látky bránící kontaktu s kapalnou matricí z povrchu vláken a zvýšení reaktivity povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím.

Uhlíková vlákna mají široký rozsah vlastností v závislosti na podmínkách přípravy. Pro využití v kompozitech je však nejvýznamnější vysoká pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu.

Podle mechanických vlastností lze uhlíková vlákna rozdělit do tří základních skupin:

- **vysokopevnostní vlákna** se vyrábějí převážně z PAN a mají nejširší použití. V minulých letech prošla rychlým vývojem parametrů od původní pevnosti 3 GPa k současné nové generaci uhlíkových vláken označovaných jako vlákna vysokotažná. Pevnost těchto vláken se pohybuje mezi 4 - 7 GPa při modulu pružnosti 200 - 300 GPa.

- **vysokomodulová vlákna** se vyrábějí z PAN a z mezofázových smol. Modul pružnosti těchto vláken se pohybuje od 300 do 800 GPa, pevnost od 1,8 - 3 GPa. Používají se především pro náročnější aplikace.

- **nízkomodulová vlákna** jsou nejlevnějším typem uhlíkových vláken, jsou připravována z izotropních smol a pyrolyzních olejů a jejich hlavní použití je pro tepelné izolace a těsnění. Modul pružnosti je 70 GPa a pevnost 700 MPa [4] [10].

1.2.4.3 Polymerní vlákna

Polymerní vlákna pro kompozitní konstrukce musí mít pevnost alespoň srovnatelnou se skelnými vlákny. Nejběžněji jsou používána vlákna z PPTA známá pod obchodní značkou firmy Du Pont Kevlar 29, 49, 129, 149. Protože PPTA nevytváří taveninu musí se vlákna vyrábět z roztoku PPTA v kyselině sírové. Vysoké tuhosti a pevnosti vlákna je dosaženo téměř dokonalou orientací lineárních makromolekul v podélném směru. Ve směru kolmo na osu vlákna působí mezi makromolekulami jen slabší mezimolekulární síly tzv. vodíkové můstky, proto jsou mechanické vlastnosti vláken v tomto směru srovnatelné s běžným polymerem. Při tlakovém namáhání ve směru kolmo na osu se vlákno snadno plasticky deformuje. Tkaninu z aramidových vláken lze velmi obtížně stříhat. Ačkoliv vlákna nejsou křehká jako třeba uhlíková, při jejich textilním zpracování je jejich povrch také poškozován a snadno dochází k fibrilaci povrchových vrstev.

Polyetylénová vlákna z UHMW PE začala být dodávána na trh v devadesátých letech pod obchodními značkami Dyneema a Spectra. Pro dosažení vysoké pevnosti a tuhosti musí být makromolekuly téměř dokonale orientovány v podélném směru vlákna, čehož se dosahuje extruzí a následným dloužením polymerního gelu vytvořeného směsí UHMW PE a plastifikátoru, např. parafinového oleje. Nevýhodou těchto vláken je nízká teplota tání (140 °C) . Kompozity vyztužené těmito vlákny mají vysoké hodnoty měrné pevnosti a vykazují podobnou odolnost proti poškození nárazem jako kompozity vyrobené z Kevlarových vláken.

Polymerní vlákna mají všeobecně malou povrchovou energii a jsou špatně smáčena pryskyřicemi, což se musí kompenzovat jejich povrchovou úpravou [6] [11].

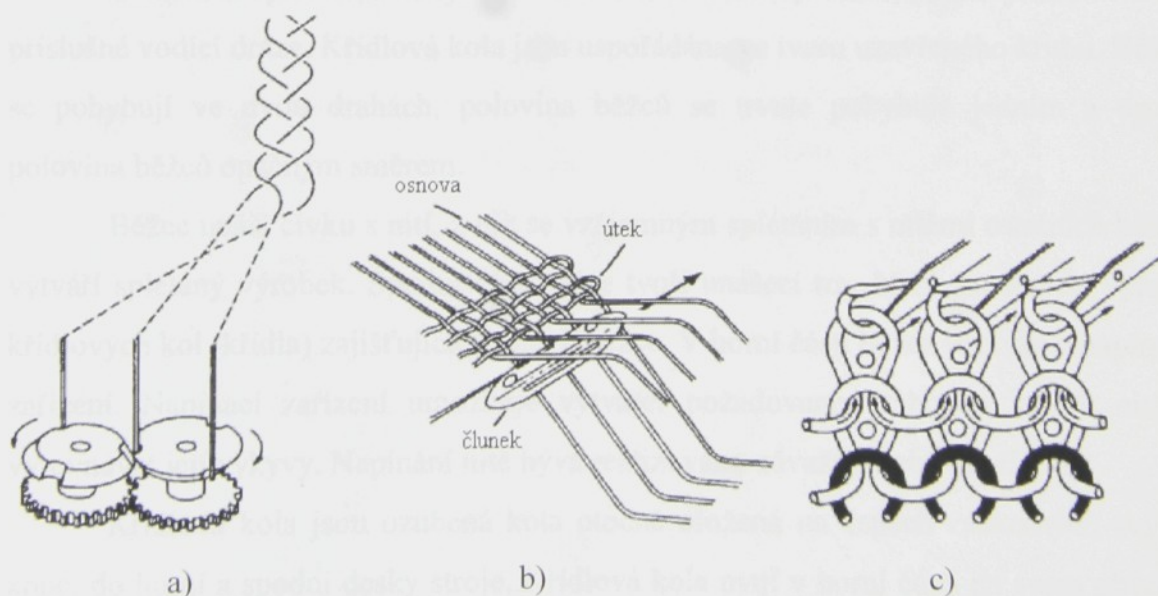
1.2.5 Technologie výroby kompozitních trubek a profilů

Existuje celá řada způsobů výroby kompozitních trubek nebo profilů a stále novější a dokonalejší technologie jsou vyvíjeny. Právě nové technologie umožňující rychlejší a levnější výrobu umožnily rozšíření kompozitních materiálů téměř do všech oblastí průmyslu. V této kapitole je zmíněna především technologie výroby trubek splétáním vláken a to vzhledem k podrobnějšímu rozboru těchto trubek v dalších částech této práce a dále některé základní technologie a principy výroby kompozitních trubek a profilů.

1.2.5.1 Problematika spojená se splétáním vláken

Splétání vláken je textilní proces, který se vyznačuje především svojí jednoduchostí a univerzálností použití. Struktura spletených vláken vyniká svojí vysokou přizpůsobivostí, pevností v krutu a odolností proti porušení.

Proces splétání je v podstatě velmi jednoduchý. Jedná nebo několik soustav nití, které se vzájemně proplétají v úhlopříčném směru. Provázání nití je podobné jako při procesu tkaní. V tkanině jsou dvě soustavy provazujících se nití, kde jedna prochází výrobkem v podélném a druhá v příčném směru. Při splétání provazující soustavy nití procházejí výrobkem podélně. Rozdíl mezi splétáním, tkaním a klasickým pletením je dobře vidět na obr.2.



Obr.2 Rozdíl splétání (a) tkaní (b) a klasického pletení (c)

Splétání vláken je jedna z nejstarších textilních technologií. Princip splétání vláken se používá již velmi dlouho k výrobě domácích, později průmyslových výrobků. V dnešní době se technologií splétání (strojní výroba) vyrábí drobné výrobky určené pro ozdobné účely, tak i výrobky určené pro průmyslové použití. Avšak z důvodu složitosti výroby velmi širokých textilií a relativně nízké produktivity splétané materiály nedosáhly takového rozšíření v textilním průmyslu jako tkaniny a pleteniny.

Díky relativně nízkému využití splétaných materiálů v textilním průmyslu, jsou publikace v tomto oboru omezené [12]. Seriózně se splétanými materiály pro průmyslové aplikace zabývá až ke konci sedmdesátých let skupina vědců z firmy McDonnell Douglas, kde je splétání popsáno jako metoda snížení nákladů na výrobu kompozitních trubek [12]. Od osmdesátých let se publikace ohledně splétání začínají orientovat i na kompozitní materiály. Za počátek využití této technologie k výrobě kompozitních trubek lze považovat vynález firmy Newport Composites, kdy jejich speciální epoxidové pryskyřice umožnily výrobu splétaných prepregů. [13]

Splétání má mnoho společných rysů s navíjením vláken. Ačkoliv splétání nemůže dosáhnout tak vysokého podílu vláken v matici jako navíjení nabízí možnost výroby tvarově mnohem složitějších součástí, navíc triaxiálním splétáním je možné integrovat podélná vlákna do struktury pleteniny. Studie firmy McDonnell Douglas poukazuje, že splétáním je možné dosáhnout 44% úspor nákladů oproti navíjení [12].

Základem splétacího stroje je soustava tzv. křídlových kol, pohánějících běžce v příslušné vodící dráze. Křídlová kola jsou uspořádána ve tvaru uzavřeného kruhu. Běžce se pohybují ve dvou drahách, polovina běžců se trvale pohybuje jedním a druhá polovina běžců opačným směrem.

Běžec unáší cívku s nití, z níž se vzájemným splétáním s nitěmi ostatních běžců vytváří splétaný výrobek. Spodní část běžce tvoří unášecí trn, který zapadá do výřezů křídlových kol (křídla) zajišťujících pohyb běžce. V horní části běžce je cívka a napínací zařízení. Napínací zařízení umožňuje vytvářet požadovanou tahovou sílu v niti a vyrovnávat její výkyvy. Napínání nitě bývá realizováno závažím nebo pružinou.

Křídlová kola jsou ozubená kola otočně uložená na čepech zasazených svými konci do horní a spodní desky stroje. Křídlová kola mají v horní části na svém obvodu výřezy, do nichž zapadají unášecí trny běžců. V čepech křídlových kol může být veden

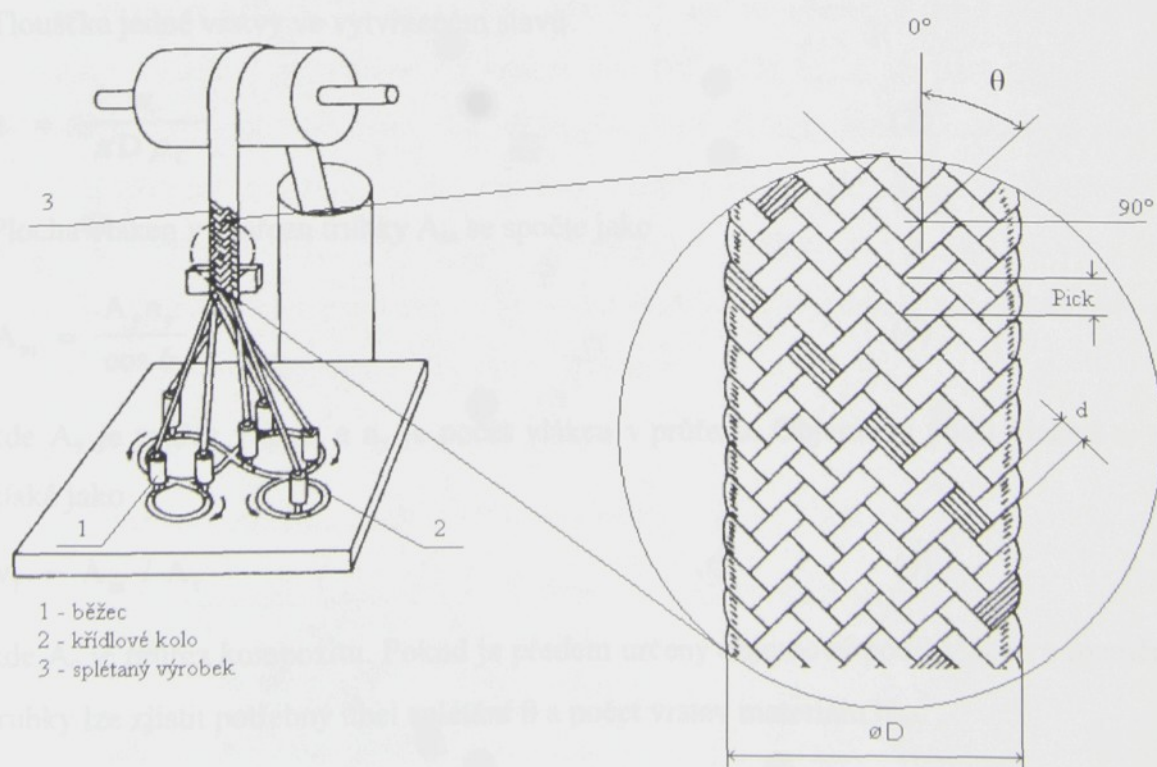
výplňkový materiál, který tvoří samostatnou soustavu nití. Nítě procházejí výrobkem podélně, neproplétají se, jsou pouze zachyceny mezi křížícími nitěmi běžců.

V horní desce jsou vyfrézovány vodící dráhy. Podstatou jsou dvě vlnící se dráhy, v nichž se pohybují protisměrně běžce. V místě, kde běžce přecházejí z vnitřního na vnější úsek dráhy dochází ke křížení nití. Tomuto křížení říkáme provazování (splétání). Samostatné vodící dráhy se říká hlava (stroje jednohlavové i vícehlavové).

Sběrný bod je místo vlastního splétání nití. Polohu sběrného bodu zajišťuje sběrač nití. Sběrač je umístěn nad středem kruhové vodící dráhy a je výškově nastavitelný. Změnou výšky sběrače se mění úhel, který svírají nitě se základnou. Lze říci, že zmenšením úhlu dojde ke zhuštění výrobku a naopak [14].

Výrobek je veden od sběrače přes vodící kladku do odtahu, sloužícího k odebrání spleteného zboží. Odtah tvoří 3 válečky, poháněné přes ozubené soukolí od jednoho z křídlových kol. Mezi ně je naveden výrobek v plochem stavu a pak volně klesá do přistavené konve.

Na obr. 3 je znázorněn princip nejjednoduššího splétacího stroje. Stroj má několik křídlových kol 2, na konci křídel jsou umístěny běžce 1 tak, aby v místě odvalování nedošlo k setkání dvou běžců. Běžce sledují vodící dráhu splétacího stroje a pohybují se tak střídavě po vnějším a vnitřním úseku dráhy.



Obr. 3 Parametry splétaných trubek

Splétané materiály jsou charakterizovány základními veličinami:

- počet pramenů (rovingů) N
- šířka pramence d
- tloušťka jedné vrstvy t
- hmotnost pramenu na jednotku délky trubkyw
- úhel splétání θ
- průměr trubky D

Je zřejmé, že objemový podíl vláken bude záviset na parametrech pletacího stroje, ve smyslu počtu jeho běžců (cívek) a orientaci vláken při splétání. Za předpokladu, že trn je kompletně zakryt vlákny po napletení první vrstvy můžeme spočítat základní parametry trubky.

Počet běžců nutných pro daný průměr a šířku pramene

$$n = \frac{2 \pi D \cos \theta}{d} \quad (1)$$

Hmotnost pleteniny na jednotku délky

$$W = \frac{nw}{\cos \theta} \quad (2)$$

Tloušťka jedné vrstvy ve vytvrzeném stavu

$$t = \frac{w}{\pi D \rho_L} \quad (3)$$

Plocha vláken v průřezu trubky A_m se spočte jako

$$A_m = \frac{A_y n_y}{\cos \theta} \quad (4)$$

kde A_y je průřez vlákna a n_y je počet vláken v průřezu. Objemový podíl vláken v_f se získá jako

$$v_f = A_m / A_c \quad (5)$$

kde A_c je průřez kompozitu. Pokud je předem určený objemový podíl vláken a rozměry trubky lze zjistit potřebný úhel splétání θ a počet vrstev materiálu N_{ply} .

$$\cos \theta = \frac{MN_{\text{ply}}}{v_f A_c} \quad (6)$$

kde M je počet běžců na stroji.

Celkově lze parametry splétaných kompozitů charakterizovat následujícími rovnicemi

$$d_0 = \frac{MN_{\text{ply}} A_y}{Tv_f \pi \cos \theta} + t \quad (7)$$

$$d_i = \frac{MN_{\text{ply}} A_y}{Tv_f \pi \cos \theta} - t \quad (8)$$

kde d_0 je vnější průměr trubky a d_i vnitřní průměr trubky a t je tloušťka stěny trubky. Z daných rovnic vyplývá, že v klasickém případě kdy jsou zadány potřebné rozměry trubky a úhel křížení vláken je možné dosáhnout potřebných vlastností trubky změnou parametrů vláken nebo rovingů a počtem běžců, přičemž platí že čím větší počet běžců tím je možno vyrábět širší rozsah průměrů trubek [12].

1.2.5.2 Navíjení vláken

Navíjení vláken je proces kdy jsou kontinuální prameny nebo pásy vláken nasyceny pryskyřicí a navíjeny na rotační trn. Trn může být různého, většinou však válcového nebo kulového tvaru, podmínkou je, že nesmí mít negativní zakřivení ploch. Navíjecí zařízení umožňuje volbu různého předpětí vlákna při navíjení, změnu úhlu vlákna k ose trnu a obsahu pryskyřice v jednotlivých vrstvách kompozitu, tak aby bylo dosaženo optimálního objemového podílu vláken, tloušťky materiálu a struktury vláken v závislosti na druhu namáhání finálního výrobku.

K hlavním přednostem navíjení vláken patří:

- velmi rovnoměrná struktura vláken a vrstev
- možnost použití kontinuálního vlákna v celé struktuře materiálu
- úspora nákladů na autoklávu
- možnost výroby rozměrově velkých součástí
- vyšší objemový podíl vláken

Za nevýhody je považováno:

- tvar výrobku musí být takový, aby bylo možné vyjmout navíjecí trn
- nemožnost výroby negativního zakřivení
- nižší kvalita povrchu (především z pohledu aerodynamiky)

Pryskyřice může být nanesena na suchá vlákna těsně před jejich navinutím na trn (mokrý navíjení) nebo můžou být vlákna prosycena předem a navíjena až když je pryskyřice vytvrzena do tzv. B fáze, kdy je ještě měkká a lepkavá (začíná probíhat zesíťování molekul), ale již neteče. Navíjené kompozitní materiály bývají většinou vytvrzeny za vyšších teplot za normálního tlaku. Proces je ukončen vyjmutím trnu. Nejjednodušší na vyjmutí jsou pískové vodou rozpustné formy, kdy je voda napuštěna dovnitř výrobku, rozpustí formu a je i s rozpuštěnou formou odvedena ven. Složitější je vyjmutí různých segmentových forem, kdy tato operace musí být provedena ručně a hrozí potenciální nebezpečí poškození výrobku [12] [11].

1.2.5.3 Pletení

Pleteninám je v poslední době věnována značná pozornost především z důvodů jejich značné přizpůsobivosti (netvoří záhyby) a možnosti výroby jakýchkoliv tvarů bez zbytečného odpadu. Pleteninové materiály se dnes svými vlastnostmi vyrovnají tkaninám a to při nižších výrobních nákladech, možnosti výroby tvarově složitých součástí bez problémů s rozplétáním na okrajích textile. Pleteninové textilie se vyznačují řadou vlastností, které z nich činí ideální materiál pro zjednodušení a zefektivnění výrobního procesu a tím značného snížení výrobních nákladů. Výroba kompozitních materiálů z pleteniny je vhodná i pro sériovou výrobu vstřikovacím lisováním.[15]

Pleteninové textilie se vyznačují těmito základními charakteristikami:

- vysoká roztažnost ve všech směrech
- přizpůsobivost téměř jakémukoliv tvaru
- značná flexibilita a variabilita výrobního procesu (na jednom stroji lze vyrábět textilie s širokou škálou vlastností)

- roztažením textilie v jednotlivých směrech lze výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti v daných směrech, kdy se jinak isotropní pletenina chová značně anizotropně dle stupně a směru roztažení
- možnost vpletení podélných vláken do struktury textilie, aniž by došlo ke zhoršení její roztažnosti a přizpůsobivosti
- univerzálnost výrobního procesu (možnost výroby trubkovitých i plochých polotovarů značné šíře)
- možnost výroby speciálních struktur např. dvojité pletenina spojená systémem vláken nebo multitubulární pletenina kdy jsou dvě vrstvy textilie propleteny navzájem čímž vytvářejí systém podélných kanálů po délce pleteniny [16].

1.2.5.4 Pultruze

Pultruze je automatizovaný proces pro výrobu kontinuálních kompozitních materiálů konstantního průřezu. Je to jedna z nejuniverzálnějších metod výroby kompozitních materiálů.

Proces začíná tažením vyztužujících vláken z cívek do lázně s pryskyřicí kde jsou impregnována. Pryskyřicí nasycená vlákna jsou předformována do budoucího tvaru výrobku a jsou tažena do vyhřívané ocelové formy, jejíž průřez odpovídá požadovanému tvaru finálního profilu. Teplo iniciuje exotermickou reakci v reaktoplastové matrici. Profil je kontinuálně tažen skrze formu takovou rychlostí, aby na konci vyhřívané formy byla pryskyřice již vytvrzena. Po té následuje ochlazení profilu na vzduchu nebo se používá chlazení vodou, nakonec je profil automaticky uříznut na požadovanou délku.

Existují dva základní druhy pultruzně vyrobených kompozitních materiálů. Prvním druhem jsou výrobky pouze s podélnými vlákny, které se používají pro axiálně namáhané součásti, typickým představitelem jsou rybářské pruty. U druhého typu jsou axiální vlákna kombinována s rohoží, ve které jsou vlákna kladena pod takovým úhlem, aby výsledné vlastnosti splňovaly nároky kladené na konkrétní výrobek.

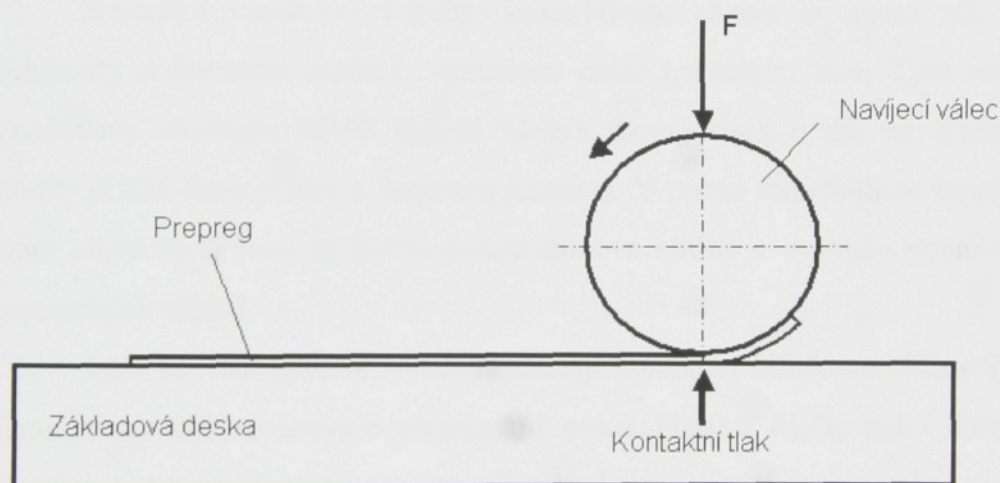
Více než 90% pultruzně vyrobených profilů je ze skelných vláken a polyesterových pryskyřic. Tam kde je vyžadována větší korozivzdornost se používají vinylesterové pryskyřice a u výrobků s vyššími nároky na mechanické vlastnosti se používá epoxidová pryskyřice [12].

K hlavním výhodám pultruzní technologie patří:

- délka výrobku je v podstatě omezena pouze transportními možnostmi
- možnost výroby téměř jakéhokoliv profilu
- kompozitní profil může být vyplněn dalším materiálem např. polyuretanová pěna, drát, dřevo ...
- vysoká variabilita použití různých materiálů vláken a matic
- možnost výroby rozměrově velkých profilů

1.2.5.5 Navíjení tkaniny

Jedná se o zřejmě nejjednodušší způsob výroby převážně kruhových profilů. Principem této metody je navíjení impregnované tkaniny ležící na plochem stole na válec, za působení tlaku mezi válcem a stolem viz. obr. 4.



Obr. 4 Technologie navíjení tkaniny

K navíjení jsou používány prepregy z tkanin nebo rohoží, mohou se ale také používat pleteniny. Nejčastěji je používána tkanina s vlákny $0^\circ/90^\circ$. Trubky vyrobené z této tkaniny mají dobré vlastnosti v podélném a kruhovém směru avšak jsou málo odolné v krutu. Rozdíly vlastností v jednotlivých směrech záleží na použitém typu textilie. Rohože bývají používány v případě nutnosti dosažení specifických vlastností v jednotlivých směrech. Použitím rohoží s dominantní směrovostí vláken lze dosáhnout téměř jakékoliv kombinace mechanických vlastností v jednotlivých směrech.

V podstatě existují dva typy navíjení textilie. V prvním případě je podélná osa textilie navíjena kolmo na osu trnu (kolmé navíjení) v druhém případě pod určitým úhlem, pak se jedná o spirálové navíjení.

Kolmé navíjení je nejjednodušší a nejrychlejší způsob navíjení. Nevýhodou je, že při navíjení většího počtu vrstev má tkanina tendenci k vytváření „vrásek“ a bublin. Různým rozložením více kusů tkaniny a pohybem navíjecího trnu lze dosáhnout rozličných vlastností a efektů, jako například kónické trubky, změny tloušťky stěny podél délky trubky a pod.. Spirálové navíjení je pomalejší, protože najednou může být navíjena pouze jedna vrstva tkaniny, na druhou stranu eliminuje vznik vrásek a bublin při navíjení tlustostěnných trubek [12].

1.2.5.6 Kompozity s kovovou maticí

Speciální kapitolou v těchto materiálech, kterou je nutno též zmínit jsou kompozity s kovovou maticí, vyztužené další zpevňující fází. Tyto materiály jsou označovány zkratkou MMC (Metal Matrix Composite), u nás se zřídka používá i zkratky KKM (kompozity s kovovou maticí). V tomto materiálu se kombinuje velmi dobrá elasticita a lomová houževnatost kovové slitiny s vysokou pevností a tvrdostí keramických přísad.

Jako kovová matrice slouží nejčastěji komerční hliníkové slitiny 7005 a 7020. Keramickou složku obvykle představují oxidy hliníku Al_2O_3 nebo karbidy bóru či křemíku ve formě rozptýlených granulí nebo krátkých vláken. Na volbě materiálů obou složek a na jejich objemovém podílu pak závisí výsledné vlastnosti tohoto materiálu.

K aplikacím na rámy jízdních kol předurčuje kompozity MMC především podíl pevnost a hmotnost. Pro tyto kompozity je také charakteristický vzrůst elastických hodnot měřených modulem pružnosti vzhledem k běžným hliníkovým slitinám.

Největším výrobcem těchto trubek je italská firma Metalba - jeden z největších výrobců hliníkových polotovarů v Evropě. Vývoj těchto trubek probíhá přibližně od roku 1992 a jeho výsledkem jsou kompozity obchodních názvů Ceramical 100 a 200, kde čísla představují procentuální podíl keramické složky 10% a 20%. Maticí zde tvoří hliníková slitina 6061 a keramickou složku oxidy hliníku Al_2O_3 . Ceramical 100 má o 16% vyšší modul pružnosti než slitina tvořící jeho matici a u Ceramicalu 200 je tento rozdíl ještě větší. Tyto materiály představují špičku ve své skupině a tažením se z nich

vyrábějí bezešvé trubky určené speciálně pro stavbu rámu cyklistických kol, které se většinou spojují svářením metodou TIG, výjimečně se spojují lepením.

Vývoj kompozitu s kovovou maticí a jejich použití v cyklistice je teprve v počátcích. Směr výzkumu je zaměřen především na hledání dalších materiálů pro kovové matrice, nabízí se například slitiny hořčíku typu elektron, využití jiných keramických materiálů, například karbidu křemíku a také zdokonalení vazby mezi zpevňovací fází a maticí. Cílem je dosažení ještě lepších mechanických vlastností MMC materiálů při co nejnížší hmotnosti, ale také zlevnění jejich výroby, což by vedlo k většímu rozšíření mezi běžné uživatele [17].

1.2.6 Porušení kompozitních materiálů

Způsob porušení materiálů je zkoumán již několik století, v podstatě se datuje ke vzniku metalurgie. Jako výsledek tohoto zkoumání byla pevně ustanovena analýza porušení kovových materiálů. Podobný výzkum však zatím ještě nebyl zakončen u kompozitních materiálů. Ačkoliv některé poznatky získané pro způsoby porušení kovových materiálů mohou být aplikovány také na jednotlivé složky kompozitů, vzájemně rozlišné chování dvou základních materiálů v jednom kompozitním celku neumožňuje aplikovat běžné teorie porušení kovových materiálů na kompozit jako celek. Porušení kompozitních materiálů závisí především na vzájemné kombinaci zatěžující síly a směru vláken, což vyvolává různé způsoby porušení, které se nevyskytují u kovových materiálů [18].

V posledních letech se výzkum v této oblasti zaměřuje na modifikaci teorií získaných pro kovové materiály tak, aby mohly být aplikovány také pro kompozity [12]. Úkol této kapitoly je poskytnout základní přehled znalostí o porušení kompozitních materiálů. Protože je tato oblast stále předmětem výzkumu jsou některé teorie a postupy stále upřesňovány. Postup vyšetřování příčiny poškození kompozitních materiálů zahrnuje následující body:

- získání informací o historii součásti
- nedestruktivní zkoušky
- vyhodnocení zda součást vyhovuje daným specifikacím
- fraktografické vyhodnocení
- napětíová analýza [12].

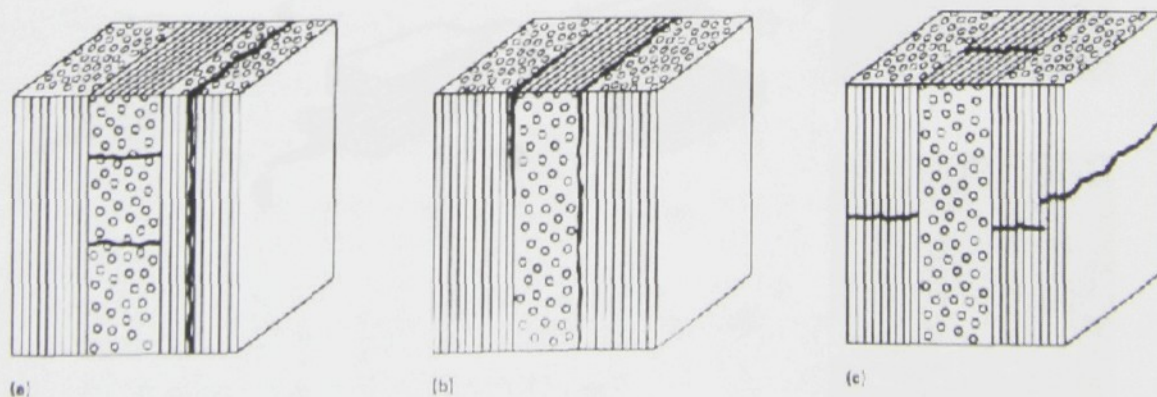
Výše zmíněné body v podstatě odpovídají běžnému postupu pro ostatní materiály. Existují však jistá specifika pro kompozitní materiály pramenící z jejich heterogenity a anizotropnosti. Tyto rozdíly se týkají především nedestruktivních zkoušek a fraktografie. Vzhledem k zaměření této práce je dále popsána pouze fraktografie kompozitních materiálů.

• Fraktografie

Fraktografie je mikroskopická analýza povrchu lomové plochy. Jejím cílem je zjistit příčinu poškození a vztah mezi způsobem porušení a mikrostrukturou materiálu. Používá se pro zjištění počátku porušení a jeho dalšího postupu. Fraktografie se také může využít pro stanovení velikosti a typu zatížení, které způsobilo poruchu. Z tohoto důvodu hraje fraktografie hlavní úlohu při zkoumání procesu porušení kompozitních materiálů.

Porušení kompozitních materiálů vzniká celou řadou různých způsobů, což vyplývá především z jejich anizotropie. Typy porušení kompozitů se odvíjejí od směru působící síly a orientaci vláken a vrstev. Změnou orientace vláken můžeme dosáhnout několika odlišných typů porušení u stejných vzorků, při jejich stejném způsobu zatížení. Rozsah různorodosti porušení znemožňuje pevně stanovit jednotlivé makroskopické typy porušení pro většinu aplikací. V mikroskopickém měřítku je však možné stanovit alespoň základní typy porušení podobně jako u kovů.

Porušení vláknových laminovaných kompozitů může být rozděleno do tří základních skupin: interlaminární, intralaminární a translaminární, jak je zřejmé z obr. 5.



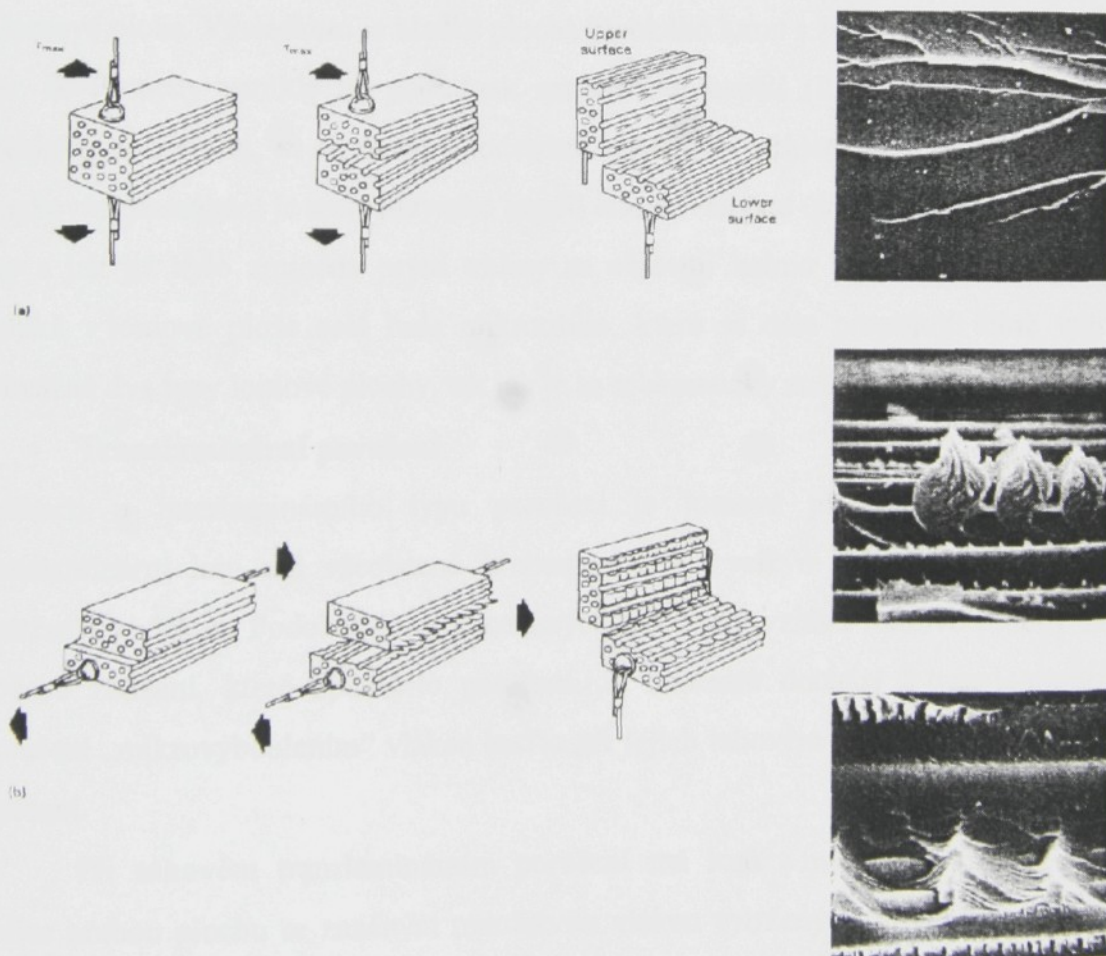
Obr. 5 Základní způsoby porušení vláknových laminovaných kompozitních materiálů –

a) Intralaminární b) Interlaminární c) Translaminární

U translaminárního porušení je trhlina orientována napříč směru vláken ve vrstvě, u které vzniklo první porušení. V případě interlaminárního porušení je naopak trhlina orientována podélně ke směru vláken mezi jejich jednotlivými vrstvami, kdežto u intralaminárního typu vznikají tyto stejné trhliny, ale uvnitř jednotlivých vrstev. Translaminární porušení zahrnuje rozsáhlé porušení vláken, zatímco u „inter“ a „intra“ laminárního porušení vzniká trhlina podél vláken a tak dochází k malému nebo vůbec žádnému porušení vláken [19].

• Interlaminární a intralaminární porušení

Uvažováno v mikroměřítku může interlaminární a intralaminární porušení popsáno stejným způsobem. V obou případech se trhlina objevuje v jedné vrstvě, rovnoběžně se směrem vláken. Podobně jako u kovů může dojít k porušení vlivem tahového napětí (typ I) smykového napětí (typ II) nebo jejich různou kombinací. Oba typy napětí jsou zobrazeny na obr. 6.



Obr.6 Porušení kompozitních materiálů a) typ I. interlaminárním tahovým napětím

b) typ II. interlaminárním smykovým napětím

Protože u interlaminárního a intralaminárního typu vzniká trhlinka ve stejné rovině jako je rovina vyztužujících vláken, převládá mechanismus porušení (a vzhled lomové plochy) oddělením vláken od matrice nebo jejím samotným porušením, což odpovídá pouze typu zatížení I. nebo II. viz. obr.6.

U většiny dnes běžně používaných reaktoplastových matric dochází ke křehkému porušení matrice samotné. Podobně jako u křehkého lomu u kovů a nevyztužených polymerů mají běžné matrice (využívající kohezivní sílu) poměrně rovnou hladkou plochu s minimálními znaky plastické deformace. Plocha křehkého porušení je téměř vždy kolmo ke směru lokálního napětí, které způsobilo poruchu. Jak je patrné z obr.6 porušení vzniká u obou typů zatížení I. a II. stejným mikroskopickým mechanismem tedy křehkým lomem. Jediným rozdílem mezi těmito typy zatížení je směr hlavního napětí, pod kterým se objevují první mikroskopické trhlinky.

V případě tahového zatížení (I.) leží směr maximálního tahového napětí kolmo k lomové ploše. Výsledkem je hladká plocha křehkého lomu s žilkovitou morfologií viz. obr. 6. Poruchy vzniklé za podmínek smykového napětí (II.), ačkoliv též vznikají křehkým porušením, se vyznačují podstatně rozdílným vzhledem lomové plochy. Při smykovém namáhání je směr hlavního napětí orientován pod úhlem 45° ke směru hlavní osy a jak již bylo zmíněno první trhlinky se objevují kolmo ke směru tohoto napětí, vzniká v lomové ploše celá řada mikrotrhlin, které se dále propojují čímž vznikají převážně dva typy lomové plochy, tak jak je to schematicky znázorněno na obr. 6.

• Translaminární porušení

Zatímco u interlaminárního typu porušení je lomová plocha relativně hladká, translaminární lom má všeobecně hrubou plochu s velkým množstvím porušených vytržených vláken. Podobně jako u kovových materiálů vzhled lomové plochy odráží způsob zatížení, které způsobilo porušení. U laminátů dochází k translaminárnímu porušení „mikrovyboulením“ vláken buďto při jejich tahovém nebo tlakovém lokálním zatížení.

Při **tahovém** translaminárním porušení má lom z makroskopického pohledu velice hrubou plochu se značným množstvím vláken vytržených ze základní struktury. Žádná nebo malá delaminace je patná v blízkém okolí lomové plochy. Přednostně dochází ke křehkému porušení jednotlivých vláken a následně k porušení matrice v oblasti porušení vlákna. Vlákná se neporušují jednotlivě, ale v celých svazcích, kdy

lomová plocha jednotlivého svazku je relativně plochá. K porušení nedochází v jedné linii, ale vzhledem k citlivosti vláken na vrypy v mnoha zónách, pak se lomová plocha sestává z několika izolovaných zárodků porušení [20].

Při **tlakovém** zatížení se lom vyznačuje výrazným vybočením vláken rozsáhlou delaminací a zablokováním delaminovaných vrstev [21]. Lomová plocha vláken je hladká s výrazným poškozením povrchu lomové plochy, způsobené kontaktem dvou protilehlých lomových ploch až po původním porušení. Celkově je povrch lomové plochy značně hladší než při porušení tahovým napětím s minimálním množstvím vytržených vláken [12].

Experimentální výsledky

2. Hodnocení vlastností nepoužívanějších kovových trubek

Před vlastním návrhem struktury kompozitní trubky je jako výchozí bod nejdříve nutné znát vlastnosti kovové trubky, běžně používané pro stejný účel tedy pro výrobu sportovního náradí. Protože publikací v této oblasti je velice málo, bylo nutné zjistit vlastnosti kovových materiálů experimentálně.

2.1 Přehled testovaných trubek

Jako reprezentativní vzorek kovových materiálů používaných pro výrobu sportovních potřeb byly zvoleny z důvodu dostupnosti a široké škály použitých materiálů trubky určené ke stavbě rámců jízdních kol. Je ovšem možné konstatovat, že stejné nebo obdobné materiály jsou používány při konstrukci dalších sportovních potřeb, jako jsou například hokejové nebo golfové hole a podobně. Jak již bylo popsáno, ke komerční výrobě levnějších sportovních potřeb se nejběžněji používají ocelové trubky. Z velké části se jedná o oceli třídy 15, nízko legované chromem, manganem, molibdenem a v malém množství některými dalšími prvky. V poslední době pronikají na trh trubky a profily z hliníkových slitin, především řady 7000 dle ASTM. Pro výrobky nejvyšší kategorie se používají speciálně vyvinuté slitiny oceli, hliníkové slitiny třídy 6000 a 7000, slitiny titanu s hliníkem a vanadem, převážně TiAl3V2.5 a v poslední době nejrůznější druhy kompozitních materiálů [17].

2.1.1 Ocelové trubky

Trubky pro zkoušky poskytl firma Fortframes z Ústí nad Orlicí. Tato firma vyrábí jedny z nejkvalitnějších rámců v naší republice, navíc jako jediná u nás vyrábí v sériovém množství rámy z těch nejdražších trubkových sad, kde je běžná jen kusová nebo zakázková výroba.

Do testu byly získány trubky Sanko, Tange, Oria a Columbus, které používá firma Fort Frames a představují průřez světovou produkcí.

SANKO je poměrně mladá firma pocházející z Japonska, produkuje především ocelové trubky. Trubka s označením RO78 se používá pro stavbu silničních rámců, představuje cenově přijatelnou kvalitu.

Firma TANGE již ukončila výrobu trubek pro jízdní kola. Před několika lety však patřila ke špičce v tomto oboru. Model Prestige ještě nedávno představoval nejlepší ocelovou trubku na trhu, používá se především pro horská kola, má zeslabovanou stěnu z tloušťky 1 mm na 0,6 mm. Model Infinity je cenově přijatelnější verzí trubky od této firmy při zachování vysokých pevnostních parametrů, stěny trubky již nejsou zeslabované.

Firma ORIA pochází z Itálie a produkuje širokou škálu trubek z oceli a hliníkových slitin na vysoké úrovni. Model Vanadium patří k tomu nejlepšímu v nabídce této firmy, v testovaném provedení oversize se používá pro horská kola.

Columbus je také italská firma, momentálně jedna z nejpoužívanějších všemi výrobci kol, jako první vyvinula speciální ocelovou slitinu pro cyklistiku - Nivacorm. Z tohoto materiálu je vyroben nejvyšší model v nabídce Columbus-Max. Tato trubka má dvakrát zeslabovanou stěnu z 0,7 mm na neuvěřitelných 0,4 mm, navíc je v různých místech ovalizována dle daného průběhu napětí na rámu, což však zároveň přináší značné problémy a náročnost na výrobu. Mechanické a chemické vlastnosti testovaných trubek udávané výrobcem jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab.1 Vlastnosti trubek z oceli udávané výrobcem

Označení	Chemické složení	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
Sanko RO78	1%Cr - 0,5%Mn - 0,3%C - 0,2%Mo	780	10-12
Tange Infinity	neuveďeno	800	10
Tange Prestige	neuveďeno	1250	17-20
Columbus Max	neuveďeno - Nivacorm V-Nb	1200	12
Oria Vanadium OS	neuveďeno	750	10

2.1.2 Trubky z hliníkových slitin

Tyto trubky poskytla také firma Fortframes, jedná se o modely Altec a Aluthron od italského Columbusu.

Altec je speciálně pro cyklistiku vyvinutá slitina hliníku s hořčíkem. Tato slitina díky dobré tvářitelnosti dovoluje více než čtyřicetiprocentní změnu průřezu během tváření [2], při zachování dobré tažnosti. Vynikajících mechanických vlastností těchto trubek je dosaženo právě díky mechanickému zpevnění materiálu při tváření, jehož postup je pro každou trubku jiný a je patentově chráněn. Mechanické vlastnosti se také

mění po délce trubky, v závislosti na stupni tváření a tloušťce stěny v daném místě, což odpovídá zatížení tohoto místa na samotném rámu kola.

Aluthron je běžná slitina řady 7000 odpovídající soustavě Al-Zn-Mg s dobrou svařitelností i mechanickými vlastnostmi a také s příznivější cenou než Altec. Mechanické a chemické vlastnosti testovaných trubek udávané výrobcí jsou uvedeny v Tab.2.

Tab.2 Vlastnosti trubek z hliníkových slitin

Označení	Chemické složení	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
Columbus Altec	Al-Mg4-Mn0,6	420	9
Columbus Aluthron	Al-Zn4-Mg1-Mn-0,2	410	10-15

2.1.3 Trubky ze slitin titanu

Tyto trubky poskytla firma Morati, jež je součástí letecké divize firmy Mora Moravia, která produkuje rámy a další výrobky z titanu na té nejvyšší světové úrovni, mimo jiné dodává díly pro motory letadel Boeing.

Pro trubky se používá slitina TiAl3V2,5 vyráběná v Rusku. Jedná se o jednu z nejběžnějších titanových slitin používaných především v leteckém průmyslu.

Mechanické a chemické vlastnosti této slitiny udávané výrobcem jsou uvedeny v Tab.3.

Tab.3 Vlastnosti trubek z titanových slitin

Označení	Chemické složení	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
TiAl3V2,5	3%Al - 2,5%V	860	10

2.2 Testování mechanických vlastností

Cílem testování mechanických vlastností výše popsaných trubek, bylo ověřit jejich základní mechanické vlastnosti a tyto porovnat s parametry, které udává výrobce trubek v katalogu nebo v průvodní dokumentaci pro výrobce rámu. Zjištěné hodnoty posloužily jako základní údaje pro vývoj trubky z kompozitního materiálu.

Dále bylo cílem vypracovat jednoduchý postup zkoušení trubek, který by mohl být používán jako standardní při ověřování mechanických vlastností dodaných trubek ve firmách produkující rámy cyklistických kol. Ty totiž často narážejí na obtížnost testování kvality dodaného materiálu.

2.2.1 Rozbor chemického složení ocelových trubek

Vzhledem ke skutečnosti, že ve většině případů neměli výrobci rámu k dispozici certifikáty s přesným ověřením chemického složení jednotlivých materiálů jsem musel provést chemickou analýzu u vzorků, u kterých bylo chemické složení známé jen částečně nebo vůbec. Zjištěné výsledky jsou uvedeny v Tab. 4. Množství nižší než 0.1% jsou uvedena kurzívou.

Tab. 4 Chemické složení materiálu

Vzorek	Obsah jednotlivých prvků obsazených v materiálu													
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
Reynolds 853	97.2	0.25	0.25	0.57	1.14	0.18	0.094	0.019	0.21	<.004	<0.0002	<.003	0.032	<.002
Tange Prestige	97.6	0.28	0.27	0.58	0.98	0.19	<0.01	0.044	0.02	<.004	0.0007	<.004	0.036	<.002
Tange Infinity	97.4	0.26	0.27	0.50	1.07	0.23	0.024	0.011	0.16	<.004	<0.0002	0.007	0.036	<.002
Oria Vanadium	97.2	0.24	0.26	0.57	1.19	0.19	0.100	0.016	0.21	<.004	<0.0002	0.008	0.037	<.002
Columbus Max	94.5	0.15	0.24	1.80	2.29	0.52	0.140	0.021	0.25	0.005	<0.0002	<.003	<.039	<.002

Zjištěné výsledky potvrdily, že v případě ocelových trubek se jedná o nízko legované slitiny obsahující přibližně 0.25% uhlíku, okolo 1% chromu, 0.6 % manganu a 0.2 % molibdenu s příměsí přibližně 0.25 % křemíku a 0.2 % mědi a nepatrného množství ostatních látek, jak je tomu uvedeno v Tab. 4.

Nepatrnou výjimkou jsou trubky Columbus Max, kde se jedná o slitinu identickou s ostatními materiály, pouze s nepatrně vyšším množstvím legur a nižším obsahem uhlíku a křemíku, což odpovídá vyšším hodnotám mechanických vlastností uváděným u tohoto materiálu výrobcem.

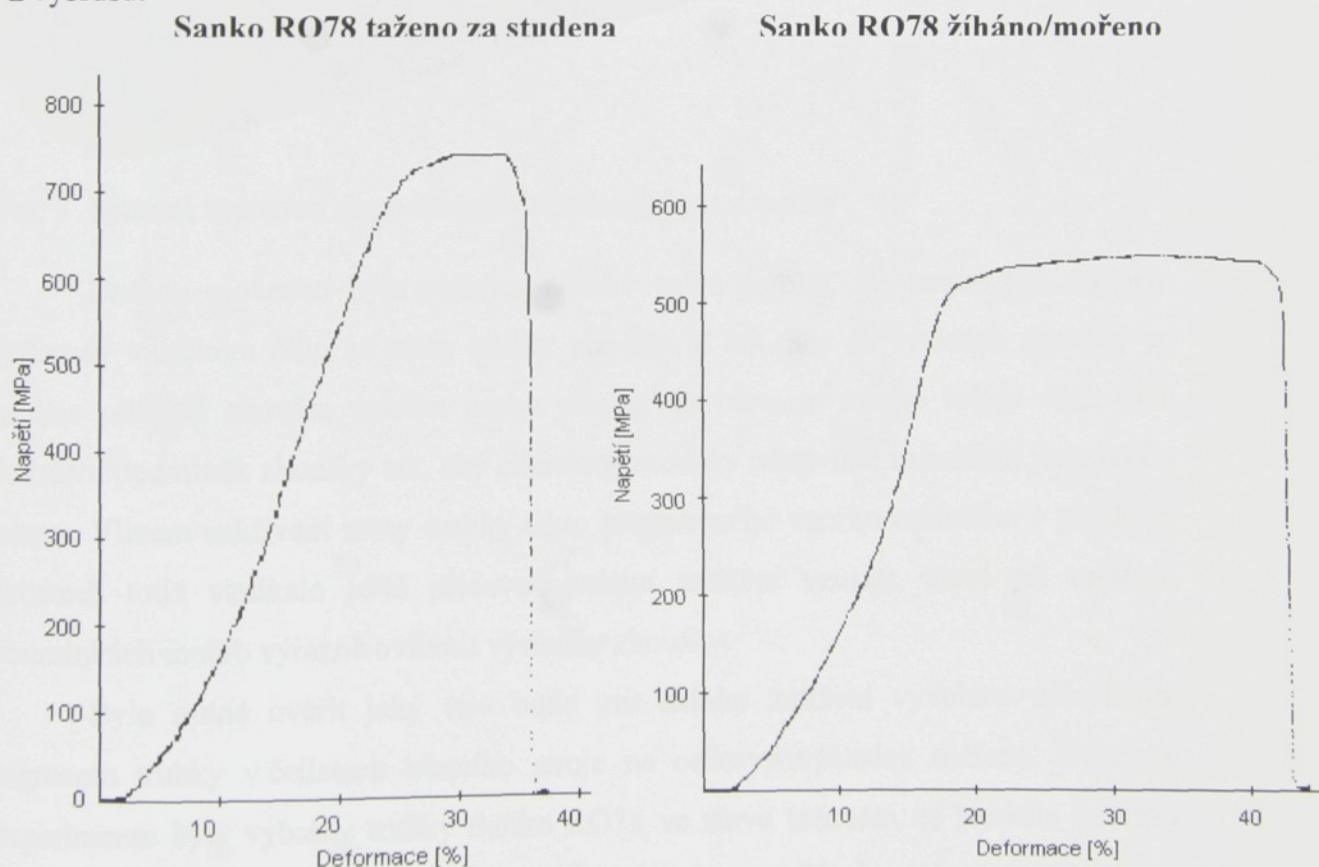
2.2.2 Tahová zkouška trubek

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním trhačím stroji FPZ 100, v laboratoři KMT. Pro zkoušku byly použity prizmatické čelisti, do trubky byl v místě upnutí vložen ocelový válec bránící promáčknutí trubky čelistmi.

Ukázalo se jako velice obtížné provést zkoušku tak, aby došlo k porušení trubky v její střední části. U většiny trubek docházelo k prokluzu v čelistech a úplně nejčastěji k jejich porušení na hraně čelisti, v místě posledního vrubu, vytlačeného čelistí do trubky. Takto provedené zkoušky samozřejmě nebylo možné interpretovat.

S úspěchem se podařilo odzkoušet pouze trubky z měkčích materiálů a to konkrétně Sanko RO78 a titanové trubky TiAl3V2,5. Ale i u těchto materiálů bylo nutné provést více pokusů, aby bylo možné co nejobektivněji vyhodnotit výsledky. Výsledky měření jsou uvedeny v příloze Tab. č. 1 až 3.

Vyhodnocením výsledků tahové zkoušky materiálu Sanko RO78 bylo zjištěno, že mechanické vlastnosti vzorků vykazují značný rozptyl. Hodnoty meze pevnosti se ustálily přibližně ve dvou hladinách. Z tohoto důvodu byly zhotoveny metalografické výbrusy těchto vzorků a bylo zjištěno, že trubky které byly výrobcem rámu (nikoliv trubek) označovány jako vzorky stejné kvality pouze s odlišnou povrchovou úpravou se ve skutečnosti značně liší druhem použitého tepelného zpracování. Vyhodnocením struktury obou materiálů bylo dosaženo závěru, že se jedná o trubky ve stavu taženém za studena, bez následného tepelného zpracování a v druhém případě o vzorky žíhané, s mořeným povrchem. Na obr. 7 jsou znázorněny zkušební diagramy pro trubku Sanko RO78 ve stavu taženém za studena a stavu žíhaném/mořeném, jak bylo zjištěno z výbrusu.

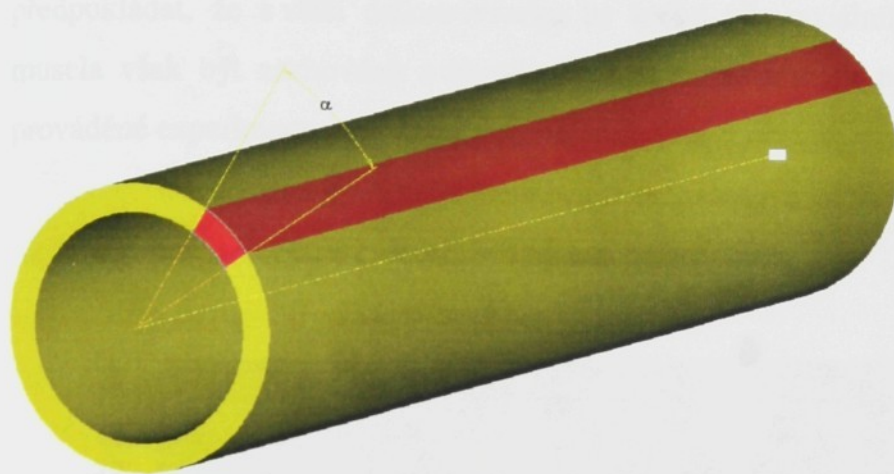


Obr. 7 Zkušební diagramy ze zkoušky tahem

2.2.3 Rozbor vlastností segmentů trubek

Problém s upnutím trubek v čelistech trhačího stroje bylo nutné nějakým způsobem vyřešit tak, aby bylo možné co nejobektivněji a zároveň co nejjednodušeji a nejlevněji provést zkoušky na všech vzorcích trubek.

Jako řešení se nabízela možnost zesílit stěnu trubky v místě upnutí připájením segmentu stočeného plechu nebo rozřízlé trubky. Tato varianta se však nejevila jako nejlevnější a navíc hrozilo riziko, že budou vzorky praskat v tepelně ovlivněné zóně těsně za místem vyztužení trubky i přes to, že se jedná o materiály určené pro následné svařování nebo pájení, což se potvrdilo praktickým testem.



Obr. 8 Schéma vyříznutí segmentu příslušného úhlu α z trubky

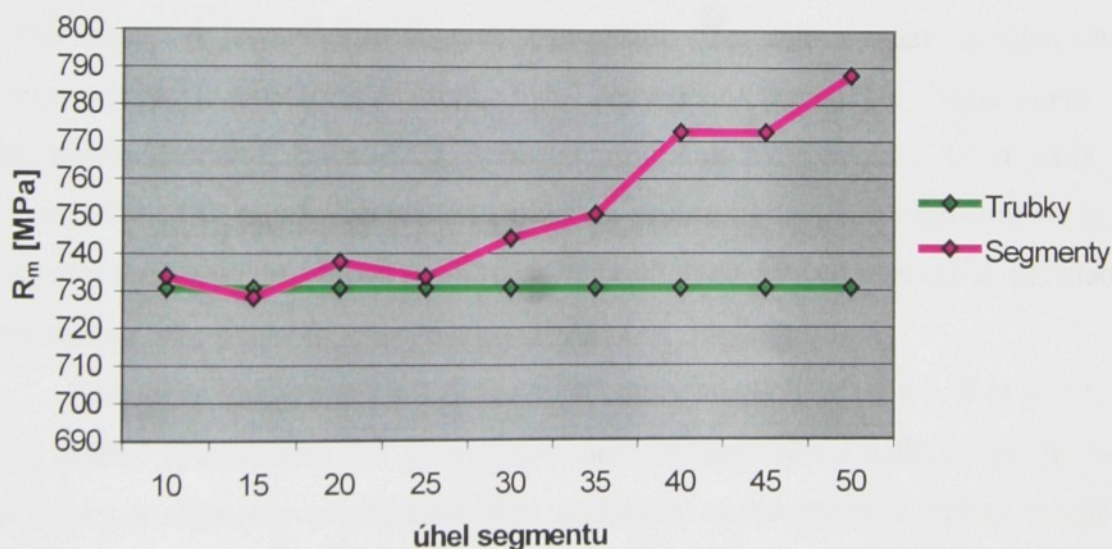
Druhou možností bylo testovat nikoliv celou trubku, ale pouze její segment vyříznutý v určitém úhlu ze stěny trubky viz. obr. 8 tak, aby se výsledek zkoušky co nejvíce přiblížil zkoušce úzkého pruhu plechu. Problémem tohoto řešení však bylo dodržení podmínek zkoušky tak, aby charakter zkoušky odpovídal namáhání jednoosým tahem. Vlivem zakřivení stěny trubky takto připraveného vzorku upnutého v plochých čelistech totiž vznikalo ještě přidavné axiální zatížení vzorku, které při určitých podmínkách mohlo výrazně ovlivnit výsledky zkoušky.

Bylo nutné ověřit jaký vliv bude mít axiální zatížení vyvolané zploštěním segmentu trubky v čelistech trhačího stroje na celkový výsledek měření. K tomuto experimentu byly vybrány trubky Sanko RO78 ve stavu taženém za studena i trubky žíhané a mořené, jejichž mechanické vlastnosti byly spolehlivě ověřeny v testu, který byl popsán výše.

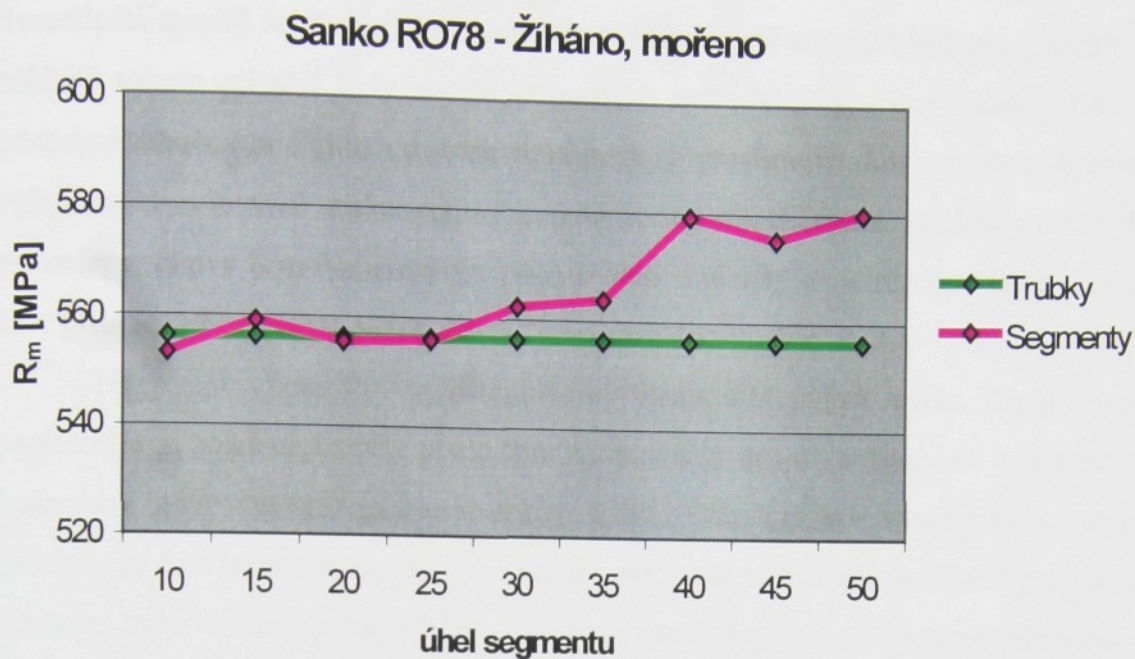
Tyto trubky byly rozřezány tenkým brusným kotoučem za vydatného chlazení a s pomocí dělicího zařízení na vzorky po úhlu 5° . Pro každý úhel bylo připraveno pět vzorků segmentů. Na těchto vzorcích byla posléze provedena zkouška tahem, jejímž cílem bylo zjistit vliv úhlu výřezu segmentu na mechanické vlastnosti vzorku. Naměřené výsledky jsou zpracovány v příloze Tab. č. 4 a 5.

Jak se ukázalo skutečně došlo k ovlivnění výsledků v důsledku přidavného axiálního napětí, vyvolaného zploštěním segmentu v plochých upínacích čelistech trhacího stroje. Toto mělo vliv především na hodnotu meze pevnosti materiálu. Tyto hodnoty by byly zajisté také ovlivněny délkou zkušební vzorku, kdy se dá předpokládat, že s větší délkou vzorku by klesal vliv axiálního napětí. Tato délka musela však být zachována z důvodu dodržení standardních podmínek pro všechny prováděné experimenty.

Sanko RO78 - Taženo za studena



Obr.9 Vliv úhlu segmentu trubky



Obr.10 Vliv úhlu segmentu trubky

Naměřené hodnoty byly zpracovány do výše uvedených grafů na obr.9 a 10, ze kterých jasně vyplývá nárůst meze pevnosti s rostoucím úhlem segmentu. Aby bylo možné zjistit od jakého úhlu segmentu je rozdíl mezi soubory dat naměřených na segmentech a trubkách významný, bylo provedeno statistické vyhodnocení dat programem Microsoft Excel [22]. V tomto programu byl proveden t-test vždy pro soubor hodnot R_m zjištěných při testu trubky a soubor hodnot R_m segmentů při jejich různých úhlech, vše pro případ rozdílných rozptylů dvou daných souborů a při hladině významnosti 5%.

Statistická analýza je zpracována v příloze, v tabulkách č. 4 a 5. Z té je zřejmé, že při hladině významnosti 5% jsou rozdíly mezi soubory měření hodnot meze pevnosti pro trubky a segmenty příslušného úhlu statisticky nevýznamné u trubky tažené za studena až do úhlu segmentu 25° a u trubky žíhané s mořeným povrchem dokonce až do 30° . Na základě tohoto zjištění tedy lze konstatovat, že výsledky měření mechanických vlastností celé trubky a segmentu z ní vyříznutého jsou shodné do úhlu segmentu 25° [23].

2.2.4 Měření mechanických vlastností segmentů trubek

Měřením vlivu úhlu výřezu segmentu trubky, respektive šířky testovaného vzorku na jeho mechanické vlastnosti bylo prokázáno, že přibližně až do úhlu

dvacetipětí stupňů se shodují mechanické vlastnosti celé trubky i jejího segmentu. Na základě tohoto zjištění byly z výše popsaných materiálů vyrobeny zkušební vzorky odebrané z trubek pod úhlem dvaceti stupňů tak, aby byla s jistotou zajištěna objektivita vyhodnocení výsledků získaných zkouškou segmentu trubky. U těchto vzorků byla provedena tahová zkouška, naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny tabulkách 6 až 13 v příloze.

Naměřené hodnoty mechanických vlastností jednotlivých druhů trubek poukazují na značné rozdíly mezi hodnotami udávanými výrobcem a skutečnými hodnotami zjištěnými testem. Největší rozdíl byl zjištěn u trubek Sanko RO78, kde bylo zjištěno, že část trubek, které výrobce rámu považoval za trubky s odlišnou povrchovou úpravou, byly ve skutečnosti žíhány a mořeny s určením na použití pro značně tvářené části rámu, jako například některé části stavby dámských rámu. Tato skutečnost byla nakonec potvrzena samotným výrobcem trubek z Japonska. Naopak u trubek Oria Vanadium a Tange Infinity byly zjištěny vyšší hodnoty meze pevnosti než bylo výrobcem udáváno. Hmotnost a cena těchto sad trubek však odpovídá naměřeným vlastnostem, je pravděpodobné, že se v tomto případě jednalo o nepřesné údaje uvedené v katalogu.

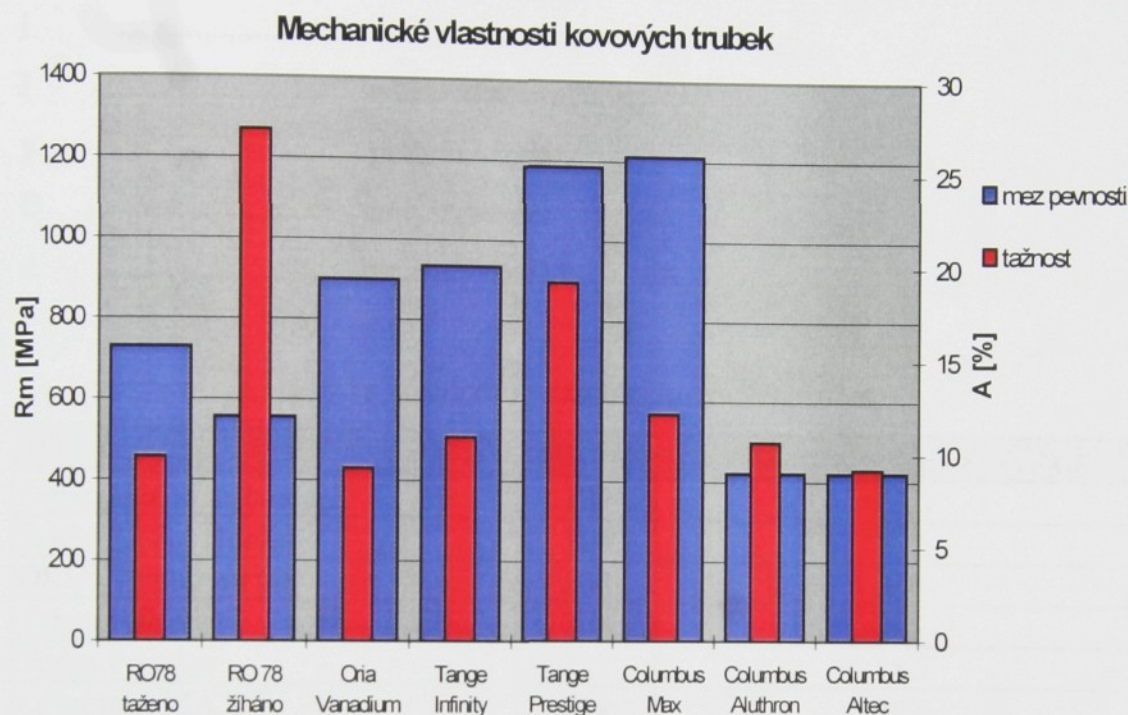
Nejpřesnější údaje o vlastnostech materiálu udává firma Columbus, což odpovídá jejímu současnému postavení na trhu výrobců cyklistických trubek. Naměřené hodnoty jak ocelových (Max), tak hliníkových (Altec, Aluthron) trubek jsou velmi blízké hodnotám udávanými výrobcem.

Velmi zajímavým zjištěním byly naměřené hodnoty trubky Tange Prestige. Jedná se o jednu z nejkvalitnějších a zároveň nejdražších trubek, používaných pro závodní účely. Mez pevnosti této trubky přibližně odpovídala katalogovým údajům, vyšší meze pevnosti dosahují pouze trubky Reynolds 853 (1250 - 1450 MPa), které zřejmě představují vrchol v nabídce ocelových trubek, bohužel z důvodů jejich vysoké ceny nebylo možné tyto trubky zařadit do testu. Hlavním překvapením u trubek Prestige byla jejich vysoká tažnost, téměř 20%. U trubky s takto vysokou pevností, navíc značně tvářené na různé tloušťky stěn byla očekávána tažnost nižší.

Nepřekvapily naopak trubky ze slitiny Ti3Al2,5V, jejichž vlastnosti přesně odpovídaly udávaným hodnotám. Důvod je v naprosto odlišném přístupu firmy Morati

k výrobě, který odpovídá normám pro letecký průmysl, protože Morati je součástí letecké divize firmy Mora Moravia.

Kompletní výsledky měření mechanických vlastností nepoužívanějších kovových trubek pro stavbu rámců jízdních kol jsou zpracovány v grafu na obr.11.



Obr.11 Vlastnosti kovových trubek

2.2.5 Měření modulu pružnosti trubek

Z důvodů co nejjednoduššího měření a především možnosti porovnání s hodnotami zjišťovanými na trubkách z kompozitních materiálů, bylo zvoleno měření modulu pružnosti materiálu v ohybu. Měření bylo provedeno v laboratoři katedry materiálu TU Liberec na zkušebním stroji FPZ 100.

Byla provedena zkouška tříbodovým ohybem se vzdáleností opor 200mm. Byl měřen průhyb vzorku v závislosti na jeho zatížení až do doby, kdy se začal výrazně deformovat průřez trubky.

Výsledná hodnota modulu pružnosti byla vypočtena dle vztahu [24]:

$$E = \frac{F \cdot l^3}{48 I_y} \quad (9)$$

Kde
$$I = \frac{\pi^4}{64} (D^4 - d^4) \quad (10)$$

E		modul pružnosti v ohybu
F		zatěžující síla
l		vzdálenost podpor
I		moment setrvačnosti
y		průhyb vzorku
D		vnější průměr
d		vnitřní průměr

Tab.5 Modul pružnosti kovových trubek

Materiál	E [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]
Sanko taženo za studena	187	15,3
Sanko žíháno, mořeno	164	9,7
ORIA Vanadium OS	204	8,4
Tange Infinity	208	4,5
Tange Prestige	217	18,7
Columbus MAX	214	35,6
Columbus Aluthron	70	4,4
Columbus Altec	75	5,2
Ti3AL2,5V	111	7,9

Hodnoty modulu pružnosti byly spočítány pro všechny naměřené hodnoty průhybu. Ukázalo se že při větších průhybech vzorku, v závislosti na tloušťce stěny trubky nastává výrazný pokles hodnot modulu pružnosti od reálných hodnot v důsledku deformace kruhového průřezu trubky. Z vypočtených hodnot modulu pružnosti do jejich poklesu byl spočten průměr. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 5.

3. Hodnocení základních vlastností kompozitních materiálů

Jak již bylo výše popsáno jedním z cílů této práce je návrh struktury a optimální technologie výroby trubky z kompozitního materiálu, určené k použití při výrobě různého sportovního náčiní, především pro výrobu rámců cyklistických kol. Jako první krok k prozkoumání vlastností kompozitních materiálů je nutné znát jednotlivé vlastnosti složek těchto materiálů, tzn. pryskyřic, vláken a způsobů jejich kladení v jejich vzájemných kombinacích. Obzvláště důležité z hlediska použití trubek pro sportovní náčiní je poznání procesu porušení kompozitních materiálů. Náhlé porušení kompozitního materiálu bez předchozí plastické deformace může způsobit vážné zranění uživatele, proto je znalost procesu porušení nesmírně důležitá. Z těchto důvodů je před vlastním návrhem struktury kompozitních trubek zvolena a provedena analýza vlastností laminovaných vzorků, kde je mnohem snazší sledovat proces porušení a vliv jednotlivých faktorů kompozitního materiálu. Získané informace pak mohou být využity pro návrh struktury vlastní trubky.

Jako nejjednodušší způsob zjištění základních vlastností a chování při porušení u kompozitních materiálů byla vybrána zkouška třibodovým ohybem provedená na laminátech, vyrobených z nejběžněji dostupných druhů pryskyřic a vláken.

Vyhodnocením základních mechanických vlastností laminátů, ze kterých byly vzorky vyrobeny je možné poznat vliv matrice a výtuzí v dostatečně široké škále jejich vzájemných kombinací. Výsledky tohoto snažení jsou popsány v následujících kapitolách.

3.1 Použité matrice

Matrice má za úkol vzájemně spojovat vyztužující fázi a také chránit vlákna před poškozením a vlivy okolí. Mezi základní charakteristiky, které ovlivňují technologii přípravy kompozitu patří povrchová energie, viskozita a hustota pryskyřice. Pryskyřice použité pro tuto práci byly zvoleny právě s ohledem na tyto, ale i další vlastnosti a dostupnost na našem trhu.

Polyesterové a vinylesterové pryskyřice poskytla firma Reichhold a epoxidové pryskyřice pocházejí od českého výrobce Spolchemie Ústí nad Labem. Pryskyřice Synolit je italské výroby a poskytla ji firma Trident z Plzně.

3.1.1 Matrice SYNOLIT K 0175

Matrice SYNOLIT K 0175 je matricí používanou ve firmě Trident k výrobě laminátových výrobků, například trupů sportovních a rekreačních lodí, skeletů a doplňků pro automobilový průmysl. Jedná se o středně reaktivní polyesterovou pryskyřici se zvýšenou chemickou odolností, obsahuje antiemisní prostředek, který při laminaci podstatně snižuje odpařivost styrenu. Pryskyřice má barvu medovou s charakteristickým zápachem po styrenu. Pryskyřice již obsahuje tvrdidlo a při výrobě se pouze přidá iniciátor v množství 2 až 4 % objemu pryskyřice. Doba zpracovatelnosti při pokojové teplotě a obsahu iniciátoru v množství 3 % je 25 až 30 minut.

Tab.6 Vybrané vlastnosti pryskyřice SYNOLIT K 0175 udávané výrobcem

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Dynamická viskozita nevytvrzené pryskyřice	350 - 550	mPas
Obsah netěkavých látek	49 - 52	%
Pevnost v tahu vytvrzené pryskyřice	69	MPa
Modul pružnosti v tahu vytvrzené pryskyřice	3600	MPa
Tažnost	4,3	%
Hustota	1,1	g/cm ³

3.1.2 Matrice ChS POLYESTER 145

Matrice ChS POLYESTER 145 se zpracovává při výrobě laminátů se zvýšenou chemickou odolností, dobrou mechanickou pevností a tepelnou odolností. Je určena pro technologii navíjení tažení a ruční stříkání. POLYESTER ChS 145 je roztok nenasyceného polyesteru na bázi kyseliny izofosfátové ve styrenu, stabilizovaný proti samovolné polymeraci a obsahuje antiemisní prostředek, který při laminaci podstatně snižuje odpařivost styrenu. Pryskyřice je světle žlutá, viskózní kapalina s charakteristickým zápachem po styrenu. Při výrobě je potřeba přidat do pryskyřice 2 % Peroximonu K1 a 0,5% Co urychlovače. Při této koncentraci je doba zpracovatelnosti pryskyřice při pokojové teplotě 30 - 45 minut.

Tab.7 Vybrané vlastnosti pryskyřice ChS POLYESTER 145 udávané výrobcem

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Dynamická viskozita nevytvrzené pryskyřice	500 - 650	mPas
Obsah netěkavých látek	58 - 62	%
Pevnost v tahu vytvrzené pryskyřice	68	MPa
Modul pružnosti v tahu vytvrzené pryskyřice	2950	MPa
Tažnost	4,0	%
Hustota	1,7	g/cm ³

3.1.3 Matrice NORPOL COR VE 8300

Pryskyřice NORPOL COR VE 8300-045 se nejčastěji používá jako matrice pro ručně kladené lamináty a výrobu vnutím vláken. Jedná se o Bisfenol-A epoxidovou pryskyřici na bázi vinylesteru, která neobsahuje katalyzátory. Její mechanické vlastnosti jako je adheze, houževnatost a odolnost proti únavě předurčují její použití při výrobě nádrží, trubek a dalších výrobních součástí. Mezi její další přednosti patří vynikající chemická odolnost zejména ke kyselinám, alkáliím a oxidačním prvkům. Při výrobě je potřeba přidat do pryskyřice 2% Peroximonu K1 a 3% CO urychlovače.

Tab.8 Vybrané vlastnosti pryskyřice NORPOL COR VE 8300-045 udávané výrobcem

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Dynamická viskozita nevytvrzené pryskyřice	500 - 650	mPas
Obsah netěkavých látek	43 - 47	%
Pevnost v tahu vytvrzené pryskyřice	80	MPa
Modul pružnosti v tahu vytvrzené pryskyřice	3400	MPa
Tažnost	5,0	%
Hustota	1,02 - 1,06	g/cm ³

3.1.4 Matrice NORPOL COR VE 8770

Tato pryskyřice má zvýšenou tepelnou odolnost oproti běžným vinylesterovým pryskyřicím. Vyniká také velmi dobrou odolností proti chemikáliím za zvýšených teplot, speciálně proti silným alkáliím a rozpouštědlům. Používá se na výrobu laminovaných

nádrží, potrubí a různých konstrukčních částí. Při výrobě se mísí s 3 % jednoprocenního CO urychlovače a 2 % Luperoxu K12.

Tab.9 Vybrané vlastnosti pryskyřice NORPOL COR VE 8770 udávané výrobcem

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Dynamická viskozita nevytvrzené pryskyřice	450-650	mPas
Obsah netěkavých látek	43-47	%
Pevnost v tahu vytvrzené pryskyřice	70	MPa
Modul pružnosti v tahu vytvrzené pryskyřice	4000	MPa
Tažnost	2,1	%
Hustota	1,04-1,08	g/cm ³

3.1.5 Matrice NORPOL 200-800

Pryskyřice NORPOL 200-800 se nejvíce používá jako matrice pro ručně pokládané a stříkané lamináty s optimální přilnavostí ke skelným a aramidovým vláknům. Jedná se o středně reaktivní isophtalicko-neopenthylglycolovou polyesterovou pryskyřici, která neobsahuje katalyzátory, s dobrými mechanickými vlastnostmi, zvláště rázovou pevností. Tato pryskyřice má v porovnání s ostatními pryskyřicemi stejného typu velké poměrné prodloužení. Obsahuje nízkoexotermický systém katalyzátorů, který ji přizpůsobuje k laminování tlustých (4 - 8 mm) vrstev vyráběných technologií „wet on wet“ a doporučuje se při laminování různých materiálů jako jsou sendvičové lamináty. Při výrobě je potřeba přidat do pryskyřice 1 % Peroximonu K1.

Tab.10 Vybrané vlastnosti pryskyřice NORPOL 200-800 udávané výrobcem

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Dynamická viskozita nevytvrzené pryskyřice	1 100 - 1 300	mPas
Obsah netěkavých látek	45 - 47	%
Pevnost v tahu vytvrzené pryskyřice	73	MPa
Modul pružnosti v tahu vytvrzené pryskyřice	3100	MPa
Tažnost	6,5	%
Hustota	1,16 - 1,18	g/cm ³

3.1.6 Matrice ChS - EPOXY 531

Jedná se o nízkomolekulární epoxidovou pryskyřici modifikovanou bifunkčním reaktivním rozpouštědlem na bázi glycidyleteru. Používá se v elektrotechnice a stavebnictví jako zalévací, lepící, laminační a impregnační pryskyřice, k přípravě laminátů, tmelů, podlahovin apod. . Vytvrzování této pryskyřice se může provádět při normální nebo zvýšené teplotě, je možné použít různých tvrdidel, v praxi se však nejčastěji zpracovává za normální teploty s přidáním 11-12 % ChS-Tvrdidla P11. Vzhledem k výraznému vývinu tepla při zpracování s tímto tvrdidlem je ve většině případů nutno zvýšit intenzivní odvod tepla při želatinaci nebo jeho rozptyl do plniva.

Tab.11 Vybrané vlastnosti pryskyřice ChS - Epoxy 531 udávané výrobcem

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Dynamická viskozita nevytvrzené pryskyřice	1000-3000	mPas
Obsah netěkavých látek	56-62	%
Pevnost v tahu vytvrzené pryskyřice	min 50	MPa
Modul pružnosti v tahu vytvrzené pryskyřice	3300	MPa
Tažnost	3,0	%
Hustota	1,07-1,15	g/cm ³

3.1.7 Matrice ChS - EPOXY 422

ChS - Epoxy 422 je nízkomolekulární epoxiakrylátová pryskyřice. Nejčastěji se používá v kombinaci s minerálními plnivy pro přípravu tmelů, šterkových hmot, polymermaltových a polymerbetonových kompozic ve stavebnictví. Při přípravě se mísí s 9 % tvrdidla P11.

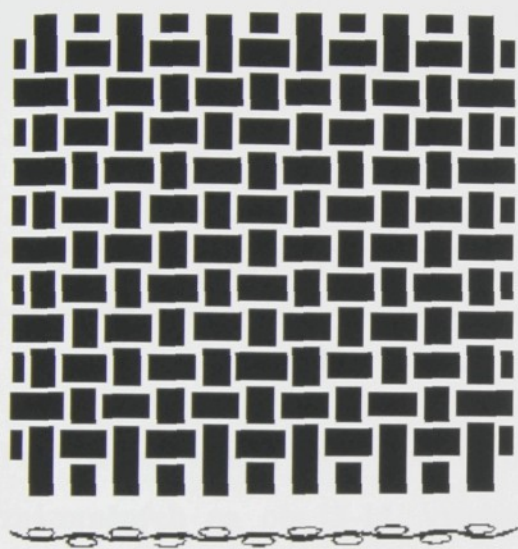
Tab.12 Vybrané vlastnosti pryskyřice ChS - Epoxy 422 udávané výrobcem

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Dynamická viskozita nevytvrzené pryskyřice	500-1900	mPas
Obsah netěkavých látek	75-77	%
Pevnost v tahu vytvrzené pryskyřice	40	MPa
Modul pružnosti v tahu vytvrzené pryskyřice	2600	MPa
Tažnost	min 5	%
Hustota	1,13-1,15	g/cm ³

3.2 Použité výztuže

3.2.1 Výztuže ze skelných vláken

Výroba vzorků ze skelné výztuže byla zvolena zejména pro její snadnou dostupnost, široký sortiment a relativně nízkou cenu. Pro výrobu těchto vzorků byla použita skelná tkanina vyrobená firmou VERTEX a.s. Byly vybrány dva druhy těchto výztuží, oba s plátnovou vazbou obr.12, ale s různými plošnými hmotnostmi a s různou délkovou hmotností u použitých provazců. Oba druhy byly vyrobeny ze stejného druhu skla, ale s různým počtem pramenců v provazci.



Obr.12 Plátňová vazba

Tab.13 Vlastnosti skelných výztuží udávané výrobcem

Označení výztuže	Materiál vláken	Typ vazby tkaniny	Hustota [g/cm ³]	Modul vláken [GPa]	Pevnost vláken v tahu [MPa]	Plošná hmotnost tkaniny [g/m ²]	Délková hmotnost provazce [g/km]
1S	E - sklo	plátňová	2,54	74	3500	240	261
3S	E - sklo	plátňová	2,54	74	3500	301	541

Obr.13 Plošná vazba

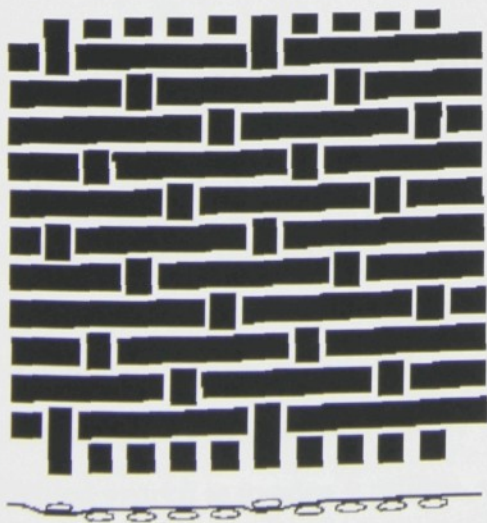
3.2.2 Výztuže z uhlíkových vláken

Pro použití uhlíkových výztuží bylo rozhodnuto zejména pro předpokládané zvýšení tuhosti kompozitu a snížení hmotnosti, ovšem při vyšší ceně než při použití sklelných vláken.

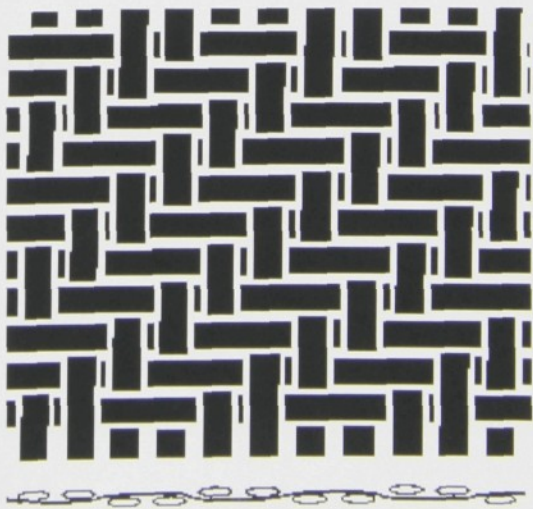
Tab.14 Vlastnosti uhlíkových výztuží udávané výrobcem

Označení výztuže	Typ vlákna	Typ vazby tkaniny	Modul vláken [GPa]	Pevnost vláken v tahu [MPa]	Hustota [g/cm ³]	Délková hmotnost provazce [g/km]
KT	M 40J	plátňová	377	4 410	1,77	225
CE	T 300J	keprová	230	4 210	1,78	198
A5	M 40J	5-ti vazný atlas	377	4 410	1,77	225
A8	T 300J	8-mi vazný atlas	230	4 210	1,78	396

Pro výrobu vzorků bylo použito čtyř druhů výztuží s různými vazbami tkanin, znázorněných na obr.13-14, vyrobených z uhlíkových vláken od firmy TORAY. Tkaniny měly plátňovou a keprovou vazbu, vazbu 5-ti a 8-mi vazného atlasu, což mělo dostatečně prokázat i vliv jednotlivých vazeb na mechanické vlastnosti.



Obr.13 Atlasová vazba



Obr.14 Keprová vazba

3.2.3 Hybridní výztuž karbon-kevlar

Pro výrobu vzorků byly použity zapůjčené tkaniny od firmy Trident z karbon-kevlarových vláken se směrově orientovanou keprovou vazbou. Směrovost vazby je dána tím, že v jednom směru jsou vždy pokládána dvě vlákna z uhlíku a jedno vlákno z kevlaru vedle sebe a v kolmém směru jsou vedle sebe pokládána vždy dvě kevlarová vlákna a jedno vlákno uhlíkové. Poměrné zastoupení jednotlivých vláken v tkanině je tedy 1 : 1. Bližší vlastnosti této tkaniny nemohou být publikovány, protože jsou součástí výrobního tajemství firmy. Podařilo se pouze změřit délkovou hmotnost jednotlivých druhů pramenců.

Kevlar.....170 [g/km]

Karbon.....201 [g/km]

3.3 Zkouška tříbodovým ohybem pro laminované vzorky

Statická zkouška ohybem byla provedena ve zkušebně podniku PEGUFORM BOHEMIA a.s. v Liberci na přístroji INSTRON 4204 vybaveném zkušebním zařízením pro zkoušku tříbodovým ohybem, se vzdáleností opěr 40 mm, poloměrem přitlačného trnu 2,5 mm a poloměrem opěr 2,5 mm. Průběhy zkoušek byly zaznamenávány do datových souborů, které byly pomocí software INSTRON SERIES IX zpracovány do grafů.

3.3.1 Technologie přípravy vzorků

Pro výrobu vzorků vyztužených skelnými tkaninami bylo použito čtyř druhů matric a dva druhy skelných výztuží. Jednotlivé skupiny vzorků ze stejné matrice a výztuže se dále dělí na tři druhy podle směru pokládání jednotlivých vrstev ke směru hlavního namáhání. Vzorky vyztužené uhlíkovými vlákny a hybridní tkaninou z karbon-kevlarových vláken byly vyrobeny pouze ze dvou druhů pryskyřic a pouze se dvěma různými směry položených vrstev laminátu vzhledem ke směru hlavního namáhání. Přehled vzorků je uveden v příloze, v Tab. č.14.

Pro výrobu vzorků byl zvolen následující výrobní postup. Jako podklad byla použita dřevěná deska, která byla proti poškození pryskyřicí a pro snadnější oddělení

laminátů od podložky potažena souvislou vrstvou vytvořenou z nalepených pruhů jednostranně lepící průhledné pásy. Tento povrch se ukázal jako ideální, protože dokonale přilnul k povrchu desky, nevytvářel nerovnosti a zaručoval snadné oddělení vytvrzených laminátů.

Lamináty byly připraveny z několika vrstev tak, aby byla výsledná tloušťka vzorků přibližně stejná. Tyto vrstvy byly na sebe položeny podle daného druhu vzorku. Mezi každou vrstvou je nanesen jemný film pryskyřice pomocí válečku s tenkou vrstvou polyuretanu. Vrchní povrch byl potažen tenkou fólií a na ní byla umístěna skleněná deska rovnoměrně zatížená u všech vzorků tak, aby byla vytlačena přebytečná pryskyřice a došlo k dokonalému prosycení výztuže. Takto nalaminované pásy byly nechány vždy v digestoři při teplotě 23 °C do úplného vytvrzení. Pouze vzorky u kterých byla použita pryskyřice Norpol COR VE 8300 byly vytvrzeny po dobu 24 h při 60 °C. Po vytvrzení a odstranění laminátových pásů z desky byly z těchto pásů nařezány polotovary pro výrobu vzorků o rozměrech 18×55 mm. Řezání bylo provedeno na kotoučové pilce, s kotoučem s diamantovými destičkami. Dělení laminátových pásů na této pile bylo zvoleno zejména pro její velice tenký kotouč a vynikající plochu řezu bez otřepů, což bylo předpokladem pro zhotovení maximálního počtu vzorků z nalaminovaných pásů, které byly k dispozici. Po rozřezání laminátových pásů na polotovary vzorků následovalo broušení jednotlivých vzorků na rozměry 15×50 mm. Broušení hran vzorků bylo nutné, protože řezáním nebylo možné dosáhnout kvality povrchu hran jako po broušení a nebylo možno dosáhnout rozměrů vzorků v takové toleranci, aby tím nebyly ovlivněny výsledky. Broušení probíhalo v přípravě vzorků na kotoučových bruskách za použití kotoučů o hrubosti 600 a stálého proudu vody. Tím, že bylo použito broušení ve vodě, bylo dosaženo velmi kvalitního povrchu hran vzorků, což bylo nejmarkantnější u vzorků vyztužených hybridní tkaninou z karbon-kevlarových vláken. Takto připravené vzorky byly nechány 21 dní při teplotě 20 až 25 °C, aby bylo bezpečně dosaženo u všech vzorků dokonalého zesíťování materiálu matric [25].

3.3.2 Měření hustoty materiálu

Hustotu vzorků ρ , připravených postupem popsáním v kapitole 3.3.1 je nutné zjistit za účelem výpočtu dalších materiálových konstant jako například objemového

podílu vláken, které jsou potřebné k dalšímu výpočetnímu stanovení materiálových vlastností testovaných vzorků. Měření hustoty bylo provedeno metodou dvojího vážení na laboratorních vahách. Na jednom rameni vah byl zhotoven závěs na zavěšení vážených vzorků, potom bylo nutné vyvážení vah. Pro větší přesnost měření bylo váženo vždy pět vzorků. Jako první byla měřena hmotnost vzorků na vzduchu, potom byly ty samé vzorky zváženy ponořené v technickém lihu. Z těchto dvou hodnot byla vypočítána hustota vzorků podle vzorce:

$$\rho = \frac{m_1 (\rho_k - \rho_v)}{m_1 - m_2} + \rho_v \quad [\text{g/cm}^3] \quad (11)$$

m_1hmotnost na vzduchu

m_2hmotnost v kapalině

ρ_khustota kapaliny (technický líh) $(\rho_k = 0.801 \text{ g/cm}^3)$

ρ_vhustota vzduchu $(\rho_v = 1.169 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3)$

Objemový podíl vláken v kompozitu v_f byl spočítán z hmotnosti vzorku na vzduchu m_1 zjištěné zvážení jednotlivých vzorků, hmotnosti vláken v jednom vzorku m_f zjištěné dle plošné hmotnosti tkaniny udávané výrobcem a hustot vláken ρ_f a matrice ρ_m udávaných výrobcem, podle vztahu:

$$v_f = \frac{w_f / \rho_f}{w_f / \rho_f + (1 - w_f) / \rho_m} \quad (12)$$

$$\text{Kde } w_f = \frac{m_f}{m_1} \quad (13)$$

Podíl dutin v matrici v_d se vypočte porovnáním skutečné hustoty kompozitu ρ , zjištěné metodou dvojího vážení a teoretické hustoty kompozitu ρ_c , vypočtené z hustoty matrice ρ_m , hustoty vláken ρ_f a objemového podílu vláken v matrici dle vztahu:

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m = \rho_f v_f + \rho_m (1 - v_f) \quad (14)$$

Vzhledem k tomu, že skutečná hodnota hustoty kompozitu ρ byla stanovena z objemu vzorků ponořených v kapalině, jedná se o podíl uzavřených dutin a pórů ve vzorku.

Vzhledem ke způsobu přípravy vzorků je však jejich povrch velmi hladký a je tedy možné konstatovat, že vliv otevřených dutin je minimální.

$$v_d = \frac{\rho_c - \rho}{\rho_c} \quad (15)$$

Naměřené a vypočtené hodnoty hustoty a s ní spojených veličin jsou uvedeny v příloze, Tab. č. 15.

3.3.3 Výpočtové charakteristiky vzorků

Pro snadný popis skladby vrstev laminovaných vzorků je vhodné zavést určitý systém jejich značení. Standardně se skladba vrstev zapisuje do hranatých závorek, kam se zleva zapisují úhly položení vláken v jednotlivých vrstvách vzhledem k hlavní ose vzorku v pořadí od povrchu vzorku směrem do středu. Tak například čtyřvrstvý vzorek složený z vrstev pod úhly 0° , $-\alpha^\circ$, $+\alpha^\circ$, 90° se zapíše jako $[0/-\alpha/+\alpha/90]$. Jestliže na spodní straně takového laminátu pokračuje vrstvení 90° , $+\alpha^\circ$, $-\alpha^\circ$, 0° dostaneme osmivrstvý laminát symetrický kolem střední roviny, který se značí jako $[0/-\alpha/+\alpha/90]_s$. V případě, že by se ve stěně laminátu tato vrstva n -krát opakovala zapíšeme skladbu jako $[(0/-\alpha/+\alpha/90)_n]_s$. Pro vícekrát se opakující vrstvu například 0° je používáno zápisu $[0_n/-\alpha/+\alpha/90]_s$. Je-li počet vrstev lichý, zapíše se nad úhel střední vrstvy, uvedený v kódu jako poslední, čárka: $[0/-\alpha/+\alpha/\overline{90}]_s$. Pokud jde o hybridní laminát, v němž se střídají vrstvy s různými vlákny, je k úhlu vrstvy možno připsat dolní index označující materiál vláken (K-Kevlar, G-sklo nebo C-uhlík).

Pro výpočty byla použita analýza laminovaných kompozitů se zohledněním na zvlnění vlákna, dané typem použité vazby a se zjednodušením zanedbáním vlivu křížení jednotlivých vláken. Smyslem těchto výpočtů je určení výpočtových vlastností laminovaných vzorků a porovnání výsledků se skutečnými hodnotami a hodnotami naměřenými v následujících experimentech.

Příklad výpočtu je názorně předveden pro vzorky se skladbou vrstev $[(0/90)_2]_s$ a $[(+45/-45)_2]_s$ pro tkaninu s keprovou vazbou v pryskyřici NORPOL COR VE 8300. Níže uvedené rovnice byly zadány do programu Microsoft Excel, ve kterém byly spočteny výpočetní materiálové vlastnosti ostatních typů testovaných vzorků.

Materiálové konstanty vzorku s keprovou vazbou v pryskyřici NORPOL COR VE 8300: modul pružnosti vláken udávaný výrobcem..... $E_f = 294$ GPa

modul pružnosti matrice udávaný výrobcem..... $E_m = 3400$ MPa

vypočtený objemový podíl vláken..... $v_f = 0,612$

Modul pružnosti vrstvy s přímými vlákny ve směru zatížení E_{lp} se spočítá ze vztahu

$$E_{lp} = E_f v_f + E_m (1 - v_f) \quad (16)$$

Po dosazení hodnot pro vzorek s keprovou vazbou v pryskyřici NORPOL COR VE 8300 dostaneme:

$$E_{lp} = 181,26 \text{ GPa}$$

Hodnoty elasticity jedné vrstvy jsou dále zapsány s indexem 1 pro směr souhlasný se směrem vláken, indexem 2 pro směr kolmý na směr vláken a indexem 3 pro směr normální k popisované vrstvě (lamině).

Vliv pravidelného zvlnění vlákna tak jak je tomu u tkanin lze pro výpočetní metodu

zohlednit zavedením parametru zvlnění f podle [26]: $f = \frac{\pi a k}{l} \quad (17)$

kde

aamplituda zvlnění

kpočet vln na definovaném intervalu délky l .

Parametry π , a , l byly změřeny z výbrusů provedených podélnými vlákny tak, aby byl viditelný a měřitelný sinusoidní průběh vláken u jednotlivých typů tkanin.

Pak je možné vyjádřit změnu modulu pružnosti způsobenou zvlněním vláken vztahem:

$$E_1 = \frac{E_{lp}}{1 + \left(\frac{E_{lp}}{G_{12p}}\right) f^2 / 2} \quad (18)$$

Kde E_{lp} a G_{12p} jsou moduly vrstvy s přímými vlákny [8].

Pro výpočet modulu pružnosti ve smyku pro vrstvu s přímými vlákny G_{12p} lze použít Halpin-Tsaiův vztah, zde ovšem narážíme na neznalost modulu pružnosti vlákna ve smyku G_{f12} . Z tohoto důvodu byl pro další výpočty použit experimentálně zjištěný modul $G_{f12} = 4,55$ GPa a Poissonova konstanta $\nu_{f12} = 0,3$ pro prepreg s vlákny Torayca 300 v epoxidové pryskyřici [3].

Dosazením hodnot pro vzorek s keprovou vazbou v pryskyřici NORPOL COR VE 8300 do rovnice (18) dostaneme modul pružnosti vrstvy se zvlněnými vlákny:

$$E_1 = 160,6 \text{ GPa}$$

Z porovnání modulu pružnosti s přímými vlákny E_p a se zvlněnými vlákny E_l je zřejmé, že v tomto případě došlo ke snížení modulu pružnosti materiálu přibližně o 12%.

Pro výpočet modulu pružnosti E_2 je nejvhodnější využít Halpin-Tsaiův vztah [8].

$$E_2 = E_m \frac{1 + \xi \eta v_f}{1 - \eta v_f} \quad (19)$$

$$\text{kde } \eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi} \quad (20)$$

je tzv. konstanta elasticity.

Pro kontinuální vlákna kruhového průřezu má konstanta ξ hodnotu 2.

Dle Halpin-Tsaiova vztahu (19) je růst modulu pružnosti E_2 se zvyšující se hodnotou v_f zpočátku velmi pozvolný, takže při běžných objemových podílech je modul E_2 několikanásobně menší než modul E_1 (při $v_f = 0,6$ je modul E_2 zhruba dvojnásobkem modulu matrice E_m). Z tohoto důvodu je možné v tomto případě pro výpočet modulu pružnosti E_2 zanedbat zvlnění vláken a použít vztah (18).

Dosazením hodnot pro vzorek s keprovou vazbou v pryskyřici NORPOL COR VE 8300 do rovnice (18) dostaneme výsledek:

$$E_2 = 5,35 \text{ GPa}$$

Poissonovu konstantu ν_{21} pak spočítáme:

$$\nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \nu_{12} \quad (21)$$

Po dosazení hodnot pro vzorek s keprovou vazbou v pryskyřici NORPOL COR VE 8300:

$$\nu_{21} = 0,001$$

Na základě takto vypočtených, popř. experimentálně stanovených hodnot je možné sestavit tzv. matici tuhosti $[Q]$ nebo matici poddajnosti $[S]$ jedné vrstvy v Hodkově zákonu:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \nu_{12} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Matice tuhosti pro ortotropní laminát má tvar:

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Jednotlivé členy matice tuhosti spočítáme podle vztahů [8]:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (24)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (25)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (26)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (27)$$

V případě ukázkového výpočtu pro vzorek s keprovou vazbou v pryskyřici NORPOL COR VE 8300 bude mít matice tuhosti tvar:

$$[Q] = \begin{bmatrix} 160,65 & 1,60 & 0 \\ 1,60 & 5,34 & 0 \\ 0 & 0 & 4,55 \end{bmatrix} \quad [\text{GPa}]$$

Pokud se vrstva nachází v obecné poloze, tzn. že vlákna svírají s osou 1 úhel α , neexistují v její matici tuhosti žádné nulové prvky. Pro tyto vrstvy je nutné provést přepočítání matice tuhosti $[Q]$ na matici $[\bar{Q}]$. Jednotlivé členy Q_{ij} se přepočítají na $\bar{Q}_{ij}$ podle vztahů uvedených v [8]. Pro výpočet vlastností vzorků $[(0/90)_2]_s$ a $[(+45/-45)_2]_s$ je tedy třeba vypočítat matice tuhosti pro vrstvy s úhlem $\alpha = +45^\circ$, $\alpha = -45^\circ$, $\alpha = 90^\circ$, pro vrstvu $\alpha = 0^\circ$ platí $[Q] = [\bar{Q}]$. Úhel α je kladný proti směru hodinových ručiček a měří se od obecné osy x k materiálové ose 1. Po dosazení hodnot matice $[Q]$ a příslušného úhlu α pak dostaneme příslušné matice $[\bar{Q}]$ jednotlivých vrstev.

Potom

$$[\bar{Q}]_0 = \begin{bmatrix} 160,65 & 1,60 & 0 \\ 1,60 & 5,34 & 0 \\ 0 & 0 & 4,55 \end{bmatrix} \quad [\text{GPa}]$$

$$[\bar{Q}]_{90} = \begin{vmatrix} 5,34 & 1,60 & 0 \\ 1,60 & 160,65 & 0 \\ 0 & 0 & 4,55 \end{vmatrix} \quad [\text{GPa}]$$

$$[\bar{Q}]_{+45} = \begin{vmatrix} 46,85 & 37,75 & 38,83 \\ 37,75 & 46,85 & 38,83 \\ 38,83 & 38,83 & 40,70 \end{vmatrix} \quad [\text{GPa}]$$

$$[\bar{Q}]_{-45} = \begin{vmatrix} 46,85 & 37,75 & -38,83 \\ 37,75 & 46,85 & -38,83 \\ -38,83 & -38,83 & 40,70 \end{vmatrix} \quad [\text{GPa}]$$

Pak je možno psát pro jednotlivé vrstvy:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{vmatrix} \quad (28)$$

Pro výpočet tuhosti a kontrolu pevnosti laminátu jako celku slouží tzv. konstitutivní rovnice. Ty jsou založeny na následujících zjednodušeníh:

- vrstvy se deformují jako celek, nedochází k jejich vzájemnému posunu
- v tloušťce vrstvy je předpokládána jednotná úroveň napětí
- spoj dvou vrstev má nulovou tloušťku
- zanedbávají se smyková napětí ve směru kolmém na střední rovinu
- vnější síly jsou nahrazeny ekvivalentním systémem sil N_x , N_y , N_{xy} a momentů M_x , M_y , M_{xy} , působících ve střední rovině laminátu.
- prodloužení střední roviny je konstantní v celé tloušťce laminátu
- zakřivení laminátu, definované pomocí křivosti je stejné pro všechny vrstvy

Potom po odvození podle [2] je možné psát pro ohyb laminátu souměrného podle střední osy:

$$\begin{vmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{vmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{vmatrix} \quad (29)$$

Jednotlivé členy matice ohybové tuhosti spočítají podle vztahu [2]:

$$D_{ij} = 1/3 \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (30)$$

Pro vzorek vyztužený keprovou vazbou v pryskyřici COR VE 8300 byla naměřena pro osm vrstev vláken tloušťka 1,85mm. Pak jsou hodnoty vzdáleností jednotlivých vrstev od střední osy x :

$$h_0 = -0,925$$

$$h_1 = -0,69375$$

$$h_2 = -0,4625$$

$$h_3 = -0,23125$$

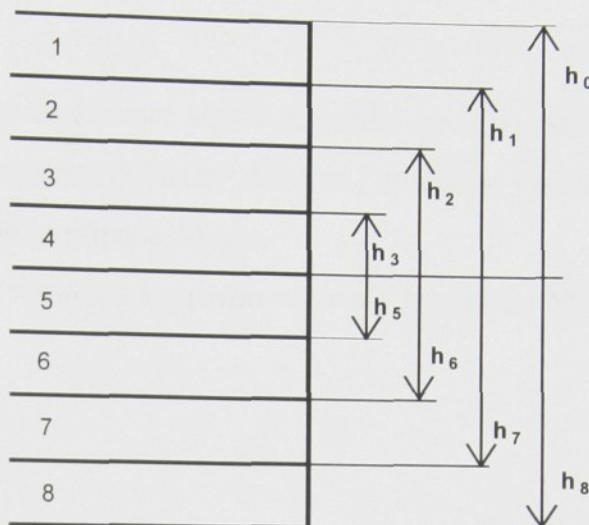
$$h_4 = 0$$

$$h_5 = 0,23125$$

$$h_6 = 0,4625$$

$$h_7 = 0,69375$$

$$h_8 = 0,925$$



Obr.15 Vzdálenosti vrstev od střední roviny

pak má matice ohybové tuhosti pro vrstvení $[(0/90)_2]_s$ následující podobu

$$D_{ij} = \begin{vmatrix} 59,16 & 0,84 & 0 \\ 0,84 & 28,43 & 0 \\ 0 & 0 & 2,40 \end{vmatrix} \quad [\text{Pa}]$$

V praxi je zpravidla nutné zjistit deformace střední vrstvy ze známého zatížení vzorku a z těch pak zjistit napětí v jednotlivých vrstvách vzorku. Proto je nutné vyjádřit závislost deformace střední roviny laminátu a křivosti na ohybové matici tuhosti a zatížení vzorku. V tomto případě stačí pouze spočítat inverzní matici D_{ij}^{-1} .

Pak je možné zapsat

$$\begin{vmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{vmatrix} = [D]^{-1} \begin{vmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{vmatrix} \quad (31)$$

Pro případ konkrétního vypočítávaného vzorku bude mít tato rovnice podobu

$$\begin{vmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1,69 & -0,05 & 0 \\ -0,05 & 3,52 & 0 \\ 0 & 0 & 41,65 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{vmatrix} \quad [\text{Pa}]$$

Informace, zdrojové odkazy, zdrojové údaje

Vlastní práce autora

Pokud za hodnotu M_x dosadíme velikost ohybového momentu v okamžiku prvního porušení vzorku, kdy platí, že $M_x = M_{\max}$, $M_y = 0$ a $M_z = 0$, získáme odpovídající hodnoty křivostí střední roviny vzorku.

$$M_{\max} = \frac{F_{\max}}{2} \cdot \frac{l}{2} \quad (32)$$

kde za $F_{\max}$ dosadíme hodnotu zatěžovací síly v okamžiku prvního porušení vzorku zaznamenanou zkušebním zařízením INSTRON 4204 za l dosadíme vzdálenost podpor zkušebního zařízení, což je v tomto případě 40 mm.

Po dosazení hodnot pro vzorek s keprovou vazbou v pryskyřici NORPOL COR VE 8300 jsou křivosti:

$$k_x = 5,8345$$

$$k_y = 0,1732$$

$$k_{xy} = 0$$

Při předpokladu stejného zakřivení pro všechny vrstvy můžeme psát:

$$\varepsilon_{xj} = \varepsilon_0 + z k_x \quad (33)$$

kde z je vzdálenost k -té vrstvy od střední vrstvy.

V praxi neplatí, že se stření vrstva shoduje s vrstvou neutrální, při ohybu dochází k jejich oddělení. Vzhledem k malé tloušťce vzorku můžeme toto zjednodušení přijmout. Pak budeme střední vrstvu považovat za vrstvu neutrální a ε_0 bude rovno nule a deformaci povrchové vrstvy můžeme uvažovat jako deformaci maximální, pak:

$$\varepsilon_1 = z k_x \quad (34)$$

Potom můžeme pro vzorek s keprovou vazbou v pryskyřici NORPOL COR VE 8300 vypočítat deformaci povrchové vrstvy namáhané tahem:

$$\varepsilon_1 = 0,000925 \cdot 5,8345$$

$$\varepsilon_1 = 5,4 \cdot 10^{-3}$$

A stejně tak vypočítat deformaci povrchové vrstvy namáhané tlakem:

$$\varepsilon_1 = -0,000925 \cdot 5,8345$$

$$\varepsilon_1 = -5,4 \cdot 10^{-3}$$

Za předpokladu, že před okamžikem prvního porušení nedojde k plastické deformaci, můžeme pak zjednodušeně z Hookova zákona vypočítat napětí v dané vrstvě v okamžiku prvního porušení [27]. Jak je vidět na obr. 33-51 u většiny vzorků má

zatěžovací diagram výraznou lineární fází a před okamžikem prvního porušení dochází k malé plastické deformaci je tedy možné tento předpoklad přijmout. Za předpokladu, že dojde k prvnímu porušení vláken tlakovým zatížením můžeme spočítat teoretické napětí, při kterém nastane první porušení materiálu. Zde ovšem musíme znát příslušný modul pružnosti dané vrstvy. Pro tento konkrétní případ to je modul pružnosti vrstvy 0° v tlaku. V tomto případě je použita experimentálně zjištěná hodnota dle [3] pro vlákna Torayca v epoxidové matrici. Pak dostáváme výsledné napětí při kterém došlo k prvnímu porušení tohoto vzorku:

$$\sigma = E |\varepsilon_1| \quad (35)$$

$$\text{kde } E = 148,78 \text{ GPa [3]}$$

Po dosazení:

$$\sigma = 803,41 \text{ MPa}$$

Stejným způsobem lze také spočítat hodnoty křivostí pro stejný vzorek, ale s vrstvením $[(+45/-45)_2]_s$. Matice tuhosti pro vrstvy $+45^\circ$ a -45° již byly spočítány výše, stačí jejich hodnoty dosadit do vztahu (29), pak dostaneme

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 24,72 & 19,92 & 7,68 \\ 19,92 & 24,72 & 7,68 \\ 7,68 & 7,68 & 21,47 \end{bmatrix} \quad [\text{Pa}]$$

z čehož stejným postupem získáme

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11,69 & -9,14 & -0,91 \\ -9,14 & 11,69 & -0,91 \\ -0,91 & -0,91 & 5,31 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix}$$

po dosazení M_x odpovídajícímu zatížení vzorku v okamžiku jeho prvního porušení získáme křivosti střední roviny:

$$k_x = 14,022$$

$$k_y = -10,96$$

$$k_{xy} = -0,031$$

Deformace povrchové vrstvy pak bude:

$$\varepsilon_1 = 0,0129$$

Při použití experimentálně zjištěného modulu pružnosti dané vrstvy dle [3] je opět možné vypočítat napětí, které vyvolá první porušení vzorku. Pro vzorek s keprovou vazbu v pryskyřici NORPOL COR VE 8300:

$$\sigma = 384,36 \text{ MPa}$$

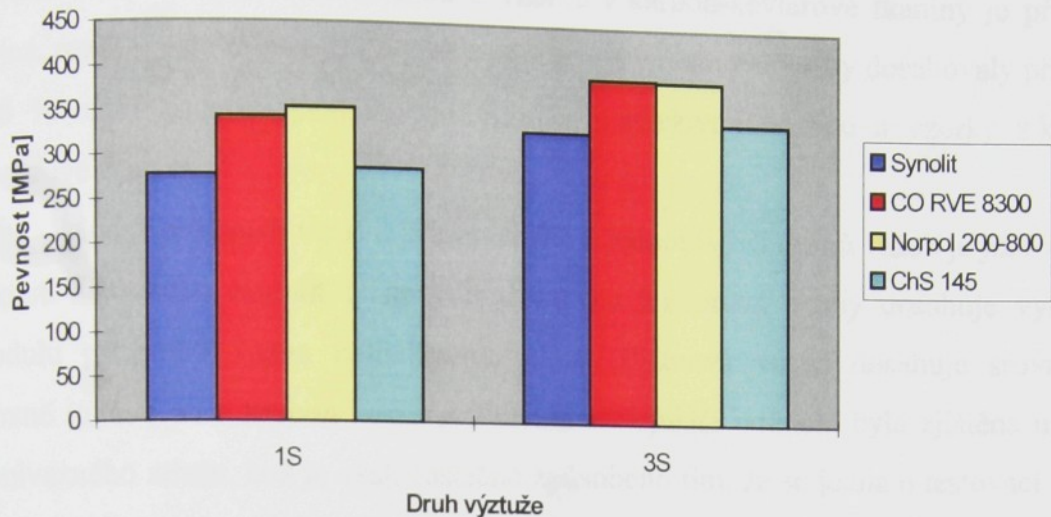
Takto vypočtené výsledky posloužily k odhadnutí, která tkanina a pryskyřice bude dosahovat nejvyšších mechanických hodnot, zda k porušení dojde tahovým nebo tlakovým namáháním a jaký je vliv skladby vrstev na výsledné mechanické vlastnosti kompozitu. Diskuse k porovnání vypočtených a experimentálně zjištěných hodnot je v další části práce.

3.3.4 Mechanické vlastnosti laminovaných vzorků

Pro výrobu vzorků ze skelných vláken byly použity čtyři druhy dostupných pryskyřic viz. Tab. 6, 7, 8 a 10. Protože nebylo k dispozici dostatečné množství výztuží z uhlíkových vláken a hybridních výztuží pro vyrobení vzorků ze všech dostupných druhů pryskyřic, bylo pro výrobu vzorků z těchto materiálů použito pouze těch dvou druhů pryskyřic, které vykazovaly nejlepší vlastnosti při předběžném testování vzorků připravených ze skelných vláken a to vinylesterová pryskyřice Norpol COR VE 8300 a polyesterová pryskyřice Synolit K 0175. Naměřené hodnoty ze zkoušky tříbodovým ohybem jsou uvedeny v příloze, v Tab. 16-18.

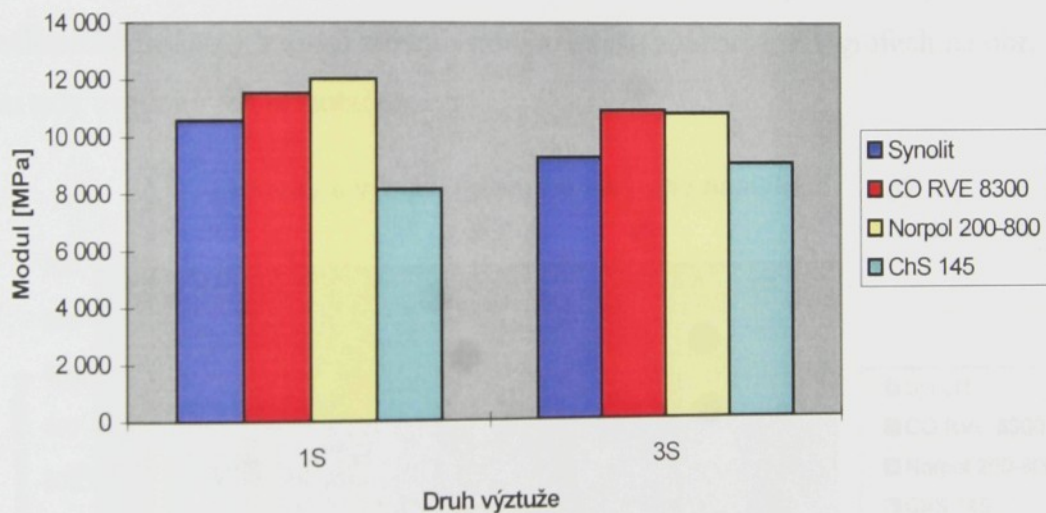
U vzorků připravených ze skelných vláken byly testovány pouze dva druhy výztuží, které byly navíc zhotoveny ze stejného druhu vláken, pouze s rozdílnou plošnou hmotností tkaniny a především s rozdílnou délkovou hmotností provazce. To způsobilo malé rozdíly v mechanických vlastnostech obou typů vzorků. Ukazuje se, že tkanina označená 3S má nižší objemový podíl vláken v matrici. To je způsobeno její řidší strukturou a větší tloušťkou pramenců, což způsobuje, že jednotlivé vrstvy k sobě tolik nepřilnou a zbývá větší prostor mezi pramenci, který vyplní pryskyřice. Díky tomuto faktu se u vzorků 3S s vlákny ve směru hlavního namáhání projevila nižší pevnost a modul pružnosti. U vzorků typu „sandwich“ a vzorků s výztuží $\pm 45^\circ$ není možné konstatovat nějaký významnější vliv použitého druhu výztuže viz. grafy na obr. 15,16.

Vzorky s výztuží typu "sandwich"



Obr.15 Vliv výztuže na mez pevnosti v ohybu

Vzorky s výztuží typu "sandwich"



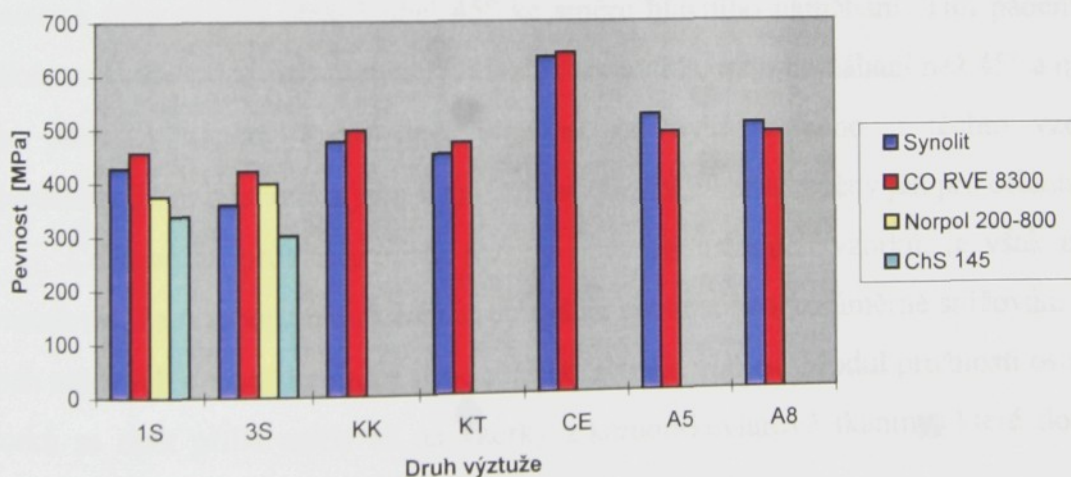
Obr.16 Vliv výztuže na modul pružnosti

U vzorků připravených z uhlíkových a hybridních výztuží se ukazuje především významný vliv použité vazby výztuže. Vzorky s vlákny osnovy orientovanými ve směru hlavního namáhání prokazují jasně nejvyšší pevnost a tuhost vzorky s keprovou vazbou. Ty dosahují přibližně o 20% lepších hodnot než vzorky s jinými vazbami. Tato vazba je výhodná zejména malým zvlněním vlákna a nižším počtem uzlových bodů oproti klasické plátnové vazbě a zároveň má ještě dostatečnou soudržnost v nezalaminovaném stavu, což zabraňuje poškození struktury vazby během přípravy vzorků. Zároveň je u

této vazby použita optimální plošná hmotnost tkaniny vzhledem k tloušťce vzorku. Pevnost vzorků s atlasovou vazbou a vzorků z karbon-kevlarové tkaniny je přibližně stejná, rozdíly jsou minimální, vzorky připravené z plátňové vazby dosahovaly přibližně o 5 % nižší hodnotu pevnosti než vzorky s atlasovou vazbou a vzorky z karbon-kevlarové tkaniny.

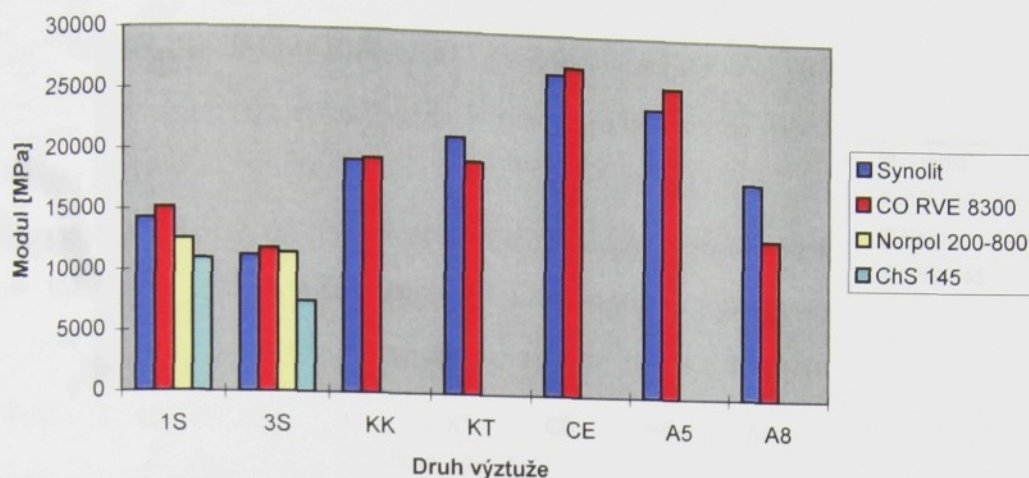
Modul pružnosti vzorků připravených z jednotlivých druhů vazeb je již rozdílný. Kromě nejvyšších hodnot zjištěných u vzorků z keprové vazby dosahuje vysokého modulu pružnosti vazba pětivazného atlasu. Plátňová vazba dosahuje srovnatelné úrovně tuhosti jako karbon-kevlarová tkanina. Nejnižší hodnota byla zjištěna u vazby osmivazného atlasu, což je však částečně způsobeno tím, že se jedná o testovací vzorek tkaniny vyrobený pouze v šíři 300 mm, kde vlákna osnovy a útku navzájem nesvírají úhel 90° , ale přibližně 75° - 80° . Z těchto důvodů není možné absolutně objektivní porovnání těchto vzorků s ostatními v této kategorii, je však velmi pravděpodobné, že vlastnosti pětivazného a osmivazného atlasu se navzájem liší jen minimálně. Mechanické hodnoty vzorků z osmivazného atlasu znázorněné v grafech na obr. 17 a 18 jsou tedy uvedeny jen orientačně.

Vzorky s výztuží ve směru hlavního namáhání



Obr.17 Vliv výztuže na mez pevnosti v ohybu

Vzorky s výztuží ve směru hlavního namáhání

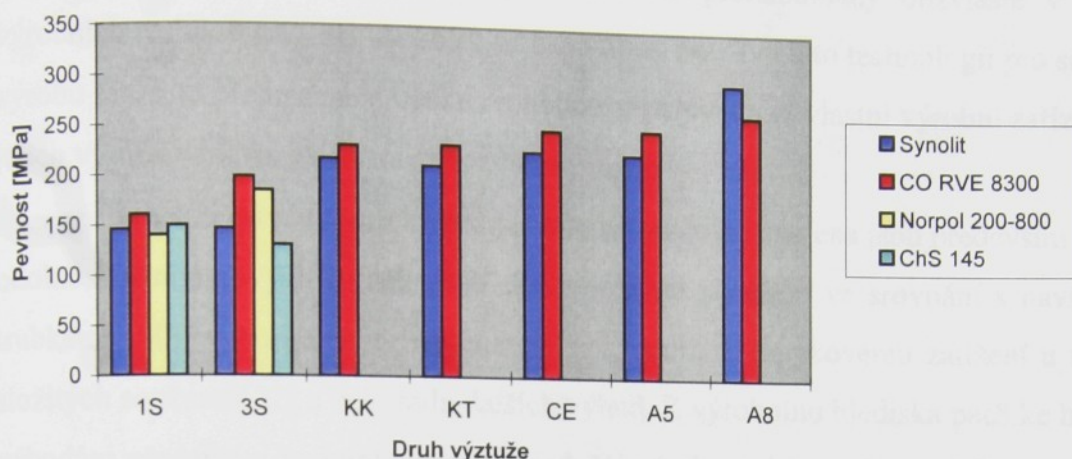


Obr.18 Vliv výztuže na modul pružnosti

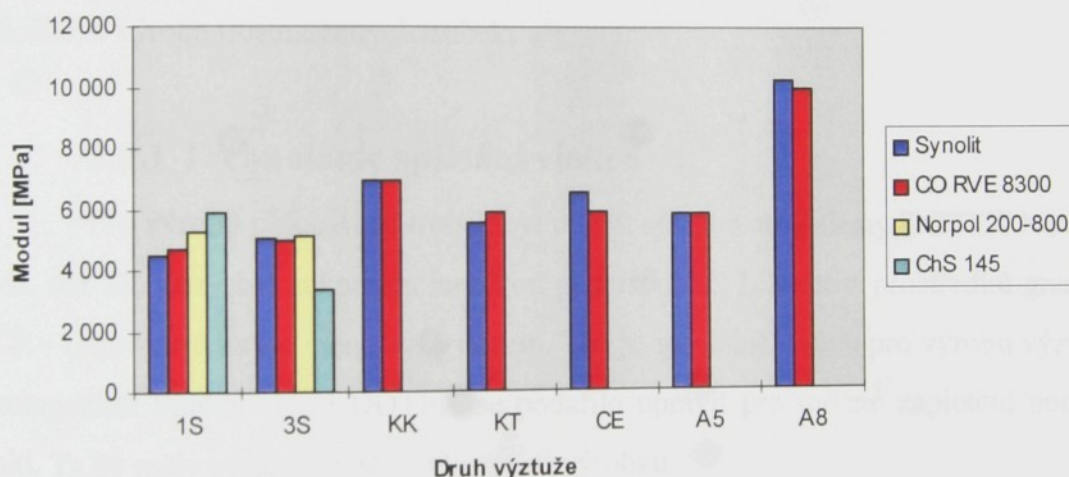
Zcela odlišných vlastností dosahují vzorky připravené pod úhlem 45° ke směru hlavního namáhání. Jednoznačně nejlepších vlastností mezi tímto typem vzorků dosahuje vazba osmivazného atlasu. Ta vykazuje o 15-20% vyšších hodnot pevnosti a až o 40% vyšších hodnot modulu pružnosti než ostatní vzorky. Tato odchylka je způsobena opět tím, že u této tkaniny nebylo možné připravit vzorky tak, aby vlákna osnovy a útku svírala přesně úhel 45° ke směru hlavního namáhání. Tím pádem jsou vlákna ve skutečnosti pod menším úhlem ke směru hlavního namáhání než 45° a mohou lépe přenášet napětí. Proto opět platí to, co bylo zmíněno o těchto vzorcích v předcházejícím odstavci a jsou v grafech na obr. 19,20 znázorněny jen pro orientaci.

Celkově se prokazují malé rozdíly pevnosti ostatních vzorků, je však možné konstatovat, že u tohoto typu vzorků se zvyšuje pevnost vzorků úměrně snižování počtu jejich uzlových míst v tkanině a tím i nižšího zvlnění vláken. Modul pružnosti ostatních vzorků se opět příliš neliší až na vzorky z karbon-kevlarové tkaniny, které dosahují přibližně o 10% vyšších hodnot.

Mechanické vlastnosti zkoušených vzorků jsou dobře patrné z grafů na obr. 15 až 20.

Vzorky s výztuží $\pm 45^\circ$ ke směru hlavního namáhání

Obr.19 Vliv výztuže na mez pevnosti v ohybu

Vzorky s výztuží 45° ke směru hlavního namáhání

Obr.20 Vliv výztuže na modul pružnosti

3.4 Mechanické zkoušky trubek z kompozitního materiálu

Velmi důležitým aspektem pro výrobu trubky z kompozitního materiálu je vhodná volba výrobního procesu. Nejběžnějším způsobem výroby trubek v praxi je navíjení vláken na trn, v poslední době se stále častěji používá splétání vláken a také některé speciální technologie pletení. Pouze minimálně se uplatňuje navíjení tkaniny na trn.

Analýzou závěrů ze zkoušení plochých vzorků v kap. 3.3 byla pro výrobu kompozitní trubky zvolena technologie splétání vláken. Tato technologie patří k těm

nejmodernějším, které se v současné době používají k výrobě kompozitních trubek [28] a jejichž vlastnosti stále ještě nebyly důkladně prozkoumány obzvláště v oblasti výrobních technologií [29]. Ačkoliv již řada firem používá tuto technologii pro sériovou výrobu jde, a to především v České republice, o firmy, které vlastní výrobní zařízení, ale jejich výroba není založena na seriózním vývoji.

Hlavními důvody, pro které byla tato technologie zvolena jsou především vysoká odolnost pleteninových trubek proti dynamickému porušení ve srovnání s navíjenými trubkami [30], výborná absorpce energie [31], odolnost smykovému zatížení u tvarově složitých součástí [32] a celá řada dalších výhod. Z výrobního hlediska patří ke hlavním výhodám především technologicky jednodušší výroba polotovarů pro další zpracování, možnost snadné změny úhlu vláken a vkládání podélných vláken dle požadavků na vlastnosti trubky, nízký odpad materiálu a možnost výroby tvarově složitých součástí o široké škále průměrů. Za částečnou nevýhodu může být považována technologicky složitější výroba tlustostěnných trubek.

3.4.1 Technologie splétání vláken

Pro výrobu polotovarů trubek byl použit splétací stroj firmy DOTEX Nový Jičín viz. obr 21, který byl zakoupen katedrou pletarství TU Liberec z prostředků grantu AV ČR - Ústav struktury a mechaniky hornin. Ten je speciálně určen pro výrobu výztuže do kompozitu. Splétací stroj DOTEX se podařilo upravit pro možné zapletení podélných nití. Ty by měly výrazně změnit vlastnosti výrobku.

Princip funkce stroje spočívá v pohybu běžců po drahách křídlových kol, které unášejí cívku s materiálem, z něhož se splétá výrobek. Při přechodu běžce z jednoho křídlového kola na druhé musí být protější křídlo prázdné, aby nedošlo ke srážce běžců. Z toho vyplývá, že nelze obsadit všechna křídla běžci (určitému počtu obsazených křídel musí odpovídat počet křídel prázdných). Maximální počet běžců je roven polovině všech křídel. Splétací stroj firmy DOTEX má 32 křídlových kol po 4 křídlech. Lze tedy použít maximálně 64 běžců. Běžce se v křídlech rozmisťují v poměru 1:1, tzn. po jednom obsazeném křídle následuje křídlo prázdné. Při tomto rozmístění se vytváří dvouvazná vazba typická pro dutinové splétací stroje. Počet běžců lze samozřejmě snížit jejich vynecháním [33].

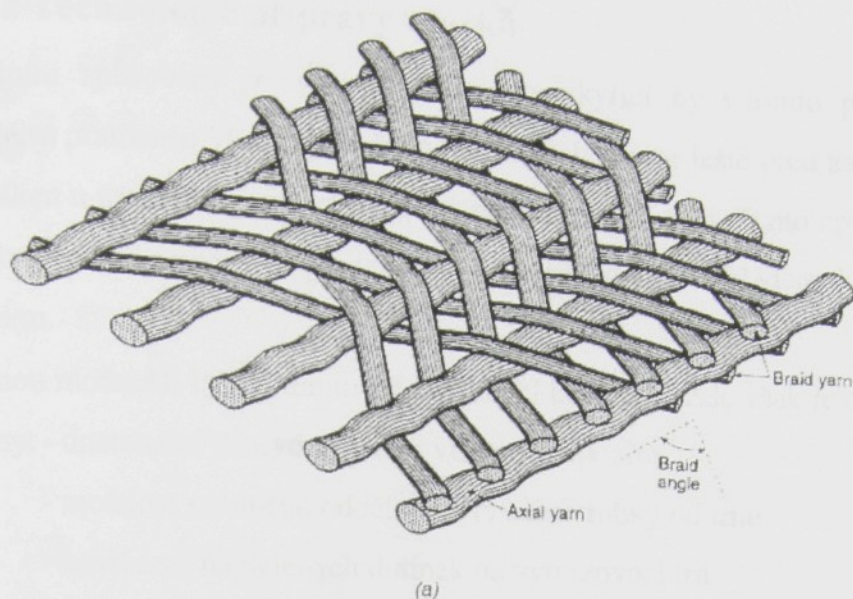
Podélná vyztužující vlákna jsou odvíjena z cívek umístěných v ose křídlových kol. Umožňují do splétaného výrobku zavést třetí soustavu nití, a tím změnit charakter, vzhled a vlastnosti výrobku. Počet výplňkových nití lze libovolně měnit v rozsahu 0 - 32 nití. Pro vnitřní výplň splétané dutiny lze použít otvor ve středu pracovní desky. Tato výplň se používá např. při výrobě horolezeckých lan, kde se oplétá pružné jádro.



Obr.21 Splétací stroj DOTEX

Parametry stroje:

výrobce:	firma DOTEX (Nový Jičín, ČR)
počet běžců:	64
počet vodičů výplně:	32
průměr vodičí dráhy:	80 cm



Obr.22 Znázornění dvouvazné pleteninové vazby s podélnou výztuží

Pro výrobu prvních vzorků pro ověření základních vlastností trubek a odzkoušení optimální technologie byla z cenových důvodů použita skelná vlákna. Soukání a splétání dutinek z těchto vláken proběhlo bez problému. Ty však nastaly při výrobě dutinek z uhlíkových vláken, protože jejich pevnost v příčném směru a v ohybu je výrazně nižší. Vlákná jsou při splétání značně namáhána na otěr a ohyb, tím dochází k jejich častému lámání a z povrchu pleteniny pak odstávají jednotlivé fibrily. Fibrily jsou na povrchu uhlíkového vlákna nepatrně narušeny již při procesu soukání. Na splétacím stroji při složitém a nešetrném odvádění se počet přetržených fibril zvýší a dojde k výraznému narušení (příliš mnoho odstávajících fibril) nebo přetržení vlákna.

Z těchto důvodů musely být na tomto stroji provedeny některé úpravy, především výměna všech třecích ploch za keramické, úprava cívečnic tak, aby docházelo k minimálnímu ohýbání vláken mezi soustavou kladek a úprava odtahovacího zařízení tak, aby nedocházelo ke kroucení vzorku a byl zajištěn konstantní odtah vzorku v závislosti na rychlosti běžců. Tyto úpravy byly provedeny ve spolupráci s pracovníky katedry pletařství TU Liberec a po značném úsilí se podařilo stroj modifikovat tak, aby bylo možné splétat uhlíková vlákna. Tyto úpravy a zkoušení splétacích technologií nejsou blíže popsány, protože zasahují do oblasti textilního průmyslu a nejsou hlavním tématem této práce.

3.4.2 Technologie přípravy vzorků

Ideálním způsobem prosycování vláken pryskyřicí by v tomto případě bylo nasycení celého pramence vláken po jeho odvinutí z cívečnice ještě před zaplétáním do ostatních vláken a následném vytvrzení přímo na naplétacím trnu. Tento způsob je však technologicky velice náročný a především neúměrně drahý vzhledem k možnostem tohoto projektu.

Jedinou možností byla v tomto případě ruční laminace. Zde však je nutné vyřešit tyto problémy: - dostatečné prosycení všech vrstev kompozitu

- možnost snadného oddělení vytvrzené trubky od trnu
- navlečení napletených dutinek na vytvrzovací trn
- odstranění bublin z kompozitu

Největším problémem je prosycení větší vrstvy vláken navlečených na trnu ruční laminací. Jako nevhodné se ukazuje prosycení pouze jedné vrstvy vláken s následným vytvrzením a pak opletením další vrstvou. Toto řešení je časově i pracně velice náročné, bez možnosti uplatnění v praxi. Navíc se mezi jednotlivými vrstvami vytváří příliš velká vrstva pryskyřice. Jako optimální se z tohoto pohledu jeví prosycení každé vrstvy zvlášť a následné napletení další vrstvy ještě před vytvrzením vrstvy předešlé. To je však vzhledem ke konstrukci splétacího stroje značně náročné na vytvrzovací čas a dodržování čistoty, tedy opět bez výraznější možnosti uplatnění v sériové výrobě. K tomu by bylo nutné naplétat vzorky v horizontální poloze tak, aby nedocházelo ke stékání pryskyřice do mechanismu splétacího stroje. Rovněž by bylo nutné upravit celý výrobní postup tak, aby nedošlo k předčasnému vytvrzení pryskyřice [34].

Praktickými zkouškami se prokázalo, že je možné ruční prosycení maximálně tří vrstev vláken, tedy do tloušťky stěny trubky 2 mm. To je dostačující pro přípravu zkušebních vzorků, pro výrobu trubek větších průměrů s větší tloušťkou stěny je však nutné použít horizontální splétací stroj s prosycováním každé vrstvy zvlášť.

Rovněž značným problémem je sejmutí vytvrzené trubky z trnu. Jako první byl použit ocelový trn stejného průměru jako naplétací trn. Byly použity různé separační prostředky. Jako nejlepší se osvědčuje separátor na bázi vosku. V tomto případě bylo třeba pro sejmutí vzorku zapřít trubku jejím průřezem za průvlak s dírou nepatrně větší než průměr trnu. I tak však bylo nutné velké síly na odtržení trubky z trnu a často docházelo k jejímu porušení, protože plocha spoje mezi trubkou a trnem je značně větší

než styčná plocha mezi trubkou a průvlakem, tak bylo nutné vyvinout značné smykové napětí ve styčné ploše trubky a trnu.

Optimálním řešením se ukazuje vytvrzení vzorku na silikonové trubce s vnitřním ocelovým trnem zajišťujícím rovinnost vzorku. Po vytvrzení se silikonová trubka natáhne, čímž dojde ke zmenšení jejího průměru, což vyvolá tahové napětí v místě styku trnu a vzorku a jejich snadnému oddělení. Navíc není téměř nutné používat separátor.

Problém však nastává s navlečením vzorku na silikonovou trubku, kdy dochází k poškození pleteniny vlivem tření při nepatrném zkroucení trubky. Tento problém byl vyřešen tak, že se silikonová trubka na jednom konci zaslepí, natáhne na tyč menšího průměru než je vnitřní průměr silikonové trubky a na druhém konci zajistí proti posunutí stahovacím kroužkem. Takto dojde ke zmenšení vnějšího průměru silikonové trubky a je možné snadné nasazení splétaných dutinek. Po jejich nasazení se povolí stahovací kroužek, čímž se silikonová trubka opět zkrátí a vrátí na původní průměr. Pak se opět nasadí trn do silikonové trubky pro zkalibrování jejího průměru a její vyrovnání.

Takto připravený vzorek je prosycen pryskyřicí. Pro vytlačení bublinek z kompozitu se nasycený vzorek omotá plastovou páskou. To však bylo provedeno ručně a proto nebyl povrch vzorku zcela ideální.

Vhodným řešením se jeví umístění nasyceného vzorku pryskyřicí se silikonovou trubkou do dvoudílné vytápěné formy s vnitřním průměrem odpovídajícím požadovanému vnějšímu průměru trubky. Potřebného tlaku k odstranění přebytečné pryskyřice se dosáhne zatlačením trnu s přesahem do silikonové trubky nebo jejím natlakováním na požadovaný tlak. Výroba takovéto formy však přesahovala finanční možnosti této práce.

3.4.3 Zkouška plochých vzorků vyrobených technologií splétání vláken

Vzorky byly vyrobeny z rozstřižené trubkové dutinky z uhlíkových vláken se 100% podílem podélné výztuže, vyrobené technologií popsané v kap. 3.4.1 a 3.4.2. Nejprve byla stejným postupem jako u vzorků z tkaniny vyrobena kompozitová deska, ze které byly vyříznuty vzorky ve směru podélné výztuže a kolmo na její směr. Výsledky zkoušky jsou zaznamenány v Tab. 15.

Tab.15 Mechanické vlastnosti pleteninových destiček

Materiál matrice: ChS EPOXY 531						
Materiál vláken: Torayca T800						
Vzorek	Modul [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
0°	10140	1635	370	18	5,10	0,18
90°	5440	821	190	10	8,70	0,24

Z naměřených výsledků je patrný výrazný vliv podélné výztuže na výsledné vlastnosti takto připravených vzorků. Způsob porušení vzorků odebraných rovnoběžně ke směru podélných vyztužujících vláken odpovídá vzorkům typu „sandwich“ testovaných v předcházející kapitole. Vzorky vyříznuté kolmo na podélná vlákna se v průběhu zkoušky značně deformovala a došlo u nich k velkému průhybu. Celkový princip porušení se však shodoval s porušením vzorků $\pm 45^\circ$ popsaným též v minulé kapitole.

V závislosti na směru odebrání testovaných vzorků odpovídaly výsledky mechanickým hodnotám příslušných laminátů testovaných v předchozí kapitole. To opět potvrzuje, že záleží především na úhlu vlákna ke směru hlavního namáhání a v menší míře na jeho zvlnění a způsobu křížení. Za předpokladu dříve přijatých zjednodušení lze tedy strukturu pleteninového kompozitu s podélnou výztuží popsat zápisem užívaným pro lamináty $[+\alpha, 0, -\alpha]_s$.

3.4.4 Statická zkouška trubek ohybem

Statická zkouška ohybem byla provedena ve zkušebně podniku PEGUFORM BOHEMIA a.s. v Liberci na přístroji INSTRON 4204 vybaveném zkušebním zařízením pro zkoušku třibodovým ohybem, se vzdáleností opěr 200 mm, poloměrem přitlačného trnu 5 mm a poloměrem opěr 2,5 mm. Průběhy zkoušek byly zaznamenávány do datových souborů, které byly pomocí software INSTRON SERIES IX zpracovány do grafů.

3.4.4.1 Trubky vyrobené ze skelných vláken

Jak již bylo popsáno způsob výroby umožňuje zapletení podélných vláken do struktury kompozitu. Maximální počet vláken, které je možno takto umístit do jedné

vrstvy dutinky je 32. Teoreticky je tedy možné vyrobit polotovar s 1 až 32 podélnými vlákny. Výhodou je že je možné tímto způsobem vyrobit trubku nebo jiný profil se směrově orientovanými vlastnostmi a využít vlastností podélné výztuže pouze v požadované části výseče trubky. Tímto způsobem je například možné vyrobit trubku s rozdílnou tloušťkou stěny v jejím průřezu, což přináší nemalé váhové úspory u jednostranně namáhaných součástí, například násad hokejových holí.

Naopak pro případ testování celkových vlastností takovéto trubky bylo vhodnější rozmístit vlákna podélné výztuže rovnoměrně po obvodu trubky a vytvořit tak trubku s vlastnostmi stejnými ve všech směrech. Takto byly připraveny vzorky ze skelných vláken se 100%, 50%, 25% a 0% vyztužujících podélných vláken s použitím matric popsaných v kapitole 3.1. Výsledky testování těchto vzorků jsou uvedeny v příloze v Tab. 19.

Pro zkoušku ohybem byly též připraveny vzorky s rozdílným úhlem křížení vláken. Úhel křížení vláken (θ) je úhel, který mezi sebou svírají dvě protisměrně uložená vlákna jak je to znázorněno na obr.3. Udává se ve stupních.

Pro měření úhlu θ byla zhotovena sada zvláštních vzorků. Dvě protisměrně křížící se uhlíková vlákna byla nahrazena kabílky z PES hedvábí bílé barvy. Po navlečení dutiny na kalibr byl přiložen průsvitný pauzovací papír, na něj překreslen průběh PES kabílek v místě jejich křížení a po přemístění pauzovacího papíru na rovnou plochu byl úhloměrem naměřen úhel θ s přesností na 0,5 stupně.

Tab.16 Úhel křížení θ

Výztuž [%]	100	50	0
θ [°]	47,35	44,98	45,63

Měřením skutečného úhlu vláken na trubkách vyrobených při nastavení stroje na úhel 45° bylo zjištěno, že objem podélně vyztužujících vláken nemá výrazný vliv na úhel křížení vláken, jak je to patrné z Tab. 16. Pro zkoušení vlivu úhlu křížení vláken byly vyrobeny vzorky s úhly 32° , 45° a 62° , tak jak to umožňovalo seřízení splétacího stroje. Úhel křížení vláken je přímo závislý na rychlosti odtahu vzorku. Tu je u přístroje DOTEX možné změnit pouze výměnou ozubených kol v převodovce pohonu odtahovacího zařízení, takže nelze plynule měnit úhel křížení po délce trubky, čehož by bylo výhodné u některých výrobků využít. Použitím jiného typu převodovky s plynulou

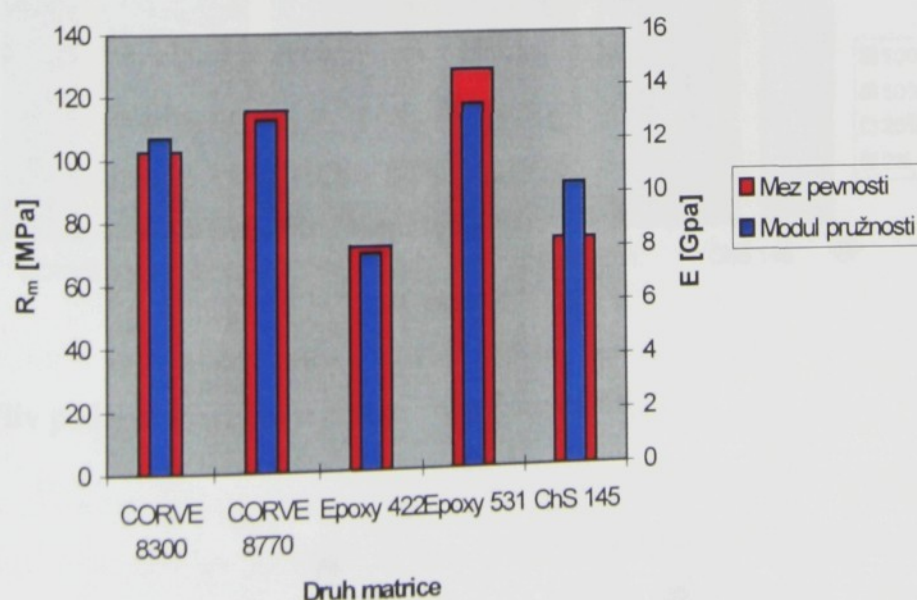
regulací je však možné na tomto zařízení vyrobit trubky s nerovnoměrným průběhem úhlu křížení vláken. Výsledky zkoušky ohybem provedené na vzorcích ze skelných vláken bez podélné výztuže jsou uvedeny v Tab. 17.

Tab.17 Vliv úhlu křížení na mechanické vlastnosti trubek

Úhel křížení [°]	Modul [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
62	6,4	0,6	62	2,0	4,4	0,3
45	7,2	0,5	70	1,5	5,0	0,4
32	8,5	0,7	84	3,8	5,0	0,3

Jak vyplývá z provedených testů, hlavní vliv na konečné vlastnosti pleteninové trubky mají parametry splétání vláken, tzn. množství podélné výztuže a úhel křížení vláken a také samozřejmě použitá matrice.

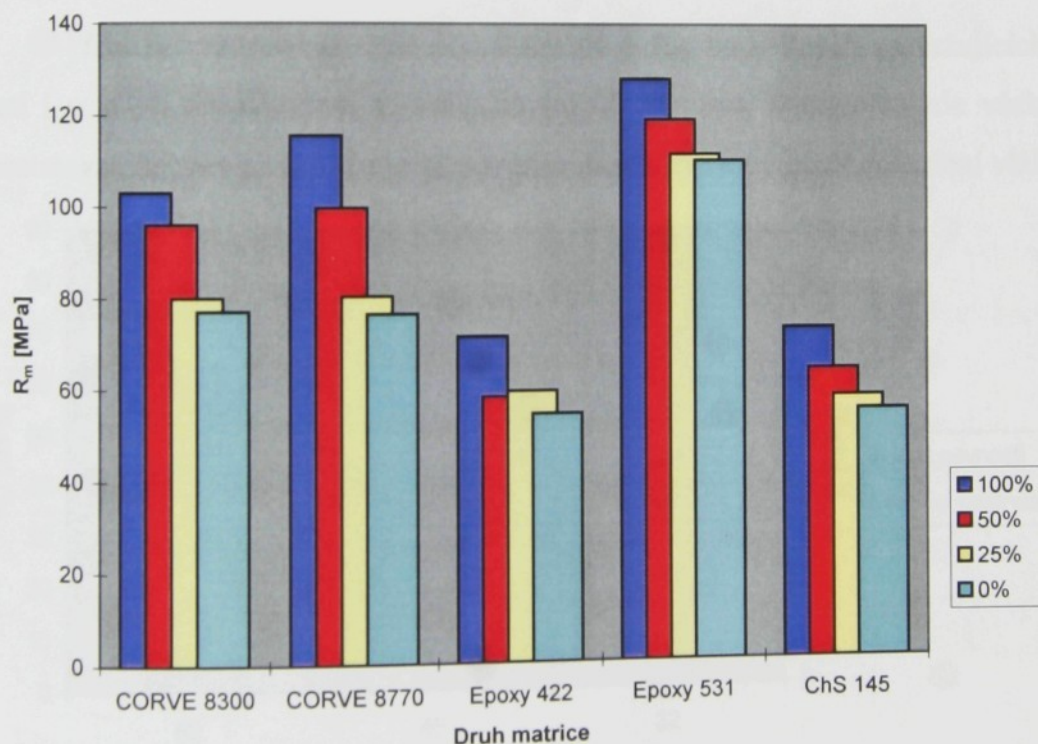
Dalo se předpokládat, že nejlepších výsledků bude dosaženo u stejných druhů matric jako při testování vlastností laminátů. Zde se opět potvrzují výborné vlastnosti vinylesterových pryskyřic, navíc se podařilo pro tento test zajistit epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 531 a 422, z nichž typ 531 dosahuje srovnatelných vlastností s vinylesterovými pryskyřicemi. Pro pryskyřici ChS Epoxy 531 navíc hovoří jednoduchá příprava a snadnost zpracování. Vliv pryskyřice při zkoušce ohybem je patrný z grafu na obr. 23.



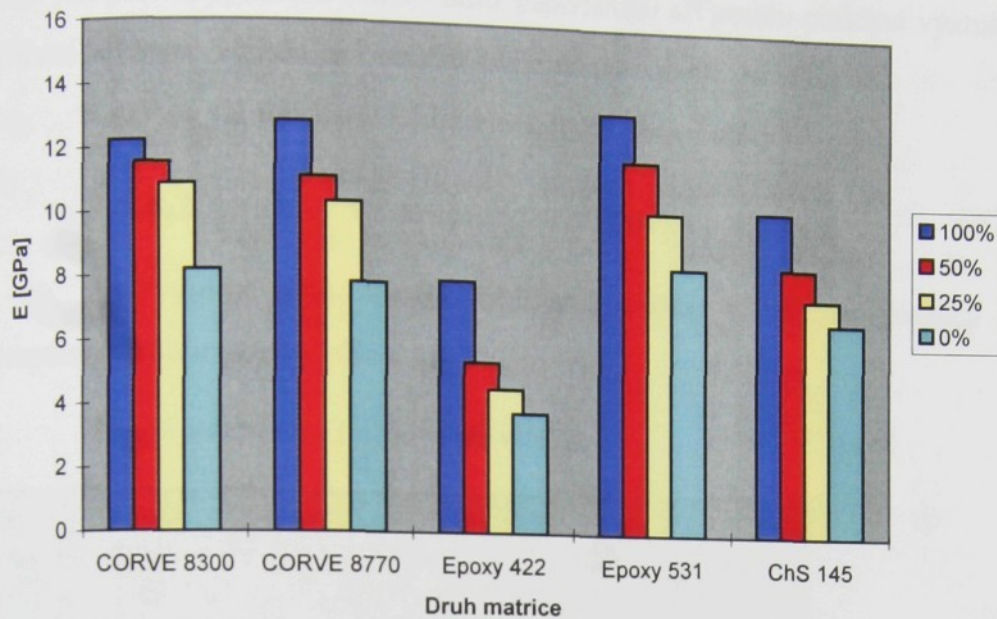
Obr.23 Vliv matrice na mechanické vlastnosti kompozitu

Podle výsledků ohybu laminátových destiček, kde se prokazuje značný vliv již malého odklonu vláken od osy hlavního namáhání se přepokládal výrazný vliv podélných vláken na mechanické hodnoty materiálu. Tento vliv se sice potvrdil, ale ne v takové míře jako u laminátů. Rozdíly pevnosti jednotlivých vzorků jsou přibližně v rozmezí 20 %. Větší vliv se projevuje u hodnot modulu pružnosti, kde jsou rozdíly mezi vzorky s výztuží a bez výztuže přibližně 30-40%.

Důvod je především v rozdílném tvaru vzorků, kdy u kruhového průřezu nemohou přenášet ohybové zatížení všechna vlákna výztuže, ale jen vlákna na spodní (tahové) a horní (tlakové) straně [35]. Pro takovýto typ zatížení by bylo vhodnější vložit vyztužující vlákna pouze do nejnamáhanějších částí průřezu vzorku a snížit tak jeho hmotnost. Pro víceosé namáhání, které je běžné v praktickém použití je však rovnoměrné rozmístění výztuže vhodné. Vliv podélných vláken je patrný z grafů na obr. 24, 25.

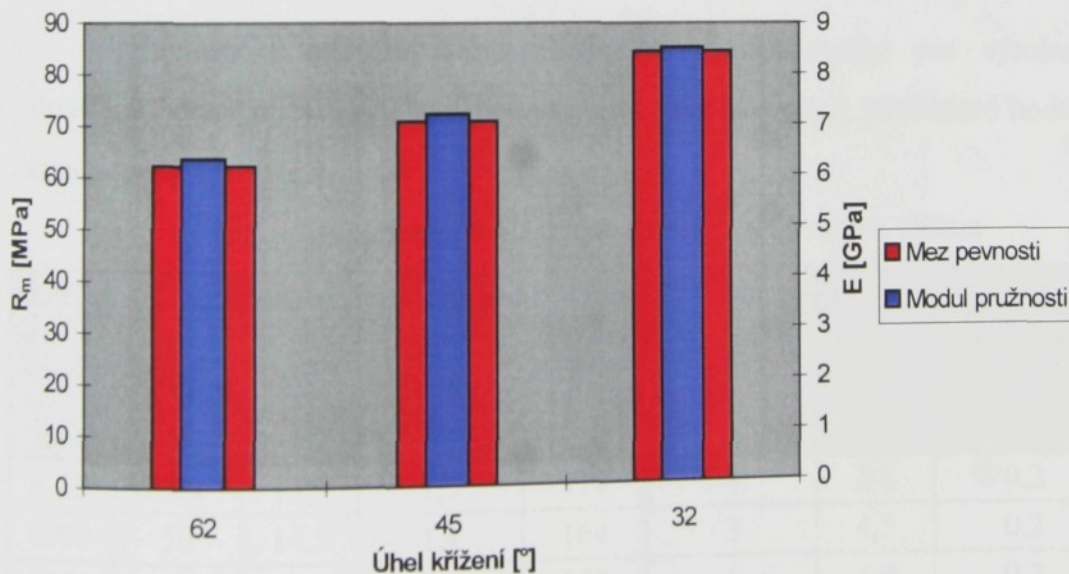


Obr.24 Vliv podélné výztuže na mez pevnosti materiálu



Obr.25 Vliv podélné výztuže na modul pružnosti

Přibližně to samé co bylo konstatováno o vlivu podélných vyztužujících vláken platí i o vlivu úhlu křížení vláken. Na rozdíl od vlivu výztuže je zde však možné konstatovat, že mez pevnosti i modul pružnosti se mění úměrně úhlu křížení vláken.



Obr. 26 Vliv úhlu křížení na mechanické vlastnosti trubek

Jak již však bylo popsáno, úhel křížení je závislý na rychlosti odtahu a ten je možné nastavit různou konfigurací ozubených kol v převodovce odtahovacího zařízení. Vzhledem k této konstrukci stroje není možné vyrobit vzorky s nižším úhlem křížení a

najít tak přesné optimum tohoto úhlu v závislosti na podílu podélné výztuže. Vliv úhlu křížení je patrný z grafu na obr. 26.

3.4.4.2 Trubky vyrobené z uhlíkových vláken

Pro výrobu bylo použito uhlíkové vlákno od firmy Torayca T800. Jeho parametry jsou uvedeny v Tab. 18.

Tab.18 Parametry uhlíkového vlákna

Průměr vláken [μm]	Počet vláken ve svazku	Hustota [kg/m^3]	Mez pevnosti v tahu [GPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Tažnost [%]
6	6 000	1 810	5,49	294	1,9

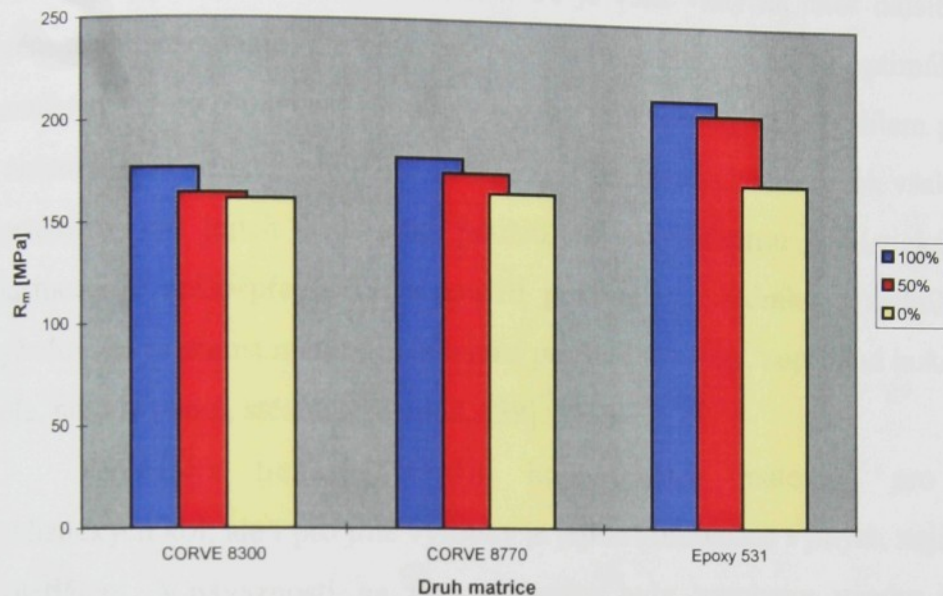
S ohledem na výsledky zkoumání vlivu pryskyřice na vzorcích ze skelných vláken bylo pro výrobu vzorků z uhlíkových vláken použito pouze tři druhů pryskyřic a to vinylesterových COR VE 8300, 8770 a epoxidové ChS 531, které vykazují nejlepší mechanické vlastnosti.

Vzhledem k vyššímu počtu vláken ve svazku stačilo pro výrobu trubky s tloušťkou stěny přibližně 2 mm použít dvouvrstvý kompozit. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 19.

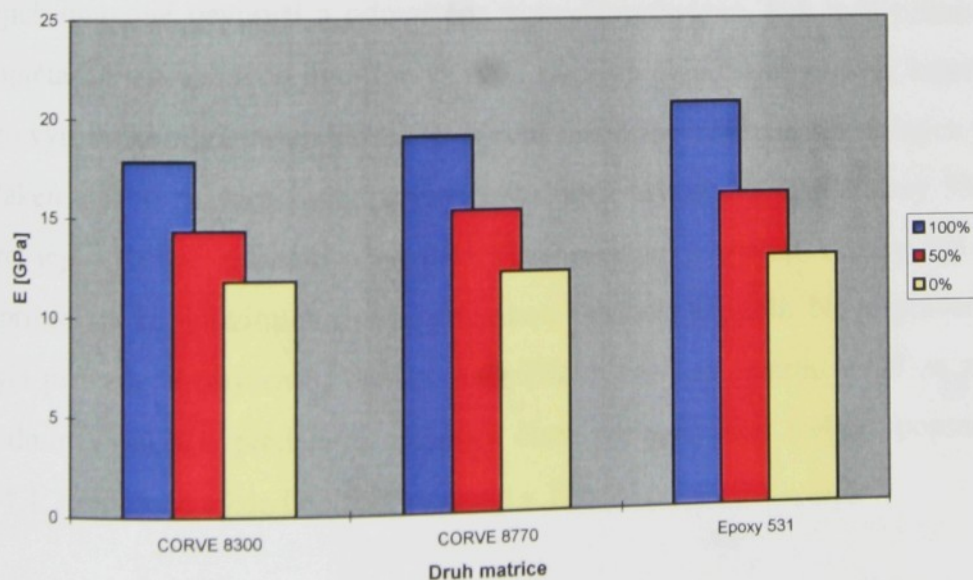
Tab. 19 Mechanické vlastnosti trubek z uhlíkových vláken

Matrice	Podélná výztuž [%]	Modul [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
8300	100	17,9	1,3	177	4	2,8	0,2
8300	50	14,3	1,4	164	3	4,5	0,2
8300	0	11,8	1,1	162	5	4,0	0,2
8770	100	19,1	1,3	182	3	4,0	0,1
8770	50	15,3	1,1	175	3	5,3	0,3
8770	0	12,1	1,4	165	3	4,8	0,3
531	100	20,7	1,5	213	2	2,8	0,1
531	50	16,0	1,1	206	1	4,0	0,2
531	0	12,7	1,2	172	4	4,7	0,2

Z naměřených výsledků je patrné zlepšení mechanických vlastností oproti skelným vláknům přibližně o 80 - 100 %. Jinak je ovšem možné konstatovat shodný vliv matrice, úhlu křížení a podélné výztuže jako tomu bylo popsáno u vzorků ze skelných vláken, což je patrné z grafů na obr 27, 28.



Obr.27 Mez pevnosti uhlíkových trubek



Obr.28 Modul pružnosti uhlíkových trubek

3.4.4.3 Trubky Ti3Al2,5V-KOMPOZIT

Z naměřených výsledků vyplývá, že pro praktické použití pleteninových kompozitních trubek je nutné zvýšit jejich modul pružnosti. Možností jak zvýšit modul pružnosti pleteninových trubek je změna faktorů pletení (podélná výztuž, úhel křížení) jak to vyplývá z předchozích zkoušek. To je však vždy na úkor dalších vlastností při jiném druhu namáhání. Celkově je však možné konstatovat, že optimálních hodnot při namáhání tahem a ohybem dosahují vzorky se stoprocentním podílem podélné výztuže s úhlem křížení vláken přibližně 40°. Modul pružnosti těchto trubek však stále ještě není dostatečný pro jejich kompletní použití při stavbě rámu cyklistického kola, jejich vlastnosti je spíše předurčují k použití pro vidlice předního a zadního kola, kde je vyžadována pružnost materiálu, ale také pro jiné výrobky, například hokejové a lyžařské hole, násady pádel, stěžně lodí apod. [39].

Posledním trendem využití kompozitních materiálů pro stavbu rámu cyklistických kol, ale i pro jiné výrobky je jejich kombinace s jiným, nejčastěji kovovým materiálem. V návaznosti na tyto poznatky byly vyrobeny vzorky kombinovaného materiálu-titanové slitiny a kompozitu.

Postup výroby byl následující, trubka ze slitiny Ti3Al2,5V byla jemně otryskána kovovými kuličkami, tato úprava je u těchto trubek standardně používána pro zvýšení jejich únavové pevnosti a odmaštěna v perchlorethylenu. Pak byla přímo použita jako naplétací trn a opletena dvojitou vrstvou stejných uhlíkových vláken, které byly použity pro výrobu kompozitních trubek. Byl zvolen stoprocentní podíl podélných vyztužujících vláken a jako matrice byla zvolena epoxidová pryskyřice ChS Epoxy 531, především pro její výborné adhezni vlastnosti. Technologický postup výroby byl dále shodný s přípravou kompozitních trubek popsanou v minulé kapitole. Na připravených vzorcích byla provedena ohybová zkouška na měřicím zařízení Instron 4204 za zcela stejných podmínek jako u předchozí zkoušky čistě kompozitních trubek, popsané v kapitole 3.4.4. Naměřené výsledky jsou uvedeny v Tab. 21.

Tab. 21 Mechanické vlastnosti materiálu kov-kompozit při zkoušce ohybem

Materiál: Ti3Al2,5V-uhlíkový kompozit (Epoxy 531, 100% výztuž)						
Vzorek	Hustota [kg m ⁻³]	Modul pružnosti [GPa]	Měrný modul pružnosti [MPa / kg m ⁻³]	Mez pevnosti [MPa]	Měrná mez pevnosti [kPa / kg m ⁻³]	Průhyb [mm]
1	3086	84,4	27,3	520	200	7,6
2		87,2	28,2	530	203	8,3
3		90,1	29,2	590	222	9,1
4		82,7	26,8	550	212	8,6
5		88,9	28,8	570	218	9,0
6		90,7	29,4	530	204	7,9
7		84,3	27,3	580	221	9,0
8		91,0	29,5	520	202	8,1
9		88,4	28,6	540	208	8,4
10		86,4	28,0	560	215	8,7
Průměr		87,4	28,3	550	210	8,5

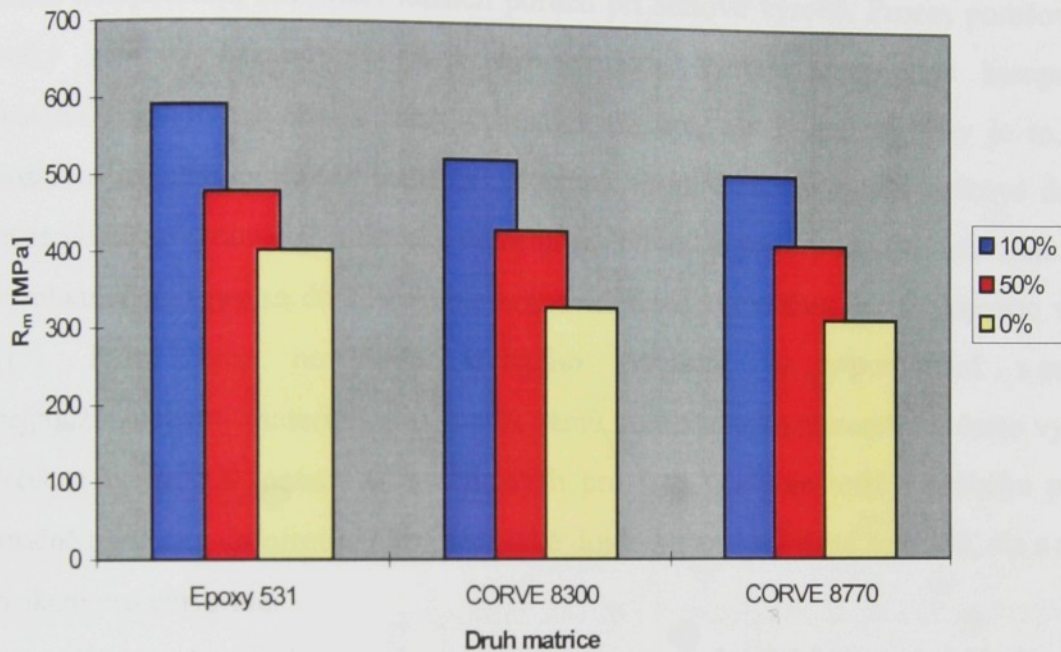
3.4.5 Zkouška jednoosým tahem

Pro zkoušku kompozitních trubek tahem bylo nutné vyřešit stejný problém s jejich upínáním do čelistí jako u kovových trubek. Kompozitní vzorky narozdíl od kovových nevyklouzávaly z čelistí, ale vlivem tlaku vyvolaného čelistmi docházelo k jejich rozdrčení v místě upnutí, kde byl do vnitřního průměru vložen ocelový váleček. Problém se podařilo celkem snadno vyřešit zesílením stěny trubky v místě jejího upnutí vrstvou skelné tkaniny prosycené epoxidovou pryskyřicí. Po jejím vytvrzení byla upínací část zbroušena do kruhového průřezu a upnuta do prizmatických samosvorných čelistí.

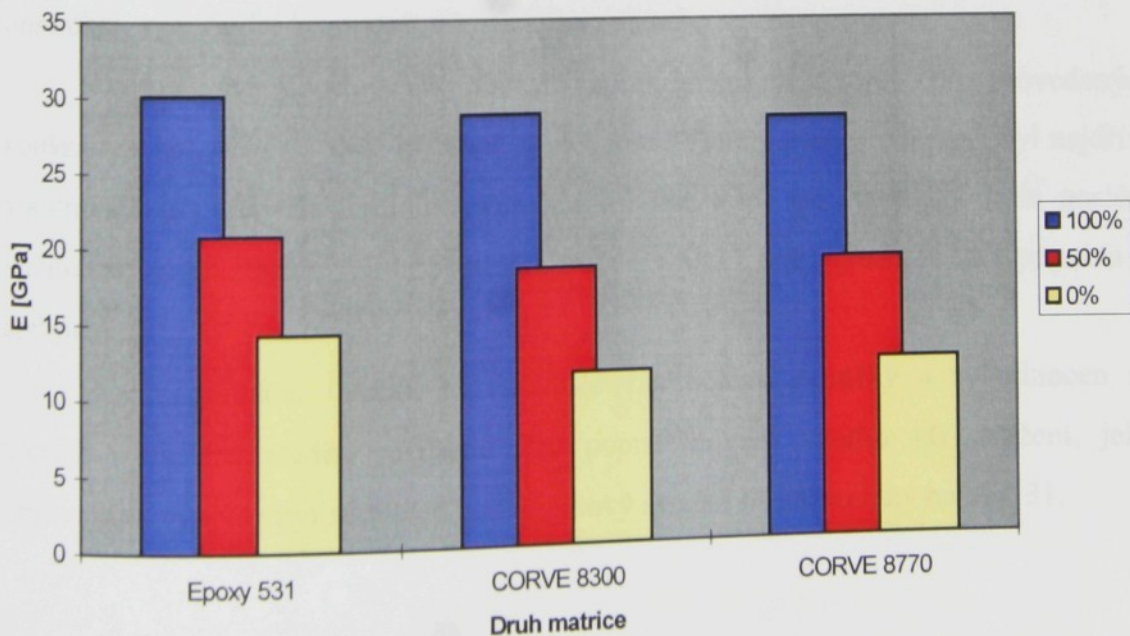
Zkouška byla provedena nejprve pro trubky ze skelných vláken s matricí ChS Polyester 145, pro odzkoušení zkušebního postupu a posléze pro vzorky z uhlíkových vláken s matricemi COR VE 8300, 8770 a ChS Epoxy 531. Naměřené výsledky jsou uvedeny v příloze, v Tab. 20-23.

Ačkoliv byly vzorky v místě styku s čelistmi zesíleny došlo v několika případech k jejich porušení mimo střední část nebo vytržení ze zesílené oblasti, což mělo za následek zkreslení průměrných hodnot. Z tohoto důvodu byly tyto hodnoty přepočítány bez těchto vzorků a zaznamenány do tabulek. Z měření vyplývá výrazně větší vliv podélné výztuže při tahovém namáhání než při ohybovém a také se potvrzuje větší vliv

podélné výztuže na modul pružnosti než na mez pevnosti materiálu. Rozdíly v naměřených hodnotách meze pevnosti materiálu mezi vzorky se 100% výztuže a bez výztuže se pohybují přibližně okolo 40% a u modulu pružnosti dokonce okolo 90%, což je patrné z grafů na obr.29, 30. Lze tedy konstatovat, že při tahovém namáhání přenášejí většinu zatížení vlákna podélné výztuže, kdežto při ohybovém namáhání je zatížení rovnoměrněji rozloženo mezi všechna vlákna.



Obr.29 Vliv podélné výztuže na mez pevnosti trubek



Obr.30 Vliv podélné výztuže na modul pružnosti trubek

4 Mechanismus porušení kompozitních materiálů

4.1 Mechanismus porušení laminovaných vzorků

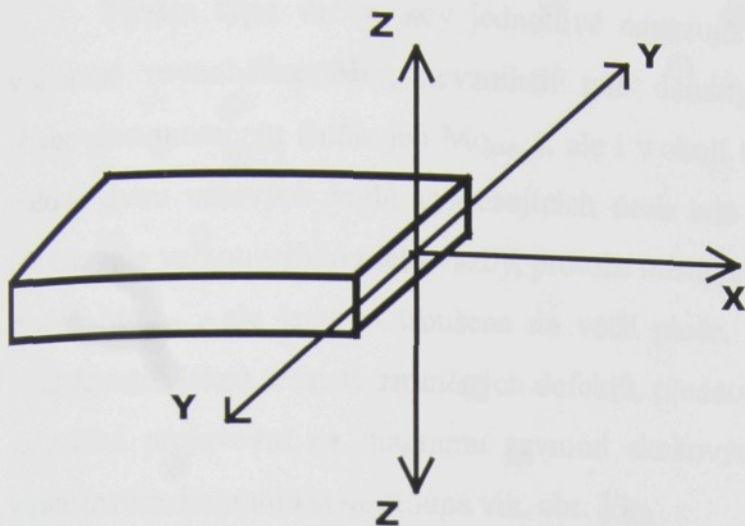
Stanovení příčin poškození kompozitního materiálu a rozbor postupu jeho poškozování jsou obzvláště důležité faktory pro návrh kompozitu.

Příčinu poškození a vznik první trhliny je nutné znát pro stanovení kritického místa kompozitu a eliminaci dalších poruch při sériové výrobě. Proces porušování má velký vliv na bezpečnost použitého výrobku. Velkou nevýhodou kompozitních materiálů aplikovaných na rámy cyklistických kol, ale i jiné výrobky je to, že při dosažení prvního porušení materiálu dochází velmi často k rychlé celkové destrukci materiálu bez výraznější plastické deformace. To může přinést zranění uživatele daného výrobku. Tento jev se dá částečně eliminovat skladbou vláken jak je popsáno v [36] a [15]. Právě tato nevýhoda křehkého porušení je v porovnání s ostatními nepoužívanějšími materiály pro stavbu rámu kompozitním materiálům často vytýkána. Většina kovových materiálů používaných pro tyto účely se totiž v průběhu porušení značně plasticky deformuje čímž sice také dojde ke zničení dané součásti, ale s menším rizikem pro uživatele.

Z důvodu eliminace tohoto procesu se v poslední době v praxi začínají vyvíjet a testovat materiály s plastovou maticí nebo například kombinace kompozitu s kovovou konstrukcí, zpevňující kompozit v kritických místech.

Snahou této kapitoly je popsat proces porušení vzorků při provedených zkouškách s ohledem na výše popsané skutečnosti. Vlastní proces porušení byl nejdříve vyhodnocen u plochých laminovaných vzorků viz. kap. 4.1, výsledků bylo posléze využito pro návrh struktury kompozitních trubek, jejichž fraktografie je dále popsána v kapitole 4.2.

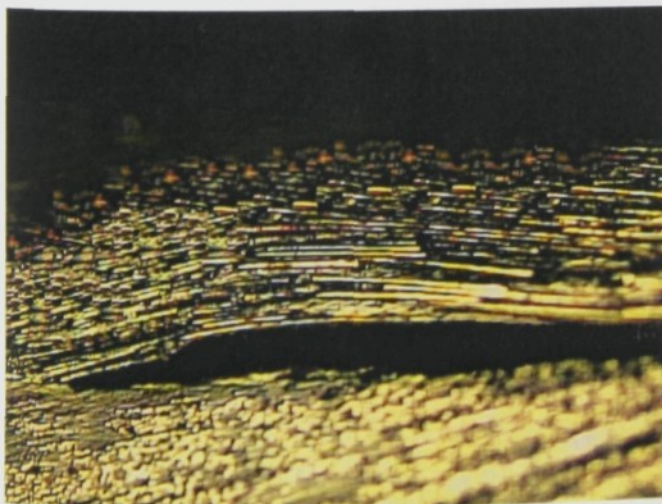
Proces porušení vzorků byl monitorován během zkoušky a vyhodnocen na vzorcích v různém stádiu porušení. Pro popis chování vzorku při zatížení, jeho porušování a výpočty byl stanoven souřadnicový systém os nakreslený na obr. 31.



Obr.31 Orientace os vůči vzorku, osa x souhlasí s osou hlavního namáhání

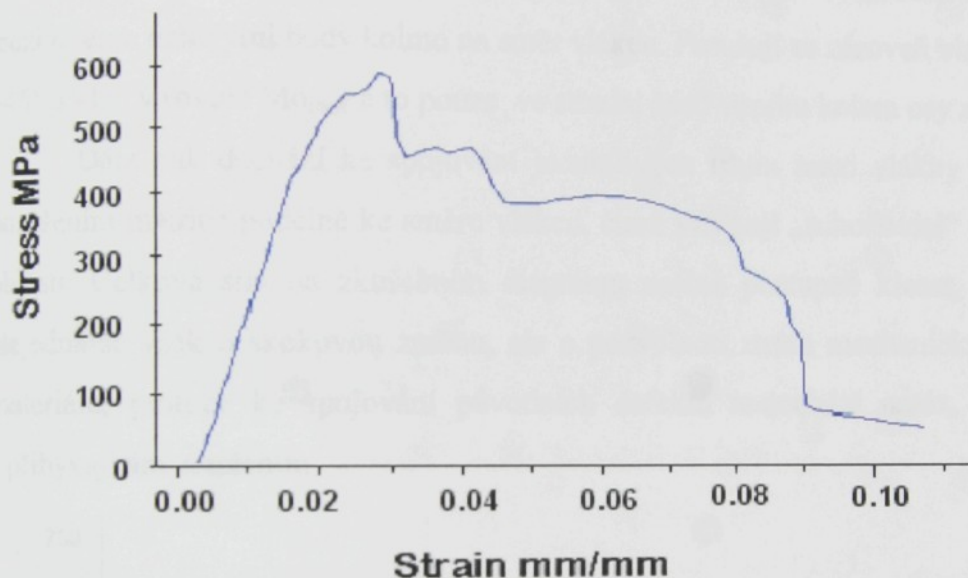
4.1.1 Keprová vazba

U vzorků s keprovou vazbou dochází k prvnímu porušení u vláken pod úhlem 0° ke směru hlavního namáhání (dále jen vláken 0°) na vnitřní - tlakové straně vzorku. K tomuto porušení dochází vždy ve střední části pramence vláken mezi dvěma uzlovými body smykovým mechanismem deformace [37]. V tomto místě se následně vytvoří malá „boulička“ viz. obr.32. Je to způsobeno tím tlakovým namáháním tohoto úseku, kdy vzhledem k jeho délce dojde ke vzpěru a vybočení vláken jediným možným směrem a to ven z povrchu materiálu.



Obr.32 Fáze prvotního porušení tlakem u vláken 0° k ose x, zvětšeno 10X

Vlivem typu vazby, kdy jednotlivé navazující uzlové body vytvářejí šikmé, vzájemně rovnoběžné čáry, nevznikají tyto defekty pouze v rovině maximálního ohybového momentu (dále jen $M_{o_{max}}$), ale i v okolí této roviny, právě v závislosti na poloze dvou uzlových bodů vymezujících úsek kde dojde k prvnímu porušení. To představuje velkou výhodu této vazby, protože místa prvních defektů nevznikají v jedné rovině $M_{o_{max}}$, ale jsou roztroušena na větší ploše. V další fázi dochází k porušení soudržnosti vláken v místě zmíněných defektů, přednostně v rovině $M_{o_{max}}$. Tento jev se začíná projevovat na diagramu prvními skokovými změnami, celková síla však v zátěžovém diagramu stále stoupá viz. obr. 33.



Obr.33 Keprová vazba, skladba $[(0/90)_2]_s$

V další fázi dochází k porušení vláken 0° na vnější - tahové straně vzorku v rovině $M_{o_{max}}$ a oddělování vláken 90° od matrice ve stejném místě viz. obr. 34.

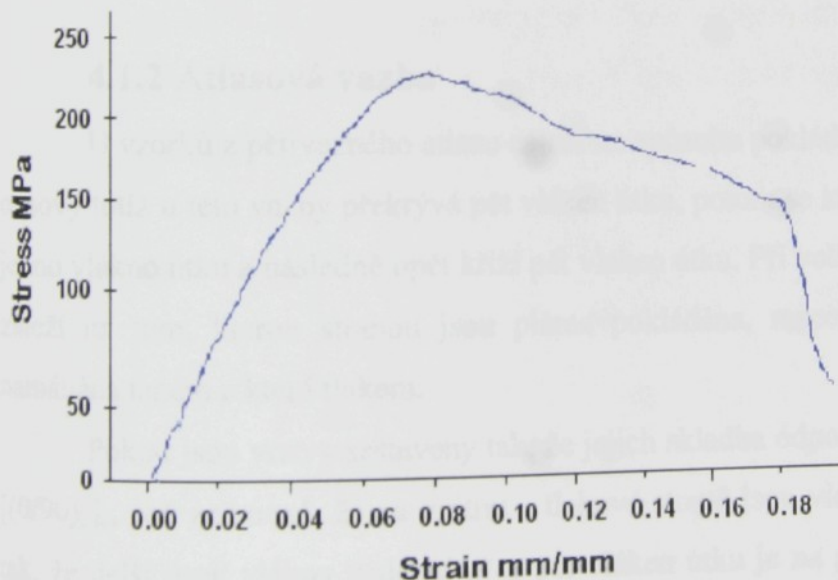


Obr. 34 Porušení vláken 0° k ose x tahovým zatížením, zvětšeno 5X

Zároveň se na vnitřní straně spojují původní trhliny směrem přes vlákna 90° a to jejich částečným přetržením a částečným oddělením od matrice. Vzhledem k tomu, že tyto původní defekty nevznikají v jedné rovině má tato trhlina stupňovitý tvar šikmo k hlavní ose vzorku a šíří se od středu vzorku k jeho okrajům. Tento proces se projevuje na diagramu první velkou skokovou změnou a výrazným poklesem křivky viz. obr. 33. V dalších fázích se porušují následující vrstvy směrem od vnější strany vzorku, což se projevuje jednotlivými „schody“ na zátěžové křivce.

U vzorků připravených s vlákny ve směru $\pm 45^\circ$ dochází k prvnímu porušení kompozitu na vnitřní straně vzorku vlivem namáhání na vzpěr ve střední části pramence mezi dvěma uzlovými body kolmo na směr vláken. Porušují se zároveň vlákna ve směru $+45^\circ$ a -45° v rovině $M_{o_{max}}$ a to pouze ve střední části vzorku kolem osy x .

Dále pak dochází ke spojování jednotlivých trhlín mezi vlákny $+45^\circ$ a -45° porušením matrice podélně ke směru vláken, čímž vznikají „schodovité“ trhliny v dané oblasti. Celková síla na zkušebním diagramu začíná postupně klesat, viz. obr. 35. Nejedná se však o skokovou změnu, ale o pozvolnou ztrátu mechanických vlastností materiálu, protože ke spojování původních defektů nedochází náraz, ale postupně s přibývajícím zatížením.

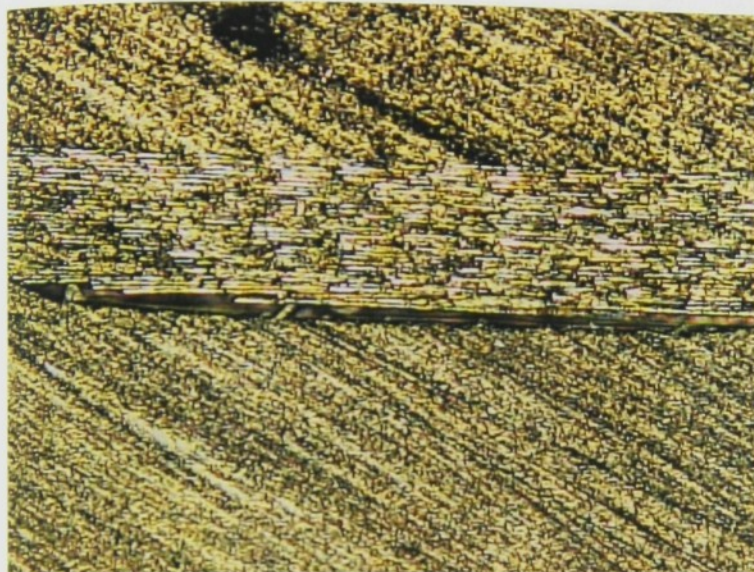


Obr.35 Keprová vazba, skladba $[(+45/-45)_2]_s$

Vlivem pnutí na volném okraji vzorku dochází k jeho podružnému prohnutí v rovině osy y . Na vnější straně začne posléze docházet k oddělení velkých částí pramenců vláken od matrice směrem od volného okraje vzorku. Nejprve se oddělují vlákna

v povrchových vrstvách a posléze vznikají mikrotrhlínky i ve středních vrstvách, což je viditelné na bočních hranách vzorku viz. obr. 36.

Až do toho okamžiku křivka zkušebního diagramu rovnoměrně klesá, potom ovšem nastává malé zpevnění vyvolané odporem povrchových vláken na vnější straně ve střední části vzorku viz. obr. 35. Potom náhle dojde k porušení a velmi rychlé destrukci vzorku.



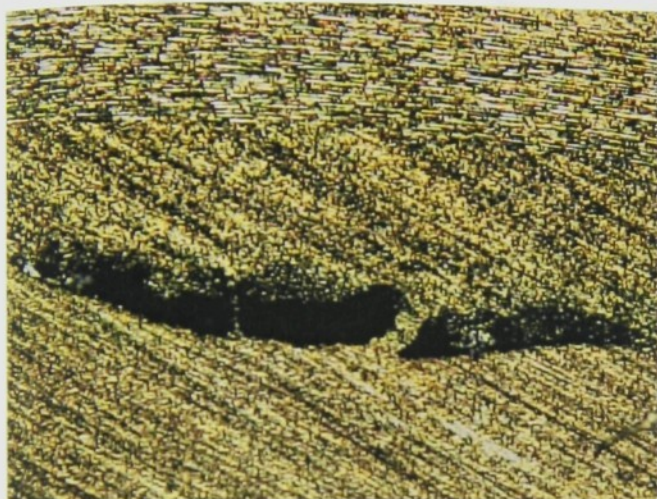
Obr.36 Mikrotrhlínky v okrajových částech vzorku, zvětšeno 10 X

4.1.2 Atlasová vazba

U vzorků z pětivazného atlasu záleží na způsobu pokládání vrstev. Každé vlákno osnovy totiž u této vazby překrývá pět vláken útku, potom se kříží v uzlovém bodě přes jedno vlákno útku a následně opět kříží pět vláken útku. Při volbě skladby vrstev značně záleží na tom, kterou stranou jsou plátina pokládána, respektive která strana bude namáhána tahem a která tlakem.

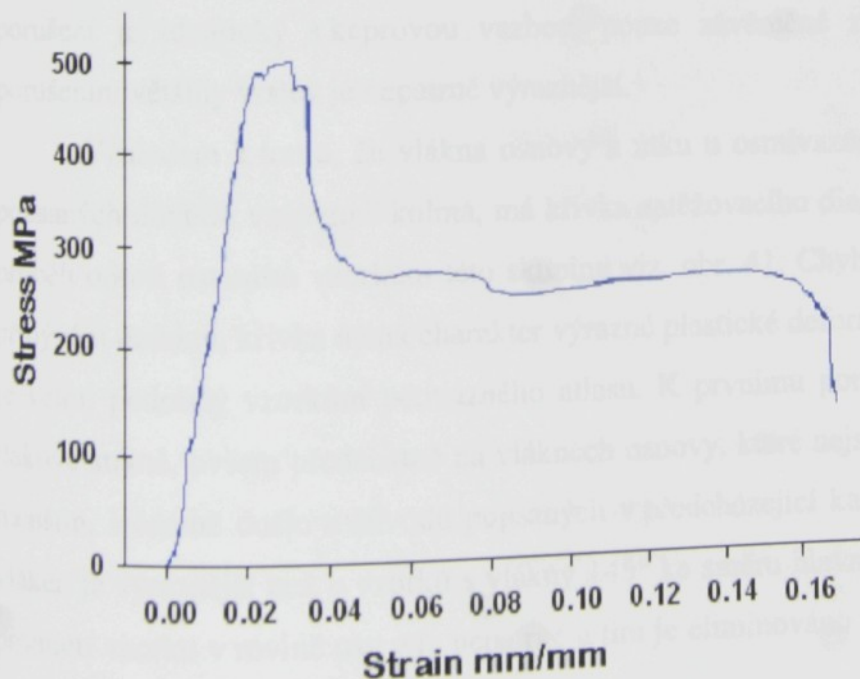
Pokud jsou vrstvy sestaveny tak, že jejich skladba odpovídá zápisu pro lamináty $[(0/90)_2]_s$, což znamená, že na vnitřní - tlakové straně jsou vlákna osnovy orientována tak, že delší úsek vlákna vedoucí přes pět vláken útku je na povrchu vzorku, dochází k porušení stejným systémem jako u keprové vazby, s tím rozdílem, že místa prvních defektů vznikají v jedné rovině $M_{o_{max}}$ a lomová plocha na vnitřní straně vzorku má rovný charakter kolmo na osu vzorku. Druhým rozdílem je to, že první defekty nevznikají vždy ve střední části jako u keprové vazby, ale kdekoli na kritickém úseku mezi uzlovými body.

Při skladbě odpovídající zápisu $[(90/0)_2]_s$ jsou však delší úseky vláken 0° orientovány směrem dovnitř vzorku (tkanina je naruby oproti předcházejícímu případu) dochází k odlišnému způsobu porušení. Nejprve dochází na vnitřní straně vzorku k oddělení vláken 0° od matrice v celém úseku, který je na povrchu materiálu (přes jeden pramen) a zároveň vznikají příčné trhliny mezi vlákny 90° na vnější straně vzorku viz. obr. 37, vše v rovině $M_{o_{max}}$.

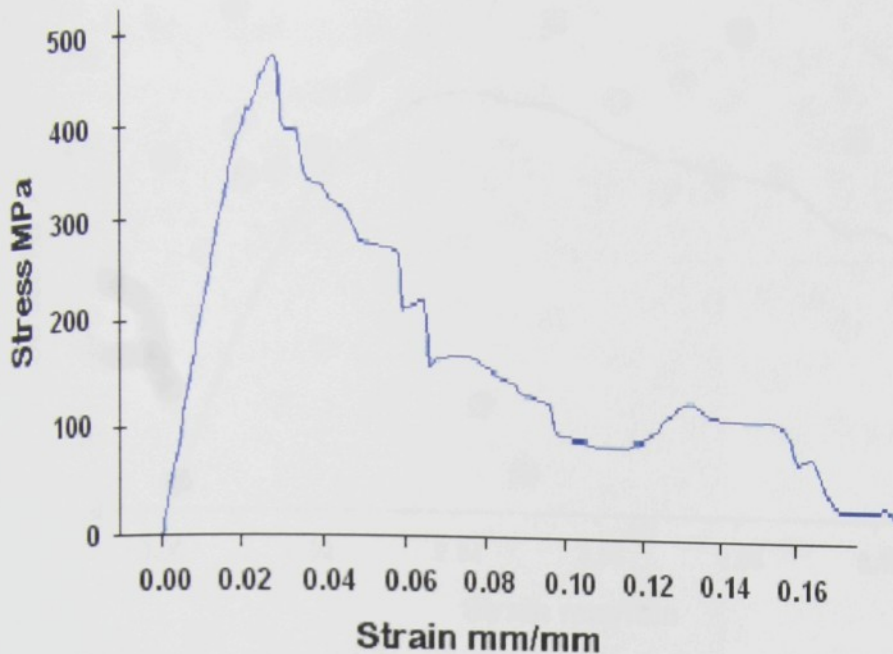


Obr.37 Vznik příčné trhliny ve vláknech 90° k ose x , zvětšeno 10 X

V další fázi dojde k porušení tlakem výše zmíněných úseků vláken 0° na vnitřní straně vzorku a potom k náhlému porušení vláken ve stejných úsecích na vnější straně tahovým namáháním a k propojení příčných trhlin, čímž dojde k úplnému porušení vrstvy na vnější straně vzorku a dále následuje jeho úplné porušení.



Obr. 38 Pětivazný atlas, skladba $[(90/0)_2]_s$

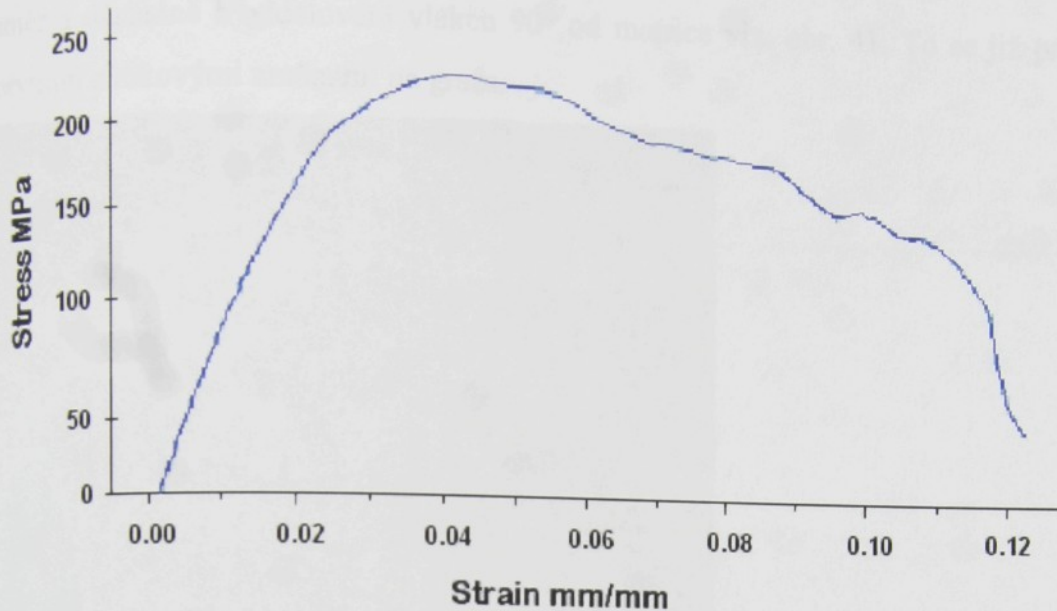
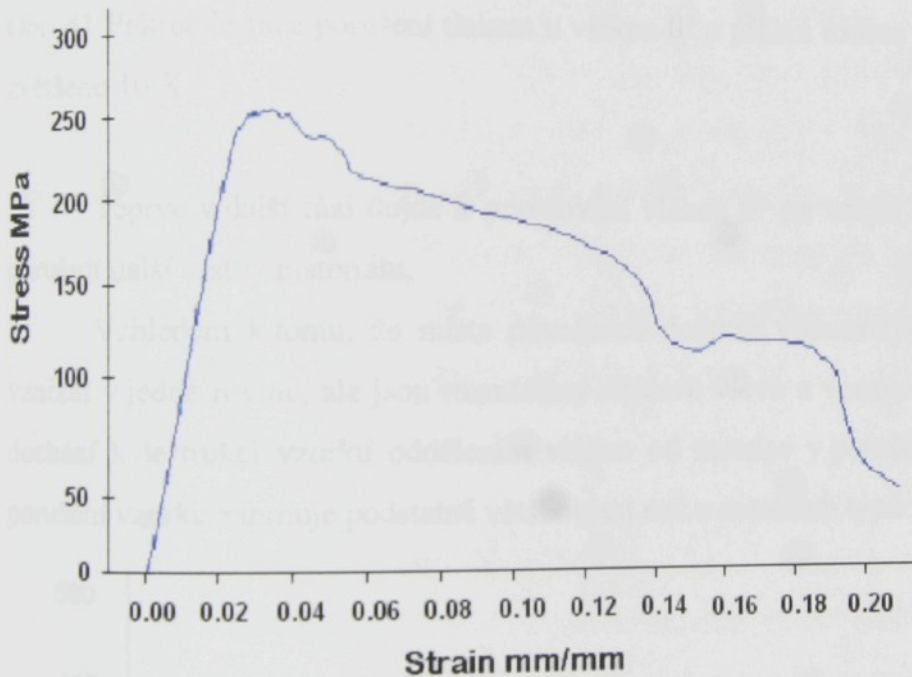


Obr.39 Osmivazný atlas, skladba $[(0/90)_2]_s$

U vzorků z pětivazného atlasu připravených ve vrstvách $\pm 45^\circ$ nejprve začínají vznikat na vnitřní straně vzorku poškození vláken tlakovým namáháním. Poškozují se ovšem pouze delší úseky vláken na povrchu v poměrně široké oblasti okolo roviny $M_{0\max}$ a pouze ve střední části vzorku. Na křivce zkušebního diagramu dochází k prvním nepatrným skokům viz. obr. 40.

V další fázi vznikají na vnitřní straně mezi místy původních defektů nepravidelné trhliny a dochází k podružnému prohýbání v rovině osy y . Další způsob porušení je identický s keprovou vazbou, pouze závěrečné zpevnění před náhlým porušením většiny vrstev je nepatrně výraznější.

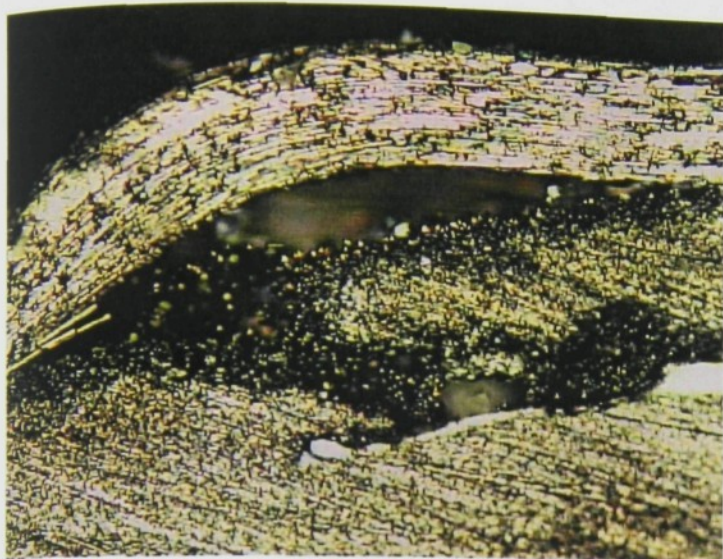
Vzhledem k tomu, že vlákna osnovy a útku u osmivazného atlasu nejsou z již popsaných důvodů vzájemně kolmá, má křivka zatěžovacího diagramu výrazně odlišný průběh oproti ostatním vzorkům této skupiny viz. obr. 41. Chybí zde fáze postupného přibývání defektů, křivka nemá charakter výrazné plastické deformace. Způsob porušení je velmi podobný vzorkům pětivazného atlasu. K prvnímu porušení opět dochází na tlakové straně, ovšem přednostně na vláknech osnovy, které nejsou pod úhlem 45° , ale menším, k čemuž došlo z důvodů popsaných v předcházející kapitole. Porušení těchto vláken je výraznější než u vzorků s vlákny $\pm 45^\circ$ ke směru hlavního namáhání. Rovněž prohnutí vzorku v rovině osy y je nepatrné a tím je eliminováno i oddělování pramenců vláken od matrice na vnější straně vzorku.

Obr. 40 Pětivazný atlas, skladba $[(+45/-45)_2]_s$ Obr. 41 Osmivazný atlas, skladba $[(+35/-55)_2]_s$

4.1.3 Plátňová vazba

První defekty u vzorků s plátňovou vazbou vznikají opět na vnitřní straně vzorku smykovým mechanismem [5], kde dochází k porušení matrice mezi jednotlivými pramenci vláken. To se na diagramu projeví ztrátou linearitu křivky viz. obr. 42. Dále dochází na vnitřní straně vzorku k porušení vláken 0° v důsledku tlakového namáhání, vzhledem k malé vzdálenosti mezi uzlovými body zde ovšem nevzniká malá boulička, jako u jiných vazeb, ale dochází přímo k porušení povrchových vláken kolmo na jejich

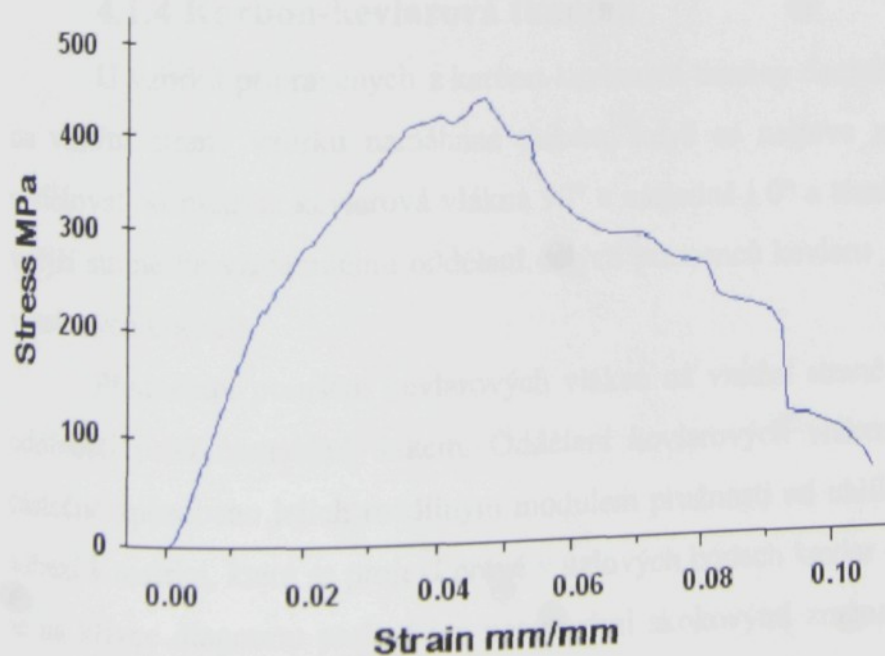
směr a následně k oddělování vláken 90° od matrice viz. obr. 41. To se již projevuje prvními skokovými změnami na grafu.



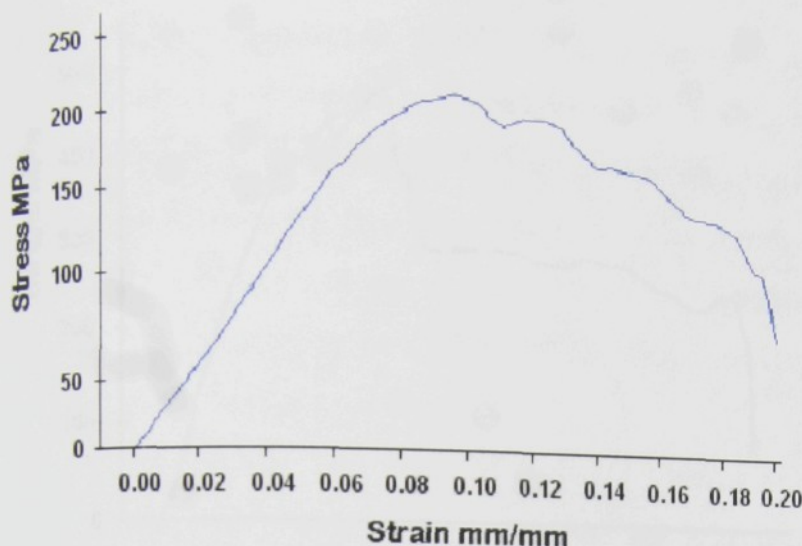
Obr. 41 Pokročilá fáze porušení tlakem u vláken 0° a příčná trhlina vláken 90° k ose x , zvětšeno 10 X

Teprve v další fázi dojde k porušování vláken 0° na vnější straně. Následně se porušují další vrstvy materiálu.

Vzhledem k tomu, že místa původních defektů vlivem typu vazby nemohou vznikat v jedné rovině, ale jsou rozmístěny střídavě vlevo a vpravo od lomové roviny, dochází k destrukci vzorku oddělením vláken od matrice v poměrně široké oblasti a porušení vzorku zahrnuje podstatně větší oblast než u ostatních typů vazeb.



Obr. 42 Plátňová vazba, skladba $[(0/90)_2]_s$



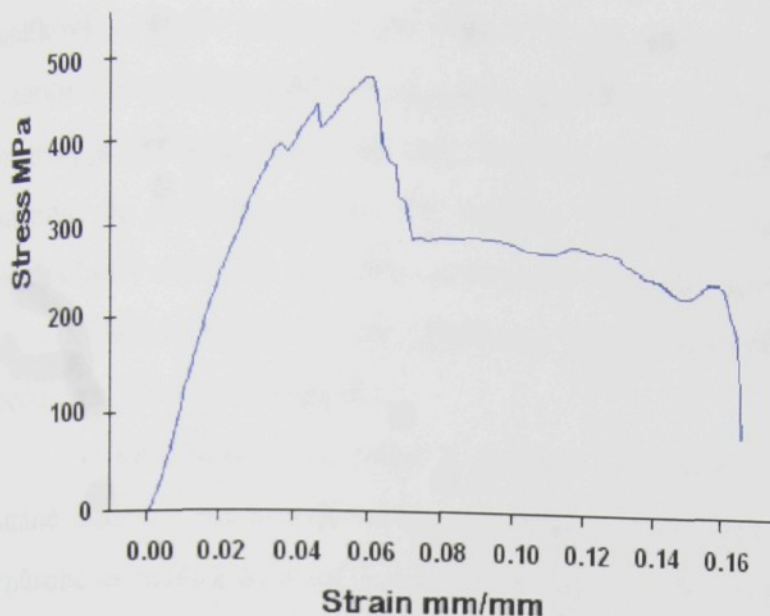
Obr. 43 Plátová vazba, skladba $[(+45/-45)_2]_s$

V případě vzorků zhotovených s vrstvami pod úhlem $\pm 45^\circ$ vznikají první defekty stejně jako u ostatních vzorků této skupiny, pouze s tím rozdílem, že vlivem krátké vzdálenosti mezi uzlovými body nedojde k porušení v malém úseku pramence, ale k oddělení vláken od matrice a jejich celkovému vybočení na celém úseku mezi uzlovými body. Porušení vnější strany opět odpovídá ostatním vzorkům, prohnutí v rovině osy y je však ještě výraznější. Výraznost jednotlivých stupňů porušení se na křivce zátěžového diagramu projevuje většími výkyvy viz. obr. 43, celkový ráz křivky však odpovídá ostatním vzorkům.

4.1.4 Karbon-kevlarová tkanina

U vzorků připravených z karbon-kevlarové tkaniny dochází k prvnímu porušení na vnitřní straně vzorku namáhané tlakem, když se nejprve začínají deformovat a oddělovat od matrice kevlarová vlákna 90° a následně i 0° a téměř zároveň dochází na vnější straně ke vzájemnému oddělení celých pramenců kevlaru od sebe a od matrice v uzlových bodech.

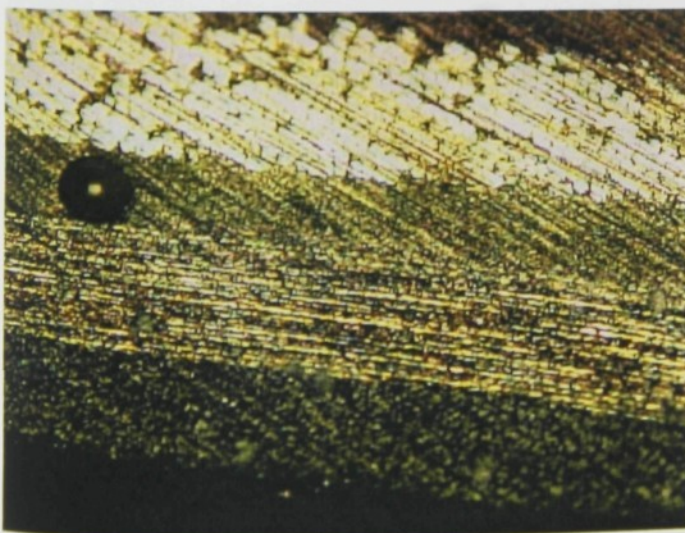
Přednostní porušení kevlarových vláken na vnitřní straně je dáno jejich menší odolností proti namáhání tlakem. Oddělení kevlarových vláken na vnější straně je částečně způsobeno jejich rozdílným modulem pružnosti od uhlíkových vláken a horší adhezí k matrici, která se projeví právě v uzlových bodech kevlar - kevlar. Tyto procesy se na křivce diagramu projeví jen nepatrnými skokovými změnami, při stále rostoucí celkové síle viz. obr. 44.



Obr. 44 K-K tkanina, skladba $[(0/90)_2]_s$

V další fázi dochází k porušení uhlíkových vláken na vnitřní straně, jejich prasknutí na hranici křížení s vlákny na ně kolmými. Tyto poruchy vznikají přednostně v rovině $M_{o_{max}}$. Toto se již projeví na diagramu výraznějším skokem při stále však ještě rostoucí hodnotě celkové síly viz. obr. 44.

Rozdílné parametry uhlíkových a kevlarových vláken způsobují obtížnější přípravu vzorků, což se projevilo nahodilým výskytem bublinek na přechodu fází karbon-kevlar viz. obr. 45.



Obr. 45 Bublinka na přechodu fází karbon-kevlar, zvětšeno 10 X

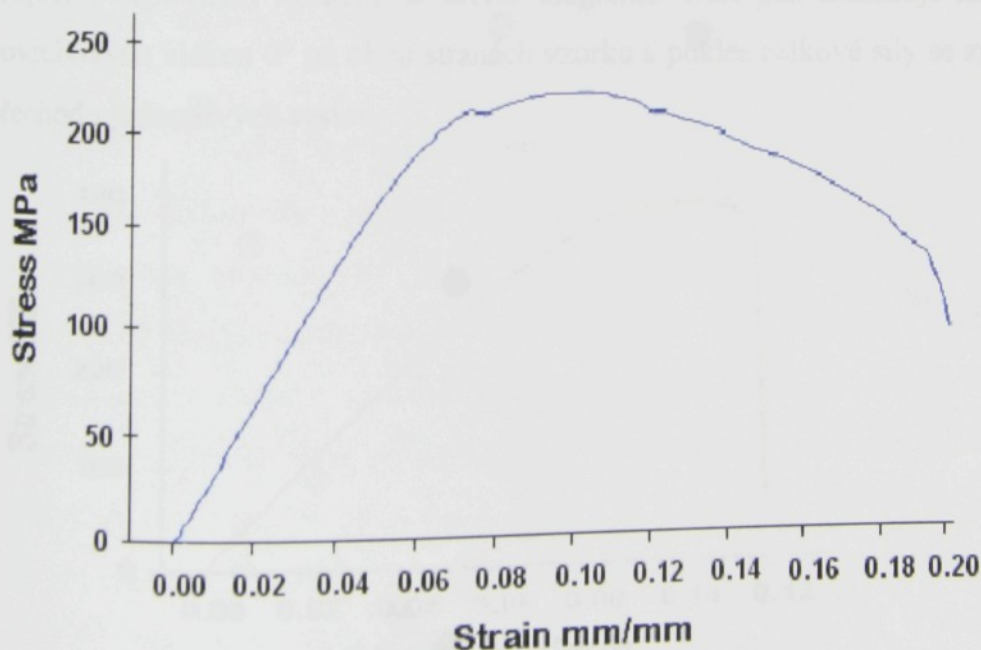
K hlavnímu zlomu na křivce diagramu dojde až při porušení povrchových uhlíkových vláken 0° na vnější straně vzorku. V rychlém sledu pokračuje oddělení

uhlíkových, popř. kevlarových vláken 90° od matrice v rovině $M_{o_{max}}$ na téže straně vzorku. Pokles napětí zastaví až vlákna kevlaru 0° , která se nejprve kompletně oddělí od matrice a praskají téměř až když dochází k porušování třetí a čtvrté vrstvy vláken směrem do povrchu vzorku. Při úplném porušení všech uhlíkových vláken zůstává především v středních vrstvách vzorku ještě velká část kevlarových vláken, která se sice již oddělila od matrice, ale není přetržena. Díky tomu zůstávají obě části vzorku u sebe a nedojde k jeho úplné destrukci.

U této tkaniny vyrobené s vrstvami pod úhlem $\pm 45^\circ$ se jako první na vnitřní straně oddělují kevlarová vlákna od matrice v uzlových bodech tkaniny, což je opět způsobeno nižší odolností kevlarových vláken tlakovému namáhání a nedostatečnou adhezí k matrici. Dále se vlivem tlakového namáhání porušují ve střední části vzorku uhlíková vlákna a to přibližně ze 70 % ve střední části mezi uzlovými body a z 30 % se porušují v místě křížení s vlákny kevlaru. Kevlarová vlákna v kritických místech nepraskají, ale následně dochází k jejich oddělení od matrice.

Opět dochází k výraznému prohnutí vzorku v rovině osy y a k oddělování obou druhů vláken od matrice na okrajích vnější strany vzorku.

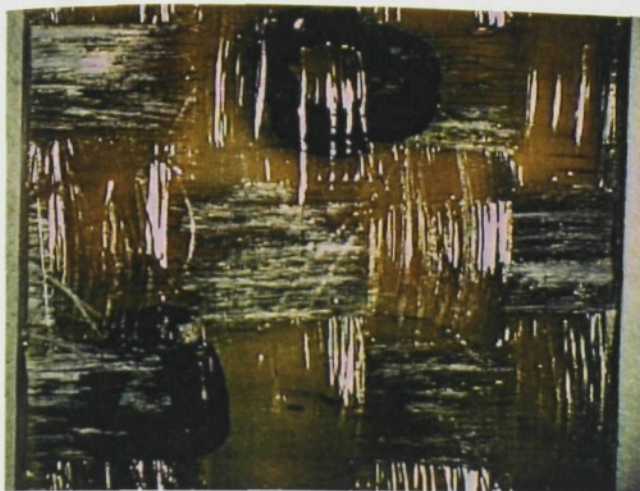
Další porušení pokračuje na vnější straně postupným praskáním uhlíkových vláken a oddělováním kevlarových vláken od matrice s následným prasknutím v okamžiku, kdy už se začínají porušovat uhlíková vlákna v nižších vrstvách. Celý proces porušení tak probíhá plynule, bez větších skokových změn na zátěžovém diagramu viz. obr. 46.



Obr. 46 K-K vazba, skladba $[(+45/-45)_2]_s$

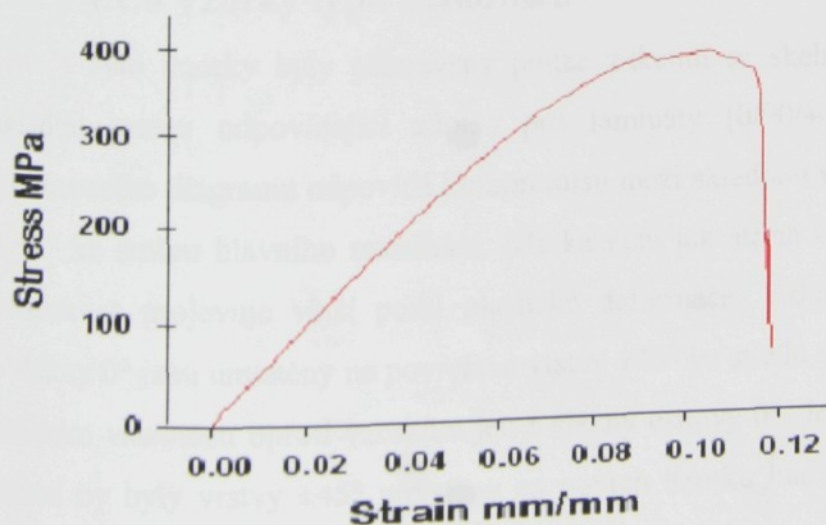
4.1.5 Tkaniny ze skelných vláken

K prvnímu porušení těchto vzorků dochází u povrchových vláken 90° na vnitřní straně vzorku, kde vznikají první příčné trhliny mezi vlákny viz. obr. 47 a téměř zároveň dochází k praskání některých vláken 0° na vnější straně vzorku vlivem jejich tahového namáhání.



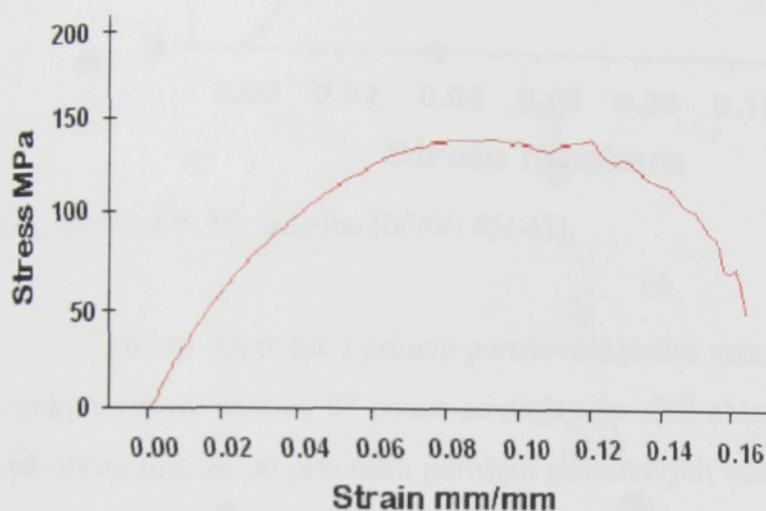
Obr. 47 První příčné trhliny mezi vlákny 90° k ose x , zvětšeno 5 X

Na křivce diagramu se to projevuje ztrátou její linearidy, bez viditelných skokových změn viz. obr. 48. S rostoucím napětím těchto defektů přibývá až po kritickou hranici. U pěti vzorků došlo k částečné delaminaci na hraně vzorku v oblasti M_{0max} , avšak pouze do vzdálenosti jeden až dvojnásobku tloušťky vzorku, což se projevilo nepatrným skokem na křivce diagramu. Dále pak následuje náhlé porušení povrchových vláken 0° na obou stranách vzorku a pokles celkové síly se zpevněním při přechodu jednotlivých vrstev.



Obr. 48 Skelná tkanina, skladba $[(0/90)_2]_s$

Průběh porušení vzorků s vlákny $\pm 45^\circ$ odpovídá materiálům s vysokou plastickou deformací, lineární úsek na křivce zátěžového diagramu je minimální. Jako první vznikají příčné trhliny na vnitřní straně vzorku u vláken $+45^\circ$ a na vnější straně se vytrhávají vlákna z matrice na okrajích vzorku, což způsobuje prohnutí vzorku v rovině osy y v důsledku napětí volného povrchu. Jednotlivých defektů stále s rostoucím zatížením přibývá bez skokových změn na zátěžovém diagramu viz. obr. 49.

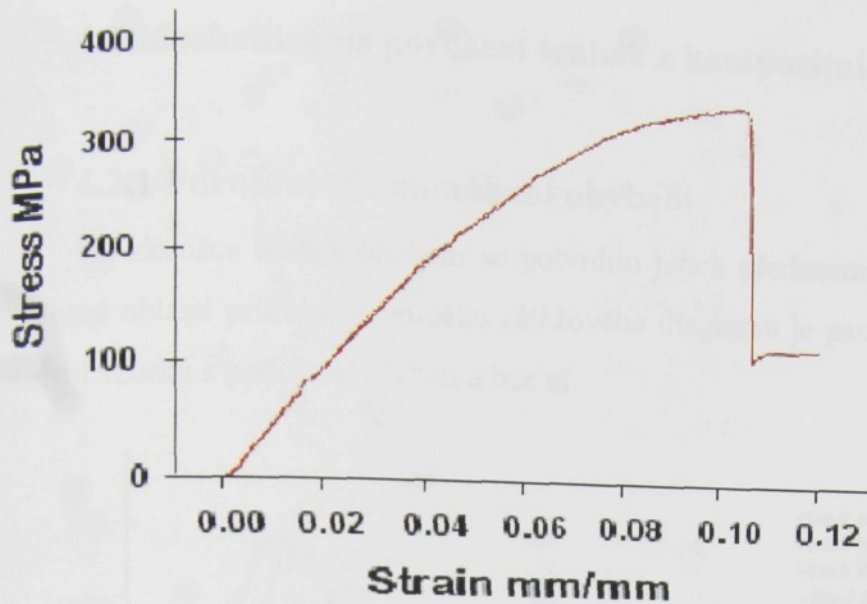


Obr. 49 Skelná tkanina, skladba $[(+45/-45)_2]_s$

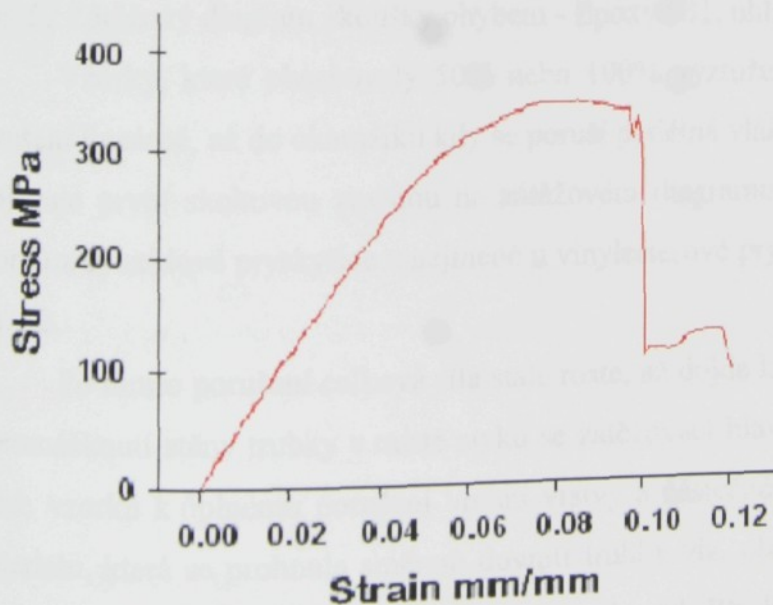
V kritickém stádiu dochází k porušení vláken na vnitřní straně vzorku tlakovým namáháním, u vzorků s pryskyřicí Synolit došlo k delaminaci protisměrných pramenců v místě jejich styku na vnitřní straně vzorku. K úplnému porušení vzorku dojde až při jeho dodatečném dolomení při úhlu ohybu 90° a více.

4.1.6 Vzorky typu „sandwich“

Tyto vzorky byly připraveny pouze z tkanin se skelnou výztuží. Jedná se o skladbu vrstev odpovídající zápisu pro lamináty $[0/90/+45/-45]_s$. Průběh křivky zátěžovacího diagramu odpovídá kompromisu mezi skladbou vrstev s vlákny osnovy 0° a 45° ke směru hlavního namáhání. Křivka není tak strmá - menší modul pružnosti, naopak se projevuje větší podíl plastické deformace. Vzhledem k tomu, že vrstvy s vlákny 0° jsou umístěny na povrchu a vrstvy $\pm 45^\circ$ ve středu vzorku, nedošlo k velkým změnám vlastností oproti vzorkům jen s vlákny osnovy 0° . Je možné předpokládat, že pokud by byly vrstvy $\pm 45^\circ$ umístěny na povrch vzorku budou se výsledné vlastnosti blížit vzorkům se všemi vlákny $\pm 45^\circ$.

Obr. 50 Výztuž 3S, skladba $[0/90/+45/-45]_s$

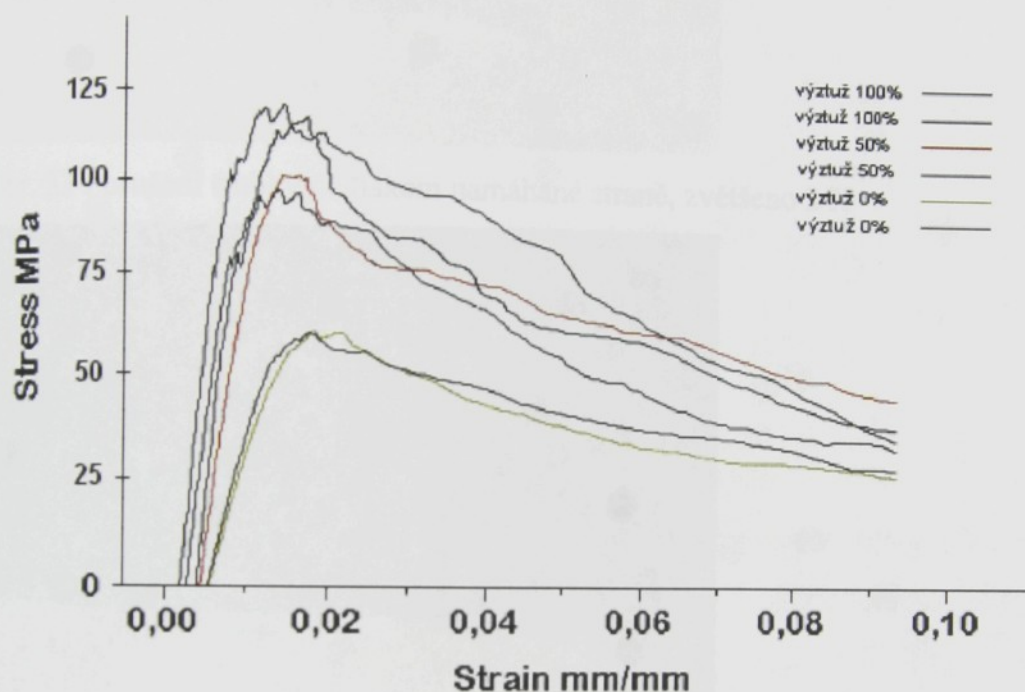
Tomuto odpovídá i princip porušování těchto vzorků, který je téměř identický se vzorky s vlákny osnovy 0° pouze se projevuje větší oblast plastické deformace, což je způsobeno tím, že po prvotním porušení povrchových vrstev začínají přenášet větší část zatížení střední vrstvy $\pm 45^\circ$, které se deformují plasticky. Po úplném porušení vrchních vrstev následuje prudký pokles celkové síly na diagramu viz. obr. 50, který se zastaví na vrstvách $\pm 45^\circ$. K jejich úplnému porušení je třeba následného dolomení, ke kterému dojde až při velkých úhlech ohybu.

Obr. 51 Výztuž 1S, skladba $[0/90/+45/-45]_s$

4.2 Mechanismus porušení trubek z kompozitních materiálů

4.2.1 Porušení při namáhání ohybem

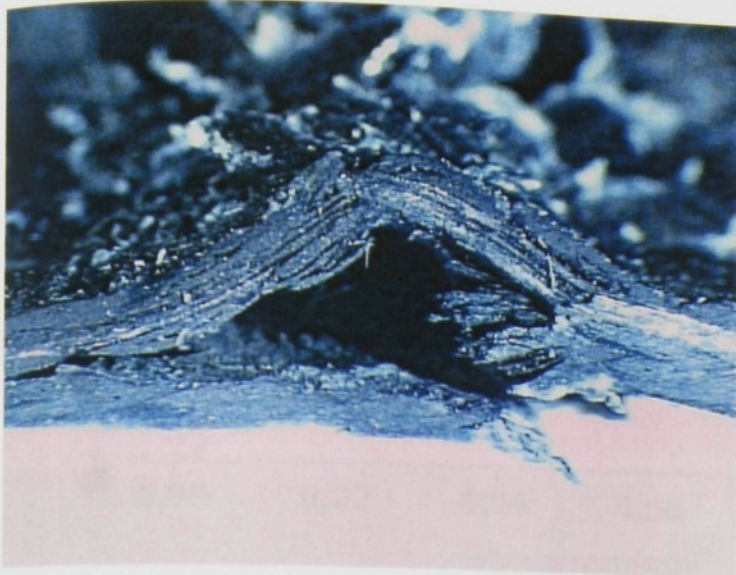
Při zkoušce trubek ohybem se potvrdilo jejich přednostní poškození v tlakem namáhané oblasti průřezu. Z průběhu zátěžového diagramu je patrný rozdíl v prvotním porušení vzorků s podélnou výztuží a bez ní.



Obr. 52 Zátěžový diagram zkoušky ohybem - Epoxy 531, uhlíková vlákna

Vzorky, které obsahovaly 50% nebo 100% výztuže se chovají až do prvního porušení lineárně, až do okamžiku kdy se poruší podélná vlákna na tlakové straně. To se projevuje první skokovou změnou na zátěžovém diagramu, která je nejvíce patrná u vzorků z epoxidové pryskyřice a nejméně u vinylesterové pryskyřice COR VE 8770 viz. obr. 52.

Po tomto porušení celková síla stále roste, až dojde k porušení šikmých vláken a k promáčknutí stěny trubky v místě styku se zátěžovací hlavou. V tomto místě došlo u všech vzorků k úplnému porušení vrchní vrstvy a částečnému porušení spodní vrstvy materiálu, která se prohnula směrem dovnitř trubky viz. obr. 53, důsledkem toho byla lokální delaminace obou vrstev materiálu viz. obr. 54. Při dalším zatěžování docházelo k deformaci trubky na jejích bocích.



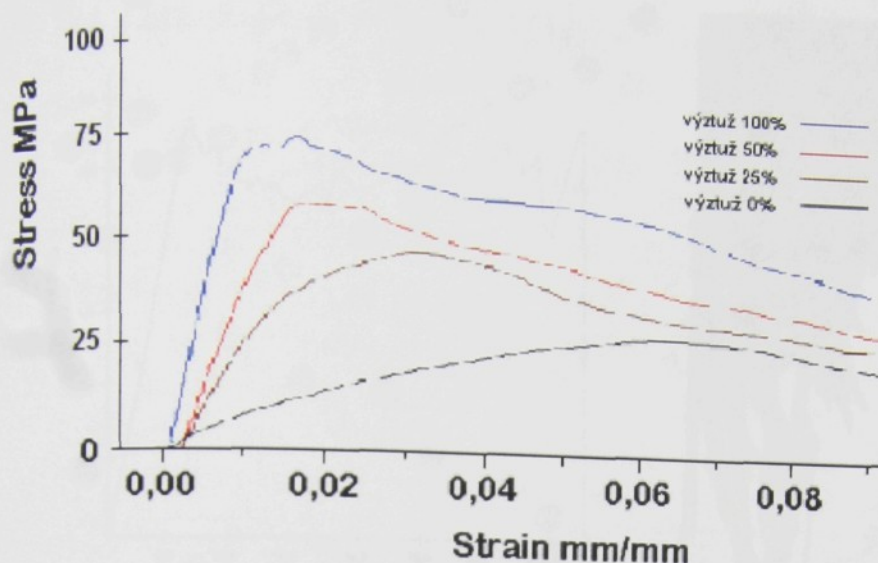
Obr. 53 Porušení trubky na tlakem namáhané straně, zvětšeno 2 X



Obr. 54 Lokální delaminace vzorku, zvětšeno 4 X

U trubek bez vyztužujících vláken chybí na zátěžovém diagramu skok při prvotním porušení. K plastické deformaci dochází pozvolna bez výrazných skokových změn, trubka se začíná deformovat v průřezu, dochází k poškození vláken v místě styku se zatěžovací hlavou a na bocích vzorku v důsledku promáčknutí jeho stěny.

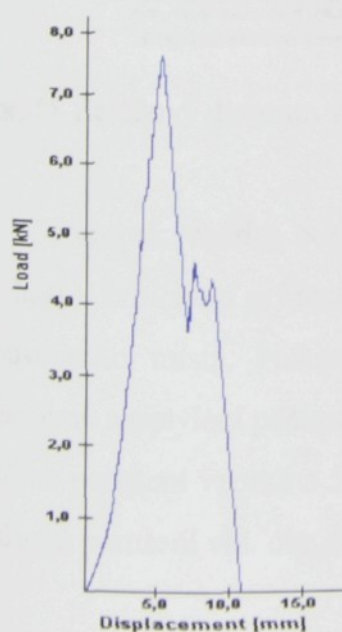
Výjimku představovaly vzorky vytvrzené pryskyřicí ChS Epoxy 422, u kterých došlo k výrazné deformaci matrice, ale nedošlo k žádnému porušení šikmých vláken a pouze k částečnému poškození podélných vláken v závislosti na jejich množství. Po odlehčení se vzorky s časovým zpožděním vrátily téměř do původního tvaru. Průběh zátěžového diagramu je na obr. 55.



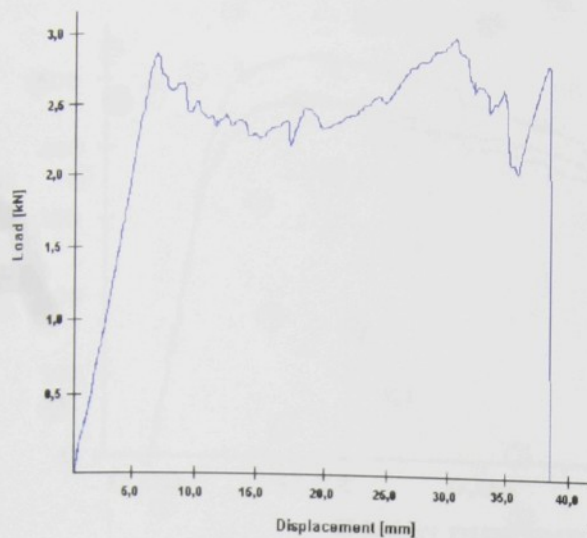
Obr. 55 Průběh zatížení vzorků vytvrzených v matrici ChS Epoxy 422

4.2.2 Porušení při namáhání tahem

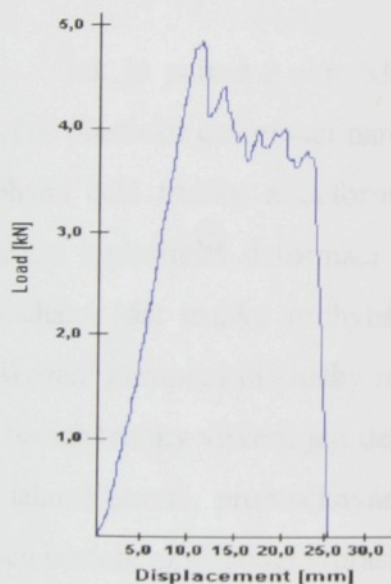
Jak již bylo popsáno, vlastnosti trubek namáhaných tahem jsou velmi závislé na množství podélné výztuže. To samé platí i pro způsob porušení těchto trubek. Zkouška byla provedena na zařízení bez výstupu na počítač, zkušební diagramy jsou naskenovány a proto uveeny jen ilustračně, v souřadnicích síla-prodloužení. U vzorků se 100% podélné výztuže dochází k lineárnímu průběhu zatížení a posléze k náhlému lomu pod úhlem 30° - 70° k ose vzorku bez výraznější plastické deformace viz. obr. 56.



Obr. 56 Zátěžový diagram vzorku se 100% výztuže a fotografie jeho porušení



Obr. 57 Zátěžový diagram vzorku s 0% výztuže a fotografie jeho porušení

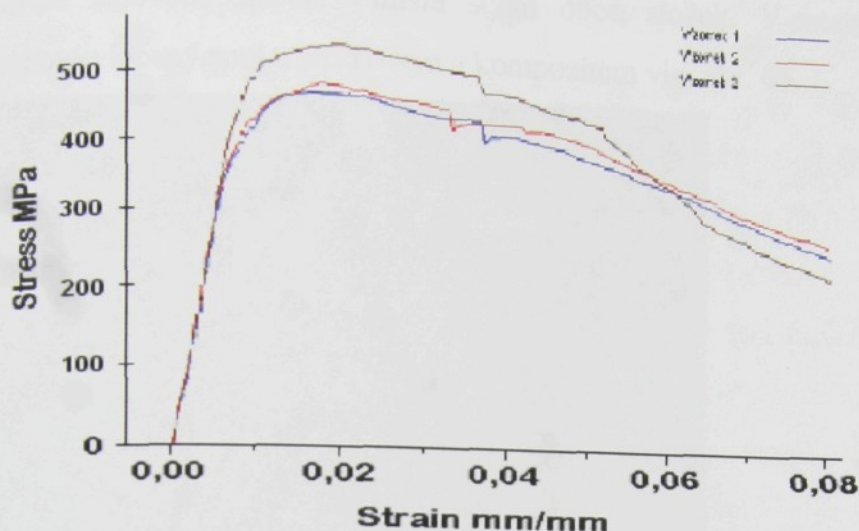


Obr. 58 Zátěžový diagram vzorku s 50% výztuže a fotografie jeho porušení

Naopak vzorky bez podélné výztuže se výrazně plasticky deformují. Nejprve dochází v kritickém průřezu k lokálnímu zúžení vzorku, které postupuje na obě strany z původního místa. Nakonec dochází k přetržení vzorku kolmo k jeho ose a ke značnému rozptýlení poškozených vláken viz. obr. 57.

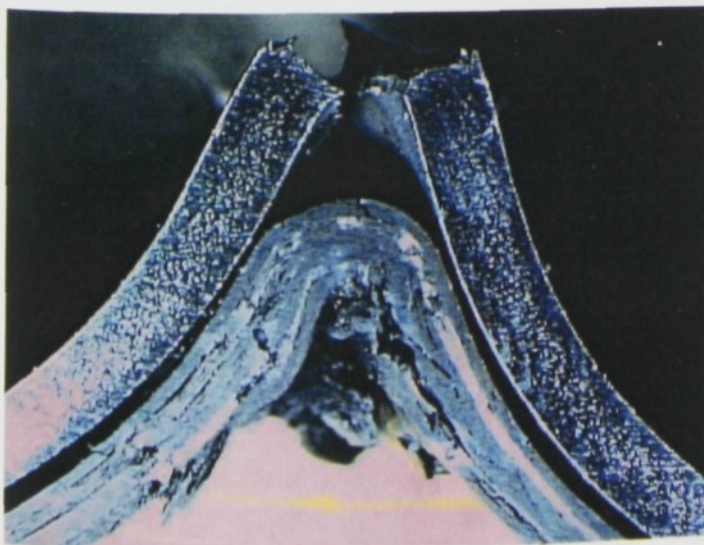
Způsob porušení vzorků s 50% podélné výztuže odpovídá kombinaci obou předchozích způsobů porušení viz. obr. 58.

4.2.3 Porušení trubek Ti3Al2,5V-KOMPOZIT



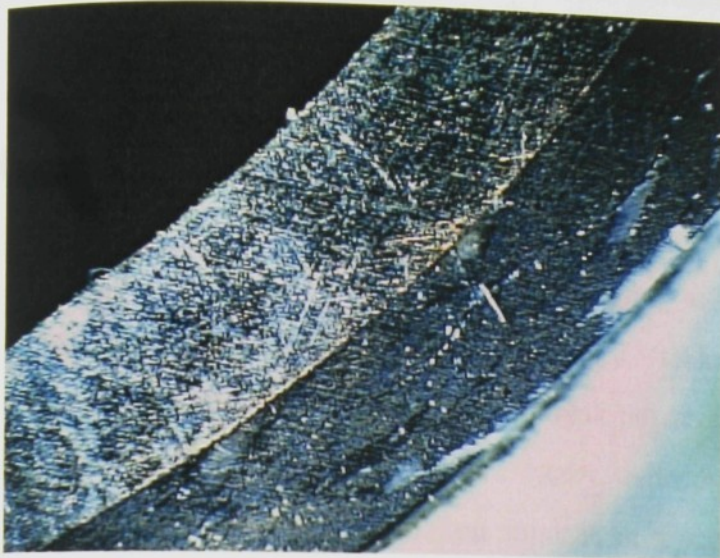
Obr. 63 Zátěžový diagram Ti3Al2,5V-uhlíkový kompozit

Jak je patrné z obr. 63 dochází před porušením tohoto materiálu nejdříve ke značné plastické deformaci narozdíl od čistě kompozitního materiálu. Nejdříve dochází k ohybu celé trubky a deformaci kruhového průřezu v místě největšího napětí, kdy dochází k plastické deformaci pouze u kovové složky materiálu a posléze se tlakem namáhaná část trubky prohýbá směrem ke své ose. V tomto okamžiku začíná první poškození kompozitní složky materiálu v místě nejvyššího tlakového napětí a posléze i na bocích trubky vlivem její deformace. V další fázi porušení pokračuje ohýbání trubky na tahové straně, promačkávání tlakové strany směrem k ose trubky a deformace na jejích bocích, až dochází k prasknutí kovové složky v místě největšího tlakového napětí, což je zřetelně viditelné na zátěžovém diagramu obr. 63 a fotografii porušení obr. 64.



Obr. 64 Detail porušení soustavy Ti-kompozit, zvětšeno 2 X

V tomto místě také zároveň dochází k oddělení kompozitní složky od kovové, vlivem tahového napětí v místě styku obou složek. V ostatních místech zůstává zachován lepený spoj mezi kovem a kompozitem viz. obr. 65.



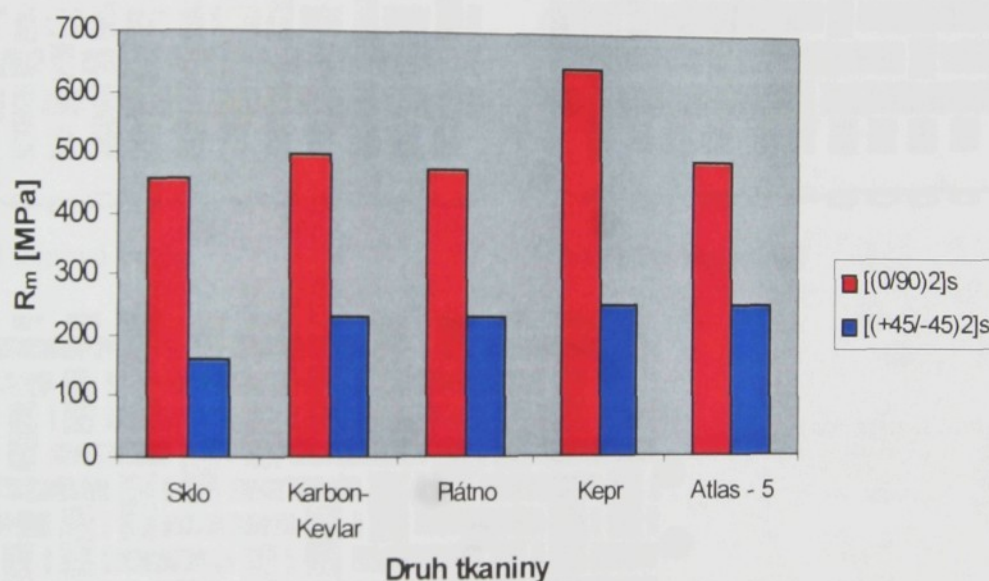
Obr. 65 Detail rozhraní Ti-kompozit, zvětšeno 2 X

4.3 Diskuse výsledků

Návrh struktury kompozitních trubek vychází z analýzy vlastností laminovaných vzorků, u kterých je snazší sledovat proces porušení a vliv jednotlivých faktorů (směr, materiál a zvlnění vláken, pryskyřice atd.) kompozitního materiálu. Na základě navrženého matematického modelu je možné srovnat výpočetní a experimentálně zjištěné hodnoty. Výpočetně by měly nejlepších mechanických vlastností dosahovat vzorky s pokud možno nejmenší hodnotou zvlnění vláken, v pryskyřici s nejvyššími hodnotami mechanických vlastností. Tomu odpovídají vzorky z vinylesterové pryskyřice s výztuží osmivazného atlasu. U těchto vzorků dosahuje matice tuhosti nejvyšších hodnot. Experimentálně se však nepotvrzují výpočetně nejvyšší mechanické hodnoty u atlasové, ale u keprové vazby. Atlasová vazba má sice nejmenší zvlnění vláken, ale tím také jejich nízkou soudržnost v nezalaminovaném stavu, čímž dochází zejména při ručním laminování k narušení struktury vazby a dodatečnému zvlnění vláken ve všech osách. Tento typ je proto vhodný zejména pro tvarově složité výrobky, kde jiné druhy vazeb nemají dostatečnou tvarovou přizpůsobivost.

Experimentálně i výpočtem se potvrdil výrazný vliv způsobu kladení jednotlivých vrstev. Především je výhodné volit pořadí vrstev tak, aby byla vazebná matice **B** [5] v konstitutivních rovnicích rovna nule, což je zajištěno u laminátů symetrických podle střední roviny, kde je vliv každé vrstvy na jedné straně roviny vzorku vyvážen vlivem analogické vrstvy na opačné straně této roviny. Výhodou tohoto vrstvení je eliminace zakřivení nebo zhroucení laminátu při jeho výrobě nebo namáhání [18]. Například, pokud není vliv jedné vrstvy pod úhlem α vyvážen stejnou vrstvou $-\alpha$ na opačné straně vzorku dojde k jeho zkroucení při tuhnutí pryskyřice z vyšší vytvrzovací teploty. Naopak pokud dojde k prohnutí vzorku podle jedné osy jako je tomu u bimetalického pásu, znamená to, že není vyvážena tuhost jednotlivých vrstev (0° , 90°) na obou stranách vzorku. Neposlední výhodou tohoto vrstvení je také značné zjednodušení výpočtových vztahů. Aby byl potlačen rychlý pokles mechanických vlastností po vzniku prvních poruch je také nutné střídat kladení jednotlivých vrstev, nikoli umístit několik vrstev se stejným úhlem za sebou. Tím se zabrání šíření trhlin mezi jednotlivými vrstvami. Je také vhodné neumísťovat vedle sebe vrstvy s velmi rozdílnými hodnotami Poissonových konstant, což by vyvolalo velké mezilaminární pnutí.

Výpočetně byly také zjištěny značné rozdíly v hodnotách matic tuhosti pro jednotlivé typy vzorků, což se projevuje na hodnotách křivosti v okamžiku prvního porušení. U vzorků typu $[(0/90)_2]_s$ dochází pouze k zakřivení v rovině osy x . Zakřivení v rovině osy y je zanedbatelné a křivost k ose z je nulová. Naopak u vzorků typu $[(+45/-45)_2]_s$ jsou zakřivení v rovinách x a y poměrně značná již při výrazně nižších zatíženích než u předešlého typu vzorků. To je způsobeno značným mezilaminárním pnutím na rozhraní dvou vrstev a vlivem volných okrajů, což způsobuje značné prohnutí v rovině osy y . Na volném okraji klesá hodnota mezilaminárního napětí τ_{xy} k nule a rovnováha sil je zachována napětím τ_{xz} a normálním napětím σ_z . To vše napomáhá delaminaci vzorků. Zakřivení v ose z je zanedbatelné v porovnání s ostatními křivostmi. I toto se plně potvrdilo při experimentu.

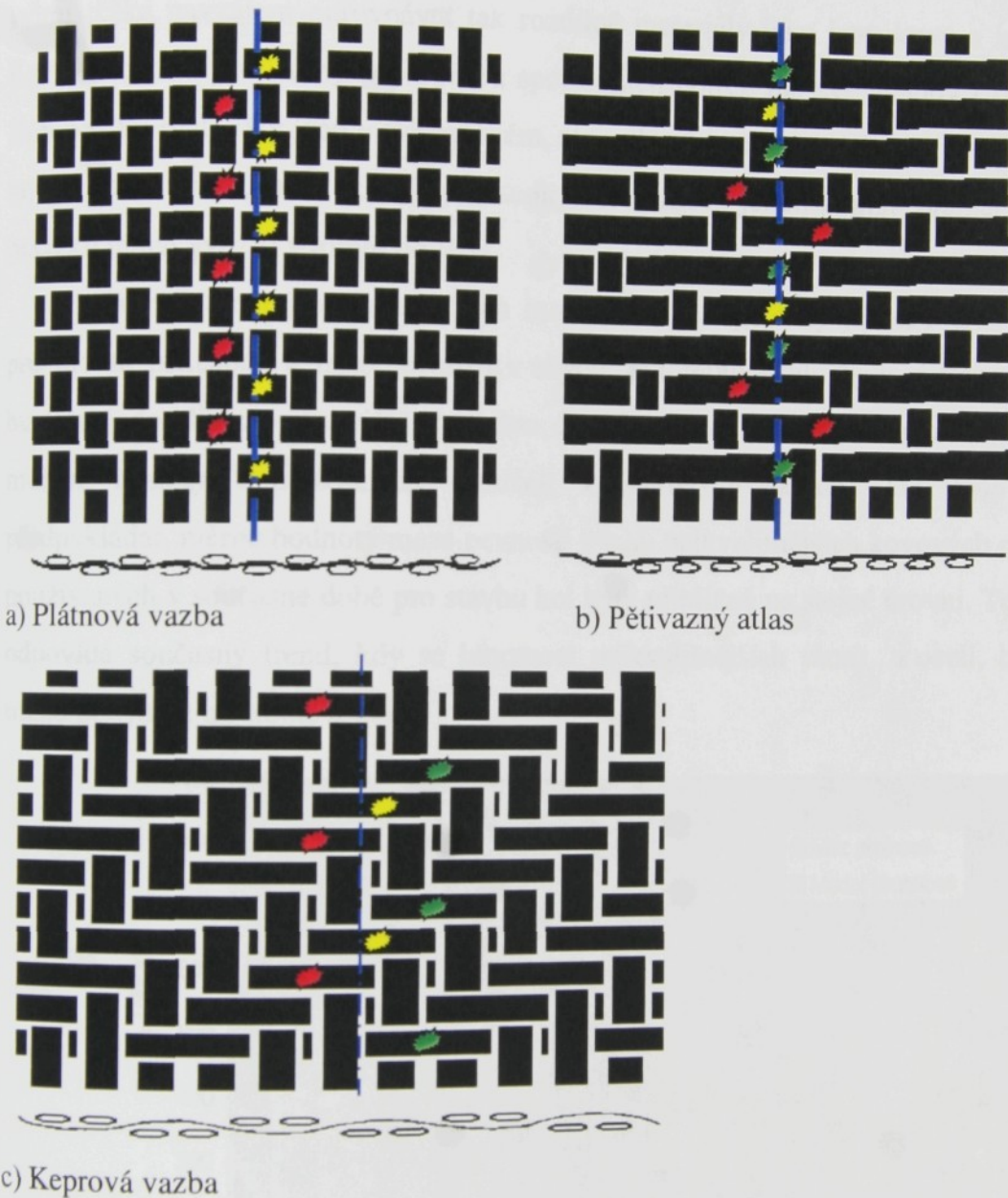


Obr. 66 Vliv výztuže na mez pevnosti v ohybu

Jak je patrné z obr. 66 lze konstatovat podstatně nižší mechanické hodnoty u vzorků s vlákny $[(+45/-45)_2]_s$ než u vzorků $[(0/90)_2]_s$. U vzorků typu $[(+45/-45)_2]_s$ se výrazně projevuje již popsáný vliv mezilaminárního napětí a napětí na volných okrajích vzorku. Dochází tak k jeho výraznému prohnutí ve směru osy y a oddělování vláken vrchní vrstvy na tahové straně od dalších vrstev.

Na rozdíl od výpočtů se experimentálně ukazuje, že rozdíl mezi jednotlivými vazbami daný různým zvlněním jejich vláken je minimální, naopak záleží na způsobu křížení vláken a rozmístění uzlových bodů. To je hlavní důvod, proč vzorky s keprovou vazbou dosahují vyšších mechanických hodnot než ostatní typy. U všech vzorků se totiž

prokazuje přednostní iniciace porušení vláken 0° na tlakem namáhané straně vzorku. První defekty vznikají převážně ve střední části povrchového úseku vláken 0° mezi uzlovými body. Právě rozmístění těchto defektů ovlivňuje výsledné vlastnosti materiálu [38]. Výskyt prvních defektů v pořadí žlutá, červená a zelená barva je graficky znázorněn na obr. 67.



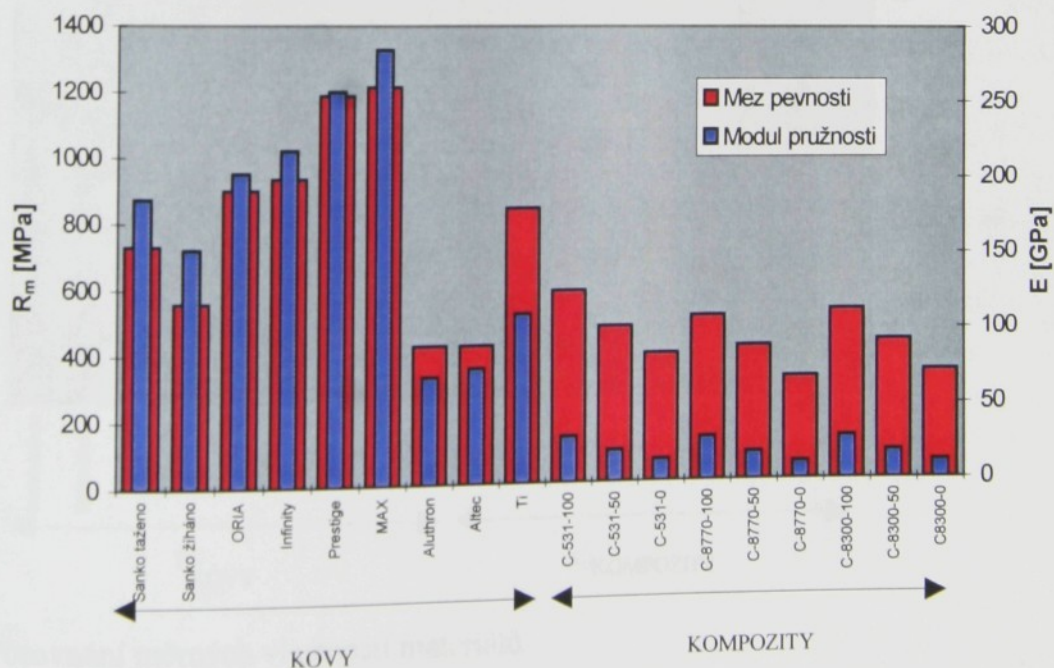
Obr. 67 Schematické znázornění vzniku prvních defektů

U keprové vazby jsou tyto první defekty rozmístěny na větší ploše a ve větší vzdálenosti od lomové roviny než je tomu u ostatních typů vazeb a proto je na další porušování materiálu zapotřebí větší energie. První defekty však vznikají u všech vzorků s uhlíkovými vlákny přibližně při stejných hodnotách. Z experimentálních

výsledků tedy není zcela zřejmý vliv zvlnění podélných vláken na hodnotu napětí při vzniku počátečních defektů, naopak výskyt těchto defektů je výrazně ovlivněn strukturou kompozitu.

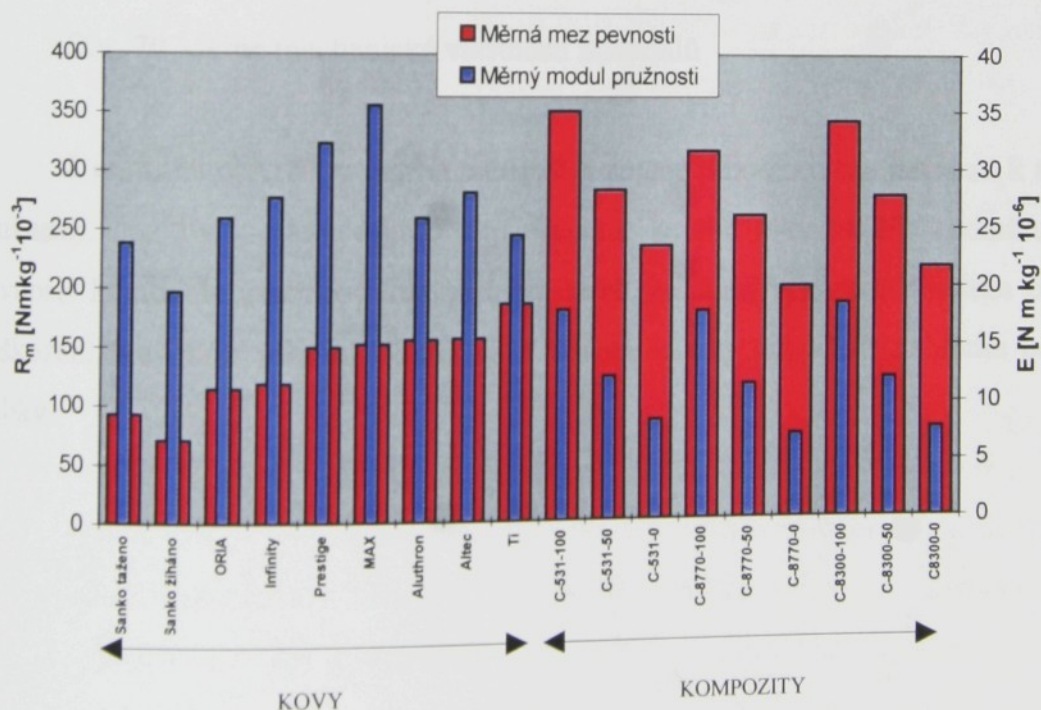
Všechny poznatky získané rozbořem vlastností plochých vzorků byly následně využity při návrhu struktury kompozitní trubky. V případě analýzy vlastností trubek, je velmi těžké navzájem porovnávat tak rozdílné materiály jako jsou kovy a kompozit. Každý materiál používaný pro výrobu sportovních potřeb má své výhody i nevýhody. Kompozitní materiály jsou v cyklistickém, ale celkově i ve sportovním odvětví poměrně novým materiálem, stále existují předsudky o vhodnosti jejich použití pramenící z dob počátku jejich využití v tomto odvětví.

Pro vzájemné porovnání všech materiálů byly spočteny jejich měrné hodnoty pro modul pružnosti a mez pevnosti v ohybu. K tomuto účelu byly zjištěny hodnoty hustoty jednotlivých materiálů metodou dvojího vážení, stejným způsobem jako u měření hustoty laminovaných destiček z uhlíkových tkanin. Jak bylo možné předpokládat, měrné hodnoty meze pevnosti v tahu nejkvalitnějších kovových materiálů používaných v současné době pro stavbu kol byly přibližně na stejné úrovni. Tomu také odpovídá současný trend, kdy se hmotnost nejkvalitnějších rámců z oceli, hliníku a titanu pohybuje na stejné úrovni.



Obr. 68 Porovnání mechanických vlastností materiálů

Z naměřených hodnot především vyplývá značný nepoměr meze pevnosti v tahu vzhledem k modulu pružnosti v tahu mezi kompozitními a kovovými materiály, což je graficky znázorněno na obr. 68. Zde je zřetelně vidět rozdíl v poměru mez pevnosti – modul pružnosti mezi ocelovými a kompozitními materiály. Hliníkové a titanové slitiny jsou vlastnostmi na rozhraní těchto materiálů. Ještě zajímavější je porovnání vlastností stejných materiálů, ovšem přepočtených na měrné hodnoty viz. obr. 69. Graficky je zde opět znázorněn vzájemný poměr měrná mez pevnosti – měrný modul pružnosti, který je u ocelí, hliníkových a částečně i titanových slitin přibližně 2:1, kdežto u kompozitních materiálů je tomu právě naopak 1:2. Znamená to tedy, že takováto kompozitní trubka bude při stejné pevnosti mnohem pružnější než trubka z kovového materiálu. Této vlastnosti kompozitních materiálů může být pro některé aplikace využito jako výhoda, ovšem při použití například pro rám jízdního kola je nutné řešit problém boční tuhosti. Rám zhotovený z takovéto kompozitní trubky by vyhovoval pevnostně, ale při působení silou na pedály jízdního kola by docházelo k mnohem větší pružné deformaci než u kovových materiálů a tím ke ztrátám energie při šlapání.

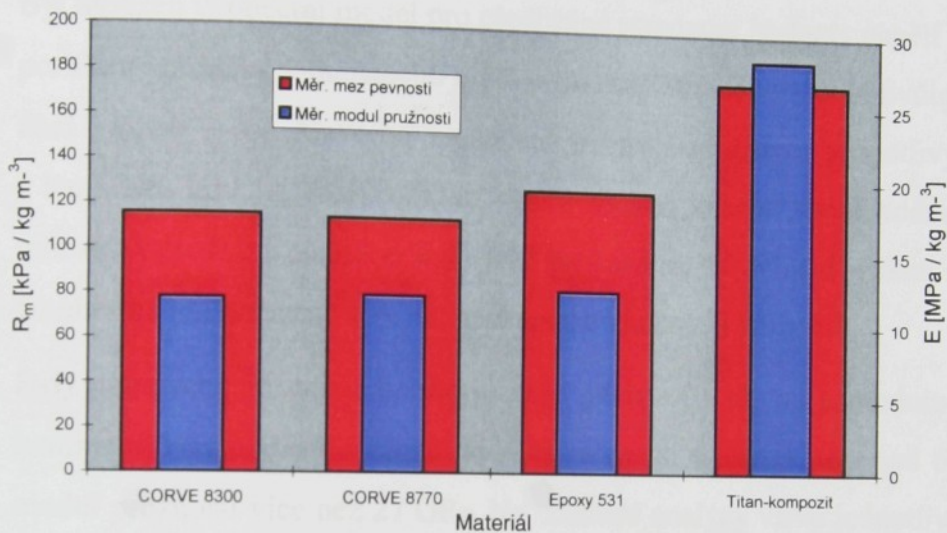


Obr. 69 Porovnání měrných vlastností materiálů

Problém nízkého modulu pružnosti kompozitních trubek se podařilo vyřešit kombinací kompozitu a titanové slitiny, kdy byla tenkostěnná trubka ze slitiny

Ti3Al2,5V opletena uhlíkovými vlákny vytvrzenými v epoxidové pryskyřici. Ukazuje se, že vzájemnou synergií těchto dvou složek dochází k výraznému zvýšení modulu pružnosti tohoto materiálu.

V grafu na obr. 70 jsou pro objektivní posouzení změny vlastností porovnány měrné hodnoty vzorků z materiálu Ti-kompozit proti odpovídajícím vzorkům vyrobeným pouze z kompozitu zkoušených na ohyb.



Obr. 70 Měrné mechanické vlastnosti materiálů

Z grafu na obr. 70 je patrná především změna poměru meze pevnosti k modulu pružnosti, což bylo cílem tohoto experimentu. Kromě výhodnějšího poměru meze pevnosti k modulu pružnosti má tento materiál značnou výhodu z hlediska průběhu poškození, kdy fáze plastické deformace kovové složky zabraňuje náhlému porušení trubky.

5. Závěr

- Byla navržena metodika pro tahovou zkoušku segmentů podélně vyříznutých ze zkoušené trubky tak, aby jednoduchostí a cenovou nenáročností vyhovovala potřebám výrobců rámců jízdních kol. Zároveň byla stanovena závislost úhlu zakřivení segmentu na hodnotě meze pevnosti v tahu, kdy do úhlu 25° jsou výsledky srovnatelné pro segment i celou trubku.
- Byl navržen výpočetní model pro předběžné stanovení hodnoty napětí při prvním porušení laminátu namáhaného ohybovým napětím. Hodnoty ovlivňuje zejména úhel vláken k ose hlavního namáhání a vliv uspořádání jednotlivých vrstev v laminátu, kdy již malý odklon směru vláken značně mění hodnotu matice tuhosti. Výpočetní metodou bylo také prokázáno, že zvlnění vláken způsobené tkaním má jen nepatrný vliv na mechanické vlastnosti laminátů.
- Byly stanoveny skutečné hodnoty meze pevnosti v ohybu a modulu pružnosti laminátů. Maximální dosažené hodnoty pevnosti v ohybu jsou nad 600 MPa a modul pružnosti více než 27 GPa. Na základě analýzy vlivu jednotlivých druhů výztuží a matic na výsledné vlastnosti materiálu je možné konstatovat, že keprová výztuž dosahuje vyšších hodnot než ostatní výztuže, vliv použité pryskyřice je již méně významný.
- Byly porovnány skutečné a výpočetní hodnoty mechanických vlastností laminátů. Vypočtené hodnoty, až na drobné výjimky odpovídají experimentálním výsledkům. Popsanou výpočetní metodu je tedy možné použít pro předběžné stanovení vlastností laminátů zhotovených z tkanin.
- Byly stanoveny a popsány mechanismy porušení laminátů při ohybovém namáhání a vliv struktury kompozitu na způsob jeho porušení. Experimenty prokázaly značný vliv struktury křížení vláken na tlakem namáhané straně vzorku, kde vždy dochází k prvnímu porušení. Tento efekt se nemůže projevit u klasických vrstvených laminátů, kdežto u laminátů připravených z tkanin hraje výraznou roli rozmístění prvních defektů, které je přímo závislé na typu tkaní.
- Byla optimalizována technologie výroby kompozitních trubek splétáním uhlíkových vláken na stroji původně určeném pro splétání polyesterových vláken

a navržen technologický postup výroby trubky z polymerní pryskyřice pro malosériovou výrobu.

- Byl stanoven vliv jednotlivých parametrů splétání na výsledné mechanické vlastnosti trubky při zkoušce tříbodovým ohybem a zkoušce jednoosým tahem. Prokázalo se, že podélná vlákna zvyšují mnohem více modul pružnosti než mez pevnosti trubek a to při namáhání tahem i ohybem.
- Byly stanoveny a popsány mechanismy porušení trubek vyrobených technologií splétání vláken při ohybovém a tahovém namáhání a vliv struktury kompozitu na způsob jeho porušení. Podélná vlákna způsobují linearitu průběhu zatěžovacího grafu až do prvního porušení, které je iniciováno u podélných vláken na tlakem namáhané straně. Podélná vlákna se porušují postupně směrem od místa prvního porušení po obvodu trubky. Vzorky bez podélné výztuže se porušují odlišným způsobem s výraznějším podílem plastické deformace. Při tahovém namáhání podélná vlákna zpevňují trubku ve směru kolmém na osu zatížení a k porušení dochází smykovým napětím pod úhlem 45° . U vzorků bez podélných vláken dochází nejdříve k deformaci a zúžení příčného průřezu trubky, kdy se vlákna nejprve oddělí od matrice a posléze prasknou v nejužším místě v rovině kolmé k ose vzorku.
- Za účelem zvýšení modulu pružnosti trubky z kompozitního materiálu byla navržena trubka systém kov-kompozit. Pro tento systém byly provedeny základní zkoušky, výsledky vyhodnoceny a porovnány s kompozitní trubicí. Rovněž byl analyzován způsob porušení takovéto kombinované trubky. Tento typ materiálu výrazně zvyšuje měrný modul pružnosti a především ovlivňuje průběh porušení tak, že nedochází ke křehkému porušení.

Seznam použitých symbolů a zkratek

[B]	Vazebná matice
$[D_{ij}]$	matice ohybové tuhosti
[Q]	matice tuhosti
[S]	matice poddajnosti
a	amplituda zvlnění
A_c	průřez kompozitu
A_m	Plocha vláken v průřezu trubky
A_y	průřez vlákna
D	průměr trubky
D	vnější průměr trubky
d	vnitřní průměr trubky
E	modulu pružnosti
E_2	Modul pružnosti vrstvy s přímými vlákny ve směru kolmo na vlákna
E_f	modul pružnosti vláken
E_l	Modul pružnosti vrstvy ve směru rovnoběžném s vlákny se zohledněním zvlnění vláken
E_{lp}	Modul pružnosti vrstvy s přímými vlákny ve směru rovnoběžném s vlákny
E_m	modul pružnosti matrice
$e_{x,y,z}$	deformace ve směru x,y,z
F	zatěžovací síla
f	parametru zvlnění vlákna
G_{12p}	modulu pružnosti ve smyku pro vrstvu s přímými vlákny
h	konstanta elasticity
h_i	tloušťka i-té vrstvy laminátu
I	moment setrvačnosti
k	počet vln na definovaném intervalu délky L
$k_{x,y,z}$	křivost vzorku ve směru x,y,z
l	vzdálenost podpěr
M	počet běžců na stroji
m_c	hmotnost vzorku na vzduchu
m_f	hmotnost vláken
m_k	hmotnost vzorku v kapalině
$M_{x,y,z}$	ohybový moment ve směru x,y,z
N	počet pramenů (rovingů)
N_{ply}	počet vrstev materiálu
$N_{x,y,z}$	vnější síla ve směru x,y,z

n_y	počet vláken v průřezu
q	úhel splétání (křížení vláken)
s	šířka pramence
$s_{x,y,z}$	napětí ve směru x,y,z
t	tloušťka jedné vrstvy (pleteniny)
$t_{x,y,z}$	smykové napětí ve směru x,y,z
v_d	objemový podíl dutin v kompozitu
v_f	Objemový podíl vláken
v_f	objemový podíl vláken v kompozitu
v_m	objemový podíl matrice v kompozitu
w	hmotnost pramenu na jednotku délky trubky
W	Hmotnost pleteniny na jednotku délky
y	průhyb vzorku
ρ	skutečná (naměřená) hustota kompozitu
ρ_c	teoretická (vypočtená) hustota kompozitu
ρ_f	hustota vláken
ρ_k	hustota kapaliny
ρ_m	hustota matrice
ρ_v	hustota vzduchu
MMC	metal matrix composite
KKM	kompozity s kovovou maticí
T_g	Teplota skelného přechodu
PAN	Polyakrylnitril
UHM	Ultra high modulus
PPTA	Poly-para-fenylentereftalamid
UHMW PE	Ultra high molecular weight polyethylen
TIG	Tungsten inert gas

Seznam použité literatury:

- [1] <http://www.gtgtandems.com/tech/materials.html>
- [2] <http://www.spectrum-cycles.com/primer.htm>
- [3] <http://www.spectrum-cycles.com/material.htm>
- [4] Bareš A. R.: Kompozitní materiály, SNTL Praha, 1988
- [5] Agarwal B. D., Broutmann L. J.: Vláknové kompozity, SNTL Praha, 1987
- [6] The Composite Materials Handbook MIL-17 vol. 1 Guidelines for Characterization of Structural Materials, Technomic Publishing Company, 1990
- [7] Vigo T.: Composite Applications – The Role of Matrix, Fiber and Interface, VCH Publishers, Inc., 1992
- [8] Macek, Zuna: Nauka o materiálu, ČVUT Praha, 1995
- [9] Figueiredo J.L.: Carbon Fibres Filaments and Composites, Kluwer Academic Publishers, 1990
- [10] Sodomka L. a kol.: Kompozity vyztužené skelnými a uhlíkovými vlákny, jejich technologie, vlastnosti a diagnostika, Výzkumná zpráva TU Liberec, 1994
- [11] Lubin G., Handbook of Composites: Van Nostrand Reinhold, 1982
- [12] Engineered Materials Handbook – Composites Vol. 1, ed. ASM International Handbook Committee, ASTM International, 1987
- [13] Sainsburg-Carter J.B. in Automotive Challenge and Plastic Response, 1987, 193-197
- [14] Lenz T.J. and col.: IEEE Expert/Intelligent systems and their applications, 11 (1996)
- [15] Ramakrishna S., Hull D.: Composites Science and Technology, 49 (1993), 349-356
- [16] Varin R.R. in 27th National SAMPE Symposium and Exhibition, SAMPE, U.S.A., 1982, 659-666
- [17] Karger A. in Sborník Mezioborového semináře doktorandů-MOSD '97, Pernink 1997, 19-25
- [18] Wilkins D.J., Eisemann J.R.: Damage in Composite Materials, ASTM, 1982

- [19] Hamada H., Nakai A., Masui M.: Proceedings of the American Society for Composites, 1996, 1026-1035
- [20] Chiu C.H., Tsai K.-H., Huang W.J.: Composites Science and Technology, 59 (1999), 1713-1723
- [21] Harte A.M., Fleck N.A.: Acta Materialia, 48 (2000), 1259-1271
- [22] Tošenovský J., Naskievičová D.: Statistické metody pro zlepšování jakosti, Montanex a.s., 2000
- [23] Karger A. in Material engineering, ISBN, Liberec 2001, 40-41
- [24] Pluhař J. a kol.: Nauka o materiálech, SNTL Praha, 1989
- [25] Guemes J. A. a kol.: Composites design, Tempus 1997
- [26] Bažant A.: Mechanika polymerov: SNTL Praha, 1968
- [27] Humen V.: Základy mechaniky kompozitních materiálů I, II, VŠST Liberec, 1991
- [28] Karbhari V.M., Haller J.E.: Composite Structures, 43 (1998), 93-108
- [29] Hamada H., Nakai A., Masui M.: Journal of Thermoplastic Composite Materials, 12 (1999), 164-176
- [30] Munjal A. K., Spencer D. F., Rahnenfuehrer E. W., Pickett B. E., Maloney P. F. in 35th National SAMPE Symposium and Exhibition, SAMPE, U.S.A., 1990, 1954-1967
- [31] Karbhari V. M., Falzon P. J.: Journal of Composite Materials, 31 (1997), 1164-1186
- [32] Croon C.: SAMPE - European Chapter, 2 (1983), 1-20
- [33] Adanur S.: Welington Sear Handbook of Industrial Textiles, Technomic Publishing Co., 1992, 133-138
- [34] Flaška M., Štekner B.: Speciální letecké technologie, ČVUT Praha, 1996
- [35] Nakai A., Hamada H., Hoa S.V.: Computer Technology, 326 (1996), 125-130
- [36] Ramakrishna S.: Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14(1995), 1121-1141
- [37] Brown T. S. in Celanese Structural Summit, New Jersey, 1999, 173-187

- [38] Karger A. in Sborník konference Nové materiály a technologie, TU Liberec, Liberec 2000
- [39] Karger A., Karger V. in Vědecká pojednání VII-1. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2001, 203-209

Příloha

Mechanické vlastnosti vybraných kovových trubek

Tab.1 Mechanické vlastnosti trubek

Materiál: Ocel Sanko				
Rozměry: $\varnothing D=25,4$ $t=0,8$				
Stav: Taženo za studena				
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m=780$ MPa				
Vzorek	F_{MAX} [kN]	R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]	Poznámka
1	40,2	650	nezjištěno	trhlina na hranici čelistí
2	44,5	720	10	
3	45,4	735	9,5	
4	45,3	733	9,5	
5	45,1	728	10	
6	45,2	732	10	
7	44,9	728	10,5	
8	45,5	736	9,5	
9	45,3	733	10	
10	45,2	731	10	
Průměr	44,7	722,7		
Průměr bez vzorku č.1	45,2	730,7	9,9	

Tab. 2 Mechanické vlastnosti trubek

Materiál: Ocel Sanko				
Rozměry: $\varnothing D=25,4$ $t=0,8$				
Stav: Žiháno, mořeno				
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m=780$ MPa				
Vzorek	F_{MAX} [kN]	R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]	Poznámka
1	35,0	557	27,5	
2	34,3	556	28,0	
3	35,4	557	27,5	
4	34,2	555	27,0	
5	33,9	555	27,0	
6	35,1	557	28,0	
7	35,5	558	27,5	
8	34,8	556	28,0	
9	34,4	556	27,0	
10	34,9	557	27,5	
Průměr	34,8	556,3	27,5	

Tab. 3 Mechanické vlastnosti trubek

Materiál: Ti3Al,2.5V - Grade 9				
Rozměry: D=20 t=1,24 úhel 20°				
Stav: Taženo za studena				
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m = 860$ MPa				
Vzorek	F_{MAX} [kN]	R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]	Poznámka
1	265,2	844	10,3	
2	259,4	826	10,6	
3	268,7	855	9,9	
4	271,3	864	10,2	
5	257,3	819	10,8	
6	261,2	832	10,7	
7	269,8	859	10,0	
8	254,2	809	10,5	
9	270,6	861	10,5	
10	264,4	841	10,9	
Průměr	264,2	841,0	10,4	

Tab. 4 Mechanické vlastnosti segmentů trubek

Materiál: Ocel Sanko									
Rozměry: D=25,4 t=0,8									
Stav: Taženo za studena									
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m = 780$ MPa									
Mez pevnosti při zkoušce celé trubky: $R_m = 730,72$ MPa									
Úhel segmentu [°]	R_m [MPa]					Průměrná mez pevnosti R_m [Mpa]	Rozptyl	Hodnota test. kritéria	Kritická hodnota test. kritéria
	1	2	3	4	5				
10	732	737	730	739	733	734	15,167	1,364	1,812
15	729	726	725	729	731	728	5,282	1,368	1,782
20	726	739	736	743	745	738	53,233	1,928	1,943
25	736	732	730	733	738	734	9,347	1,388	1,782
30	746	739	749	741	745	744	15,283	5,572	1,812
35	743	759	750	752	749	751	34,800	6,373	1,894
40	773	764	770	779	778	773	40,108	12,824	1,894
45	768	776	772	781	766	773	38,568	12,982	1,894
50	789	782	792	789	788	788	13,423	24,722	1,796
Trubka č. vz./ R_m	1 / 720,0	2 / 735,1	3 / 733,2	4 / 728,4	5 / 732,1	730,7	24,047	-	-
	6 / 727,6	7 / 736,1	8 / 733,2	9 / 730,8	Nezměřeno				

Tab. 5 Mechanické vlastnosti segmentů trubek

Materiál: Ocel Sanko									
Rozměry: D=25,4 t=1,0									
Stav: Žíháno, mořeno									
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m = 780$ MPa									
Mez pevnosti při zkoušce celé trubky: $R_m = 556,25$ MPa									
Úhel segmentu [°]	R_m [MPa]					Průměrná mez pevnosti R_m [Mpa]	Rozptyl	Hodnota test. kritéria	Kritická hodnota test. kritéria
	1	2	3	4	5				
10	556	552	547	558	552	553	17,703	1,018	1,771
15	558	560	565	558	555	559	14,895	0,969	1,771
20	558	549	555	555	560	555	16,483	0,264	1,771
25	562	557	560	548	552	556	30,807	0,107	1,796
30	569	565	551	561	566	562	47,563	1,568	1,833
35	557	567	563	564	568	564	18,158	2,488	1,771
40	582	578	575	582	580	579	9,722	8,356	1,771
45	564	589	577	569	578	575	91,375	3,893	1,894
50	584	585	575	581	577	580	19,412	7,709	1,782
Trubka č. vz./ R_m	1 / 546,7	2 / 550,5	3 /562,2	4 / 568,4	5 / 553,9	556,2	56,733	-	-
	6 / 556,8	7 / 557,5	8 / 546,3	9 / 565,9	10 / 554,3				

Tab. 6 Mechanické vlastnosti trubek Sanko

Materiál: Ocel Sanko		
Rozměry: D=25,4 t=0,8 úhel 20°		
Stav: Taženo za studena		
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m = 780$ MPa		
Vzorek	R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]
1	726	9,5
2	739	10
3	736	10
4	743	9,5
5	745	10
Průměr	738	9,8

Tab. 7 Mechanické vlastnosti trubek Sanko

Materiál: Ocel Sanko		
Rozměry: D=25,4 t=0,8 úhel 20°		
Stav: Žiháno, mořeno		
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m = 780$ MPa		
Vzorek	R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]
1	558	27
2	549	27
3	555	27,5
4	555	27,5
5	560	27
Průměr	555	27,2

Tab. 8 Mechanické vlastnosti trubek Oria

Materiál: Ocel ORIA Vanadium OS		
Rozměry: D=31,7 t=0,8 úhel 20°		
Stav: Taženo za studena		
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m = 750$ MPa		
Vzorek	R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]
1	907	9
2	889	9,5
3	902	9
4	894	9,5
5	905	9
Průměr	899	9,2

Tab. 9 Mechanické vlastnosti trubek Tange Infinity

Materiál: Ocel Tange Infinity		
Rozměry: D=28,6 t=0,9 úhel 20°		
Stav: Taženo za studena		
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m = 800$ MPa		
Vzorek	R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]
1	924	11
2	957	10,5
3	919	11
4	931	11
5	941	11
Průměr	934	10,9

Tab. 10 Mechanické vlastnosti trubek Tange Prestige

Materiál: Ocel Tange Prestige		
Rozměry: $D=34,8$ $t=0,6$ úhel 20°		
Stav: Taženo za studena		
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m=1250$ MPa		
Vzorek	R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]
1	1181	19
2	1185	19,5
3	1177	19,5
4	1196	19
5	1191	19
Průměr	1186	19,2

Tab. 11 Mechanické vlastnosti trubek Columbus Aluthron

Materiál: Columbus Aluthron Al-Zn-Mg		
Rozměry: $D=35$ $t=1,8$ úhel 20°		
Stav: Precipitačně vytvrzeno T6		
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m=\min 410$ MPa		
Vzorek	R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]
1	421	10,5
2	417	11
3	419	10,5
4	425	11
5	425	10,5
Průměr	422	10,7

Tab. 12 Mechanické vlastnosti trubek Columbus Altec

Materiál: Columbus Altec Al-Mg		
Rozměry: $D=35$ $t=1,8$ úhel 20°		
Stav: Taženo za studena		
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m=420$ MPa		
Vzorek	R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]
1	423	9
2	419	9,5
3	415	9
4	425	9
5	423	9,5
Průměr	421	9,2

Tab. 13 Mechanické vlastnosti trubek Columbus Max

Materiál: Columbus Max - Nivacorm		
Rozměry: $D=37,3/26,1$ $t=0,7/0,4$ úhel 20°		
Stav: Taženo za studena		
Mez pevnosti udávaná výrobcem: $R_m=1200$ MPa		
Vzorek	R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]
1	1191	12,5
2	1236	12
3	1215	12
4	1196	12,5
5	1226	12
Průměr	1213	12,2

Přehled značení plochých vzorků z kompozitních materiálů

Tab.14 Přehled značení vzorků

Označení vzorku	Materiál matrice	Materiál výztuže, vazba tkaniny	Směr jednotlivých vrstev ke směru hlavního namáhání
1S SY	SYNOLIT	sklo 1S	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
3S SY	SYNOLIT	sklo 3S	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
1S SY 45	SYNOLIT	sklo 1S	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
3S SY 45	SYNOLIT	sklo 3S	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
1S SY SE	SYNOLIT	sklo 1S	Vrstvy pod úhlem 0°, +45°, -45°, 90°
3S SY SE	SYNOLIT	sklo 3S	Vrstvy pod úhlem 0°, +45°, -45°, 90°
KK SY	SYNOLIT	karbon-kevlar	Vrstvy pod úhlem 0°, +90°, +180°, -90°
KK SY 45	SYNOLIT	karbon-kevlar	Vrstvy pod úhlem +45°, -45°, +45°, -45°
KT SY	SYNOLIT	uhlík,plátno	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
CE SY	SYNOLIT	uhlík,kepr	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
CE SY 45	SYNOLIT	uhlík,kepr	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
A5 SY	SYNOLIT	uhlík,5-ti vazný atlas	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
A5 SY 45	SYNOLIT	uhlík,5-ti vazný atlas	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
A8 SY	SYNOLIT	uhlík,8-mi vazný atlas	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
1S CO	COR VE 8300	sklo 1S	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
3S CO	COR VE 8300	sklo 3S	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
1S CO 45	COR VE 8300	sklo 1S	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
3S CO 45	COR VE 8300	sklo 3S	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
1S CO SE	COR VE 8300	sklo 1S	Vrstvy pod úhlem 0°, +45°, -45°, 90°
3S CO SE	COR VE 8300	sklo 3S	Vrstvy pod úhlem 0°, +45°, -45°, 90°
KK CO	COR VE 8300	karbon-kevlar	Vrstvy pod úhlem 0°, +90°, +180°, -90°
KK CO 45	COR VE 8300	karbon-kevlar	Vrstvy pod úhlem +45°, -45°, +45°, -45°
KT CO	COR VE 8300	uhlík,plátno	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
KT CO 45	COR VE 8300	uhlík,plátno	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
CE CO	COR VE 8300	uhlík,kepr	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
CE CO 45	COR VE 8300	uhlík,kepr	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
A5 CO	COR VE 8300	uhlík,5-ti vazný atlas	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
A5 CO 45	COR VE 8300	uhlík,5-ti vazný atlas	Všechny vrstvy pod úhlem 45°

Označení vzorku	Materiál matrice	Materiál výztuže, vazba tkaniny	Směr jednotlivých vrstev ke směru hlavního namáhání
A8 CO	COR VE 8300	uhlík, 8-mi vazný atlas	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
A8 CO 45	COR VE 8300	uhlík, 8-mi vazný atlas	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
1S NO	NORPOL	sklo 1S	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
3S NO	NORPOL	sklo 3S	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
1S NO 45	NORPOL	sklo 1S	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
3S NO 45	NORPOL	sklo 3S	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
1S NO SE	NORPOL	sklo 1S	Vrstvy pod úhlem 0°, +45°, -45°, 90°
3S NO SE	NORPOL	sklo 3S	Vrstvy pod úhlem 0°, +45°, -45°, 90°
1S CH	ChS 145	sklo 1S	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
3S CH	ChS 145	sklo 3S	Všechny vrstvy pod úhlem 0°
1S CH 45	ChS 145	sklo 1S	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
3S CH 45	ChS 145	sklo 3S	Všechny vrstvy pod úhlem 45°
1S CH SE	ChS 145	sklo 1S	Vrstvy pod úhlem 0°, +45°, -45°, 90°
3S CH SE	ChS 145	sklo 3S	Vrstvy pod úhlem 0°, +45°, -45°, 90°

Legenda k Tab.14

SYNOLIT.....SYNOLIT K 0175

COR VE 8300.....NORPOL COR VE 8300

NORPOL.....NORPOL 200-800

POLYESTER 145.....POLYESTER ChS 145

sklo 1S.....skelná tkanina s plátňovou vazbou,
240g/m²

sklo 3S.....skelná tkanina s plátňovou vazbou,
301g/m²

Vlastnosti laminovaných vzorků

Tab.15 Hustota vzorků

Materiál	m_1 [g]	m_2 [g]	Hustota ρ [g/cm ³]	m_c [g]	v_d [%]	v_f [%]
S1 CO	7,52	4,45	1,982	1,504	1,66	62,8
S1 SY	7,17	4,32	2,036	1,434	2,35	65,5
S1 NO	5,87	3,47	1,979	1,174	2,58	61,8
S1 CH	6,47	3,75	1,925	1,294	3,68	57,3
S3 CO	6,75	4,10	2,061	1,350	2,06	68,1
S3 SY	6,52	4,50	2,136	1,304	3,54	72,3
S3 NO	8,77	4,95	1,858	1,253	2,87	53,6
S3 CH	8,22	4,57	1,823	1,644	3,69	50,2
S1 SY SE	6,38	3,78	1,986	1,276	3,10	62,1
S1 CO SE	6,75	3,86	1,890	1,350	3,89	56,7
S1 NO SE	5,90	3,50	1,990	1,180	3,65	62,6
S1 CH SE	6,77	3,85	1,876	1,354	3,95	53,9
S3 SY SE	7,45	4,25	1,884	1,490	3,24	55,1
S3 CO SE	7,78	4,52	1,931	1,556	3,03	59,4
S3 NO SE	7,17	4,12	1,903	1,434	3,51	56,7
S3 CH SE	7,92	4,50	1,874	1,584	3,82	55,8
KK SY	6,80	2,55	1,295	1,360	1,67	54,6
KK CO	6,72	2,50	1,289	1,344	1,15	59,6
KT SY	7,57	3,22	1,409	1,343	2,04	53,9
KT CO	5,37	2,52	1,525	1,893	1,29	57,0
CE SY	8,75	4,00	1,506	1,750	2,31	63,5
CE CO	6,85	3,50	1,658	1,370	1,98	61,2
A5 SY	11,65	5,20	1,422	2,330	2,59	54,3
A5 CO	9,82	4,00	1,366	1,964	2,83	58,1
A8 SY	11,52	4,80	1,388	2,304	3,69	31,8
A8 CO	11,52	4,55	1,388	2,304	3,84	31,8

Legenda k tab.15

- m_1 hmotnost vzorků měřená na vzduchu
 m_2 hmotnost vzorků měřená při ponoření do kapaliny
 m_c hmotnost jednoho vzorku
 v_f objemové množství výztuže v kompozitu
 v_d objemový podíl dutin
 ρ skutečná hustota kompozitu

Tab.16 Mechanické vlastnosti laminátů s výztuží 1S

Materiál vzorku	Modul [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
1S SY	14260	839	430	20,0	7,6	0,7
1S CO	15140	1245	460	38,6	6,6	0,1
1S NO	12570	1512	380	36,4	10,9	1,2
1S CH	10940	1876	340	41,9	9,4	0,5
1S SY 45	4480	866	160	20,8	9,0	0,9
1S CO 45	4690	624	160	16,5	10,5	1,1
1S NO 45	5240	111	140	4,3	10,2	0,9
1S CH 45	5910	630	150	8,9	9,1	0,6
1S SY SE	10570	1579	280	27,8	9,2	0,4
1S CO SE	11540	1731	340	31,6	9,3	0,3
1S NO SE	12050	2163	350	49,4	9,5	0,6
1S CH SE	8170	1147	290	29,2	8,8	0,8

Tab.17 Mechanické vlastnosti laminátů s výztuží 3S

Materiál vzorku	Modul [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
3S SY	11240	1021	360	29,7	10,3	0,7
3SCO	11820	1135	420	44,8	8,1	0,7
3S NO	11460	1387	400	31,6	8,8	0,4
3S CH	7490	705	300	32,8	7,6	0,6
3S SY 45	5070	161	150	7,4	8,9	0,7
3S CO 45	4980	645	200	14,3	9,3	1,1
3S NO 45	5110	480	190	15,2	11,2	1,1
3S CH 45	3390	690	130	12,8	9,4	0,8
3S SY SE	9270	1011	330	30,4	7,6	0,4
3S CO SE	10930	776	390	10,6	7,2	0,3
3S NO SE	10820	1389	390	33,7	8,6	0,2
3S CH SE	9040	1803	340	51,6	8,0	0,6

Tab.18 Mechanické vlastnosti laminátů s výztuží z uhlíkových vláken a s hybridní výztuží

Materiál vzorku	Modul [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
KK SY	19220	1244	480	31,8	3,3	0,5
KK CO	19420	2586	500	18,8	4,5	0,3
KK SY 45	6960	834	220	14,5	6,2	0,9
KK CO 45	6940	307	230	6,1	7,2	0,8
KT SY	21340	1946	450	15,7	2,3	0,5
KT CO	19330	2015	470	72,9	4,0	0,6
KT CO 45	5880	226	230	9,3	7,6	1,1
CE SY	26800	1444	630	44,2	2,7	0,2
CE CO	27420	3045	640	30,6	3,1	0,4
CE SY 45	6530	1190	230	26,7	5,7	0,3
CE CO 45	5910	475	250	11,0	6,6	0,3
A5 SY	24130	2311	520	34,5	2,0	0,2
A5 CO	25980	2305	490	40,5	1,8	0,1
A5 SY 45	5850	548	230	10,0	5,8	0,4
A5 CO 45	5820	494	250	10,4	5,3	0,2
A8 SY	18150	1652	500	39,2	1,9	0,3
A8 CO	13440	2277	490	21,0	2,8	0,4
A8 CO 45	9970	731	270	4,7	2,7	0,2

Poznámka: V tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty zpracované z naměřených dat na software INSTRON SERIES IX

Vlastnosti kompozitních trubek

Tab.19 Vliv podélné výztuže na mechanické vlastnosti kompozitních trubek ze skelných vláken

Matrice	Podélná výztuž [%]	Modul [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
8300	100	12,2	1,1	103	5,32	4,1	0,7
8300	50	11,6	1,2	96	4,11	3,9	0,8
8300	25	10,9	0,7	80	2,06	4,1	0,6
8300	0	8,2	0,9	77	6,15	5,6	0,7
8770	100	12,9	1,3	115	8,05	6,0	0,9
8770	50	11,1	1,0	100	5,62	4,6	0,5
8770	25	10,4	72,0	80	4,35	6,1	0,8
8770	0	7,9	1,1	76	7,14	6,1	0,8
422	100	7,9	0,6	71	3,19	6,0	0,6
422	50	5,4	0,6	58	6,37	7,0	0,8
422	25	4,6	0,7	59	3,71	11,5	1,0
422	0	3,8	0,5	54	2,68	25,4	1,0
531	100	13,4	1,1	128	4,57	5,5	0,6
531	50	11,9	1,0	119	3,15	6,4	0,6
531	25	10,3	0,7	111	2,11	6,6	0,6
531	0	8,5	0,7	110	1,89	6,7	0,5
ChS	100	10,4	0,8	73	5,39	4,9	0,4
ChS	50	8,6	1,0	64	4,97	5,0	0,5
ChS	25	7,6	0,6	58	5,81	4,8	0,4
ChS	0	6,9	0,9	55	6,05	6,8	0,5

Vlastnosti kompozitních trubek

Tab.19 Vliv podélné výztuže na mechanické vlastnosti kompozitních trubek ze skelných vláken

Matrice	Podélná výztuž [%]	Modul [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
8300	100	12,2	1,1	103	5,32	4,1	0,7
8300	50	11,6	1,2	96	4,11	3,9	0,8
8300	25	10,9	0,7	80	2,06	4,1	0,6
8300	0	8,2	0,9	77	6,15	5,6	0,7
8770	100	12,9	1,3	115	8,05	6,0	0,9
8770	50	11,1	1,0	100	5,62	4,6	0,5
8770	25	10,4	72,0	80	4,35	6,1	0,8
8770	0	7,9	1,1	76	7,14	6,1	0,8
422	100	7,9	0,6	71	3,19	6,0	0,6
422	50	5,4	0,6	58	6,37	7,0	0,8
422	25	4,6	0,7	59	3,71	11,5	1,0
422	0	3,8	0,5	54	2,68	25,4	1,0
531	100	13,4	1,1	128	4,57	5,5	0,6
531	50	11,9	1,0	119	3,15	6,4	0,6
531	25	10,3	0,7	111	2,11	6,6	0,6
531	0	8,5	0,7	110	1,89	6,7	0,5
ChS	100	10,4	0,8	73	5,39	4,9	0,4
ChS	50	8,6	1,0	64	4,97	5,0	0,5
ChS	25	7,6	0,6	58	5,81	4,8	0,4
ChS	0	6,9	0,9	55	6,05	6,8	0,5

Tab.20 Mechanické vlastnosti trubek při zkoušce tahem

Materiál vláken : skelná vlákna				
Pryskyřice : ChS Polyester 141				
Typ vzorku : dvojité stěna, úhel křížení 55°, vytvrzeno při 20 °C				
Vzorek	Výztuž [%]	E [GPa]	R _m [MPa]	Poznámka
1	25	9,3	68	prasklina na hranici čelistí
2	25	10,1	96	
3	25	10,2	102	
4	25	9,8	104	
5	25	10,0	103	
Průměr		9,92	95,2	Průměr bez vzorku č.1: R_m=101,87 MPa; E=10,07 GPa
1	50	12,6	168	
2	50	11,8	152	
3	50	12,0	145	
4	50	11,9	142	
5	50	12,5	171	
Průměr		12,20	156,3	
1	100	15,2	241	
2	100	14,8	263	
3	100	15,3	235	
4	100	14,2	198	prasklina na hranici čelistí
5	100	15,0	233	
Průměr		14,95	234,51	Průměr bez vzorku č.4: R_m=243,49 MPa; E=15,12 GPa

Tab.21 Mechanické vlastnosti trubek při zkoušce tahem

Materiál vláken : Uhlíková vlákna Torayca T800				
Typ vzorku : dvojité stěna, úhel křížení 42°				
Pryskyřice: Epoxy 531, vytvrzeno 48 h při 25 °C				
Vzorek	Výztuž [%]	E [GPa]	R _m [MPa]	Poznámka
1	0	14,0	391	
2	0	14,2	402	
3	0	14,4	387	
4	0	14,5	385	
5	0	14,0	391	
Průměr		14,28	391,74	
1	50	20,5	476	
2	50	20,8	471	
3	50	19,9	433	prasklina na hranici čelistí
4	50	20,8	476	
5	50	20,6	478	
Průměr		20,56	467,36	Průměr bez vzorku č.3: R_m=475,83 MPa; E=20,72 GPa
1	100	30,1	581	
2	100	29,8	583	
3	100	30,3	590	
4	100	30,2	591	
5	100	29,6	552	prasklina na hranici čelistí
Průměr		30,05	579,66	Průměr bez vzorku č.5: R_m=586,50 MPa; E=30,15 GPa

Tab.22 Mechanické vlastnosti trubek při zkoušce tahem

Materiál vláken : Uhlíková vlákna Torayca T800				
Typ vzorku : dvojité stěna, úhel křížení 42°				
Pryskyřice: COR VE 8770, vytvrzeno 24 h při 60 °C				
Vzorek	Výztuž [%]	E [GPa]	R _m [MPa]	Poznámka
1	0	11,2	315	
2	0	11,6	310	
3	0	11,0	321	
4	0	11,9	309	
5	0	11,3	322	
Průměr		11,45	315,90	
1	50	18,3	411	
2	50	18,6	407	
3	50	18,1	416	
4	50	18,4	412	
5	50	18,6	420	
Průměr		18,43	413,64	
1	100	29,0	509	
2	100	28,4	499	
3	100	28,6	505	
4	100	28,8	510	
5	100	28,4	508	
Průměr		28,69	506,66	

Tab.23 Mechanické vlastnosti trubek při zkoušce tahem

Materiál vláken : Uhlíková vlákna Torayca T800				
Typ vzorku : dvojité stěna, úhel křížení 42°				
Pryskyřice: COR VE 8300, vytvrzeno 24 h při 60 °C				
Vzorek	Výztuž [%]	E [GPa]	R _m [MPa]	Poznámka
1	0	12,0	326	
2	0	11,3	311	prasklina na hranici čelistí
3	0	11,6	343	
4	0	11,9	328	
5	0	12,1	341	
Průměr		11,84	330,26	Průměr bez vzorku č.2: R_m=334,98 MPa; E=11,95 GPa
1	50	19,0	430	
2	50	18,6	421	
3	50	18,9	436	
4	50	18,4	432	
5	50	18,7	428	
Průměr		18,78	429,82	
1	100	27,9	521	
2	100	28,6	517	
3	100	28,7	526	
4	100	28,3	529	
5	100	27,5	497	prasklina na hranici čelistí
Průměr		28,25	518,38	Průměr bez vzorku č.5: R_m=523,70 MPa; E=28,42 GPa

Tab. 24 Měrné hodnoty testovaných materiálů

Materiál	Hustota [kg m ⁻³]	Modul pružnosti [GPa]	Měrný modul pružnosti [MPa / kg m ⁻³]	Pevnost [MPa]	Měrná mez pevnosti [kPa / kg m ⁻³]
Sanko taženo za studena	7856	187,1	23,8	730	93
Sanko žiháno, mořeno	7863	154,4	19,6	560	71
ORIA Vanadium OS	7871	203,8	25,9	900	114
Tange Infinity	7895	218,5	27,7	930	118
Tange Prestige	7952	256,9	32,3	1190	149
Columbus MAX	7991	284,1	35,6	1210	152
Columbus Aluthron	2712	70,3	25,9	420	155
Columbus Altec	2691	75,6	28,1	420	156
Ti3AL2,5V	4531	110,8	24,5	840	186
C-531-100	1672	30,2	18,0	590	351
C-531-50	1683	20,7	12,3	480	283
C-531-0	1669	14,3	8,6	390	235
C-8770-100	1603	28,7	17,9	500	316
C-8770-50	1588	18,4	11,6	410	260
C-8770-0	1581	11,5	7,2	320	200
C-8300-100	1530	28,4	18,6	520	342
C-8300-50	1548	18,8	12,1	430	278
C8300-0	1545	12,0	7,7	330	217

Legenda k Tab. 24

- C-531-100 uhlíková vlákna, matrice Epoxy 531, 100% podélné výztuže
- C-531-50 uhlíková vlákna, matrice Epoxy 531, 50% podélné výztuže
- C-531-0 uhlíková vlákna, matrice Epoxy 531, 0% podélné výztuže
- C-8770-100 uhlíková vlákna, matrice COR VE 8770, 100% podélné výztuže
- C-8770-50 uhlíková vlákna, matrice COR VE 8770, 50% podélné výztuže
- C-8770-0 uhlíková vlákna, matrice COR VE 8770, 0% podélné výztuže
- C-8300-100 uhlíková vlákna, matrice COR VE 8300, 100% podélné výztuže
- C-8300-50 uhlíková vlákna, matrice COR VE 8300, 50% podélné výztuže
- C8300-0 uhlíková vlákna, matrice COR VE 8300, 0% podélné výztuže