TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Pavel Trupl

Katedra mechanických technologií

2000

Technická univerzita v Liberci
Fakulta textilní
obor 31 - 12 - 8

Technologie textilu a oděvnictví
zaměření: Pletení
Katedra mechanických technologií

Dutinné splétané struktury pro výrobu kompozitů

Pavel Trupl

KME

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Bohumila Košková, CSc.
Konzultant: Ing. Martin Krula, Ing. Irena Plachá

Rozsah práce a příloh: 84
Počet obrázků: 38
Počet tabulek: 27
Počet příloh: 2

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Katedra mechanických technologií **Školní rok 1998/1999**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pro **Pavla TRUPLA**

obor **31- 12- 8 technologie textilu a oděvnictví**

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 172/1990 Sb. O vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Dutinné splétané struktury pro výrobu kompozitů**

Zásady pro vypracování

1. Zhodnoťte praktické využití kompozitů s dutinnou výztuží, zhotovenou technologiemi splétání a navíjení.
2. Navrhněte způsob realizace splétaného výrobku na splétacím stroji PSJ 64/1, včetně vhodných vazeb.
3. Popište strukturální vady splétaných dutinných výztuží. Definujte tyto vady, jejich vznik a vliv na vlastnosti.
4. Určete základní mechanicko-fyzikální vlastnosti S-P a C-P kompozitů vytvořených z těchto výztuží.
5. U vzorků proveďte technicko-ekonomické zhodnocení a na základě mechanicko-fyzikálních výsledků doporučte jejich použití.

KME/PL
73 s., 11 s. příl.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1329, Liberec 1
PSČ 461 17

V126/2000 T

Rozsah grafických prací:
Rozsah průvodní zprávy: cca 50 stran
Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomové práce: Doc.Ing. Bohumila Košková,CSc
Konzultant: Ing. Martin Krula, Ing. Irena Plachá

Zadání diplomové práce: 30.10.1997
Termín odevzdání diplomové práce: 28.05.1998.

L.S.

Vedoucí katedry:

Prof.Ing.Petr Ursíny,DrSc

Děkan:

Prof.Ing.Jiří Militký,C

V Liberci dne 30. 10. 1998.

ANOTACE

Tato práce se zabývá tvorbou splétaných dutinných výztuží na splétacím stroji PSJ 64/1, vyrobeném firmou DOTEX, Nový Jičín. Pro výrobu výztuží z uhlíkových a skleněných vláken musely být upraveny některé pracovní části stroje, jejichž popis je uveden. Tyto výztuže sloužily dále k výrobě kompozitů, na kterých byly provedeny základní mechanické zkoušky. Výsledky těchto zkoušek byly využity ke srovnání těchto kompozitů s klasickými kovovými materiály, používanými ve strojírenství.

ANNOTATION

This diploma work deals with manufacturing braided reinforcements on the braided machine PSJ 64/1, which are produced by firm DOTEX, Nový Jičín. Initiated essay contains some part of braided machine description. It had been rearranged for producing carbon and glass fibred reinforcements. Then composites made from reinforcement were tested. Values of basic mechanical tests of manufactured composites were compared with classical iron materials used in mechanical engineering.

"Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval sám s použitím uvedené literatury."

V Krasoňově dne 29. května 2000

.....
podpis

Děkuji vedoucí mé diplomové práce Doc. Ing. Bohumile Koškové, CSc. za pomoc při jejím řešení. Dále děkuji konzultantům Ing. Martinu Krulovi a Ing. Ireně Plaché za poskytnuté rady a připomínky.

Můj dík patří i panu Jindřichu Šámalovi za to, že ochotně zrealizoval všechny mé návrhy ohledně úprav strojového parku.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům, kteří mi studium na vysoké škole umožnili.

OBSAH

		Strana
Seznam zkratek a symbolů		4
Úvod		5
Cíl diplomové práce		6
1.	Kompozity	7
1.1.	Úvodní část	7
1.2.	Definice kompozitu	10
1.3.	Jak vzniká kompozit	11
1.4.	Rozdělení kompozitů	11
1.5.	Výroba kompozitů	13
1.6.	Použití kompozitů	16
2.	Technologie výroby armatury	17
2.1.	Způsoby výroby	17
2.2.	Technologie navíjení	17
2.3.	Technologie splétání	17
2.3.1	Rozdělení strojů a výroby	18
2.3.2.	Dutinové splétací stroje	18
2.3.3.	Označení dutinových splétacích strojů	20
2.3.4.	Hlavní výrobci dutinových splétacích strojů	20
2.4.	Srovnání technologií splétání a navíjení	21
3.	Materiál pro výrobu armatur	22
3.1.	Skleněná vlákna	22
3.1.1.	Suroviny a způsob výroby	22
3.1.2.	Povrchová úprava skleněných vláken	23
3.1.3.	Druhy skleněných vláken	23
3.1.4.	Vlastnosti skleněných vláken	23
3.1.5.	Výrobci skleněných vláken	25
3.2.	Uhlíková vlákna	26
3.2.1.	Suroviny a způsob výroby uhlíkových vláken	26
3.2.2.	Povrchová úprava uhlíkových vláken	27
3.2.3.	Druhy uhlíkových vláken	28

3.2.4. Vlastnosti uhlíkových vláken 29
3.2.5. Výrobci uhlíkových vláken 31
3.3. Parametry použitých vláken 32
3.3.1. Metody zkoušení 32
3.3.2. Parametry skleněných vláken 33
3.3.3. Parametry uhlíkových vláken 33
4. Experimentální výroba kompozitů 34
4.1. Použitý stroj 34
4.1.1. Úpravy stroje 34
4.1.1.1. Běžce 34
4.1.1.2. Civečnice pro uložení podélné nitě 37
4.1.1.3. Zařízení na odvádění spletené dutinky 39
4.1.1.4. Ostatní úpravy 39
4.2. Vazební parametry armatury 42
4.2.1. Hustota spletení 42
4.2.2. Tloušťka stěny 42
4.2.3. Úhel křížení vláken 43
4.2.4. Měření délkové hmotnosti 43
4.2.5. Parametry použitých armatur 44
4.2.6. Strukturální vady armatury 44
4.2.6.1. Vady konstrukce armatury 44
4.2.6.2. Nedostatečné prosycení armatury pryskyřicí 45
4.2.7. Teoretický předpoklad mechanických vlastností armatury 45
4.2.8. Experimentální zjištění mechanických vlastností armatury 45
4.3. Technologie přípravy kompozitu 46
4.3.1. Použité matrice 48
4.3.1.1. Matrice ChS POLYESTER 145 48
4.3.1.2. Matrice NORPOL COR VE 8300 49
4.3.1.3. Matrice NORPOL COR VE 8770 49
4.3.1.4. Matrice ChS-EPOXY 531 50
4.3.1.5. Matrice ChS-EPOXY 422 51
4.4. Geometrické a fyzikální parametry kompozitů 51

5. Zkoušení kompozitů 53
5.1. Statická zkouška trubek ohybem 53
5.1.1. Vliv matrice na mechanické vlastnosti trubek 53
5.1.2. Vliv podélné výztuže na mechanické vlastnosti trubek 53
5.1.3. Vliv úhlu křížení vláken 54
5.1.4. Vyhodnocení vlastností kompozitních trubek 55
5.1.5. Trubky z uhlíkových vláken 57
5.2. Zkouška tahem 58
5.3. Princip porušení kompozitních trubek 64
5.4. Návrh použití vyrobených kompozitů 68
6. Technicko-ekonomické zhodnocení projektu 69
6.1. Technická náročnost experimentu 69
6.2. Ekonomická náročnost experimentu 69
6.2.1 Materiálové náklady 70
Závěr 71
Seznam použité literatury 72
Seznam příloh 73

Seznam zkratek a symbolů

PSJ 64/1 – označení splétacího stroje
E, S, R, C, ACR – označení skleněných vláken
UHS, HS, HT, IM, HM, UHM – označení uhlíkových vláken
TU – Technická univerzita
KPL – katedra pletařství
DP – diplomová práce
C-P – kompozit uhlík-pryskyřice
S-P – kompozit sklo-pryskyřice
ČSN – označení normy
PAN – polyakrylonitril

tex – délková hmotnost, označení délkových textilií
H_S – hustota spletení
b – tloušťka stěny
a - úhel křížení vláken
m_L – délková hmotnost armatury
m_{LK} – délková hmotnost kompozitu
m – hmotnost vzorku
L – délka vzorku
P – plnění kompozitu
E – modul pružnosti materiálu
Rm – mez pevnosti materiálu

Úvod

Kompozity jsou hybridní materiály, jejichž potřeba byla vyvolána nutností odpovědět na volání po konstrukčních materiálech vyhovujících požadavkům současných technologií.Toto volání po něčem novém se nejprve projevilo v kosmickém výzkumu a leteckém průmyslu, ale časem i v jiných odvětvích, v nichž je potřeba využívat materiálů dosud nebývalých vlastností. Nutnost spojit pevnost s tvrdostí při malé hmotnosti vede konstruktéry vojenských i dopravních letadel, sportovních potřeb či automobilů k tomu, aby sáhli po kompozitních materiálech. Kompozity mají své místo ve všech technologiích, kde se objeví nutnost materiály s vlastnostmi, které není možné zajistit žádným homogenním materiálem. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že taková technologie, která nabídne nový vhodný způsob výroby kompozitů, najde v budoucnu zcela jistě své uplatnění.

Cíl diplomové práce

Tato diplomová práce navazuje na diplomovou práci Martina Kruly (KPL 1997) a jejím cílem je upravit dutinný splétací stroj PSJ 64/1, dodaný firmou DOTEX Nový Jičín tak, aby na něm bylo možno zhotovit splétané hadice z uhlíkových a skleněných vláken s minimem strukturálních vad, tyto hadice zpracovat do C-P a S-P kompozitů, zjistit jejich základní mechanicko-fyzikální vlastnosti a navrhnout nejvhodnější způsob jejich využití.

1. KOMPOZITY

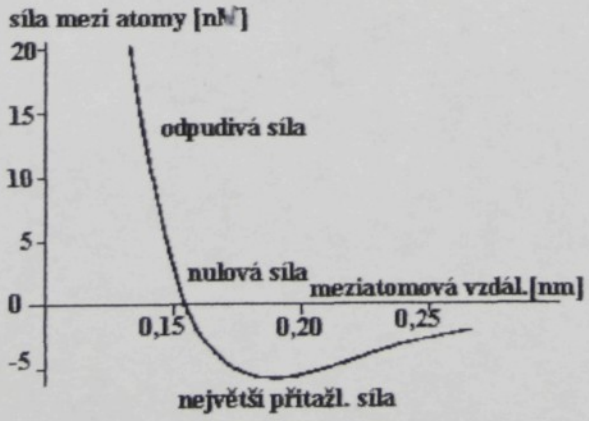
1.1. Úvodní část

Praktický zájem vede člověka k hledání materiálů, které jsou nejen velmi pevné, ale také co možná nejlehčí. Pevnost můžeme posuzovat různě, podle toho jakým způsobem materiál namáháme. K dalším úvahám si vybereme jednoduchý tah. Většina materiálů používaných ve strojírenství má pevnost v tahu menší než 1 GPa. [7]; (viz. tab. 1) .

MATERIÁL	PEVNOST V TAHU (GPa)
ocel	0,5 - 4
hliníkové slitiny	0,1 – 0,4
nylon	0,5
dřevo	0,2
len	0,6
hedvábí	0,3

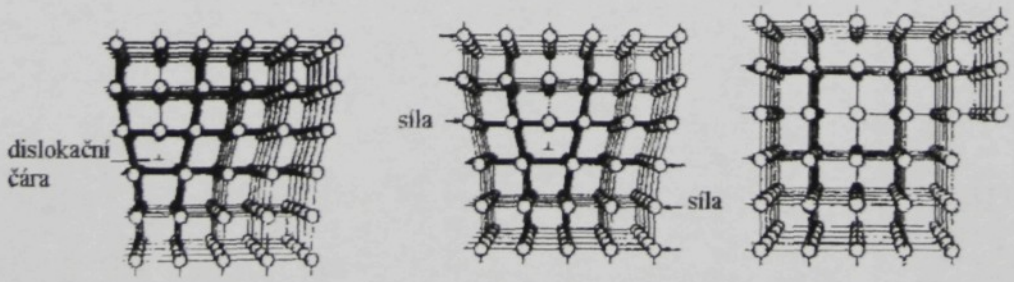
Tab. 1 Pevnosti v tahu (masívní vzorky)

Položme si otázku, jestli je možné vytvořit materiály s podstatně větší pevností než mají ty, které jsou uvedeny v tabulce. Teoretické výpočty pevnosti materiálů s ideální krystalickou mřížkou napovídají, že určitě ano. Jako příklad uvádím jednoduchý výpočet, ve kterém je využito znalostí o vlastnostech vazeb mezi atomy v krystalu pevné látky (grafitu). Na obrázku 1 je znázorněna síla, kterou na sebe působí dva atomy uhlíku v závislosti na jejich vzdálenosti. [7]



Obrázek 1 Graf závislosti přitažlivé síly atomů uhlíku na jejich vzdálenosti

Z grafu je vidět, že při vzdálenosti rovné přibližně 0,15 nm mezi těmito atomy síla nepůsobí. Se zvětšující se vzdáleností atomů síla vzrůstá ke svému maximu – asi 6 nN. Tuto hodnotu je možno pokládat za mez, kterou nesmí přesáhnout vnější tahová síla, mají-li dva atomy zůstat neoddělené. Mezní sílu , kterou může vydržet krystal uhlíku s rozměry zápalky, můžeme odhadnout tak, že krystal budeme pokládat za soubor mnoha rovnoběžných, vzájemně se dotýkajících řetízků z atomů uhlíku, přičemž články těchto řetízků jsou navzájem vázány stejnou silou jako dvojice atomů. Do průřezu zápalky o plošném obsahu 4 mm2 se vejde 180.1012 řetízků . Horní mez pro sílu, kterou by mohla taková dokonalá uhlíková zápalka vydržet, získáme, vynásobíme-li počet řetízků pevností každého z nich : 180.1012.6.10-9 N = 1,08.106N. Také mezní napětí, které můžeme z výsledku vypočítat (250 GPa) je ve srovnání s údaji v tabulce podezřele vysoké. Příčiny nesouhlasu našeho modelu ve srovnání s výsledky měření pevnosti reálných vzorků naznačuje povrch kovové tyčinky po namáhání v tahu, při kterém se vzorek trvale (plasticky) zdeformoval. Pruhy, které při prodlužování původně hladkého vzorku vystupují na povrch , svědčí o tom, že při natahování kloužou části krystalu po sobě šikmo napříč vzorkem. Odhad síly potřebné k tomu, aby se v krystalu dvě roviny atomů po sobě navzájem posunuly, tj. odhad mezní pevnosti materiálu však také dává hodnoty blízké řetízkovému modelu. K podstatně odlišným výsledkům nevedly ani zpřesněné výpočty , ve kterých se přihlíželo ke skutečnému uspořádání atomů v krystalu i k příspěvku vazbových sil od vzdálenějších atomů. Kde tedy hledat příčinu, proč naměřené hodnoty zaostávají za teoretickými předpoklady? Je známo, že běžné materiály mají k dokonalé vnitřní stavbě daleko. Jestliže krystal není dokonalý, atomové roviny mohou po sobě klouzat snadněji a síla k tomu potřebná není pak dána součtem sil, které by při vzájemném přesouvání vrstev atomů v krystalu vyvolaly pohyb (mimo jiné i stoupání a klesání) všech atomů roviny najednou, protože k posunu dochází postupně. K tomu však může docházet jen tehdy, existují-li v krystalu poruchy – dislokace (viz. obr. 2).



Obrázek 2 Dislokace

Přítomnost dislokací a jejich pohyblivost tedy způsobují, že se u běžných materiálů vzorek protahuje až do přetržení i při poměrně malých napětích. Objevení tohoto mechanismu plastické deformace ukázalo i cesty, jak vytvářet materiály s větší pevností. Jsou v podstatě dvě: zmenšení pohyblivosti dislokací a příprava materiálů s co nejmenším počtem dislokací. Omezení pohyblivosti dislokací lze například u kovů a slitin dosáhnout přidáním příměsí (zachycování dislokací na částečkách uhlíku v uhlíkaté oceli zpevňuje tento materiál). Dnes jdeme k vytváření materiálů s extrémní pevností blízkou pevnosti teoretické i druhou cestou – snažíme se připravit materiály bez dislokací. V laboratořích se daří připravit velmi tenká vlákna (tzv. whiskery), která mají v celém svém objemu tak málo poruch i nečistot, že se jejich stavba blíží ideálu. Mají tloušťku jen několik tisícin milimetru a také délka je nejvýše několik centimetrů. Měření pevnosti v tahu provedená na velmi citlivých aparaturách ukázala, že tato tenká monokrystalická vlákna mají skutečně pevnost blízkou vypočtené maximální hodnotě (viz. tab. 2).

MATERIÁL	TEORETICKÝ ODHAD PEVNOSTI V TAHU (GPa)	NAMĚŘENÉ HODNOTY PEVNOSTI V TAHU (GPa)	DRUH VZORKU
C (grafit)	100	25	tenká monokrystalická vlákna (whiskery)
SiO_2	70	25	
MgO	30	24	
Al_2O_3	50	20	
NaCl	6	1	
Fe	22	13	
W	42	20	

Tab. 2 Teoretické a naměřené pevnosti v tahu některých materiálů [7]

Bohužel jsou monokrystaly bez dislokací útvary velmi labilní. Stačí nepatrné škrábnutí na povrchu, aby se i při malém namáhání začaly z porušené oblasti šířit dislokace. Přesto se již podařilo využít vláknových monokrystalů v technické praxi. Vlákna se zalijí do vhodného pojidla – například do umělé pryskyřice nebo do kovu. Toto pojidlo zajistí výslednému materiálu houževnatost a poměrnou stabilitu, zatímco vlákna dodají vysokou pevnost. Takovému spojení svou nesourodých materiálů se říká kompozit. Kompozit však rozhodně není jakákoliv směs dvou či více látek. Jde vždy o látky nějakým způsobem uspořádané. Ve vzniklém celku si jednotlivé složky, na rozdíl třeba

od slitin, ponechávají své vlastnosti, avšak uplatní se pouze jejich přednosti. Výsledný kompozit má tedy lepší vlastnosti než by měly jednotlivé jeho složky samy o sobě. Má však i lepší vlastnosti než pouhá směs těchto materiálů.

1.2. Definice kompozitu

Kompozitní znamená vytvořený či skládající se ze dvou nebo více odlišných fází. Materiál mající dvě nebo více odlišných materiálových složek (fází), je tedy složeným materiálem. Toto platí pouze tehdy, mají-li vytvářející fáze značně rozdílné vlastnosti, a tudíž i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně odlišné od vlastností materiálů složek. Takový materiál označujeme jako kompozit. Ačkoliv se zdá být takováto definice naprosto jednoznačná, vyskytují se v praxi mnohé případy jejího nepřesného výkladu a vznikají tak nejednoznačnosti, které se snažíme odstranit pomocí dalších definic zdůrazňujících některý z požadavků pro zařazení mezi kompozitní materiály.

Příklady doplňujících definic:

- kompozity jsou multifunkční materiálové systémy, které mají charakteristiky neobdržitelné žádným z jednotlivých materiálů. Jsou to kohezivní struktury, vytvořené kombinací dvou nebo více kompatibilních materiálů, lišících se složením, vlastnostmi a někdy i tvarem. [1]
- kompozity jsou složené materiály, které se liší od slitin tím, že jednotlivé složky si ponechávají své charakteristiky, ale jsou tak vloženy do materiálového systému, že se uplatní pouze jejich přednosti a potlačí jejich nedostatky, aby se získalo zlepšení jeho vlastností. [1]
- kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostou sumací. [1]
- kompozit je materiál, který se skládá v makroměřítku ze dvou nebo více chemicky odlišných složek, které mají určité, je oddělující rozhraní. [2]
- kompozity jsou složené heterogenní systémy tvořené dvěma fázemi, obvykle různého chemického složení, které se liší svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Fáze oddělené rozhraním jsou obvykle v tuhém stavu, i když může být některá z fází ve stavu kapalném nebo plynném. [3]
- kompozity jsou složeny ze dvou nebo více chemicky odlišných složek nebo fází. Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá fáze se nazývá výztuž (disperze), spojitá a

obvykle poddajnější fáze, která plní funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. [4]

1.3. Jak vzniká kompozit

Jak vyplynulo z předchozích kapitol, pro výrobu lehkých a současně pevných součástí pro praktické využití lze s výhodou použít tenká vlákna spojená vhodným pojidlem. V malém objemu vlákna totiž klesá pravděpodobnost vzniku poruchy a navíc je účinně zamezeno jejímu šíření. Pojidlo – matrice – pak plní několik funkcí. Především spojuje vlákna a tvoří z nich kompaktní celek, dále přenáší rovnoměrně vnější namáhání na jednotlivá vlákna. Matrice funguje i jako ochranný obal proti negativním vnějším vlivům (například vlhkosti) i při procesech zpracování. Pevnost a tvrdost kompozitního materiálu je sice podmíněna zejména vlastnostmi vkládané „armatury" , ale určitý vliv na jeho další vlastnosti je třeba přiznat i samotné matrici. Například tepelná a elektrická vodivost velmi závisí na vodivosti matrice. Mechanické vlastnosti kompozitů nejsou dány pouze vlastnostmi vláken, ale také jejich součinností s matricí. Meze pevnosti v tahu jsou výsledkem této spolupráce. Jestliže by vlákna existovala sama o sobě, pak při jejich zatížení způsobí přetržení každého vlákna to, že se zatížení všech zbývajících vláken zvýší. Jestliže se však toto vlákno nachází v matrici, pak jeho přetržení ještě nevede k takovým koncům, neboť matrice alespoň částečně jeho úlohu převezme. Když se konce přetrženého vlákna působením trvajícího zatížení vytahují z matrice, dojde díky pružné deformaci matrice k přesunu namáhání na jeho přetržené části. I takto narušené vlákno se tedy stále určitou měrou podílí na celkové pevnosti kompozitu. Namáhání sousedních neporušených vláken vzroste proto méně, než kdyby matrice chyběla.

1.4. Rozdělení kompozitů

Rozdělit kompozitní materiály je možno podle různých hledisek. Zpravidla se jako základní udává rozdělení na kompozity I., II. a III. druhu. Kompozity I. druhu jsou v praxi nejvíce užívaným druhem kompozitů. U tohoto druhu kompozitů jsou vyztužovací částice segregovány v matrici a nevytváří vlastní, svébytnou strukturu. Jakmile dojde v kompozitu k agregaci částic (jsou-li minimální obalové vrstvy matrice), vede další snižování objemového podílu matrice v systému k vytváření nejdříve uzavřených pórů, později otevřených, spojitých. Takovéto systémy se chovají značně odlišně navzájem i proti kompozitům I. druhu a jsou označovány za systémy II. a III. typu (druhu).

1. Podle materiálu matrice :

- kovové matrice (hliník ,titan a jejich slitiny)

- keramické, skleněné a silikátové matrice
- polymerní matrice (termoplastové, reaktoplastové, elastomerní)

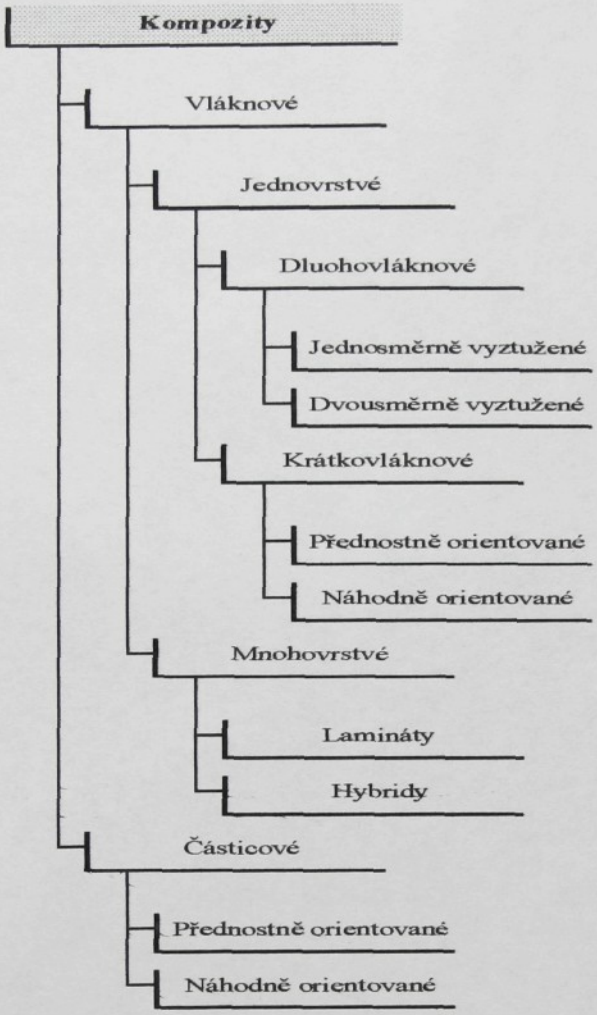
2. Podle druhu vyztužovacích částic :

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

3. Podle tvaru vyztužovacích částic :

- vláknové
- částicové

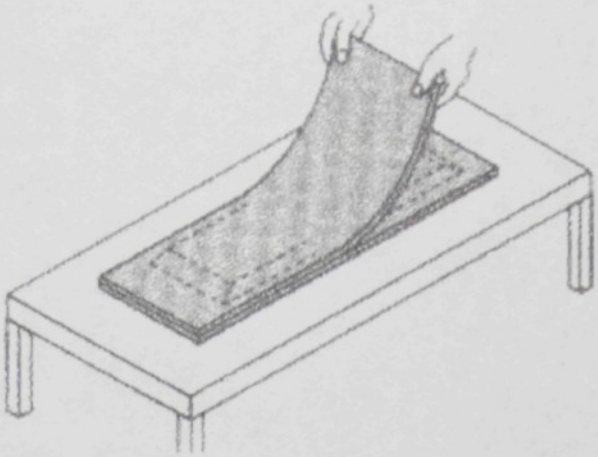
Přehled běžného dělení kompozitních materiálů je patrný z obr. 3



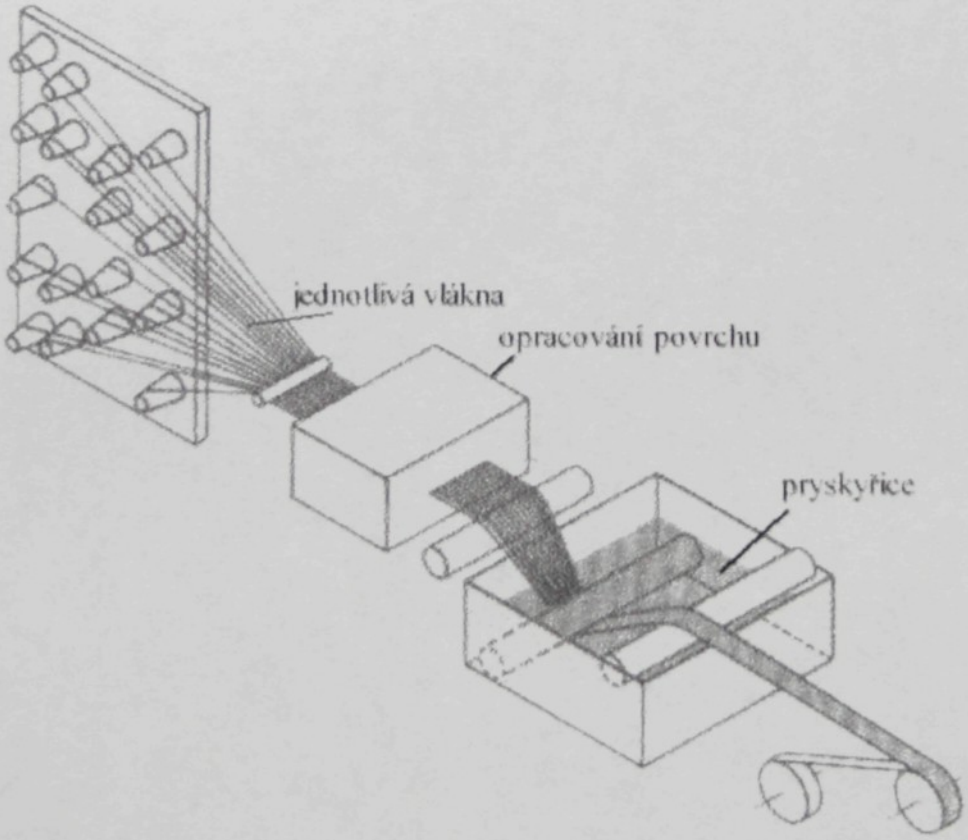
Obrázek 3 Rozdělení kompozitů

1.5. Výroba kompozitů

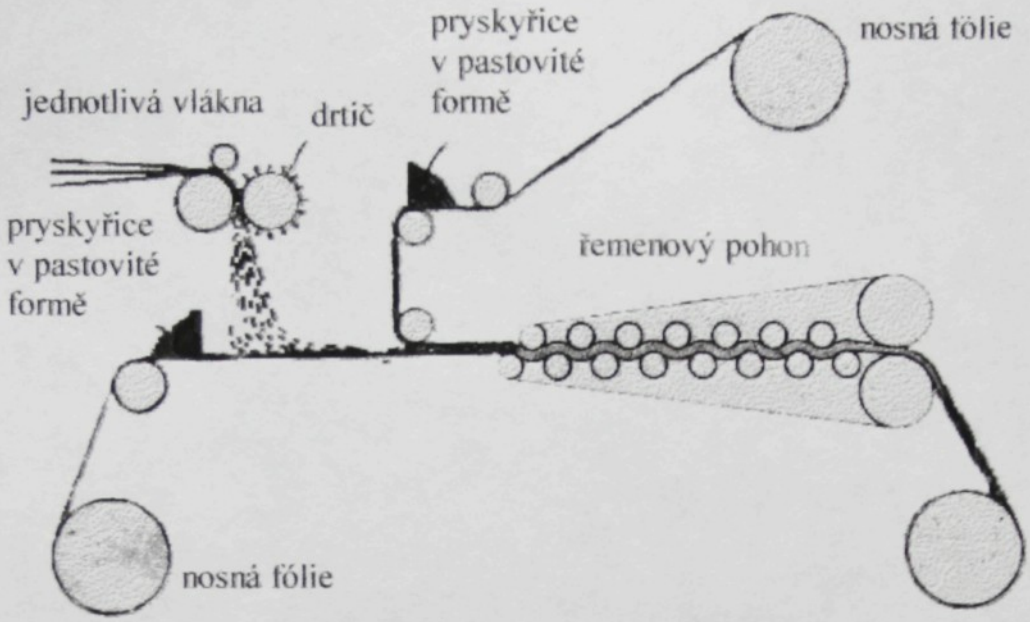
Vlákna složená vedle sebe vytvářejí vrstvu - laminu . Lamina je základní konstrukční jednotkou. Skládáním lamin se vytváří struktura a tvar součásti. Vrstvy se na sebe mohou pokládat různými způsoby, z nichž některé jsou uvedeny na obrázcích 4-7. Vlákna napuštěná pojivem se nakonec podrobují vytvrzovacímu procesu v autoklávu. Vytvrzovací režim závisí na tvaru součásti, složení materiálu a na požadovaných výsledných vlastnostech. Obvykle se používá několik vytvrzovacích cyklů. Příklad autoklávu viz. obr. 8.



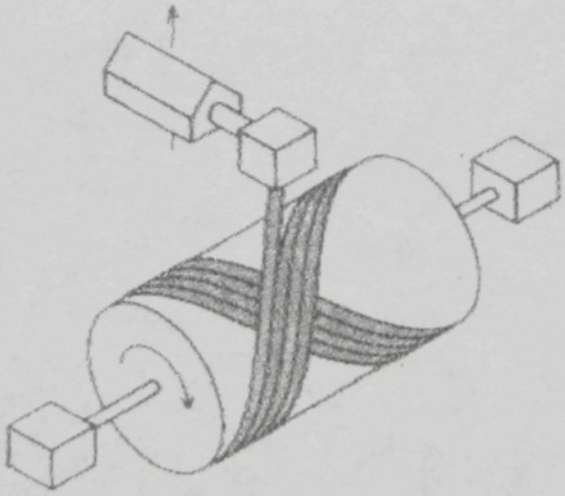
Obrázek 4 Ruční výroba



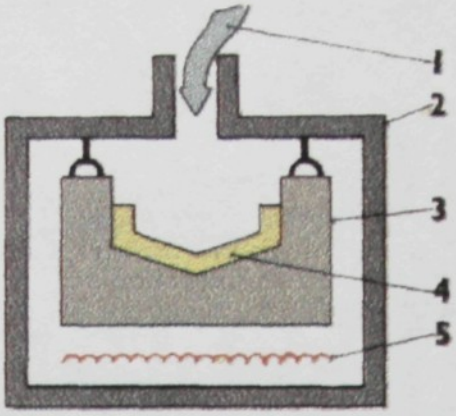
Obrázek 5 Výroba pásu laminátu



Obrázek 6 Výroba kompozitu z krátkých vláken



Obrázek 7 Výroba kompozitu navíjením



Obrázek 8 Příklad autoklávu

Legenda k obr. 8: Do tlakové komory 2 se uloží forma 3, do níž se předem vyskládá kompozitová struktura 4. Kompozit se překryje tenkou plachetkou, pod níž se vyčerpá vzduch. Do autoklávu se přivádí stlačený vzduch 1 a atmosféra se ohřívá soustavou topných těles 5.

Podívejme se ještě na jeden aspekt kompozitových konstrukcí. Zatímco v klasické výrobě zhotovíme nejdříve polotovar a ten se potom podle potřeb zpracovává, v kompozitovém dílu vzniká současně jak materiál tak i výsledný tvar součásti, takže nevzniká žádný odpad.

1.6. Použití kompozitů

Jak již bylo řečeno, kompozitní materiály pronikají stále více do všech oblastí lidské činnosti. Jako příklad uvádím alespoň ty nejznámější.

Sport lyže, lyžařské a hokejové hole, brankářské masky, tenisové rakety, rámy cyklistických kol, přilby, luky, oštěpy, skokanské tyče atd.

Letectví a kosmonautika listy rotoru u vrtulníků, kapotáž, kormidla,palivové nádrže.

Automobilový průmysl kryty motorů a ložisek, rámy, chladiče, části karosérie atd.

Textilní průmysl tkalcovská brda, prohozní ramena

Slévárenství formy pro odlévání

Chemický průmysl tepelné výměníky

Zdravotnictví spojování a fixace zlomených kostí

Konkrétní příklady jsou uvedeny v příloze.

2.TECHNOLOGIE VÝROBY ARMATURY

2.1. Způsoby výroby

Armatura ve formě duté hadice se dá vyrobit v podstatě dvěma způsoby: splétáním a navíjením, z nichž každý má své výhody a nevýhody. Předmětem této diplomové práce je splétání a proto o navíjení zmiňuji jen to nejpodstatnější.

2.2. Technologie navíjení

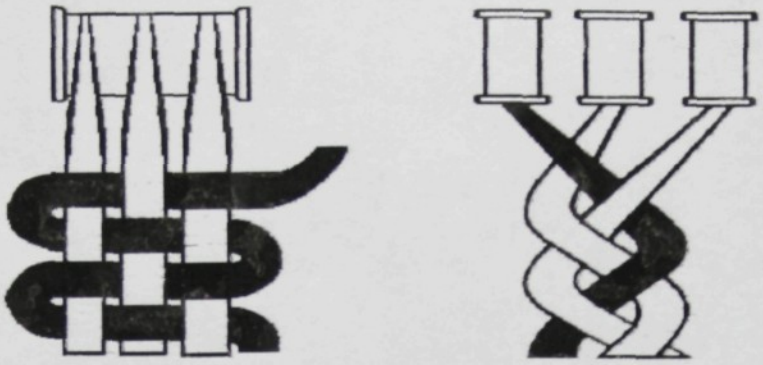
Navíjení je zatím ve světě nejrozšířenější způsob výroby dutinných výztuží pro kompozity. Princip navíjení je znázorněn na obr. 7, kap. 1.5. Rotující jádro se ovíjí nití, vedenou rozváděcí hlavou. Protože v tomto případě se nemusí zásoba nitě otáčet,je možno na stroj uložit více materiálu a také jeho výměna je mnohem jednodušší. Mezi další výhody patří možnost impregnovat materiál přímo během navíjení a možnost volby návinu pod jakýmkoli úhlem. To je v případě splétání; alespoň v podmínkách laboratoře KPL; velmi obtížné a u velkých úhlů křížení téměř nemožné.

2.3. Technologie splétání

Princip splétání vláken se používá již velmi dlouho k výrobě domácích, později průmyslových výrobků. Ručně se splétaly např. poutka, provazy, lana, výrobky z proutí, ale i krajky, záclony apod..

V dnešní době se technologií splétání (strojní výroba) vyrábí drobné výrobky určené pro ozdobné účely - různé prýmky, šňůrky, lacetky, tresy, dutinky, gumy, ...,tak i výrobky určené pro průmyslové použití - lana, kabely, ochranné pláště hadic a trubek.

Proces splétání je v podstatě velmi jednoduchý. Jedna nebo několik soustav nití se vzájemně proplétají v úhlopříčném směru. Provázání nití je podobné jako při procesu tkaní. V tkanině jsou dvě soustavy provazujících nití, kde jedna prochází výrobkem v podélném a druhá v příčném směru.



a) b)

Obrázek 9 Rozdíl tkaní (a) a splétání (b) vláken

Při splétání provazující soustavy nití procházejí výrobkem podélně. Rozdíl je dobře vidět na obr.9, kde je znázorněn princip tkaní a splétání.

2.3.1. Rozdělení strojů a výroby

Výrobu splétaných výrobků lze rozdělit:

1. Podle typu výrobního zařízení
   a) výroba plochých výrobků na plochých splétacích strojích
   b) výroba dutinných výrobků na dutinových splétacích strojích
2. Podle typu výrobků
   a) výroba prýmků, šňůrek apod. na plochých i na dutinových strojích
   b) výroba krajek a záclonovin na plochých i na dutinových strojích (tzv. paličkovací stroje)

Pro výrobu kompozitních materiálů se používají především dutinné výrobky, jejichž válcovitý tvar by bylo obtížné vyrobit jinou technikou, zatímco ploché výrobky lze snadno nahradit tkaninou. Protože cílem této diplomová práce je výroba kompozitu ve formě trubky, dále budou zmiňovány pouze o dutinové splétací stroje

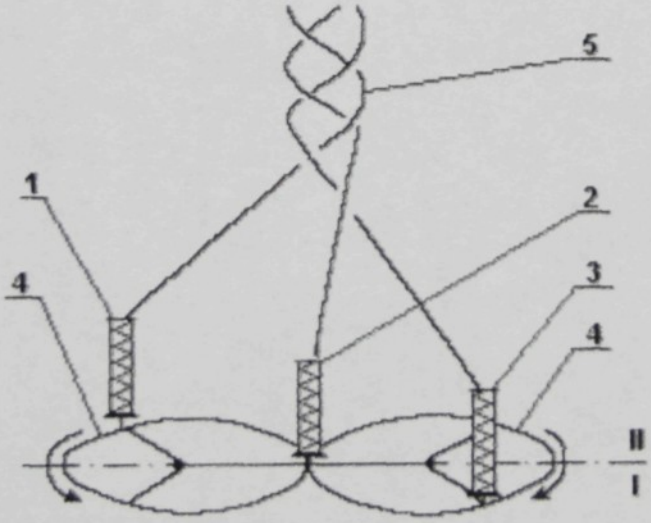
2.3.2. Dutinové splétací stroje

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. Nitě procházejí výrobkem podélně, neproplétají se, jsou pouze zachyceny mezi křížícími nitěmi běžců. V horní desce jsou vyfrézovány vodicí 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 vodicí dráze 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 vodicí 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.

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

Na obr. 10 je znázorněn princip nejjednoduššího splétacího stroje. Stroj má dvě křídlová kola 4, každé má tři křídla. Na konci křídel jsou umístěny běžce 1, 2, 3 tak, aby v místě odvalování nedošlo k setkání dvou běžců. Vodicí dráha tohoto stroje je ve tvaru osmičky. Běžce sledují vodicí dráhu splétacího stroje, a pohybují se tak střídavě po vnějším I a vnitřním II úseku dráhy.



Obrázek 10 Nejjednodušší princip splétacího stroje

Legenda k obr. 10: 1, 2, 3 – běžce; 4 - křídlová kola; 5 - splétaný výrobek

2.3.3. Označení dutinových splétacích strojů

Základní konstrukce splétacích strojů je charakterizována dvěma parametry: počtem samostatných vodicích drah a počtem běžců v jedné vodicí dráze. Na stroji bývá zpravidla několik vodicích drah. Jedné samostatné vodicí dráze se říká hlava a podle počtu těchto hlav rozeznáváme stroje jednohlavé, dvouhlavé a vícehlavé. Jejich konstrukce se vyjadřuje zlomkem, kde čitatel udává počet běžců jedné hlavy a jmenovatel počet hlav na stroji. Např. stroj označený zlomkem 40/2 má dvě samostatné hlavy a v každé 40 běžců.

2.3.4. Hlavní výrobci dutinových splétacích strojů

Mezi hlavní výrobce patří firmy:

Evropa - Herzog (SRN)
- Steeger (SRN)
- Krenzler (SRN)
- Wimatex (SRN)
- Ratera (Španělsko)
- Trenz-export (Španělsko)
- Spiraltex (Francie)
- OMA (Itálie)

ČR - DOTEX (Nový Jičín)

2.4. Srovnání technologií splétání a navíjení

parametr	splétání	navíjení
konstrukce stroje	složitější	jednodušší
rychlost zpracování materiálu	rychlejší	pomalejší
obsluha, výměna materiálu	složitá	jednoduchá
možnost impregnace materiálu při zpracování	omezeně	ano
rozsah úhlu stoupání	podle konstrukce stroje, lépe vyšší úhly	$0^{\circ} - 90^{\circ}$
tvarované výrobky	ano	omezeně

Tab. 3 Srovnání splétání a navíjení

3. MATERIÁL PRO VÝROBU ARMATURY

3.1. Skleněná vlákna

Jsou to vlákna z anorganických surovin, která se v posledním období používají zvlášt pro technické účely. Jejich výhodou je též velká dostupnost v mnoha formách (krátk vlákna, nitě, rohože, roving ...).

3.1.1. Suroviny a způsob výroby

Skleněná vlákna mají silikátový základ (SiO_2). Vyrábějí se tažením taveniny směs oxidů Si, Al, Ca, Mg a B s velmi malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla vytékajícího platinových trysek ve dnu tavicí pece. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mez rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování monovláken sdružených do pramen při navíjení na cívku. Počáteční průměr (daný otvorem trysky) je 1 - 2 mm, konečný 6 15 μm. V současné době se využívá dvou metod tažení nekonečných skleněných vláke :

- dvoustupňové tažení
- jednostupňové tažení

Dvoustupňové tažení - sklo v kuličkách o průměru 21 - 23 mm se přetavuje v pec vyrobené ze slitin vzácných kovů (platiny, rhodia), jejíž dno je opatřeno 102, 204 a 40 i více tryskami. Pracovní teplota skloviny v peci se pohybuje v rozmezí od 1150°C d 1300°C a řídí se druhem přetavovaného skla a tloušťkou vyráběného vlákna Automatická regulace udržuje v pásmu trysek stanovenou pracovní teplotu s maximál přesností, rovněž výšku hladiny skla v peci. Vyhřívání pece je elektrické. Roztaven sklovina protéká tryskami a od nich se již odtahují jednotlivá vlákna. Vedou se pře sdružovací patku, kde se spojují v jeden svazek vláken a přes lubrikační zařízení, kde s nanáší na povrch vláken ochranný film se navíjí na rychle rotující bubínek navíječky Svazek vláken se navíjí na papírovou cívku. Rychlost odtahu je přizpůsobena průměr taženého vlákna. Je závislá na teplotě skloviny v tryskové části pece, výšce hladin skloviny v peci atd. Po navinutí stanoveného množství skleněného vlákna se papírov cívka předkládá k dalším operacím.

Jednostupňový způsob tažení se od prvního výrobního postupu liší tím, že sklo se peci nepřetavuje z kuliček, ale přímo se taví ze sklářského kmene ve vanovém agregátu z něhož se sklovina dopravuje do platinových pícek nátokovými kanály.

3.1.2. Povrchová úprava skleněných vláken

Při manipulaci s nechráněnými vlákny dochází při vzájemném kontaktu jejich povrch k abrazi a následnému snížení pevnosti. Proto každé jednotlivé vlákno se po vytažení platinové trysky ve dnu tavicí pece, vydloužení a po ochlazení na teplotu okolí pokrýv tenkým ochranným povlakem (sizing), jehož tloušťka odpovídá hmotnostnímu podíl 0,3 až 1,5 %. Látky používané pro sizing jsou:

- **lubrikační látky** (vosk, olej, škrob, želatina, polyvinylalkohol), které tak usnadňují další textilní zpracování vláken. Lubrikační látku je nutno pře výrobou kompozitu z povrchu vláken odstranit, aby bylo dosaženo potřebn soudržnosti vláken a matrice,
- **vazebné prostředky**, které mají dobrou afinitu jak ke skleněným vláknům, tak polymerní matrici.

K dalším pozitivním účinkům ochranných prostředků patří snížení adsorbovaném podílu vody (mají určitý hydrofobizační účinek) a určité antistatické působení (vlákn nepřitahují prach).

Používané úpravy jsou také rozlišovány podle tvrdosti:

- měkká (silanová) úprava,
- polotvrdá (organokovová) úprava,
- tvrdá (silanová nebo organokovová) úprava.

Tvrdost vazebného prostředku, daná jeho chemickou strukturou, určuje vhodnos rovingu pro další technologie. Tvrdá úprava, např. metakrylsilanem neb chromkomplexem (je používán termín "tvrdý roving") zaručuje dobrou sekatelnos rovingu a rovnoměrný rozpad vláken při sekání, tj. vlastnosti potřebné při výrobě díl pomocí stříkacího zařízení. Je vhodná i při výrobě jednosměrných prepregů a rohož Měkká úprava (měkký roving), např. vinylsilanem nebo aminosilanem, zajišťuj rychlou smáčivost vláken polyesterovou pryskyřicí a používá se u rovingů pro navíjen tažení profilů a pro tkaniny určené k výrobě členitých dílů.
Zvláštní povrchovou úpravu vyžadují skleněná vlákna používaná pro kompozity epoxidovými nebo fenolformaldehydovými matricemi. V těchto případech se míst silanů používají povlaky na epoxidové bázi.

3.1.3. Druhy skleněných vláken

V kompozitech jsou používána nejčastěji vlákna ze skloviny E, S (R), C a ACR.

- **E sklo** je tzv. bezalkalické vápenato-hlinito-borité křemičité sklo (sklo Euta pro elektrotechniku). Je nejlevnější a přitom má dobré mechanické a elektrick

vlastnosti (velký povrchový odpor, malé dielektické ztráty) a dobrou odolnost proti hydrolýze (rozkladu ve vodě).

- **Sklo S** (evropskými výrobci používáno označení R) s vyšším podílem oxidu křemíku a hliníku je pevnější než E a C sklo, má větší modul pružnosti, větší teplotní odolnost a dobrou odolnost v prostředí kyselin. Je však dražší (vyšší teplota tavení), takže jeho použití je většinou omezeno jen na aplikace v leteckém průmyslu.
- **Sklo C** (chemicky odolné) s vyšším podílem alkálií má nižší teplotu měknutí, jeho mechanické vlastnosti rychleji klesají s rostoucí teplotou a je méně pevné. Alkalické prvky se vodou vyluhují. V prostředí obsahujícím kyseliny alkalické prvky zlepšují odolnost proti rozpouštění.
- Pro použití v alkalickém prostředí je vhodné **ACR sklo** (Vetrotex, Francie), pokud není k dispozici vyhovuje i E sklo.

3.1.4. Vlastnosti skleněných vláken

Mechanické vlastnosti

Měrná hmotnost skleněného vlákna je podle druhu použité základní suroviny přibližně 2,14 - 2,68 g.cm^3. Nejdůležitější z mechanických vlastností je vysoká pevnost v tahu, která se pohybuje od 2,5 do 4,4 GPa a modul pružnosti od 55 do 86 GPa. Další významnou vlastností skleněných vláken je i jejich minimální tažnost nejvýše 4,2 až 5,2 % patří k nejnižším ze známých vláknitých materiálů.

Odolnost skleněných vláken v ohybu je velmi malá. Kritický poloměr ohybu je daný v podstatě poloměrem elementárního vlákna a jeho prodloužením při přetrhu. Pro ohebnost vlákna se používá pevnost ve smyčce vyjádřená poměrem největšího průměru smyčky k průměru vlákna. Kritický poměr je daný hodnotami v rozmezí 20 - 24. Skleněná vlákna se nedají navazovat uzlem, dají se pouze spojit lepením.

Chemická odolnost

Skleněná vlákna jsou čirá, hladká, zpravidla kruhového průřezu, odolávají většině chemikálií, mají dobrou odolnost proti vodě, proti působení organických a slabých anorganických kyselin. Dobrá je odolnost vůči většině alkálií. Jsou nenasáklivá a nenabotnávají. Mají výbornou odolnost vůči ultrafialovým paprskům, plísním a jiným mikroorganismům. Skleněná vlákna nekorodují, dobře odolávají povětrnostním vlivům a nepříznivým vlivům stárnutí.

Tepelné vlastnosti

Charakteristickými vlastnostmi skleněných vláken je naprostá nehořlavost, velmi vysoká tepelná stálost, ale i vysoká křehkost, nízká odolnost v oděru a malá ohebnost. Teploty, při nichž se vlastnosti skleněných vláken vůbec nemění, leží v rozmezí od – 80°C do +170°C. Krátkodobě může být skleněné vlákno vystaveno i teplotám do +650°C, aniž dojde k výrazným ztrátám pevnosti. Bod měknutí skleněných vláken leží přibližně kolem 700°C. Tepelná vodivost skleněného vlákna je nižší než u kovů, avšak vyšší než u organických vláken.

Typické hodnoty nejdůležitějších vlastností skleněných vláken vyráběných firmou Vertex Litomyšl ze skloviny E jsou v tab. 4 porovnány s údaji o vlastnostech E, S, C a ACR skla

Vlastnost	E Vertex	E	S	C	ACR
Průměr [μm]	5-16	9-13	9-13	9-13	-
Hustota [$g.cm^{-3}$]	2,54	2,54	2,53	2,49	2,68
Modul pružnosti [GPa]	73	72,4	86	69	73
Pevnost v tahu [GPa]	3,4	až 3,45	až 4,6	až 3	3
Prodloužení [%]	4,5	4,8	5,2	4,8	4,3
Koef. tep roztažnosti [10^{-6} 1/K]	4,9	5	5,6	7,2	-
Teplota měknutí [°C]	650-750	840	970	750	-

Tab. 4 Vlastnosti vláken ze skloviny E, S a C při teplotě 20°C.

3.1.5. Výrobci skleněných vláken

Nejvýznamnějším domácím výrobcem skleněných vláken (v podobě příze, pramene, rovingu nebo tkaniny) je firma Vertex a.s.Litomyšl. Označování pramenů a rovingů skleněných vláken různých výrobců má shodné zásady. Firma Vertex označuje roving pro tažení, vinutí a tkaní např.:

EC 11 - 100tex x 11 t0 276,

kde E značí druh skla, C že jde o nekonečná (angl."continuous") vlákna, 11 je průměr vlákna v μm, 100tex je číslo jemnosti, 11 udává počet družených pramenů (výsledná jemnost rovingu je tedy 1100tex), t0 znamená, že pramence nemají zákrut a 276 je číslo měkké silanové úpravy vhodné pro polyesterové pryskyřice. Roving těžký, tj. s velkou hodnotou "tex", je výhodný pro výrobu tlustostěnných velkých dílů, např. navíjením, a pro těžké rovingové tkaniny nebo rohože.

3.2. Uhlíková vlákna

Počátky aplikace uhlíkových vláken spadají do období roku 1879, kdy T. A. Edison vyrobil první uhlíkové vlákno zuhelnatěním celulózového materiálu (vlákna z ramie), které se použilo jako odporové vlákno v žárovce. Významný pokrok ve výrobě uhlíkových vláken nastal po roce 1950, když byla vyřešena jejich příprava z chemických vláken (PAN a celulózových) a určeny oblasti jejich použití. V 70. letech se jako základní suroviny pro výrobu uhlíkových vláken začaly využívat pyrolýzní zbytky vznikající při zpracování ropy resp. černouhelného dehtu.

3.2.1. Suroviny a způsob výroby uhlíkových vláken

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

- viskózová vlákna
- PAN vlákna
- smoly (pryskyřice)
-

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 několik tisíc (nejčastěji 3, 6, 12 a 24 tisíc) 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 z této suroviny vláken je přibližně 55%.

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 zvlákňují.

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 z těchto surovin může být až 85%.

Výrobní postup (zahrnuje u všech uvedených surovin tři základní fáze):

Oxidace - 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°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.

Karbonizace - tvoří druhou fázi procesu, při níž se za teplot 1000 - 1500°C uvolňují zplodiny obsahující vodík, kyslík a dusík. Operace se provádí ve velmi čistém inertním prostředí a výsledná vlákna obsahují 80 - 95% uhlíku. Vlákno dosáhne maximální pevnosti v tahu.

Grafitizace - představuje třetí fázi zpracování při teplotách 1800 - 3000°C, dále se zvyšuje obsah uhlíku (nad 98%). Zdokonalení struktury vede k zvýšení tuhosti vlákna, ale za cenu poklesu pevnosti. U nejtužších vláken je používáno dloužení při grafitizaci.

Po karbonizaci či grafitizaci se provádí dokončovací úpravy, např. oxidační povrchová úprava 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 μm). 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 nejčastěji o délce 6,25 mm.

3.2.2. Povrchová úprava uhlíkových vláken (tzv. sizing)

Vyrobená uhlíková vlákna bývají podobně jako vlákna skleněná podrobena dodatečné úpravě povrchu. Účelem je:

- omezit adsorpci vlhkosti a plynů na povrch čerstvě vyrobených vláken,
- odstranit z povrchu vláken látky bránící kontaktu s kapalnou matricí,
- zvýšit reaktivitu povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím.

Povrchová úprava vláken ovlivňuje jejich adhezi k matrici. Souhrnně lze klasifikovat úpravy povrchu na oxidační a neoxidační.

Oxidační úpravy se dělí na:

1) suché (z plynné fáze)
- při nízkých teplotách (< 150°C),
- při zvýšených teplotách (> 400°C),

2) mokré (z kapalné fáze)
- chemická,
- elektrochemická (anodická úprava).

Neoxidační úpravy povrchu jsou založeny na ukládání aktivnějších forem uhlíku jako je pyrolytický uhlík nebo velmi efektivních, ale drahých whiskerů.
Další možností je termické čištění povrchu v inertní atmosféře, při kterém se odstraní z povrchu chemicky reaktivní skupiny.
Nejnověji je používána kontinuální úprava studenou plasmou, vytvářenou reaktorem pracujícím při frekvencích střídavého proudu okolo 15 MHz (tzv. RF plasma značí "rádiové frekvence"). Podle použitého prostředí (kyslík, argon, čpavek a další látky, např. monomery) je dosahováno různých účinků.

3.2.3. Druhy uhlíkových vláken

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.
Klasifikace uhlíkových a grafitových vláken není jednoznačná. Za uhlíková jsou obvykle považována ta, která vzniknou při teplotě 800 - 1600°C, zatímco grafitová vlákna jsou vyráběna při teplotě nad 2200°C. Jiným kritériem je obsah uhlíku: vlákna s obsahem uhlíku do 97% hm. jsou označována za uhlíková, s větším obsahem uhlíku za grafitová.

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. Označují se symboly UHS, HS, HT nebo IM.

- **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. Označují se symboly HM nebo UHM.
- **nízkomodulová** vlákna jsou nejlevnějším typem uhlíkových vláken, jsou připravovaná 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.

3.2.4. Vlastnosti uhlíkových vláken

Vlastnosti uhlíkových vláken jsou různé, záleží na procesu jejich výroby. V tab. 5 a 6 jsou uvedeny některé vlastnosti vybraných uhlíkových vláken z PAN a smol.

Na obr. 11 je uvedena závislost napětí - deformace a modul pružnosti pro vlákna z obou typů prekurzorů. Pro srovnání jsou uvedena vlákna skleněná a aramidová i teoretická křivka.

Hlavní vliv na mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost v tahu a lomové chování) má typ prekurzoru a karbonizační podmínky. Zvláště vztah mezi modulem pružnosti a pevností v tahu je v první řadě definován teplotou karbonizace a grafitizace.

K dalším vlastnostem uhlíkových vláken patří:

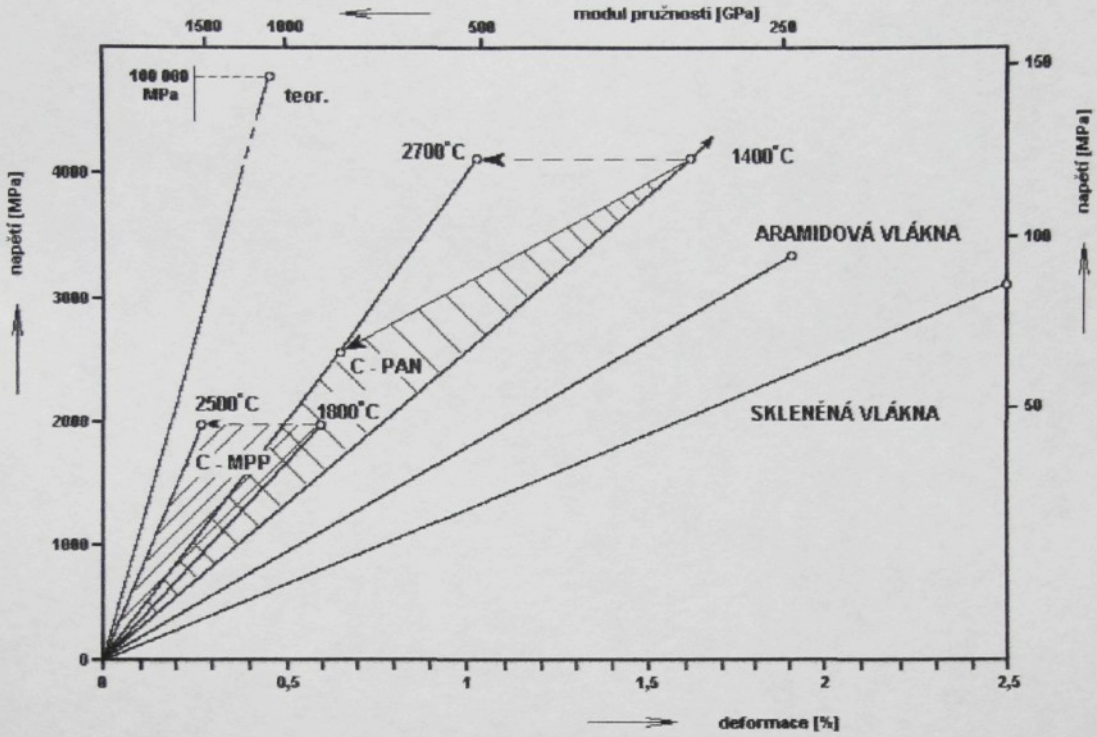
- nízká odolnost vůči oděru,
- nehořlavost,
- odolnost vůči chemikáliím (reagují pouze se silnými oxidy při vyšší teplotě),
- odolnost vůči ultrafialovému záření,
- záporný koeficient teplotní roztažnosti,
- anizotropie,
- grafitová uhlíková vlákna jsou elektricky vodivá,
- nízký koeficient tření.

Typ vlákna ---------- Vlastnost	Prekurzor: PAN				
	T300	M40J	T800H	T1000G	M60J
Průměr [μm]	6,92	5,19	5,1	5,34	4,67
Hustota [g.cm^{-3}]	1,76	1,77	1,81	1,80	1,94
Modul E osový [GPa] příčný	230 -	377 40	294 21	294 -	588 -
Pevnost v tahu [GPa]	3,53	4,41	5,49	6,37	3,92
Prodloužení [%]	1,53	1,17	1,87	2,17	0,67
Souč. tepel. roztažnosti osový [10^{-6} 1/K] příčný	-0,7 10	-0,5 7	- -	- -	- -
Obsah uhlíku [%]	97	99	97	96	96

Tab. 5 Vlastnosti uhlíkových vláken z PAN při teplotě 20°C (podle prospektu firmy Toray, z roku 1997)

Typ vlákna ---------- Vlastnost	Prekurzor: uhelná mezofázová smola				
	K13710	K13A10	KS352U	K13C2U	HM/HT
Průměr [μm]	10	10	10	10	Ploché vl.
Hustota [g.cm^{-3}]	2,12	2,15	2,05	2,19	2,15
Modul E [GPa] osový	640	790	550	900	650
Pevnost v tahu [GPa]	2,6	2,6	3,6	3,8	5,85
Prodloužení [%]	0,42	0,36	0,65	0,42	-
Souč. tepel. roztažnosti osový [10^{-6} 1/K] příčný	-0,9 10	-1,5 6	- -	- -	- -
Obsah uhlíku [%]	nad 99	Nad 99	nad 99	nad 99	-

Tab. 6 Vlastnosti uhlíkových vláken z uhelných mezofázových smol firmy Mitsubishi (obchodní značky Dialed) při teplotě 20°C. Pod označením HM/HT jsou vlastnosti vlákna firmy Teijin.



Obrázek 11 Zatěžovací charakteristiky různých typů vláken

Z údajů v tab. 5 a 6 a z obr. 11 vyplývají tyto zvláštnosti uhlíkových vláken:

- hustota uhlíkových vláken je nižší než skleněných vláken,
- modul pružnosti ve směru kolmém k ose vlákna je výrazně nižší,
- prodloužení při přetržení je menší než u vláken skleněných,
- koeficient tepelné roztažnosti je záporný (při ohřevu se vlákno zkracuje).

3.2.5. Výrobci uhlíkových vláken

V 80. a počátkem 90. let existovalo ve světě 20 výrobců produkujících asi 50 různých druhů vláken, lišících se modulem, pevností, hustotou a počtem vláken v prameni [8]. Většina těchto firem však fúzovala nebo zanikla. Mezi hlavní výrobce patří firmy:

Zámoří - Hexcel (USA)
- BP-Amoco (USA)
- Acordis (USA)
- Aldia (USA)
- Zoltek (USA)
- Toray (Jap.)
- Mitsubishi Rayon (Jap.)

- Toho (Jap.)
- Taiwan Plastic (Taiwan)

Evropa - Tenax (SRN)
- SGL Carbon Group (SRN)
- Soficar (FRA)

Každá firma používá svůj způsob označování vláken. Název produktu však u většiny z nich obsahuje symbol určující hlavní vlastnost vlákna (HS, HT, IM, atd.). Vlákna vyrobená na bázi smol navíc obsahují písmeno " P ". Pak následuje zpravidla číslo tím vyšší, čím lepší je pevnost a modul pružnosti.
Rovingy a příze z uhlíkových vláken mají označení analogické značení polotovarů ze skleněných vláken. Např. u uhlíkových vláken f. AKZO značky "Tenax" zápis

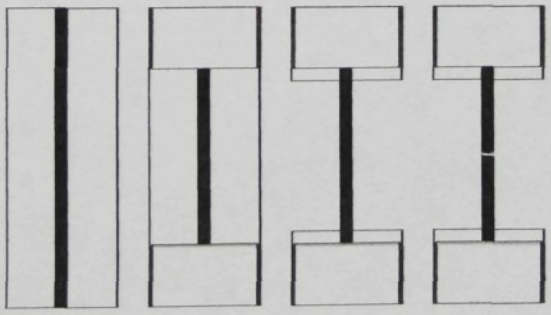
HTA 5131 400tex f6000 Z 10

znamená, že HTA uhlíková vlákna s číselným kódem 5131 (určená pro jednosměrné prepregy), jsou družená v prameni s jemností 400 g/1000 m, celkový počet elementárních vláken je 6000, pramen má zákrut v pravém směru s 10 otáčkami na délce 1 m.

3.3. Parametry použitých vláken

3.3.1. Metody zkoušení

Zkoušená vlákna se položí na papírový proužek, zakápnou pryskyřicí(ChS 1200 (měkčí typ)) a přelepí papírovým čtverečkem. Po vložení do čelistí trhačky se papírový proužek přestřihne a vzorek je připraven ke zkoušce.



Obrázek 12 Příprava vzorku ke zkoušce

Pro zkoušení svazkové pevnost byl použit elektronický přístroj pro měření mechanických vlastností INSTRON s citlivostí ± 0,5% a rychlostí zatěžování 2, 3 a 4 $mm.min^{-1}$.

Zjištěné hodnoty jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v příloze.

3.3.2. Parametry skleněných vláken

Pro výrobu byla použita sklovláknitá příze dodaná firmou Vertex, a.s. pod označením EC 19 272 tex . Cena, použitá lubrikace ani počet zákrutů nebyl uveden.

	V TAHU
PEVNOST [N]	128.3
TAŽNOST [%]	2.35
MĚRNÁ PEVNOST [N/tex]	0.47

Tab. 7 Experimentálně zjištěné parametry při upínací délce 200 mm a rychlosti zatěžování 40 $mm.min^{-1}$

3.3.3. Parametry uhlíkových vláken

Pro výrobu výztuže do kompozitu bylo použito vlákno "Torayca T 800 HB 6K 40B", vyráběné japonskou firmou Toray Industries. Jsou to vlákna středně modulová, vysoce pevná na bázi PAN. Cena tohoto uhlíkového vlákna je 4000 Kč za 1 kg. Parametry uváděné výrobcem jsou v tab. 8.

Průměr vláken [μm]	Počet monofilů ve svazku	Délková hmotnost [tex]	Sizing pryskyřicí [%]	Hustota [$kg.m^{-3}$]	Pevnost v tahu [GPa]	Modul E [GPa]	Tažnost [%]
5,1	6 000	222	1	1 810	5,49	294	1,87

Tab. 8 Parametry uhlíkového vlákna Torayca T 800 HB 6K 40B

	V TAHU
PEVNOST [N]	275.9
TAŽNOST [%]	1.34
MĚRNÁ PEVNOST [N/tex]	1.24

Tab. 9 Experimentálně zjištěné parametry při upínací délce 200 mm a rychlosti zatěžování 40 $mm.min^{-1}$

4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA KOMPOZITŮ

4.1. Použitý stroj

K výrobě dutinných výztuží byl použit upravený splétací stroj, vyrobený firmou DOTEX Nový Jičín. Stroj byl zhotoven na objednávku KPL, jejíž součástí byl požadavek na schopnost stroje vkládat do struktury splétané dutinky podélné nitě a především možnost zpracovávat uhlíková vlákna. První požadavek byl splněn částečně a druhý vůbec ne. Z toho důvodu bylo nutno podrobit stroj konstrukčním úpravám, jež budou popsány dále.

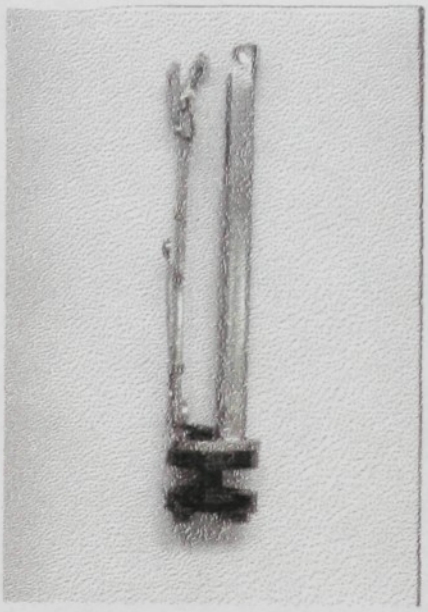
Parametry originálního stroje:

Počet vodících drah: 2
Počet běžců v dráze: 32
Počet vodičů podélných nití: 32
Průměr vodící dráhy: 80 cm

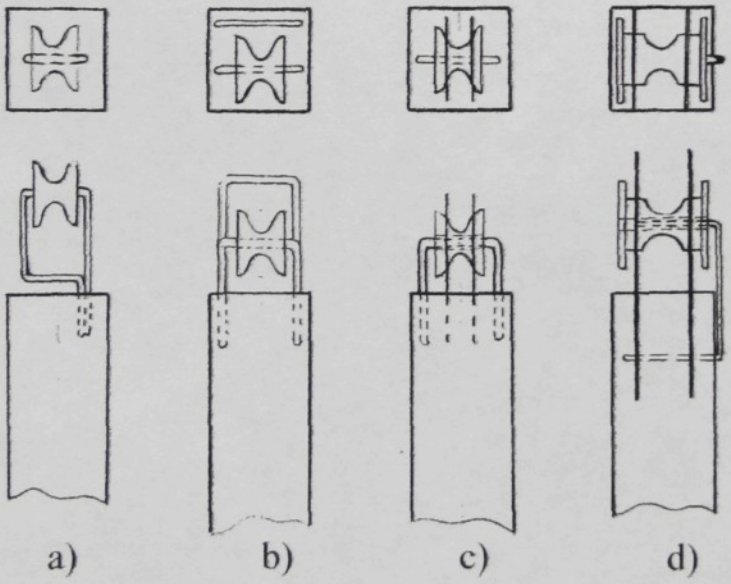
4.1.1 Úpravy stroje

4.1.1.1. Běžce

Na originálních běžcích docházelo k naprosté destrukci uhlíkových kabílků na dvou místech – na napínacím závaží a na hlídači přetrhu nitě . Protože hlídač přetrhu nitě nebyl v našich podmínkách zapotřebí, byl vyřazen. Napínací zařízení bylo původně tvořeno závažím s drátem o průměru asi 1 mm, který byl mým předchůdcem nahrazen rolničkou.Při splétání však přesto docházelo k častému přetrhu kabílku, neboť rolnička byla příliš malá a nebyla schopna zamezit vypadávání kabílku ze své drážky. Protože napínací zařízení se pohybuje v trnu, na kterém je nasazena cívka s materiálem, byla úprava a zvětšení rolničky velmi problematické. Nakonec jsem se rozhodl vyfrézovat do boku trnu drážku, která jednak zamezuje vytahování rolničky z trnu a potom také slouží pro její spojení se závažím. Tím vznikl dostatek prostoru pro nasazení dvou tvarovaných drátů, které zajišťují, že nedojde k vysmeknutí kabílku z drážky rolničky a zároveň působí jako zvedač západky, ovládající odmotávání materiálu z cívky. Bez těchto drátů západka narážela přímo na rolničku, brzdila ji a tím docházelo ke zbytečnému tření kabílku po jejím povrchu. Postupný vývoj závaží je znázorněn na obrázku 14.



Obrázek 13 Běžec bez nasazené cívky



Obrázek 14 Vývoj závaží)

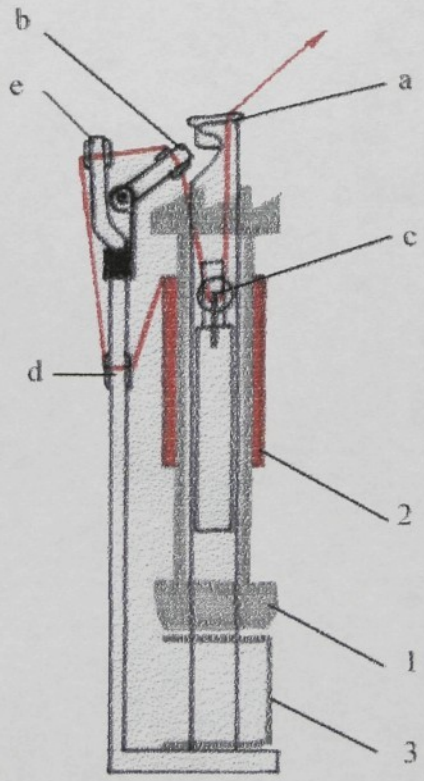
Legenda k obr.14 : a) výchozí závaží vyrobené ing. Krulou [5]

b) horní drátek funguje jako narážka, působící na západku, stále však dochází k vysmekávání kabílku z rolničky

c) drátky fungují jako narážka, vzhledem k malému prostoru však poškozují kabílek a brzdí rolničku

d) konečné řešení; dostatek prostoru zaručuje minimalizaci poškození vedené nitě

K dalšímu, byť ne fatálnímu, poškození vláken dochází už při samotném odvíjení materiálu z cívky. K soukání byl použit soukací stroj s jednou soukací hlavou, umožňující křížové vinutí. Na čelech návinu docházelo k častému padání jednotlivých ovinů a tyto se při odvíjení do sebe zařezávaly. Uspokojivějších výsledků bylo dosaženo použitím návinu s minimální možnou šířkou a malým množstvím nasoukaného materiálu. Experimentální použití rovnoběžného vinutí se ukázalo nevhodným, neboť došlo k zařezání jednotlivých vláken do sebe a následné nemožnosti zpětného odvinutí. Poslední úpravou na běžci bylo nahrazení hlavního vodícího očka (na originálním stroji vyrobeného z kovu) očkem z keramického materiálu OXAL (výrobce BRISK Tábor), čímž také došlo k výraznému snížení míry poškození vláken.



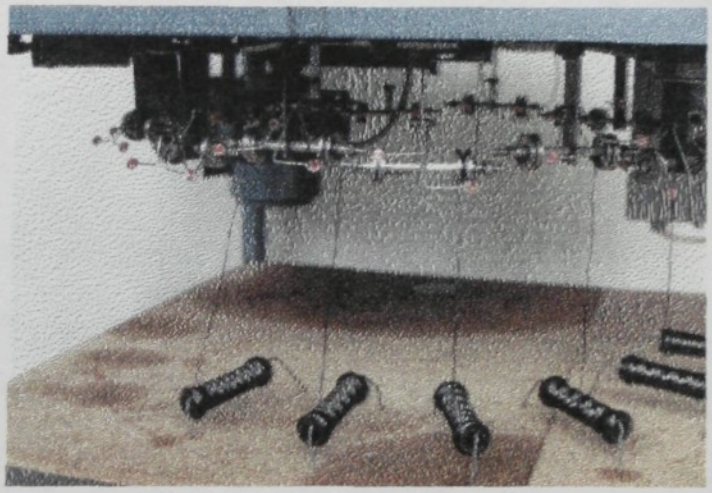
Obrázek 15 Schéma běžce

Legenda k obr. 15 : a) hlavní vodící očko
b) západka
c) rolnička
d), e) vodící očka

1)cívka
2) návin
3) nástavec pro kratší cívky

4.1.1.2. Cívečnice pro uložení podélné nitě

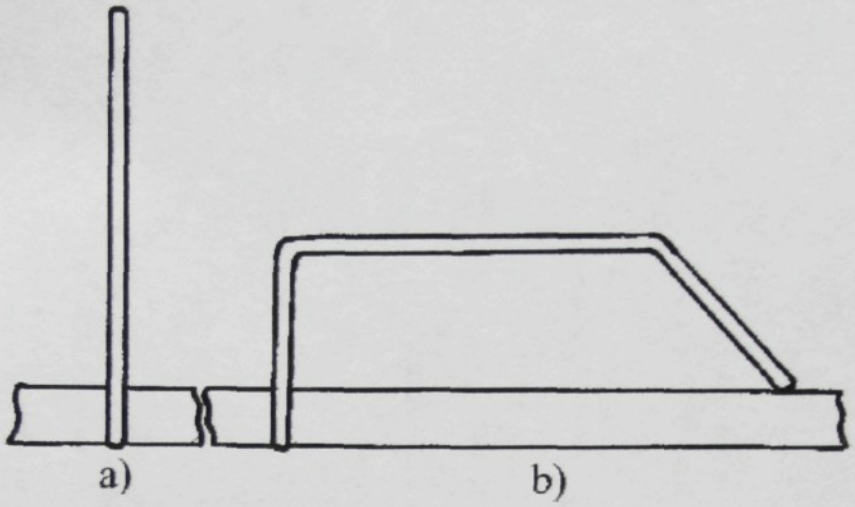
Dodaný stroj nebyl vybaven žádnou cívečnicí ani zařízením pro kontrolu a napínání nitě. Můj předchůdce tedy zhotovil cívečnici tak, že pod pracovní ústrojí umístil dřevotřískovou desku do které kolmo zasadil trny z nerezové kulatiny (viz obr. 17 a). Nevýhoda tohoto způsobu nasazení cívek se ukázala při splétání, neboť často docházelo k padání ovinů z cívek , jejich zasekávání pod cívkou a také k poškozování vláken o čela cívek vlivem jejich podřených povrchů. Z těchto důvodů jsem se rozhodl nahradit použitý způsob odvíjení odvíjením ve směru kolmém na osu cívky. Do desky cívečnice jsem vyvrtal otvory a do nich nasadil drát tvarovaný tak, aby v nich držel vlastní pružností (viz. obr. 17 b). Aby nedocházelo k padání ovinů z cívky na tento drát, použil jsem cívky s bočními čely. Dále bylo nutno nahradit napínací zařízení, neboť to dříve vyrobené nesplňovalo nároky na ně kladené, tj. spolehlivé vyrovnávání kolísavého napětí nití a minimálního poškození vláken. Řešení je nejlépe patrné z obrázku 18.



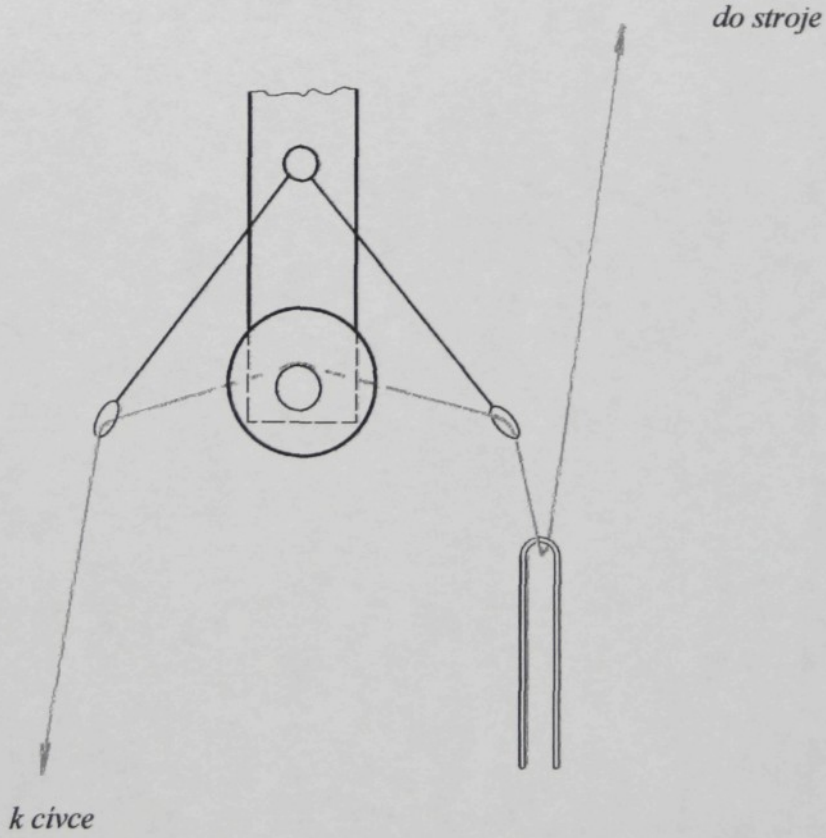
Obrázek 16 Celkový pohled na cívečnici

Materiál uložený na cívkách byl při dlouhém stání stroje znehodnocován olejem, unikajícím z pracovní desky stroje (patrno na obr. 16), což bylo patrně způsobeno nekvalitním dílenským zpracováním. Bohužel toto se nepodařilo odstranit, protože by to pravděpodobně vyžadovalo hlubší zásah do konstrukce.

Tím byly úpravy cívečnice skončeny a provoz ukázal, že zvolené řešení naprosto vyhovuje potřebám experimentální výroby.



Obrázek 17 Zasazení trnů v cívečnici



Obrázek 18 Řešení brzdění a napínání nitě

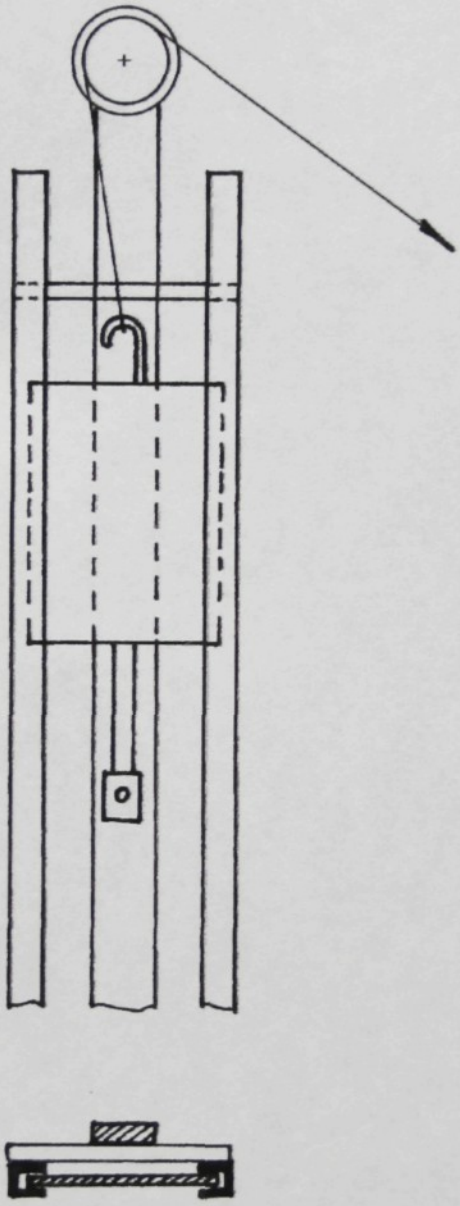
4.1.1.3. Zařízení na odvádění spletené dutinky

Způsob odvádění dutinky použitý pro předchozí diplomovou práci nebyl ideální, neboť při vkládání podélných nití docházelo k jejich zkrucování do šroubovice, což bylo hodnoceno jako vada ve struktuře spletené dutinky. Bylo tedy nutno zhotovit zařízení, které by tomuto zkrucování zabránilo. Z obrázku č. 19 je jeho konstrukce naprosto zřejmá.

Na obrázku 20 je znázorněno zařízení,sloužící k jeho spojení s oplétaným jádrem. Protože předchozí diplomant použil k uchycení opletu na jádro velice jednoduchý způsob, tj. v opletu propíchl otvor a jím přišrouboval oplet pomocí šroubku se širokou hlavou, což při splétání způsobovalo značné zdržení, rozhodl jsem se pro řešení, jež je z obr. 20 také patrno.

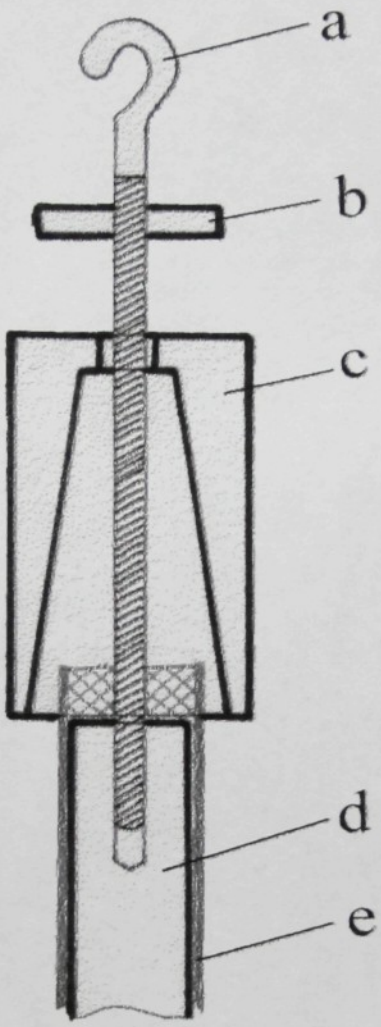
4.1.1.4. Ostatní úpravy

Pro změnu rychlosti odtahování vyrobené dutinky, potřebnou pro změnu úhlu křížení, bylo třeba provést výměnu ozubených kol. Pro převod otáčení z jednoho kola na druhé slouží ozubené mezikolečko nasazené na excentr. Při některých variantách převodového poměru došlo k tomu, že toto mezikolečko nešlo nasadit. Proto byl zhotoven nový excentr. Tato konstrukce převodu však bohužel umožňuje jen omezený počet změn, mnohem výhodnější by v tomto případě byl variátor.



Obrázek 19 Odtah

Legenda k obr. 19 : Na obrázku je znázorněn mezikus, sloužící ke spojení oplétaného jádra s provázkem odtahu. Jeho uložení ve dvou profilech tvaru U zabraňuje otáčení opletu.



Obrázek 20 Řešení spojení jádra s odtahem a fixace opletu

Legenda k obr. 20 a) hák se závitem; slouží ke spojení s mezikusem
b) kolečko dotahující konus
c) konus sloužící k fixaci opletu
d) oplétané jádro
e) oplet

Fotografická dokumentace odtahu je uvedena v příloze.

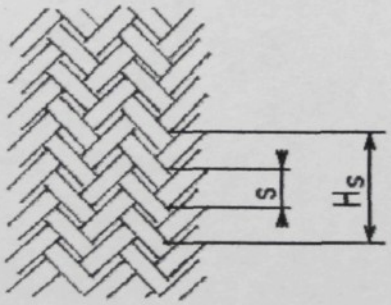
4.2. Vazební parametry armatury

Parametry splétaných výrobků a metodami jejich zkoušení se zabývá norma ČSN 80 0890: Stuhařské a prýmkařské výrobky - metody zkoušení (z roku 1990). [11]

4.2.1. Hustota spletení

Hustota spletení je definovaná jako počet po sobě následujících přechodů nití z líce na rub, na 1 cm délky splétaného výrobku (obr. 11).

Postup: Hustota spletení HS se spočítá na délce 2 cm pomocí lupy. Součet zjištěných hodnot se přepočítá na délku 1 cm s přesností na 1 spletení. Měřený vzorek má být buď volně rozprostřen na stole nebo upnut ve svorce svislého měřidla a zatížen závažím podle předmětové normy.



Obrázek 21 Hustota spletení

Legenda k obr. 21: s - 1 spletení
H_S - hustota spletení

4.2.2. Tloušťka stěny

Tloušťka stěny dutého prýmku je definovaná jako kolmá vzdálenost mezi jejím vnějším a vnitřním povrchem. Udává se v mm.

Postup: Tloušťka stěny dutého prýmku se měří pomocí kalibru a posuvného měřidla. Vzorek se navlékne na kalibr a posuvným měřidlem se změří s přesností na 0,1 mm průměr kalibru s navlečeným vzorkem. Přitom se musí dbát, aby se vzorek nestlačil. Tloušťka stěny b se vypočítá podle vzorce:

$$b = \frac{d_V - d_K}{2} \quad [\text{mm}],$$

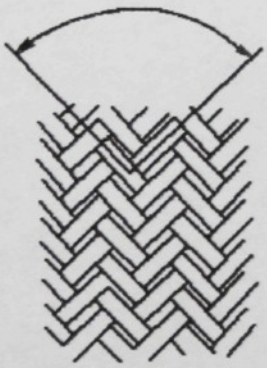
kde d_V v mm, je průměr kalibru s navlečeným vzorkem,

d_K v mm, je průměr kalibru.

4.2.3. Úhel křížení vláken

Je to úhel, který mezi sebou svírají dvě protisměrně uložená vlákna. Udává se ve stupních.

Postup: Pro měření úhlu α 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 kabílků v místě jejich křížení a po přemístění pauzovacího papíru na rovnou plochu byl úhloměrem naměřen úhel α s přesností na 0,5 stupně.



Obrázek 22 Úhel křížení

4.2.4. Měření délkové hmotnosti

Délková hmotnost výrobku je poměr hmotnosti výrobku k jeho délce. Udává se v g/m.

Postup: S přesností na 1 mm se změří délka elementárního vzorku a poté se určí jeho hmotnost. Ze zjištěných hodnot se vypočítá délková hmotnost m_L [g/m] vzorku:

$$m_L = \frac{m}{L} \text{ [g/m]},$$

kde m je hmotnost klimatizovaného elementárního vzorku v gramech,

L délka téhož vzorku v metrech.

4.2.5. Parametry použitých armatur

MATERIÁL	ÚHEL KŘÍŽENÍ a[^{o}]	HUSTOTA SPLETENÍ H_S[100mm^{-1}]	TLOUŠŤKA STĚNY b[mm]	DÉLKOVÁ HMOTNOST M_L[g.m^{-1}]
Sklo	42	50	0.7	30
Sklo	55	60	0.7	32,8
Sklo	72	75	0.8	35
Uhlík	42	45	1	30

Tab. 10 Parametry použitých armatur

Uvedené hodnoty platí pro plný počet výztuží; tj. 32, jejich ubrání nemá na tyto parametry, s výjimkou tloušťky stěny a délkové hmotnosti, vliv.

4.2.6. Strukturální vady armatury

Strukturální vady můžeme rozdělit na vady konstrukce armatury a nedostatečné prostoupení armatury pojidlem.

4.2.6.1. Vady konstrukce armatury

- Poškození zpracovávaného materiálu
- Vady ve struktuře armatury

Poškození zpracovávaného materiálu

K prvnímu poškození dochází během přesoukávání materiálu z předlohy na cívku, když se lámou jednotlivé fibrily při kontaktu s vodícími očky a talířovou brzdičkou. Pokud ale použijeme materiál s neporušeným sizingem (tzn. skladovaný ve vhodných podmínkách), není poškození nijak významné. Při samotném procesu splétání se pak materiál poškozuje v běžci (viz. kapitola 4.1.1.) a konečně následuje poškození na dráze mezi běžcem a sběrným bodem, kde se jednotlivé kabílky po sobě posouvají a dochází k rozvolňování jejich struktury. Toto rozvolnění je tím větší, čím více je v kabílku polámaných fibril. To je patrné na vzorku ve vzorníku. Tento vzorek vznikl tak, že z důvodu snahy o ušetření materiálu bylo použito uhlíkové vlákno skladované po dlouhou dobu v nevhodných podmínkách (slunce, prach) na přibližně polovině běžců v kombinaci s čerstvě rozbaleným materiálem týchž parametrů. Vlivem většího rozvolnění „starého" materiálu (degradovaný sizing) došlo k vytvoření charakteristické struktury, kde se v místech styku rozvolněných vláken nedosáhlo takové hustoty spletení jako při styku materiálu nepoškozeného. Celkově je ale možné konstatovat, že při výrobě kompozitů nemají tyto vady žádný vliv na výsledné vlastnosti výrobku (jsou

míněny pouze poškozené jednotlivé fibrily; k poškození většího rozsahu po provedených úpravách stroje nedochází).

Vady ve struktuře armatury

Před provedenými úpravami stroje docházelo jednak ke stáčení podélných výztužných kabílků do šroubovice a dále k vytváření občasných smyček na těchto výztužích, což je nutno klasifikovat jako hrubou vadu ve struktuře. Často také docházelo k přetrhům jednotlivých kabílků tvořících oplet. [5] Nyní se však tyto chyby vyskytují jen velmi výjimečně, zpravidla zanedbáním obsluhy (chybějící závaží na podélných nitích, nečistoty na rolničce). Z těchto důvodů je nutno při výměně materiálu v běžcích věnovat velkou pozornost vyčištění vnitřku trnu a rolniček od chuchvalců vláken, vznikajících při provozu stroje.

4.2.6.2. Nedostatečné prosycení armatury pryskyřicí

Tyto nedostatky jsou závislé především na počtu jednotlivých opletů tvořících armaturu a pak samozřejmě na druhu použité matrice, hlavně na její viskozitě a afinitě k sycenému materiálu.

Příklad nekvalitního prosycení je ve vzorníku.

4.2.7. Teoretický předpoklad mechanických vlastností armatury

Vliv počtu výztuží

Vzorky bez výztužných nití se budou dle mého názoru deformovat při malém napětí a tudíž budou pro výrobu kompozitů nevhodné. Při použití výztuží bude pevnost vzorků narůstat přímou úměrou. Při tahové zkoušce bude pravděpodobně dosaženo prvního maxima kdy se přetrhnou výztuže, dojde ke skokové změně a postupnému opětovnému zvyšování zátěžné síly ke druhému maximu kdy se budou postupně narovnávat a trhat kabílky v opletu. Z důvodu většího počtu kabílků v opletu bude druhé maximum větší (až dvojnásobně).

Vliv úhlu křížení

Při tahové zkoušce armatury nebude vliv úhlu křížení nití v opletu patrný, alespoň při zvolených úhlech. Jistý vliv by se mohl projevit pouze při použití malých úhlů.

4.2.8. Experimentální zjištění mechanických vlastností armatury

K testování byla zhotovena sada vzorků ze skleněných vláken. Byl zvolen střední úhel křížení, tj. 55°, průměr oplétaného trnu 15 mm, jednovrstvý oplet s počtem podélných výztužných nití 8, 16 a 32.

POČET VÝZTUŽÍ	1. MAXIMUM [kN]	TAŽNOST V 1. MAX. [%]	2. MAXIMUM [kN]	POČET MĚŘENÍ
8	0,79	3,6	3,21	3
16	1,6	3,6	2,97	5
32	3,6	4,3	3,57	3

Tab. 11 Mechanické vlastnosti armatury

Vzhledem k malému počtu měření nelze z uvedených hodnot vyvozovat průkazné závěry, přesto se domnívám, že předpoklad o vlivu počtu výztuží na tahovou pevnost armatury se plně potvrdil. Překvapením jsou nízké hodnoty 2. maxima. Vysvětlení je zřejmě třeba hledat ve vazební konstrukci armatury. Při tahovém namáhání působí obě soustavy nití v opletu proti sobě a tím dochází k jejich vzájemnému poškozování.Rozdílný nárůst tahové síly u 2. maxima lze vysvětlit tak, že při namáhání v jednom směru se vlákna orientují ve směru osy tohoto namáhání a při větším počtu nití ve stěně dutinky roste jejich odpor proti této orientaci.
Grafy těchto zkoušek jsou uvedeny v příloze. Armatury z uhlíkových vláken nebyly testovány jednak z důvodu ceny materiálu a také proto že testy srovnatelných dutinek byly publikovány v lit. 5.

4.3. Technologie přípravy kompozitu

Ideálním způsobem prosycování vláken pryskyřicí by v tomto případě bylo nasycení celého pramence vláken po jeho odvinutí z cívky a následném vytvrzení přímo na oplétaném jádru. Tento způsob by však byl technologicky velice náročný a především neúměrně drahý vzhledem k možnostem tohoto projektu.
Jedinou možností byla v tomto případě ruční laminace. Zde však bylo 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 bylo prosycení větší vrstvy vláken navlečených na trnu ruční laminací. Jako nevhodné se ukázalo prosycení pouze jedné vrstvy vláken s následným vytvrzením a pak opletením další vrstvou. Toto řešení bylo časově i pracně velice náročné, bez možnosti uplatnění v praxi. Navíc se mezi jednotlivými vrstvami vytvářela příliš velká vrstva pryskyřice. Jako optimální se z tohoto pohledu ukázalo 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. 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.Praktickými zkouškami se prokázalo, že je možné ruční prosycení maximálně tří vrstev vláken, tedy do tloušťky stěny trubky 2 mm. To bylo dostačující pro přípravu testovacích vzorků, pro výrobu trubek větších průměrů s větší tloušťkou stěny by však bylo nutné použít horizontální splétací stroj s prosycováním každé vrstvy zvlášť.

Rovněž značným problémem bylo sejmutí vytvrzené trubky z trnu. Jako první byl použit ocelový trn stejného průměru jako oplétané jádro. Byly použity různé separační prostředky. Jako nejlepší se osvědčil separátor na bázi vosku. Bylo třeba 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 značnou sílu.

Optimálním řešením se ukázalo vytvrzení na silikonové trubce s vnitřním ocelovým trnem zajišťujícím přímost vzorku. Po vytvrzení se silikonová trubka natáhla, čímž došlo ke zmenšení jejího průměru, což vyvolalo tahové napětí v místě styku trnu a vzorku a jejich snadnému oddělení. Navíc nebylo téměř nutné používat separátor.

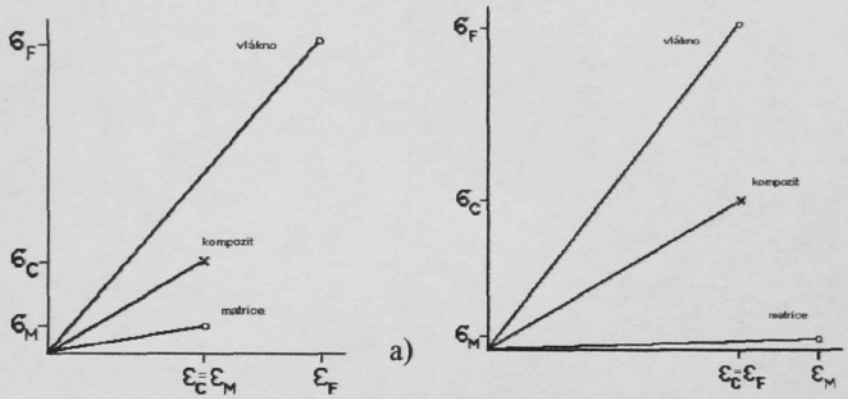
Problém však nastal s navlečením vzorku na silikonovou trubku, kdy docházelo k poškození opletu vlivem tření při nepatrném zkroucení trubky. Tento problém byl vyřešen tak, že byla silikonová trubka na jednom konci zaslepena, natažena na tyč menšího průměru než byl vnitřní průměr silikonové trubky a na druhém konci zajištěna proti posunutí stahovacím kroužkem. Takto došlo ke zmenšení vnějšího průměru silikonové trubky a bylo možné snadné nasazení splétaných dutinek. Po jejich nasazení se povolil stahovací kroužek, čímž se silikonová trubka opět zkrátila a vrátila na původní průměr. Pak byl opět nasazen trn do silikonové trubky pro zkalibrování jejího průměru a její narovnání.

Takto připravený vzorek byl prosycen pryskyřicí. Pro vytlačení bublinek z kompozitu byl nasycený vzorek omotán plastovou páskou. To však bylo provedeno ručně a proto nebyl povrch vzorku úplně ideální.

Optimálním 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 by se dosáhlo zatlačením trnu s přesahem do silikonové trubky nebo jejím natlakováním na požadovaný tlak. Výroba takovéto formy však přesahovala finanční možnosti této práce.

4.3.1. Použité matrice

Matrice má za úkol vzájemně spojovat vyztužující fázi a také chránit vlákna před poškozením a vlivy okolí. Její vlastnosti významným způsobem ovlivňují vlastnosti výsledného kompozitu. Následující obrázek znázorňuje deformační chování kompozitu při použití různých matric.



a) křehká matrice b) tažná matrice

Obrázek 23 Deformační charakteristika kompozitů s křehkou a tažnou matricí

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.

4.3.1.1. Matrice ChS POLYESTER 145

Matrice ChS POLYESTER 145 se zpracovává při výrobě laminátů se zvýšenou chemickou odolností, dobrou mechanickou pevností a tepelnou odolností. Je určen 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, viskozní kapalina s charakteristickým zápachem po styrenu, je nepatrně opalescentní, při zvýšené teplotě opalescence zmizí zcela. 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.

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Viskozita	500 - 650	mPa.s
Obsah netěkavých látek	58 - 62	%
Pevnost v tahu	68	MPa
Modul pružnosti v tahu	2950	MPa
Poměrné prodloužení	4,0	%
Hustota	1,7	g/cm^3

Tab. 12 Vybrané vlastnosti pryskyřice ChS POLYESTER 145

4.3.1.2. Matrice NORPOL COR VE 8300

Pryskyřice NORPOL COR VE 8300-045 se nejčastěji používá jako matrice pro ručně kladené lamináty a výrobu vynutím vláken. Jedná se o Bisfenol-A epoxidovou pryskyřici na bázi vinylesteru, která neobsahuje katalyzátory. Její mechanické vlastnosti jako je vnější adhezischopnost, 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.

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Viskozita	500 - 650	mPa.s
Obsah netěkavých látek	43 - 47	%
Pevnost v tahu	80	MPa
Modul pružnosti v tahu	3400	MPa
Poměrné prodloužení	5,0	%
Hustota	1,02 - 1,06	g/cm^3

Tab. 13 Vybrané vlastnosti pryskyřice NORPOL COR VE 8300-045

4.3.1.3. 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 % jednoprocentního CO urychlovače a 2 % Luperoxu K12.

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Viskozita	450-650	mPa.s
Obsah netěkavých látek	43-47	%
Pevnost v tahu	70	MPa
Modul pružnosti v tahu	4000	MPa
Poměrné prodloužení	2,1	%
Hustota	1,04-1,08	g/cm^3

Tab.14 Vybrané vlastnosti pryskyřice NORPOL COR VE 8770

4.3.1.4. 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.

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Viskozita	1000-3000	mPa.s
Obsah netěkavých látek	56-62	%
Pevnost v tahu	min 50	MPa
Modul pružnosti v tahu	3300	MPa
Poměrné prodloužení	3,0	%
Hustota	1,07-1,15	g/cm^3

Tab. 15 Vybrané vlastnosti pryskyřice ChS - Epoxy 531

4.3.1.5. Matrice ChS - EPOXY 422

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

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Viskozita	500-1900	mPa.s
Obsah netěkavých látek	75-77	%
Pevnost v tahu	40	MPa
Modul pružnosti v tahu	2600	MPa
Poměrné prodloužení	min 5	%
Hustota	1,13-1,15	g/cm^3

Tab. 16 Vybrané vlastnosti pryskyřice ChS - Epoxy 422

4.4. Geometrické a fyzikální parametry kompozitů

Protože použitým způsobem výroby kompozitů (ruční laminací) bylo dosaženo značně kolísavých výsledků co se týče tloušťky stěny a (hlavně u třívrstvých opletů) i plnění pryskyřicí, a také z důvodu pracnosti výroby vzorků ke zkouškám, byly vybrány jen některé druhy kompozitů pro ilustraci. Vzhledem k podobným vlastnostem pryskyřic (viskozita, hustota) lze očekávat i podobné výsledky. Navíc u mechanických zkoušek, které jsou jedním z hlavních témat této práce by se tyto hodnoty neměly zásadně projevit.

POČET VÝZTUŽÍ	TLOUŠŤKA STĚNY b[mm]	DÉLKOVÁ HMOTNOST $m_{LK}[g.m^{-1}]$	PLNĚNÍ p[%]
0	0.8	63,5	-
16	1	83.3	-
32	1.1	87	69

Tab. 17 Použitá armatura – uhlíková vlákna, dvouvrstvý oplet, úhel křížení 42°, vnitřní průměr 15 mm, pryskyřice NORPOL COR VE 8300

POČET VÝZTUŽÍ	TLOUŠŤKA STĚNY b[mm]	DÉLKOVÁ HMOTNOST $m_{LK}[g.m^{-1}]$	PLNĚNÍ p[%]
0	1.5	118.5	-
8	1.5	122.8	-
16	1.7	130.7	-
32	1.8	155	63.5

Tab. 18 Použitá armatura – Skleněná vlákna, třívrstvý oplet, úhel křížení 55°, vnitřní průměr 15 mm, pryskyřice NORPOL COR VE 8300

Pozn. Plnění kompozitu p vyjadřuje hmotnostní zastoupení výztuže v kompozitu, vypočítá se z hodnot m_L a m_{LK}.

5. ZKOUŠENÍ KOMPOZITŮ

5.1. Statická zkouška trubek ohybem

Statická zkouška ohybem byla provedena ve zkušebně podniku PEGUFORM BOHEMIA a.s. v Liberci na přístroji INSTRON 4204. Průběhy zkoušek byly zaznamenávány do datových souborů, které byly pomocí software INSTRON SERIES IX zpracovány do grafů a také ve formě tabulek v různých závislostech.

5.1.1. Vliv matrice na mechanické vlastnosti trubek

Zkouška vlivu matrice na mechanické vlastnosti trubek byla provedena na vzorcích ze skelných vláken se 100% podílem podélných vyztužujících vláken napletených ve třech vrstvách. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 19.

Matrice	Podélná výztuž [%]	Modul [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
8300	100	12,23	1,03	102,55	5,32	4,11	0,74
8770	100	12,87	0,94	115,49	8,05	5,95	0,89
422	100	7,93	0,68	71,46	3,19	6,02	0,57
531	100	13,35	1,15	107,80	4,57	5,50	0,56
ChS	100	10,37	0,91	71,46	5,39	4,87	0,38

Tab. 19 Vliv matrice na mechanické vlastnosti kompozitu

5.1.2. Vliv podélné výztuže na mechanické vlastnosti trubek

Jak již bylo popsáno způsob výroby umožňuje vpletení 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. Výsledky testování těchto vzorků jsou uvedeny v tabulce 20.

Matrice	Podélná výztuž [%]	Modul [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
8300	100	12,23	1,08	86,55	5,32	4,11	0,74
8300	50	11,56	1,21	75,29	4,11	3,94	0,81
8300	25	10,90	0,69	80,00	2,06	4,07	0,56
8300	0	8,21	0,87	77,05	6,15	5,62	0,71
8770	100	12,87	1,30	115,49	8,05	5,95	0,89
8770	50	11,13	0,96	99,65	5,62	4,56	0,51
8770	25	10,37	72,00	80,35	4,35	6,12	0,78
8770	0	7,85	1,11	76,44	7,14	6,07	0,81
422	100	7,93	0,63	71,46	3,19	6,02	0,57
422	50	5,39	0,57	58,22	6,37	7,01	0,82
422	25	4,56	0,66	59,44	3,71	11,53	0,95
422	0	3,81	0,48	54,43	2,68	25,37	1,03
531	100	13,35	1,10	107,80	4,57	5,50	0,56
531	50	11,86	1,02	109,02	3,15	6,43	0,57
531	25	10,26	0,67	111,37	2,11	6,56	0,62
531	0	8,51	0,71	109,94	1,89	6,72	0,49
ChS	100	10,37	0,82	71,46	5,39	4,87	0,38
ChS	50	8,59	1,03	58,22	4,97	5,03	0,46
ChS	25	7,62	0,63	59,44	5,81	4,84	0,36
ChS	0	6,85	0,85	54,43	6,05	6,83	0,54

Tab. 20 Vliv podélné výztuže na mechanické vlastnosti materiálu

5.1.3. Vliv úhlu křížení vláken

Úhel křížení vláken α je úhel, který mezi sebou svírají dvě protisměrně uložená vlákna. Udává se ve stupních. Výsledky provedeného měření na vzorcích ze skelných vláken bez podélné výztuže jsou uvedeny v tabulce 21.

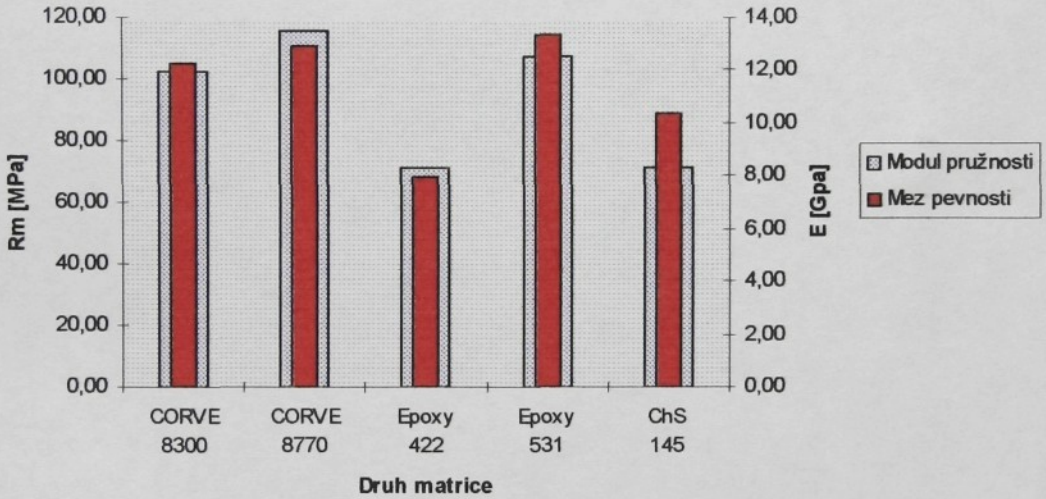
Úhel křížení [°]	Modul [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
72	6,37	0,61	62,24	2,04	4,46	0,32
55	7,23	0,52	70,89	1,58	5,04	0,47
42	8,52	0,76	84,39	3,86	5,05	0,39

Tab. 21 Vliv úhlu křížení na mechanické vlastnosti trubek

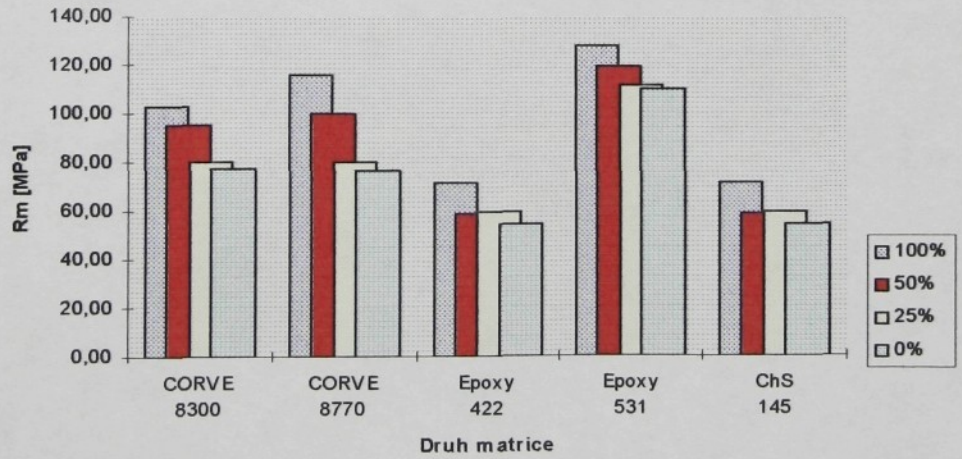
5.1.4. Vyhodnocení vlastností kompozitních trubek

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

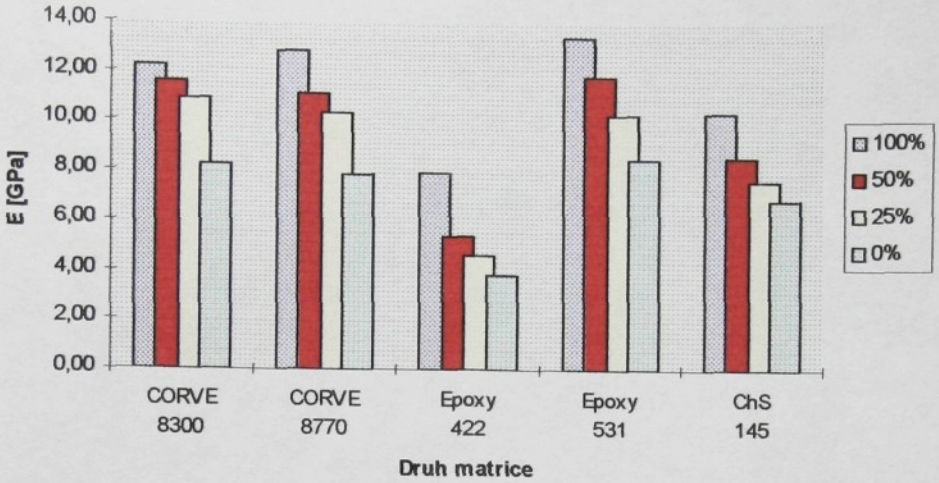
Výbornými se ukázaly vlastnosti vinylesterových pryskyřic, navíc se podařilo pro tento test zajistit epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 531 a 422, z nichž typ 531 dosahoval srovnatelných vlastností s vinylesterovými pryskyřicemi. Pro pryskyřici ChS Epoxy 531 navíc hovoří jednoduchá příprava a snadnost zpracování. Výsledky vlivu pryskyřice při zkoušce ohybem jsou patrné z grafu na obr. 24



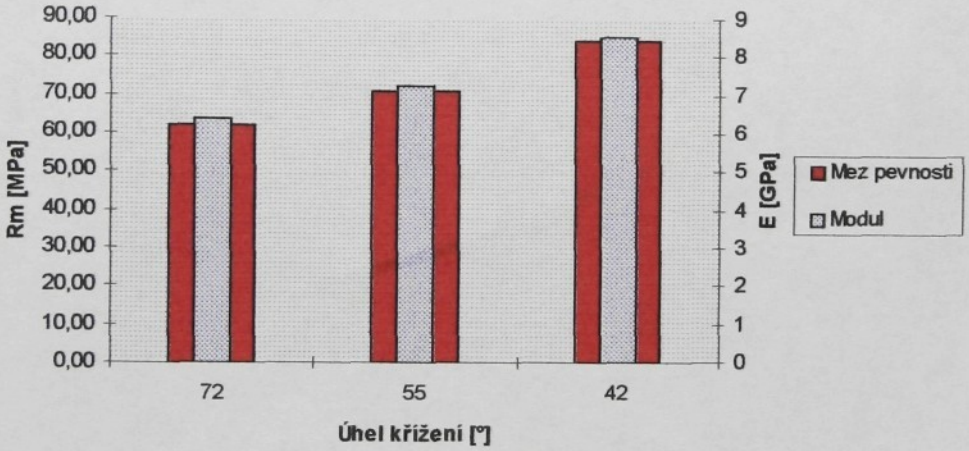
Obrázek 24 Vliv matrice na mechanické vlastnosti kompozitu



Obrázek 25 Vliv podélné výztuže na mez pevnosti materiálu



Obrázek 26 Vliv podélné výztuže na modul pružnosti



Obrázek 27 Vliv úhlu křížení na mechanické vlastnosti trubek

5.1.5. Trubky z uhlíkových vláken

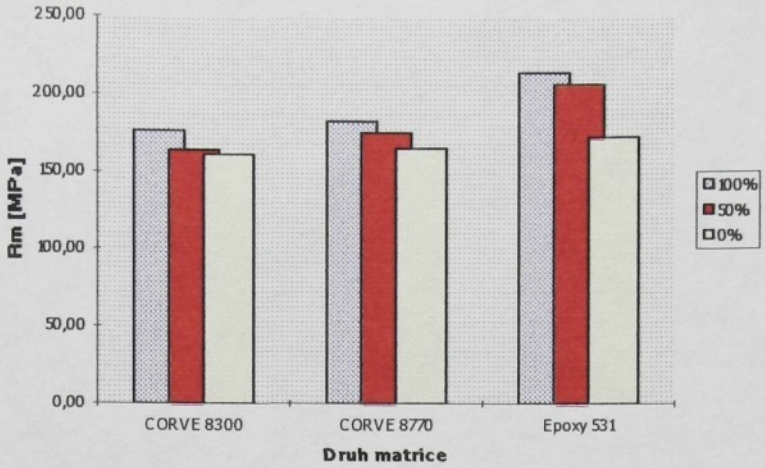
S ohledem na výsledky zkoumání vlivu pryskyřice bylo pro výrobu vzorků z uhlíkových vláken použito pouze tří druhů pryskyřic a to vinylesterových COR VE 8300, 8770 a epoxidové ChS 531.

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 tabulce 22.

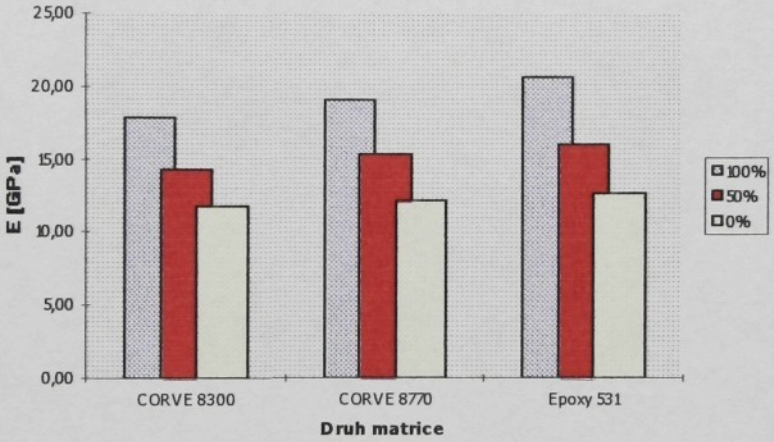
Matrice	Podélná výztuž [%]	Modul [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]	Pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Průhyb [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
8300	100	17,86	1,29	176,57	4,28	2,79	0,23
8300	50	14,34	1,38	164,36	3,47	4,54	0,15
8300	0	11,82	1,11	161,58	5,12	4,00	0,17
8770	100	19,08	1,34	182,12	2,69	3,96	0,11
8770	50	15,29	1,05	174,94	3,08	5,34	0,31
8770	0	12,14	1,41	165,37	2,73	4,78	0,27
531	100	20,66	1,50	213,28	2,15	2,80	0,14
531	50	15,97	1,06	206,42	1,36	4,01	0,19
531	0	12,73	1,19	171,95	3,61	4,68	0,21

Tab. 22 Mechanické vlastnosti trubek z uhlíkových vláken

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. 28, 29.



Obrázek 28 Mez pevnosti uhlíkových trubek



Obrázek 29 Modul pružnosti uhlíkových trubek

5.2. Zkouška tahem

Pro zkoušku kompozitních trubek tahem bylo nutné vyřešit problém s jejich upínáním do čelistí. Kompozitní vzorky nevyklouzávaly z čelistí, ale vlivem tlaku vyvolaného čelistmi docházelo k jejich rozdrcení 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.

Materiál vláken : skleněná vlákna				
Pryskyřice : ChS Polyester 141				
Typ vzorku : dvojitá stěna, úhel křížení 55°, vytvrzeno při 20 °C				
Vzorek	Výztuž [%]	E [GPa]	Rm [MPa]	Poznámka
1	25	9,34	68,54	prasklina na hranici čelistí
2	25	10,12	96,28	
3	25	10,29	102,98	
4	25	9,81	104,58	
5	25	10,06	103,62	
Průměr		9,92	95,2	Průměr bez vzorku č.1: **Rm=101,87 MPa; E=10,07 GPa**
1	50	12,64	168,70	
2	50	11,86	152,86	
3	50	12,06	145,96	
4	50	11,93	142,30	
5	50	12,52	171,67	
Průměr		12,20	156,3	
1	100	15,21	241,64	
2	100	14,87	263,34	
3	100	15,34	235,19	
4	100	14,28	198,60	prasklina na hranici čelistí
5	100	15,04	233,80	
Průměr		14,95	234,51	Průměr bez vzorku č.4: **Rm=243,49 MPa; E=15,12 GPa**

Tab. 23 Mechanické vlastnosti trubek

Zkouška byla provedena nejprve pro trubky ze skleněných 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 tabulkách.

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 vyplynul výrazně větší vliv podélné výztuže při tahovém namáhání než při ohybovém a také se potvrdil větší vliv

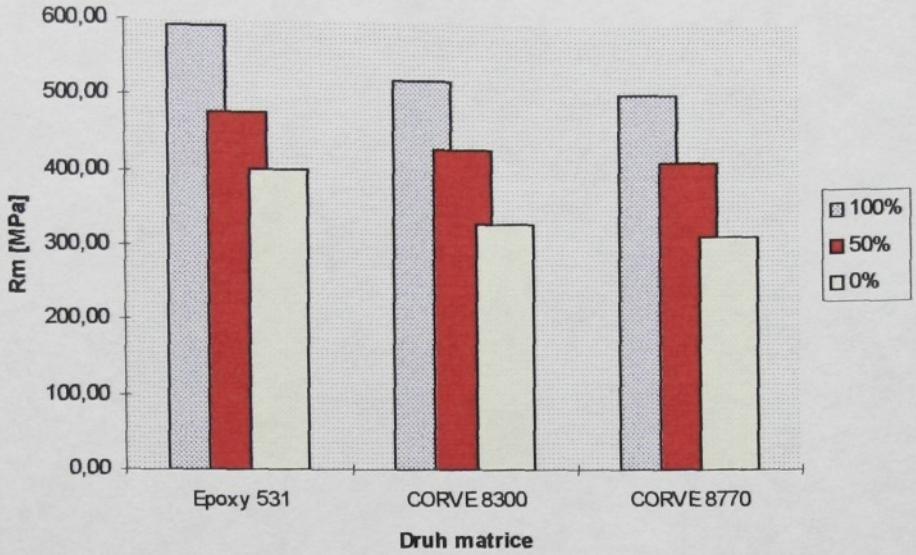
podélné výztuže na modul pružnosti než na pevnost materiálu. Rozdíly v naměřených hodnotách meze pevnosti materiálu mezi vzorky se 100% výztuže a bez výztuže se pohyboval přibližně okolo 40% a u modulu pružnosti dokonce okolo 90%, což je patrné z grafů. Lze tedy konstatovat, že při tahovém namáhání přenášejí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

Materiál vláken : Uhlíková vlákna				
Typ vzorku : dvojitá stěna, úhel křížení 42°				
Pryskyřice: Epoxy 531, vytvrzeno 48 h při 25 °C				
Vzorek	Výztuž [%]	E [GPa]	Rm [MPa]	Poznámka
1	0	14,05	391,70	
2	0	14,29	402,10	
3	0	14,47	387,80	
4	0	14,51	385,60	
5	0	14,08	391,50	
Průměr		14,28	391,74	
1	50	20,59	476,90	
2	50	20,84	471,30	
3	50	19,92	433,50	prasklina na hranici čelistí
4	50	20,81	476,80	
5	50	20,63	478,30	
Průměr		20,56	467,36	Průměr bez vzorku č.3: **Rm=475,83 MPa; E=20,72 GPa**
1	100	30,11	581,20	
2	100	29,87	583,40	
3	100	30,35	590,20	
4	100	30,26	591,20	
5	100	29,66	552,30	prasklina na hranici čelistí
Průměr		30,05	579,66	Průměr bez vzorku č.5: **Rm=586,50 MPa; E=30,15 GPa**

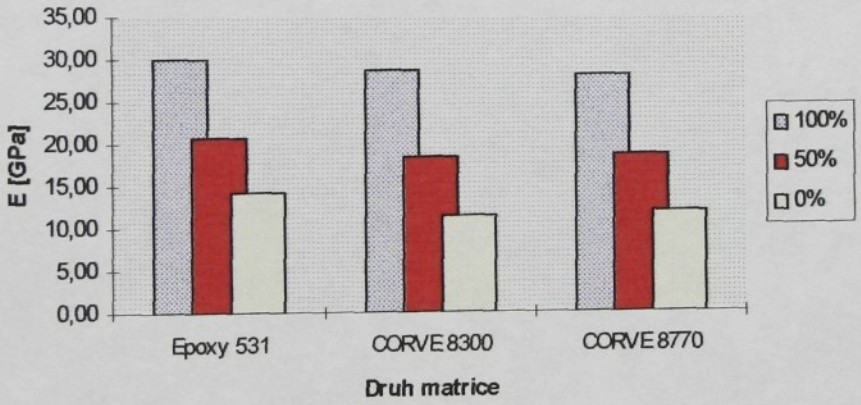
Tab. 24 Mechanické vlastnosti trubek

Materiál vláken : Uhlíková vlákna				
Typ vzorku : dvojitá stěna, úhel křížení 42°				
Pryskyřice: COR VE 8770, vytvrzeno 24 h při 60 °C				
Vzorek	Výztuž [%]	E [GPa]	Rm [MPa]	Poznámka
1	0	11,24	315,70	
2	0	11,62	310,20	
3	0	11,02	321,50	
4	0	11,98	309,70	
5	0	11,37	322,60	
Průměr		11,45	315,90	
1	50	18,31	411,60	
2	50	18,65	407,30	
3	50	18,12	416,80	
4	50	18,42	412,40	
5	50	18,64	420,10	
Průměr		18,43	413,64	
1	100	29,06	509,10	
2	100	28,49	499,60	
3	100	28,63	505,80	
4	100	28,81	510,10	
5	100	28,47	508,70	
Průměr		28,69	506,66	

Tab. 25 Mechanické vlastnosti trubek



Obrázek 30 Vliv podélné výztuže na mez pevnosti trubek



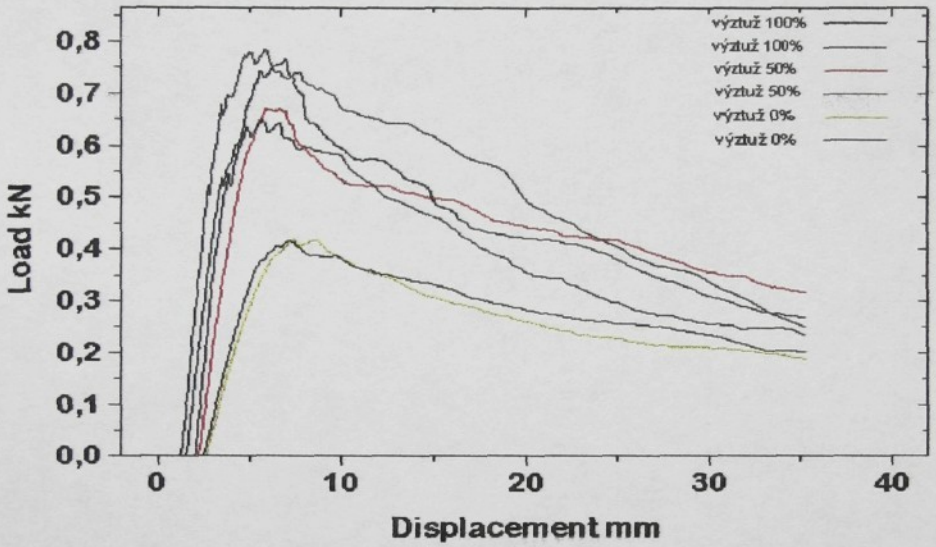
Obrázek 31 Vliv podélné výztuže na modul pružnosti trubek

Materiál vláken : Uhlíková vlákna				
Typ vzorku : dvojitá stěna, úhel křížení 42°				
Pryskyřice:COR VE 8300, vytvrzeno 24 h při 60 °C				
Vzorek	Výztuž [%]	E [GPa]	Rm [MPa]	Poznámka
1	0	12,06	326,30	
2	0	11,39	311,40	prasklina na hranici čelistí
3	0	11,68	343,80	
4	0	11,91	328,70	
5	0	12,15	341,10	
Průměr		11,84	330,26	Průměr bez vzorku č.2: **Rm=334,98 MPa; E=11,95 GPa**
1	50	19,08	430,20	
2	50	18,64	421,60	
3	50	18,97	436,20	
4	50	18,46	432,80	
5	50	18,73	428,30	
Průměr		18,78	429,82	
1	100	27,98	521,80	
2	100	28,65	517,60	
3	100	28,71	526,10	
4	100	28,34	529,30	
5	100	27,59	497,10	prasklina na hranici čelistí
Průměr		28,25	518,38	Průměr bez vzorku č.5: **Rm=523,70 MPa; E=28,42 GPa**

Tab. 26 Mechanické vlastnosti trubek

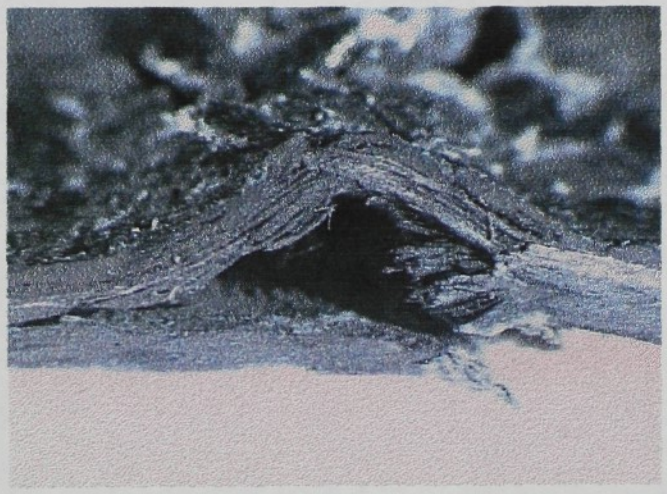
5.3. Princip porušení kompozitních trubek

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.



Obrázek 32 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.

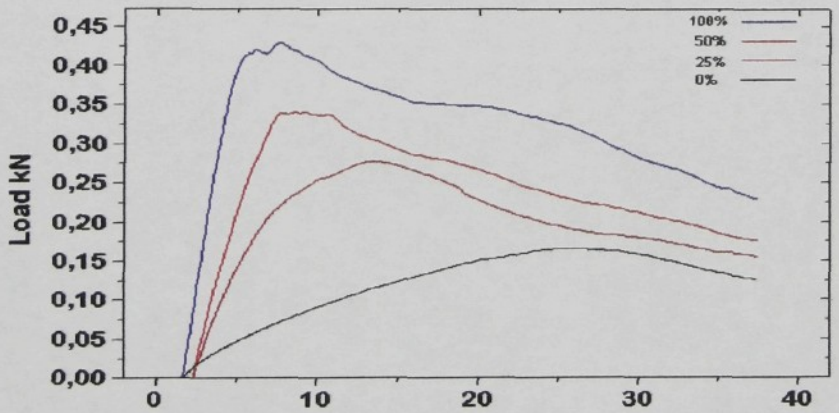


Obrázek 33 Porušení trubky na tlakem namáhané straně

Obrázek 34 Lokální delaminace vzorku

Po tomto porušení celková síla stále roste, až dojde k porušení šikmých vláken a k promáčknutí stěny trubky v místě styku se zatěžovací 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, důsledkem toho byla lokální delaminace obou vrstev materiálu. Při dalším zatěžování docházelo k deformaci trubky na jejích bocích.

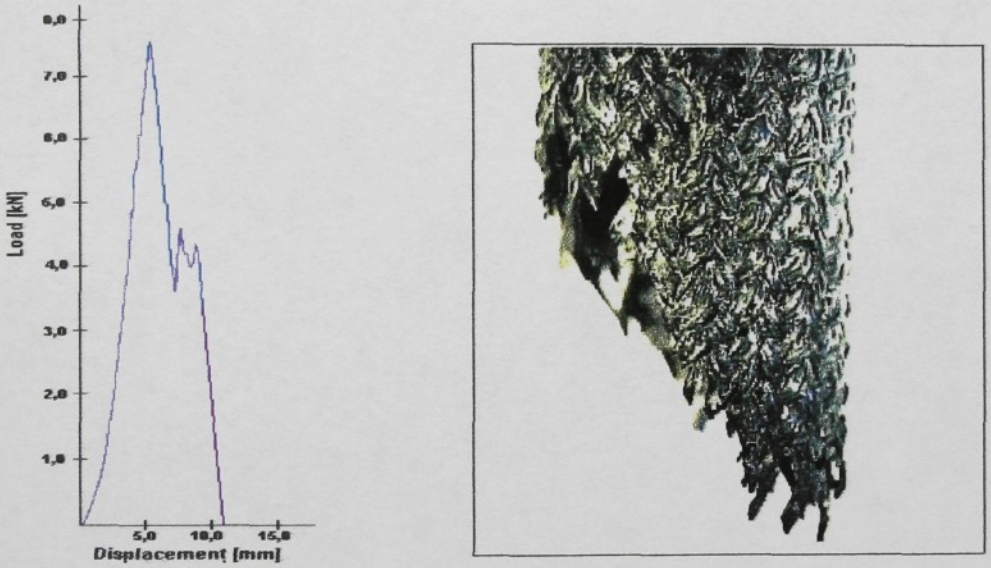
U trubek bez vyztužujících vláken chybí na zátěžovém diagramu skok při prvotním porušení, k plastické deformaci dochází pozvolna bez výrazných skokových změn, trubka se začíná deformovat v průřezu, dochází k poškození vláken v místě styku se zatěžovací hlavou a na bocích vzorku v důsledku promáčknutí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



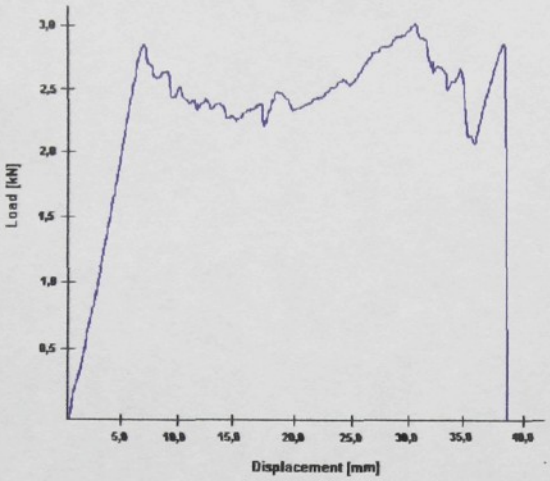
Obrázek 35 Průběh zatížení vzorků vytvrzených v matrici ChS Epoxy 422

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.

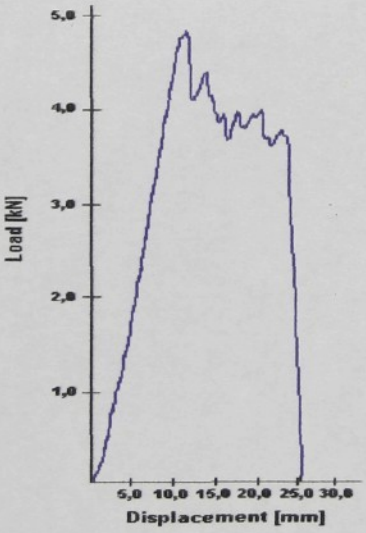
Jak již bylo popsáno, vlastnosti trubek namáhaných tahem jsou velmi závislé na množství podélné výztuže. To samé platí i pro způsob porušení těchto trubek. U vzorků se 100% podélné výztuže docházelo k lineárnímu průběhu zatížení a posléze k náhlému lomu pod úhlem 30°-70° k ose vzorku bez výraznější plastické deformace.



Obrázek 36 Zátěžový diagram vzorku se 100% výztuže a fotografie jeho porušení



Obrázek 37 Zátěžový diagram vzorku s 0% výztuže a fotografie jeho porušení



Obrázek 38 Zátěžový diagram vzorku s 50% výztuže a fotografie jeho porušení

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

Způsob porušení vzorků s 50% podélné výztuže odpovídal kombinaci obou předchozích způsobů porušení.

5.4. Návrh použití vyrobených kompozitů

Praktické využití kompozitů v podobě, v jaké byly testovány se mi jeví jako problematické. Důvodem je zejména jejich chování při ohybovém namáhání. Trubka s popsanou tloušťkou stěny se totiž poruší mnohem dříve, než by se dalo očekávat od vlastností materiálu výztuže. Zlepšení tohoto stavu (zabránění prolomení stěny na tlakem namáhané straně) lze podle mého názoru dosáhnout dvěma způsoby – zvětšením tloušťky stěny, což je při cenách výztuže (hlavně uhlíkových vláken) finančně náročné a v našich podmínkách nerealizovatelné kvůli obtížnému prosycování více než dvou vrstev opletu, nebo vyplněním trubky lehkým a současně proti tlakovému namáhání odolným materiálem. Takovým způsobem se vyplňují například tenisové rakety (raketa Wilson Ultra FPK má jádro ze speciální polyuretanové pěny která zároveň redukuje nežádoucí vysokofrekvenční vibrace).

Nízká odolnost stěny trubky je také zapříčiněna poměrně nízkým plněním kompozitu, což vyplývá z vazební struktury armatury, kde je mezi kabílky poměrně dost volného prostoru pro pryskyřici. Tyto prostory se neodstraní ani stlačením stěny při laminaci. Trubka se stejnou tloušťkou stěny vyrobená technologií navíjení má hodnoty plnění mnohem vyšší a také výroba tlustostěnných trubek nečiní žádné problémy.

Praktické využití technologie splétání proto vidím spíše v oplétání různých výrobků u kterých je potřeba zlepšit hodnoty zatěžovacích charakteristik jako jsou např. lyžařské a hokejové hole, pádla nebo lodní stěžně. Výhodou této technologie je rychlost výroby a hlavně možnost oplétat prostorově tvarované výrobky, což konkurenční navíjení nedokáže (viz. obrázek výroby skořepiny závodního automobilu v příloze).

Pokud se týká čistě tahového namáhání kompozitních trubek je situace jiná. Vysoká měrná mez pevnosti a nízký měrný modul pružnosti v porovnání s různými kovovými materiály (viz. příloha) tyto trubky předurčují k roli např. závěsných nosníků pro přesné konstrukce.

6. TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PROJEKTU

6.1. Technická náročnost experimentu

- Soukání

  Byl použit laboratorní soukací stroj s jednou pracovní hlavou, na kterém bylo zhotoveno jednoduché brzdící zařízení a všechna vodící očka byla vyměněna za očka z materiálu OXAL.
- Splétání

  Tato operace proběhla na stroji PSJ 64/1 upraveném dle popisu v kap.4.3.
- Výroba kompozitu

  Byla použita ruční laminace popsaná v kap.5.2.
- Zkoušení vlastností kompozitů a vláken

  Byly použity standartní trhací stroje, konce vzorků byly upraveny tak, aby nedocházelo k jejich poškozování v čelistech.

6.2. Ekonomická náročnost experimentu

Výroba armatury

Úpravy stroje byly prováděny v dílnách TU a použit byl materiál a součástky vyřazené z jiných strojů, např. talířové brzdičky, oplétaná jádra, dráty na výrobu trnů do cívečnice, U profily k odtahu, závaží, ocelová kulatina na výrobu rolniček atd. Některé součástky byly darovány různými podniky, např. vodící očka z BRISKu Tábor. Velká časová náročnost úprav byla způsobena značným počtem upravovaných či vyráběných dílů (64 závaží, 32 brzdiček a napínačů, úprava 64 běžců).

Na popsaném stroji nepřipadá v úvahu sériová výroba, úpravy byly provedeny v rámci možností tak, aby bylo možno zhotovit sadu vzorků ke zkouškám.Pro názornou ilustraci uvádím příklad časové náročnosti deseti třívrstvých dutinek o délce přibližně 35 cm.

a) soukání a navlékání stroje

Pokud dva lidé soukají a jeden nasazuje cívky na stroj, je možné tento úsek zvládnout za 4-5 hodin, pro jednoho člověka zabere tato operace téměř dva dny.

b) splétání

Zásoba materiálu vystačí maximálně na uvedený počet dutinek (pokud se nevyskytnou chyby), na její vypletení je zapotřebí cca dvou až třech hodin práce jednoho člověka.

c) příprava stroje k novému navlečení

Je nutno sejmout prázdné cívky a očistit je od zbytků starého materiálu, dále je třeba vyčistit rolničky a vnitřky trnů od nečistot. To se provádí pinzetou a v případě,že předchozím zpracovávaným materiálem bylo uhlíkové vlákno s nekvalitním sizingem, zabere tato operace několik hodin neboť někdy je nutné odšroubovat běžec a nečistoty z něho vyfoukat, popř. uvolnit rolničku vystříháním namotaných vláken.

Z výše uvedeného je tedy patrno, že pokoušet se o ekonomicky výhodnou výrobu armatur na tomto stroji je naprosto nereálné, zejména pro časovou náročnost výměny materiálu.

Laminace

O použití ruční laminace pro sériovou výrobu také nelze uvažovat; podniky, zabývající-se výrobou kompozitů většinou používají kontinuální způsob (stroj-laminace-vytvrzení).

6.2.1. Materiálové náklady

Uhlíkové vlákno bylo zakoupeno za cenu 8000 Kč/kg, nyní cena poklesla na 4000 Kč/kg.

Skleněné vlákno bylo darováno firmou Vertex bez udání ceny, ta se pohybuje kolem 150 Kč/kg.

Použité pryskyřice darovaly firmy Reichhold a Spolchemie Ústí nad Labem bez udání cen, ty se u epoxidových pryskyřic pohybují kolem 250 Kč/kg, vinylesterové a polyesterové jsou dražší.

MATERIÁL	POČET OPLETŮ	ÚHEL KŘÍŽENÍ	PLNĚNÍ	PRYSKYŘICE	CENA 1 METRU
sklo	1	42°	70%	422	7,75 Kč
sklo	1	55°	70%	422	8.50 Kč
sklo	1	72°	70%	422	9.00 Kč
uhlík	1	42	70%	422	123,25 Kč

Tab. 27 Materiálové náklady u vybraných kompozitů

Obrovský rozdíl v cenách je dán cenou materiálu výztuže, ceny pryskyřic jsou nepodstatné.

ZÁVĚR

Hlavním úkolem této práce bylo technologií splétání zhotovit sadu C-P a S-P kompozitů, na nichž by bylo možno odzkoušet základní mechanicko-fyzikální vlastnosti těchto materiálů. K tomu bylo nutno upravit konstrukci pracovních částí stroje PSJ 64/1 tak, aby stroj byl schopen zpracovat tak choulostivé materiály, jakými jsou skleněná a zejména uhlíková vlákna.

Vhodné vazby a průměry výztuží byly vybrány ve spolupráci s ing. A. Kargerem, který výsledky testů kompozitů použil ve své disertační práci, kde zároveň uvádí jejich srovnání s běžnými materiály, používanými ve strojírenství.

Toto srovnání dává mojí diplomové práci další rozměr a její využití je snad i jistou zárukou, že nebyla vypracována samoúčelně.

Seznam použité literatury:

[1] Bareš A. R., Kompozitní materiály, SNTL Praha, 1988

[2] Agarwal B. D., Broutmann L. J., Vláknové kompozity, SNTL Praha, 1987

[3] Pluhař J. a kol., Nauka o materiálech, SNTL Praha, 1989

[4] Macek, Zuna, Nauka o materiálu, ČVUT Praha, 1995

[5] Krula M., Diplomová práce, TU Liberec 1997

[6] Daněk V., Speciální technologie a programování výroby, TU Liberec, 1991

[7] Věda a technika mládeži, různé ročníky

[8] Kořínek, Z.: Vlákna pro kompozity s polymerní matricí, Skripta ČVUT, 1996

[9] Kolouśková P., Dutinné splétané výrobky z uhlíkových vláken, Liberec 1995

[10] Textil, různé ročníky

[11] ČSN 80 0890: Stuhařské a prýmkařské výrobky - metody zkoušení, 1990.

Seznam příloh

Ukázky využití kompozitů

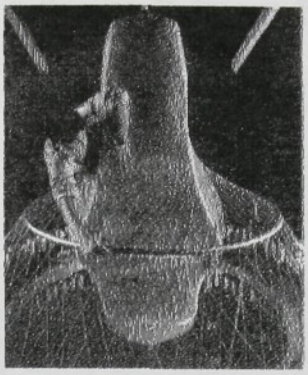
Zjištěné parametry použitých vláken

Fotografická dokumentace stroje

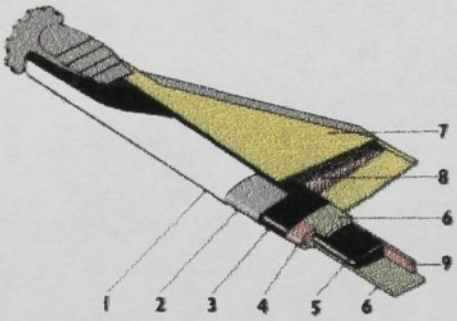
Zjištěné parametry armatur

Srovnání vlastností kompozitů s některými dalšími materiály

Ukázky využití kompozitů

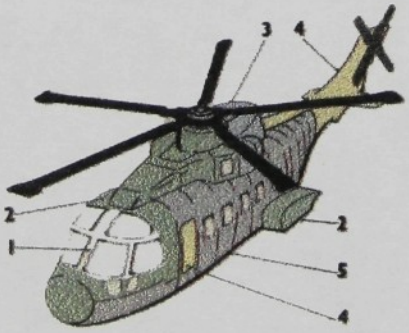


1. Výroba skořepiny závodního automobilu



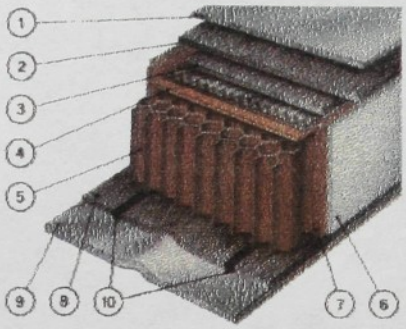
2. Konstrukce rotorového listu British Experimental Rotor Programme

Legenda k 2. : 1) ochranný tepelný štít z titanu
2) ochranná tepelná fólie
3) vnější obal s uhlíkovými vlákny
4) vypěňovaný díl se skleněnými vlákny
5) vnitřní obal s uhlíkovými vlákny
6) vrstvy s uhlíkovými a skelnými vlákny
7) plášť se skelnými vlákny
8) voštinová výplň z nomexového kompozitu
9) zadní stěna z kompozitu se skleněnými vlákny



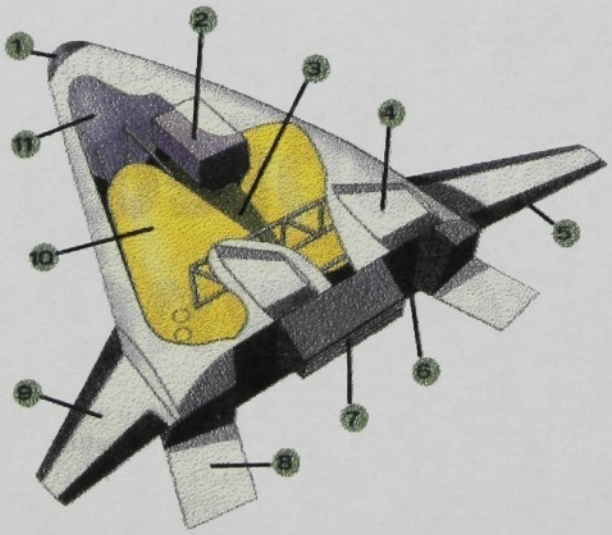
3. Využití kompozitů u vrtulníku EH-101

Legenda k 3. : 1) vypěňovaná konstrukce s uhlíkovými a aramidovými vlákny
2) kompozit Kevlar-Nomex
3) struktura s uhlíkovými a nomexovými vlákny
4) hybridní kompozit kevlar-nomex-uhlík
5) díly z lehkých kovových slitin, kompozity tvoří 24 % konstrukce



4. průřez lyží Delta Cobra (Rossignol)

Legenda k 4. : 1) ozdobná lišta z polyesteru
2) deska ze skelných kompozitů
3) středová výztuha ze skelných kompozitů
4) fixační vložka
5) plástvová struktura z aramidových vláken impregnovaných fenolickou pryskyřicí
6) boční výztuha je z melaminové pryskyřice se skleněnými vlákny
7) dřevo
8) deska ze skelných kompozitů
9) skluznice z vysokomolekulárního polyetylénu
10) uhlíkové kompozity



5. Projekt X-33 firmy Lockheed Martin, navrženo pro NASA

Legenda k 5. : 1) kompozit Carbon-Carbon
2) schránka na výbavu
3) letová avionika
4) svislá ocasní plocha
5) elevon
6) směrové kormidlo
7) pohon
8) řídící klapka
9) vodorovná ocasní plocha
10) kompozitová nádrž na zkapalněný vodík
11) hliníková nádrž na zkapalněný kyslík

Parametry použitých vláken

Skleněné vlákno

Celkem 17 měřeni, 0 vyloučeno.

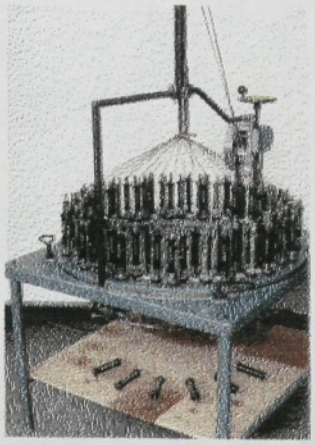
Těleso Cislo	Maximum (mm)	Maximum (kN)
1	9.400	.1122
2	4.070	.1714
3	3.070	.1031
4	3.040	.1306
5	3.410	.1282
6	3.540	.1126
7	6.470	.0928
8	4.550	.1489
9	5.710	.1352
10	5.070	.1295
11	9.360	.0758
12	4.230	.1360
13	3.520	.1344
14	4.330	.1391
15	4.400	.1651
16	3.780	.1165
17	3.840	.1495
Průměr	4.811	.1283
Standard odchylka :	1.939	.0246
Var. koef.	40.3%	19.4%

Uhlíkové vlákno

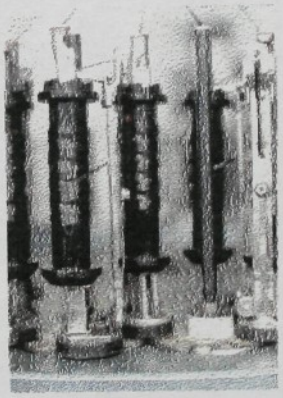
Č.vzorku	Max.(mm)	Max.(kN)	Č.vzorku	Max.(mm)	Max.(kN)	Č.vzorku	Max.(mm)	Max.(kN
1	2,410	,2749	20	2,760	,2866	38	2,810	,2805
2	2,630	,2821	21	2,430	,2895	40	2,560	,2483
3	2,550	,2584	22	2,770	,2819	41	2,560	,2596
4	2,600	,2819	23	2,830	,2828	42	2,550	,2698
5	2,980	,1511	24	2,490	,2651	43	2,700	,2495
6	2,730	,2942	25	2,670	,3013	44	3,120	,3067
7	2,400	,2650	26	2,440	,2815	45	2,980	,2656
8	2,490	,2468	27	2,720	,2777	46	2,420	,2834
9	2,620	,2699	28	2,580	,2727	47	3,180	,2666
10	2,620	,2581	29	2,330	,2444	48	2,690	,2801
11	2,850	,2881	30	2,430	,2627	49	2,460	,2890
12	2,740	,2957	31	2,380	,2881	50	2,780	,2864
13	2,450	,2964	32	2,490	,2923	50	2,860	,2740
14	2,890	,2683	33	2,520	,2926	52	2,950	,3165
15	2,970	,3003	34	3,040	,2599	53	2,330	,2726
16	2,620	,2702	35	2,600	,2795	54	2,710	,2783
17	2,780	,2808	36	2,830	,2824	55	2,680	,2609
18	2,460	,2702	37	3,120	,2973	56	2,580	,2710
19	2,900	,2760	38	2,800	,2591	57	2,490	,2784

Průměr	2,675	0,2759
S.odchylka	0,210	0,0236
V. koef.	7,86%	8,56%

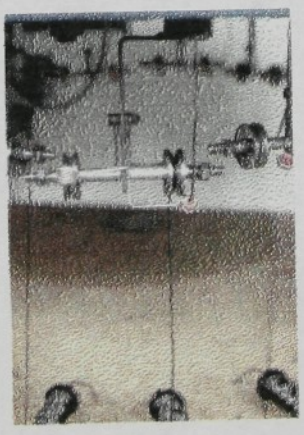
Fotografická dokumentace stroje



Celkový pohled

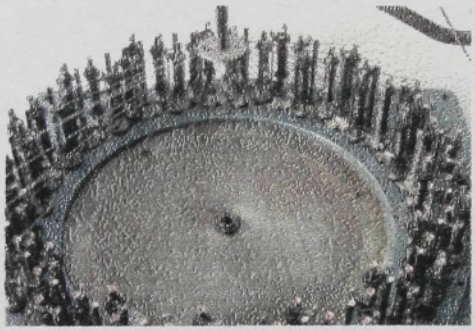


běžce

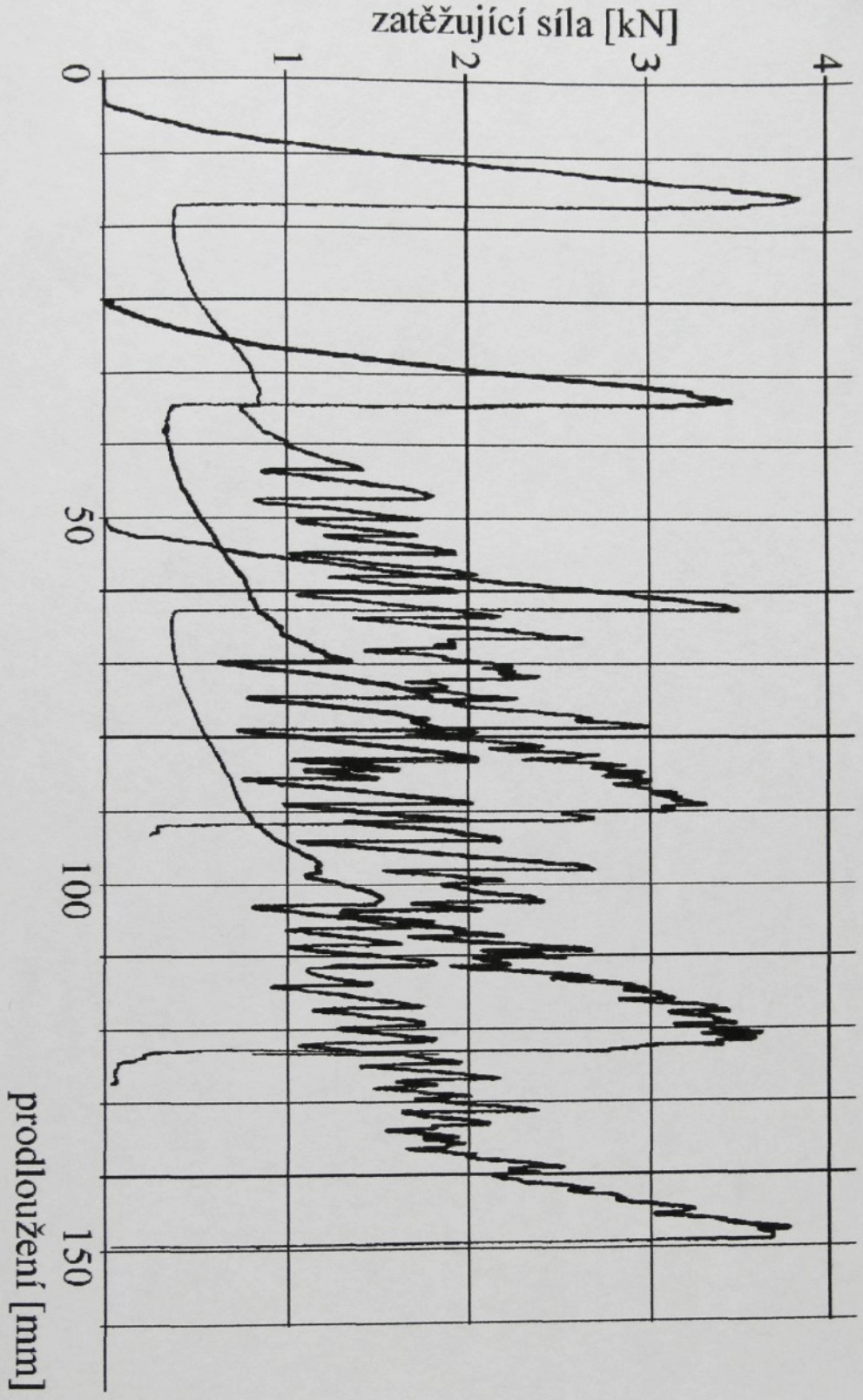


brzdička

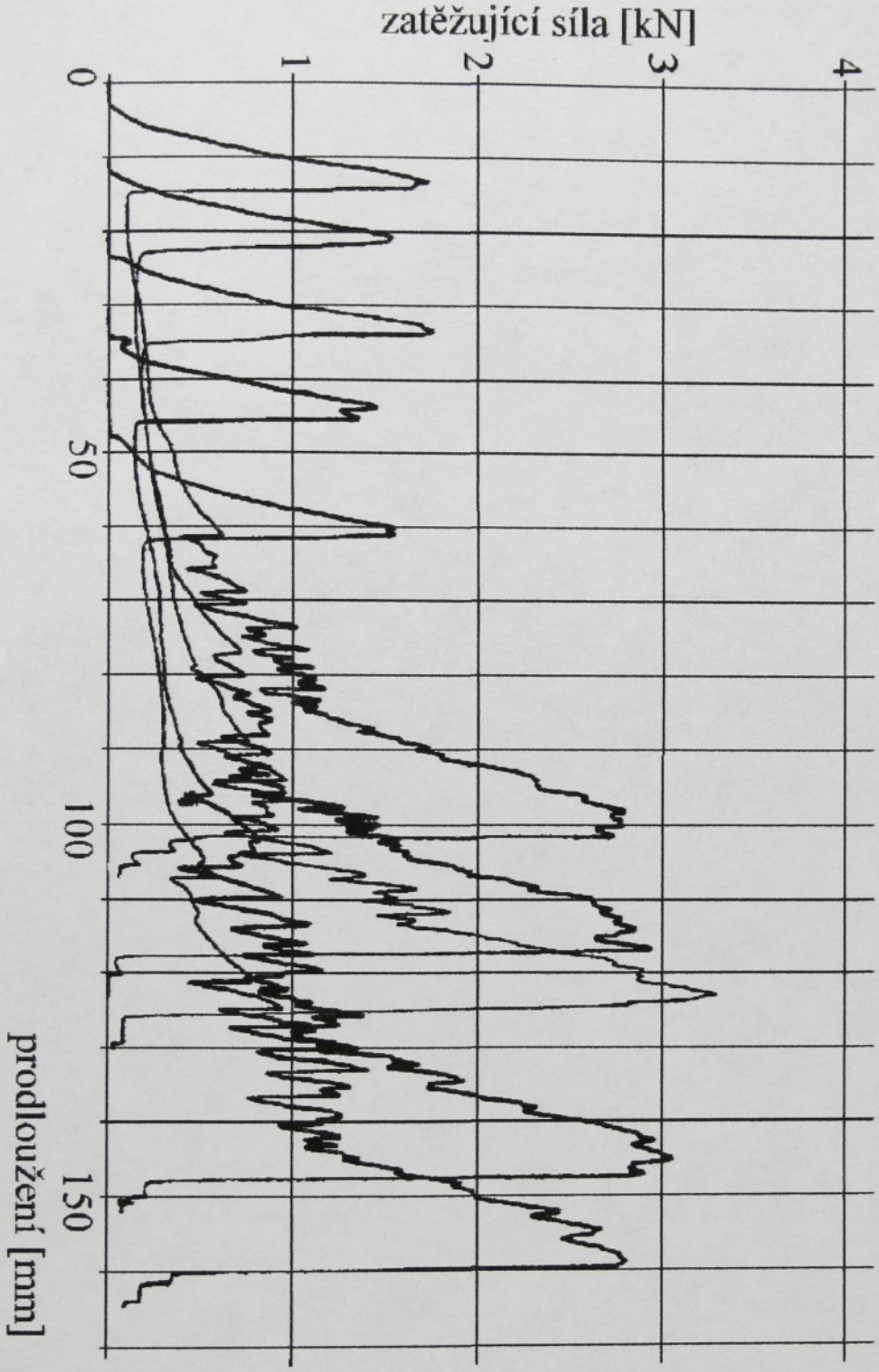
Uložení mezikusu v U profilech, spojení s odtahem



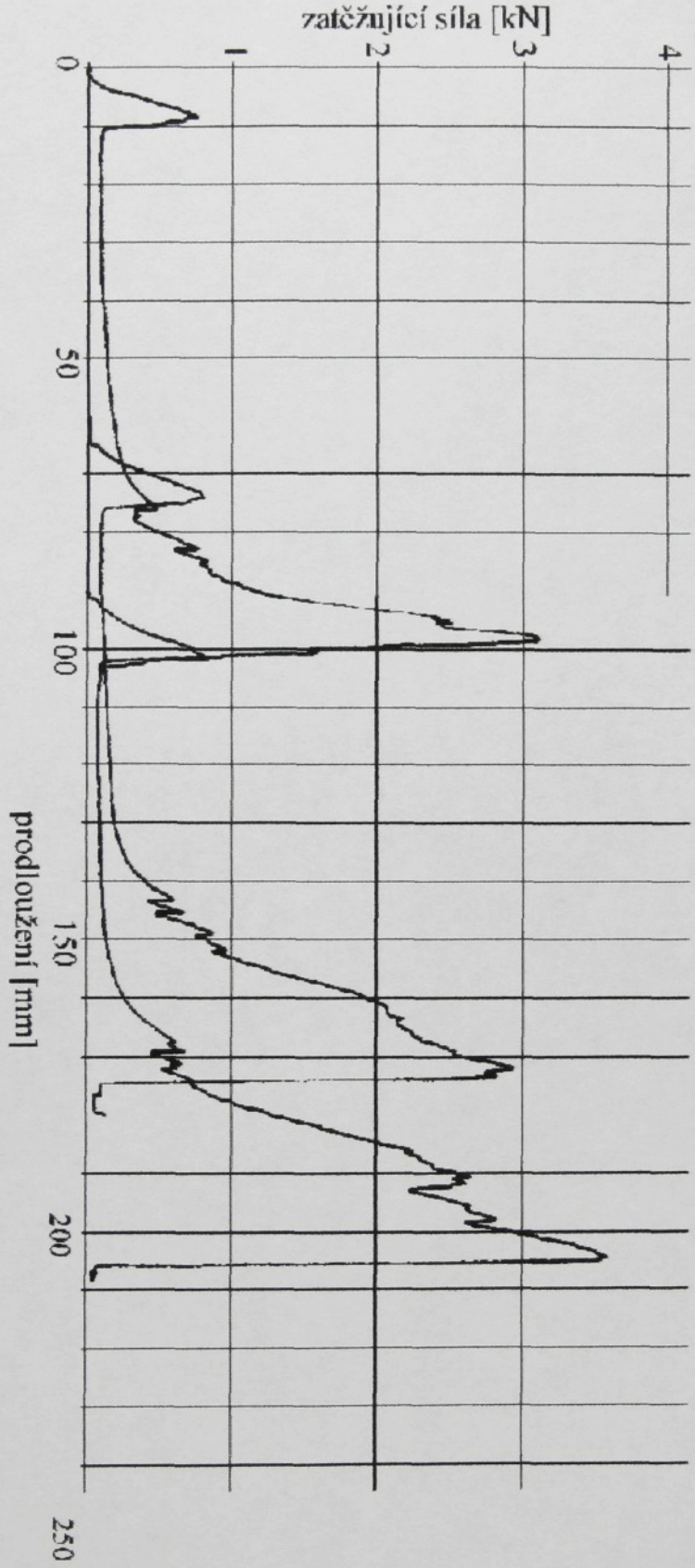
Pohled na pracovní desku stroje, lze vidět i sbíhání nití ve sběrném bodě



Tahová charakteristika armatury s plným počtem podélných výztuží

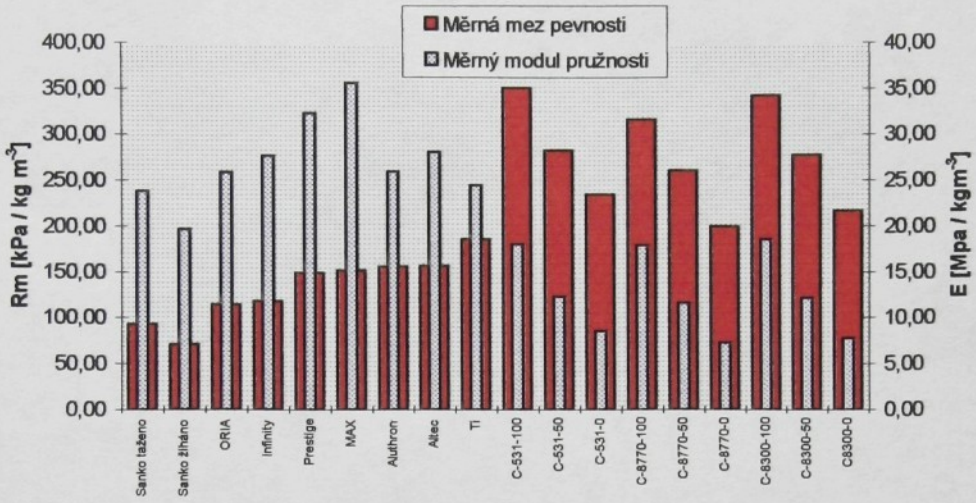


Tahová charakteristika armatury s 1/2 podélných výztuží



Tahová charakteristika armatury s ¼ podélných výztuží

Srovnání vlastností C-P kompozitů s některými vybranými materiály



Porovnání měrných vlastností materiálů