

Stavební konstrukční kompozitní prvky

Bc. Michaela Hověžáková

Diplomová práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michaela HOVĚZÁKOVÁ**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **STAVEBNÍ KONSTRUKČNÍ KOMPOZITNÍ PRVKY**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii k dané problematice
2. Experimentálně vyšetřete ohybové vlastnosti pochůzných roštů, se skelnou výztuží
3. Sestavte FEM modely a proveďte analýzy napěťově deformačního stavu stavebních kompozitních profilů a roštů
4. Získané požadavky formulujte jako doporučení pro aplikace

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

JANČÁŘ, J.: Organické materiály a kompozity

ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

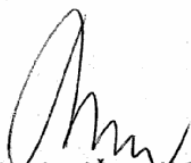
Datum zadání diplomové práce:

14. února 2006

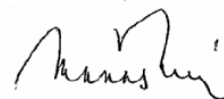
Termín odevzdání diplomové práce:

31. května 2006

Ve Zlíně dne 12. ledna 2006



prof. Ing. Josef Šimoník, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou optimalizace stavebních konstrukčních prvků z kompozitních materiálů – pochůzkových roštů. V teoretické části je popsána výroba a vlastnosti kompozitních prvků. V praktické části jsou shrnuty výsledky z ohybových zkoušek pochůzných roštů litých a tažených a výsledné napěťově deformační vlastnosti modelů roštů zpracované v FEM softwaru Cosmos/M. U litých roštů byly modifikovány hlavní rozměry - výšky roštu, rozteč a tloušťky žebra. U roštů tažených byly měněny parametry rozteč a délka. Zkušební tělesa byla dodána firmou PREFA KOMPOZITY, a.s.

Klíčová slova: Konstrukční, kompozitní, rošt, ohybová, průhyb, deformace,

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on the problem of optimization of the engineering constructional elements from composite materials – wear layers - grids. The theoretical part contains the description of production and qualities of the composite elements. In the practical part are mentioned results of bending tests of wear layers (casted panels and pulled profiles) and final tension deformation properties of grid models processed in FEM software Cosmos/M. For casted grids were modified main dimensions - high of grid, pitch and thickness of grid fin. The parameter of pitch and length for pultruded profiles has been modified as well. The test pieces were provided by PREFA KOMPOZITY, a.s. company.

Keywords: Construct, composite, grid, deflexion,

Jsou tři cesty k získání moudrosti. První je cesta zkušenosti, ta je nejtěžší. Druhá je cesta napodobení, ta je nejlehčí. Třetí cesta je cestou přemýšlení, ta je nejušlechtlejší.

Konfucius

Chtěla bych tímto poděkovat mému vedoucímu diplomové práce, panu docentu Ing. O. Šubovi, CSc., za trpělivost, přátelský přístup a za připomínky při řešení problematiky týkající se oblasti dimenzování prvků a také za praktické rady při zpracování modelů v softwaru Cosmos/M. Také bych ráda touto cestou poděkovala panu Ing. J. Prokeši, z firmy PREFA KOMPOZITY a.s., za vstřícný přístup a praktické rady, a také za poskytnuté výrobky bez nichž by tato práce nemohla být zpracována.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího diplomové práce a vedoucího katedry.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci psala sama a použitou literaturu jsem citovala.

Ve Zlíně dne:

.....

podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V PRAXI	11
2 KLASIFIKACE KOMPOZITŮ	14
2.1 DĚLENÍ PLASTŮ	15
2.1.1 Termoplasty.....	15
2.1.2 Reaktoplasty	15
2.2 DĚLENÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ	16
3 MATRICE A VÝZTUŽ	18
3.1 PRYSKYŘICE.....	18
3.2 VLÁKNA, TKANINY, ROHOŽE	20
3.2.1 Skleněná vlákna	22
3.2.2 Uhlíková vlákna	23
3.2.2.1 Forma výztuží	25
3.2.2.2 Tkané, pletené a jiné mnohosměrné dlouhovláknové výztuže	26
4 VÝROBNÍ METODY VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ	29
4.1 RUČNÍ KLADENÍ.....	29
4.2 METODA VAKUOVÉHO VAKU.....	30
4.3 METODA TLAKOVÉHO VAKU	31
4.4 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU.....	31
4.5 NAVÍJENÍ (FILAMENT WINDING)	32
4.6 METODA NANÁŠENÍ KOMPOZITU DO FORMY SPREJEM.....	33
4.7 METODA LISOVÁNÍ SE VSTRÍKEM MATRICE (RTM)	34
4.8 METODA LISOVÁNÍ VE FORMĚ	36
4.9 LISOVÁNÍ Z PREPREGŮ.....	36
4.10 TAŽENÍ KOMPOZITNÍCH PROFILŮ (PULTRUZE)	37
4.11 KONTINUÁLNÍ LAMINACE FRC	38
4.12 Odstředivé lití FRC	39
5 KOMPOZITOVÉ POCHŮZKOVÉ ROŠTY	41
5.1 HLAVNÍ VÝHODY VÝBĚRU MATERIÁLU:	41
5.1.1 Skládání rošty	41
5.1.2 Lité rošty	42
6 MECHANIKA VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ	44
6.1 ZÁKLADNÍ POJMY	44
6.2 OHYB SLOŽENÝCH VÝROBKŮ	47
6.2.1 Definice tuhosti	47

6.2.2	Ohyb složeného výrobku:	47
6.2.2.1	Redukce šířek.....	49
6.3	BIMODULÁRNÍ OHYB PRUTŮ VYZTUŽENÝCH DLOUHÝMI VLÁKNY	49
6.4	ORTOTROPNÍ MATERIÁLY	50
II	PRAKTICKÁ ČÁST	54
7	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	55
8	STUDIUM OHYBOVÉHO CHOVÁNÍ VYZTUŽENÝCH PRUTŮ	56
8.1	METODIKA STATICKÝCH OHYBOVÝCH ZKOUŠEK	56
8.1.1	Základní charakteristiky.....	56
8.1.2	Podstata zkoušek	57
8.1.3	Zkoušené výrobky	58
8.1.4	Zkušební zařízení	59
8.1.5	Provedení zkoušek	60
8.2	VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK	60
8.2.1	Ohybové zkoušky litých roštů.....	61
8.2.1.1	Série 1 – Litý rošt	61
8.2.1.2	Série 2 – Litý rošt	64
8.2.1.3	Série 3 – Litý rošt	66
8.2.1.4	Srovnání výsledků z ohybových zkoušek litých roštů:.....	69
8.2.2	Ohybové zkoušky taženého profilu I:	70
8.2.2.1	Profil I – L =300 mm	70
8.2.2.2	Profil I – L =1000 mm	71
8.2.3	Porovnání získaných hodnot z ohybových zkoušek taženého profilu	74
9	ANALÝZA NAPĚŤOVĚ-DEFORMAČNÍHO CHOVÁNÍ ROŠTŮ POMOCÍ FEM MODELŮ	75
9.1	ROŠTY LITÉ	75
9.1.1	Postup při řešení úlohy v konečně-prvkovém programu COSMOS/M.:	75
9.1.2	Výsledky z modelování litých roštů:.....	78
9.2	ROŠTY TAŽENÉ	83
9.2.1	I-profil - bimodularita	83
9.2.2	Konečněprvkový model I-profilu.....	89
10	DOPORUČENÍ PRO APLIKACE, SHRNUÍ	91
10.1	LITÉ ROŠTY	91
10.2	TAŽENÉ ROŠTY	96
	ZÁVĚR.....	97
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	98
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	100
	SEZNAM OBRÁZKŮ	102
	SEZNAM TABULEK.....	104
	SEZNAM PŘÍLOH.....	106

ÚVOD

Snahy o snižování spotřeby pohonných hmot a energií vůbec či o použití materiálů odolných proti korozi, které snižují ztráty vzniklé korozí kovů, leží v centru zájmu nejen ekologických hnutí, ale jsou prioritou všech vyspělých společností. Například snižování hmotnosti kolejových i silničních vozidel může ovlivnit snižování spotřeby pohonných hmot až ze šedesáti procent. Použití materiálů s velkou antikorozií odolností ve speciálním a ekologickém stavebnictví je schopno prodloužit životnost konstrukcí i ve velmi agresivních prostředích, a snížit tak náklady na jejich údržbu na minimum. Nové materiály zahrnující ve struktuře již možnost snadné recyklace snižují potenciální ekologickou zátěž životního prostředí po skončení užitého cyklu výrobku. Plasty samotné, které mají většinu těchto atributů, byly v důsledku svých omezených mechanických vlastností dosud použitelné pouze tam, kde netvořily nosnou část konstrukce. Polymerní kompozity se svým spektrem vlastností vyrovnávají tradičním konstrukčním materiálům, a jsou tedy použitelné i při výrobě nosných prvků konstrukcí a proto jsou tedy nejnadějnějšími kandidáty pro náhradu kovů a jiných tradičních materiálů v konstrukčních aplikacích i ve speciálním stavebnictví. Největšího rozšíření v této oblasti dosáhly kompozity, ve kterých jsou pojivem organické polymery a výztužemi jsou různé typy anorganických či organických vláken.

Nejvýznamnější předností kompozitů s organickými maticemi je kombinace snadné tvarovatelnosti málo pevného polymeru s pevností a tuhostí vyztužujících vláken. I ty nejjednodušší kompozity, jako je polyesterová pryskyřice vyztužená skleněnými ručně kladenými vlákny a rohožemi, nabízejí nízkou měrnou hmotnost, vysokou pevnost při statickém i dynamickém namáhání a vynikající odolnost vůči působení korozií, především kyselých prostředí, nízkou tepelnou vodivost, elektrickou nevodivost a zanedbatelný útlum elektromagnetického záření. Tyto a další fyzikální a chemické vlastnosti mohou být odborníkem znalým materiálového inženýrství „šity na míru“ konečné aplikaci prostřednictvím variací ve strukturních parametrech (typ pojiva, typ vláken, forma výztuže, použitá aditiva, prostorové uspořádání výztuží, obsah výztuže atd.). Velká část i technické veřejnosti se pod dojmem novinových článků či vědecko-populárních statí domnívá, že kompozity jsou výdobytkem vědy druhé poloviny 20. století. Tato představa je mylná a kompozitní materiály jsou lidstvem cíleně vyráběny a používány už od jeho raného vývojového stadia.

Původní použití vláknových kompozitů bylo především ve stavebnictví, dá-li se tomu tak v dnešním slova smyslu říci. Typickým kompozitem byly cihly vyrobené ze směsi jílu (pojivo) a organických většinou přírodních celulóзовých vláken (výztuž), které ve srovnání s čistě jílovými nevypalovanými cihlami byly méně křehké.

Důvodem, proč je poslední čtvrtina 20. století nazývána dobou kompozitů, je nesmírně prudký rozvoj jejich průmyslových aplikací, umožněný jednak objevy a výrobou nových pokročilejších komponent (nové polymery, nové výztuže) o vynikajících vlastnostech a jednak nalezením kvantitativních vztahů mezi jednotlivými strukturálními parametry a výslednými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi kompozitů. Technologicky zvládnutá schopnost napodobit přírodu umožnila velmi rychlý rozvoj aplikací kompozitů v technické praxi. To umožnilo kompetentní design výrobků z kompozitů a skutečné využití všech nabízených výhod. Byly již syntetizovány a v praktických podmínkách ověřeny pryskyřice umožňující kontinuální použití kompozitů při teplotách 250 - 350 °C. Byla rovněž vyrobena a komercializována vlákna, jejichž modul pružnosti je 600 - 850 GPa (4 x více než ocel a 12 x více než hliník) s pevnostmi až 6 GPa. Nezanedbatelným atributem tohoto vývoje je i automatizace výroby, která umožnila dosažení vynikající reprodukovatelnosti vlastností a snížení ceny těchto materiálů na úroveň srovnatelnou s tradičními konstrukčními materiály. Velkou měrou přispěl ke komercializaci původně vojenských materiálů průmysl sportovních potřeb (lyže, tenisové rakety, golfové hole, rybářské pruty), automobilový průmysl, silnoproudá elektrotechnika, radiokomunikace a speciální stavebnictví. V posledním desetiletí se na tomto trendu začínají projevovat i vlivy medicínských, především ortopedických a stomatologických oborů, ekologické stavitelství a hromadná doprava.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V PRAXI

Největší jednorázovou stavební aplikací nejběžnějších sklolaminátových materiálů v Evropě, a to ve formě tažených vláknových kompozitních profilů bylo jejich použití při stavbě tunelu pod kanálem La Manche, kde bylo 3500 t tažených kompozitních profilů polyester/sklo použito k montáži kabelových tratí s vynikající odolností proti korozi a nehořlavostí. V ČR byla do roku 1994 odhadována spotřeba nejrůznějších typů dlouhvláknových kompozitů na 2-3 tisíce tun ročně, většinou ve formě ručně kladených laminátových polotovarů. V přepočtu na jednoho obyvatele to tedy bylo zhruba 15krát méně než v USA a 10krát méně než v dalších zemích EU. Výrobní základna je i přes velmi dynamický rozvoj zaznamenaný především v posledních 3-4 letech v ČR podobně jako v celé Evropě značně roztržštěná. Přesto se odhaduje meziroční nárůst kapacity na zhruba 10 % a výroba se přiblížila 10 tisíc tunám ročně. Právě roztržštěnost výrobních kapacit, malá informovanost technické veřejnosti, její větší konzervativnost a nedostatek technických norem pro konstruování s kompozity jsou hlavními důvody zaostávání Evropy za Japonskem a USA v této oblasti. Největší jednorázovou aplikací vláknových kompozitů v ČR byly pochůzkové rošty pro čističku odpadních vod v Prostějově v rozsahu kolem 5 tun (PREFA KOMPOZITY a.s.) a pochůzkové rošty a lávky u kamencového jezírka v Mostě (cca 2 tuny, PREFA KOMPOZITY a.s.).

Skutečností, která vedla k obrovskému rozvoji vláknových kompozitů v posledních dvaceti letech a která odlišuje kompozity od tradičních materiálů, je i to, že vláknové kompozity jsou obvykle vyráběny v jednom kroku zároveň s konečným tvarem dílce či výrobku. To znamená, že kompozitní materiály jsou do značné míry šity na míru konečné aplikaci, a to nejen svou strukturou a vlastnostmi, ale i výrobní technologií. Nejtradičnějším a technologicky nejjednodušším způsobem výroby je ruční kladení, kdy je skleněná výztuž kladena na kopyto či do formy, kde je následně prosycena pojivem obsahujícím všechna aditiva nutná k vytvrzení. Požadovaná tloušťka je budována postupně z vrstev (laminace), poté je pojivo vytvrzeno za pokojové či zvýšené teploty a dílec je vyjmut z formy či sejmut z kopyta pro konečné dokončení. Tato technologie je kapitálově nejméně náročná (pokud nejsou používány k tvrzení autoklávy), poskytuje však kompozity s nejnižšími hodnotami mechanických vlastností. Umožňuje však vyrábět i velmi složité komplexní tvary, jako jsou různé vany, zásobníky, lodě atd. Zavedení automatizovaných výrob kompozitních materiálů, jakými je tažení (pultruze), navíjení atd., si vynucuje změny formy vstupních

surovin, a jejich ekonomika je tedy silně závislá na objemu výroby. Výsledné kompozity mají však mnohem reprodukovatelnější vlastnosti, velmi dobré konstrukční tolerance a existuje o nich relativně značné množství informací použitelných pro konstrukční výpočty.[2]

Při navrhování konstrukcí a zařízení z kompozitů je výběr materiálů komplikován nejen neizotropní vlastností kompozitů (závislost vlastností na směru působení vnějšího napětí), ale i velkým množstvím možných kombinací pojivo/výztuž při konstantním složení (konstantní obsah vláken) a technologií výroby. Tato komplikace a zvýšená obtížnost výběru jsou však více než kompenzovány možnostmi navrhovat s konečným výrobkem i kompozitní materiál podle toho, jaké typy namáhání budou na výrobek působit. Tvarová variabilita nabízená kompozity není v mnoha případech za použití tradičních materiálů (ocel, hliník atd.) vůbec možná. Do značné míry zde platí pravidlo, že pouhá záměna ocelového dílce kompozitním nevede ve většině případů k žádoucímu ekonomickému efektu a nepřináší výrazné výhody ani z hlediska užitných vlastností. Výjimkou jsou aplikace, kdy poskytují soubor vlastností jediným tradičním materiálem nedostupné. Mezi tyto vlastnosti patří především:

- vynikající odolnost proti korozi v širokém spektru agresivních prostředí kyselých i zásaditých,
- nízká měrná hmotnost (4 x lehčí než ocel, o 50 % nižší než hliník),
- snadná údržba (nejsou nutné nátěry),
- vysoká tvarová komplexnost relativně snadno dosažitelná (jednoduchá tvarovatelnost výztuží i pryskyřic),
- vynikající tepelné a elektrické izolační vlastnosti (tepelná vodivost 300x nižší než hliník, vynikající elektrická pevnost),
- zanedbatelné ztráty elektromagnetického záření (kryty telekomunikačních a radarových antén),
- snadné probarvení v objemu, možná průsvitnost, snadné úpravy povrchu,
- malý odpor proudění tekutin (při aplikacích v trubkách).

Přestože počátečními parametry, které rozhodují o výběru kompozitů pro danou aplikaci, jsou mnohdy jiné než mechanické vlastnosti kompozitů, úspěšnost konečné aplikace nebo

výrobku je mechanickými vlastnostmi podstatně ovlivněna. A právě mechanické vlastnosti, způsob jejich prezentace a pochopení principů, na jejichž základech jsou tyto vlastnosti dosahovány, jsou obsahem této části kapitoly o polymerních kompozitech. Z hlediska konstruktérských požadavků je možno tyto vlastnosti rozdělit do dvou kategorií - okamžité (modul pružnosti, pevnost, rázová houževnatost atd.) a dlouhodobé (creep neboli tečení za studena, relaxace napětí, stárnutí pod napětím atd.). [2]

Tab.1. Srovnání fyzikálních vlastností různých konstrukčních materiálů (vlastnosti jsou vztaženy k vlastnostem tažených profilů obsahujících 50 % skleněných vláken v polyestrové pryskyřici)

Vlastnost:	FRC	Hliník	Ocel	Dřevo (borovice)
hustota	1,0	1,3	4,0	0,3
lineární roztažnost	1,0	3,0	2,0	0,5
tepelná vodivost	1,0	300	80	0,2
tuhost	1,0	1,2	1,7	0,6
pevnost v tahu	1,0	0,4	1,0	0,1
pevnost v ohybu	1,0	0,7	1,1	0,3

Tab. 2. Porovnání nákladů a efektivnosti různých technologií výroby kompozitů

Technologie	Produkční cyklus	Hodnota zboží v Kč vyrobeného za 1 hod. na základním technologickém zařízení
Lisování	3 min.	100-600
Autokláv	8 hod.	40-5000
Navíjení	4 hod.	100-6000
Membránové lisování	1 hod.	40-2000
Ruční kladení	5 hod.	600
Pultruze	0,5-3 m/min.	2000-100000

2 KLASIFIKACE KOMPOZITŮ

Dalšími kritérii pro klasifikaci kompozitů mohou být technologie jejich výroby či typ použité matrice. Z hlediska této klasifikace jsou specifickou třídou komerčně velmi důležitých kompozitů pneumatiky, které splňují všechna kritéria definice kompozitního materiálu, ale výztuže jsou velmi specificky prostorově uspořádány (tzv. kord), matricí je vulkanizovaný kaučuk. Průmyslově jsou vláknové kompozity (FRC) vytvářeny promyšleným prostorovým uspořádáním vyztužujících vláken spojených pryskyřičným pojivem. Úkolem pojiva je chránit výztuž před mechanickým či chemickým poškozením, udržovat ji v požadovaném směru vůči namáhání a umožnit přenos vnějších napětí do výztuže. Nositelem pevnosti a tuhosti FRC jsou vyztužující vlákna a pryskyřice k ní, zvláště u dlouho-vláknových kompozitů, výrazněji nepřispívá. Role matrice se zvyšuje obecně se zmenšováním délky vyztužujících vláken. Principem vlastního vláknového vyztužení je skutečnost, že vyztužující vlákna, mající o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem, se při vnějším namáhání deformují méně než polymer. Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/polymer, které v případě nenulové adheze mezi oběma komponentami umožňují přenos veškerého napětí z nepevné matrice do vláken. Ta jsou schopna, překročí-li jejich délka jistou kritickou délku (obvykle minimálně 100násobně průměr), nést veškerá napětí působící na kompozitní dílec, takže nepevné, ale deformovatelné pojivo je prakticky bez napětí. Z výše uvedeného principu vyztužování je jasné, že adheze mezi vlákny a matricí hraje roli především u kompozitů s krátkými vlákny. U jednosměrně orientovaných kompozitů s kontinuálními vlákny hraje adheze roli pouze při namáhání ve směru kolmém na směr orientace vláken. Adheze má význam u všech kompozitů i z hlediska jejich stability v agresivních prostředích. Difúze vody či jiných nízkomolekulárních látek polymerním kontinuem je zhruba 400krát pomalejší než difúze stejných látek rozhraním mezi vlákny a polymerní matricí. Je tedy zřejmé, že dobrá adheze je podmínkou dobré funkce kompozitů používaných v konstrukci lodí, nádrží na ropné produkty, zásobníků plynů, zásobníků odpadních látek či v ortopedii (nosné části implantátů). V současnosti je na trhu dostupné relativně široké spektrum kompozitních materiálů lišících se pojivem (pryskyřicí, matricí), typem a charakterem výztuží (typ vláken, struktura tkaniny, rohože, rouna) a mnohdy i způsobem výroby (laminace, tažení, navíjení, odstředivé lití, atd.). Z hlediska klasifikace matric existují dva základní typy polymerních pryskyřic - pojiv, a to termoplasty a reaktoplasty. [7]

2.1 Dělení plastů

2.1.1 Termoplasty

Termoplasty, ke kterým patří například polystyrén, polypropylén, polyetylén, polykarbonát, polyetyléntereftalát a další, jsou tuhé látky, které měknou a tečou při zvýšení teploty nad jistou charakteristickou teplotu. Touto teplotou může být teplota tání (T_m) u semikrystalických polymerů jako PP, PE, PEEK, PA atd. nebo teplota skelného přechodu (T_g) u amorfních polymerů jako PMMA, PS, PC atd. Po ochlazení pod tuto charakteristickou teplotu tekuté polymery opět přejdou do pevného skupenství. Charakteristickým strukturálním znakem termoplastů jsou velmi dlouhé molekuly (makromolekuly) vytvořené opakováním stejných strukturálních jednotek (několik tisíc až několik milionů). Z tohoto důvodu bývá tento typ makromolekul označován jako polymer. Jednotlivé makromolekuly nejsou vzájemně vázány chemickými vazbami. Jejich vzájemné interakce, které zaručují kohezí pevnost polymerního tělesa, jsou většinou slabé, vodíkové můstky atd.

2.1.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty (dříve termosety), ke kterým patří například epoxidy, bismaleimidy, polyimidy, nenasycené polyestery, melaminy či fenolformaldehyd, jsou obvykle dodávány ve formě více či méně viskózních tekutin s konzistencí řídkého medu a jsou tvořeny relativně malými molekulami. Tyto „monomery“ či „oligomery“ jsou polymerizovány (vytvrzeny) chemickou reakcí vedoucí ke vzniku chemických vazeb mezi těmito malými molekulami po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Vytvrzení probíhá buď za pokojové teploty nebo za zvýšených teplot. Způsob, kterým vytvrzování probíhá, do značné míry ovlivňuje vlastnosti výsledného termosetu. Jelikož při vytvrzování dochází ke vzniku chemických vazeb mezi jednotlivými malými molekulami, vzniká místo dlouhých lineárních molekul, které jsou charakteristické pro termoplasty, třídímenzionální polymerní síť s různou hustotou. V ideálním případě je celý makroskopický reaktoplastový výrobek vlastně jedinou obrovskou makromolekulou. Tento fakt způsobuje, že vytvrzený reaktoplast zůstává v pevné fázi i po zahřátí, což zvyšuje jeho odolnost proti creepu a vysokým teplotám, i když to na druhé straně zvyšuje i jeho křehkost a omezuje recyklovatelnost.

Výroba je zaměřena na kompozity s reaktoplastickými matricemi, protože tyto materiály mají mezi konstrukčními aplikacemi vláknových kompozitů naprostou převahu. Kromě technologie výroby ovlivňuje volba termoplastické nebo reaktoplastické matrice především způsob tvarování, recyklaci a spojování jednotlivých komponent do konečného produktu. [14]

2.2 Dělení vláknových kompozitů

Z důvodu jasného vymezení pojmů rozdělujeme vláknové kompozitní materiály do tříd. K tomu je možno využít celé řady kritérií. Jedním z nejčastěji používaných dělicích kritérií je prostorová orientace a délka vyztužujících vláken. Z tohoto hlediska je možno dělit vláknové kompozity na:

- jednosměrné (vlákna jsou orientována převážně v jednom směru většinou souvisejícím se nejdelším rozměrem kompozitního dílce):

- krátkovláknové (poměr L/D vláken < 100),

- dlohovláknové (poměr $L/D > 100$,

- kompozity s kontinuálními vlákny, (t.j. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce),

- mnohosměrné (vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientována dvěma či více směry),

- krátkovláknové ($L/D < 100$),

- dlohovláknové ($L/D > 100$),

- kontinuální.

Dalším dělicím kritériem může být způsob prostorového uspořádání vláknové výztuže. Podle tohoto kritéria rozdělujeme kompozity na:

- lamina (jedna vrstva kompozitu s tloušťkou zanedbatelnou ve srovnání se zbývajícími dvěma rozměry, orientace vláken může být v této vrstvě buď jednosměrná nebo mnohosměrná),

- lamináty (střídání vrstev – lamin - s různými vzájemnými orientacemi výztuže v sousedních vrstvách),

- lamináty s tkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou

vlákna před prosycením pryskyřicí utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi),

- lamináty s netkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna zpracována do roun aniž by byla tkána),
- tažené profily (komplikovanější tvary průřezu lineárních prvků s konstantním průřezem - profilů - s kombinací vyztužujících vláken a netkaných či tkaných rohoží, (desky, trubky, komplikované profily),
- navíjené profily (kruhové nebo oválné tvary průřezu, tlakové nádoby či trubky).

3 MATRICE A VÝZTUŽ

3.1 Pryskyřice

V technologii vláknových kompozitních materiálů se v současné době používají jako matrice převážně reaktoplasty, v menší míře jsou však aplikovány i matrice termoplastické poskytující některé výhody ve srovnání s reaktoplasty. Jako reaktoplastické matrice se nejčastěji používají nenasycené polyestery, vinylestery, epoxidy a fenolické pryskyřice pro kompozity s požadavkem na výrazně sníženou hořlavost. Z celkového objemu pryskyřic světově zpracovávaných při výrobě vláknových kompozitů připadá 70 % na nenasycené polyestery, 16 % tvoří vinylestery a 14 % tvoří speciální pryskyřice jako fenolické, epoxidy a vysokoteplotní reaktoplasty.

Největší překážkou většího rozšíření termoplastů jako matric je v současné době především velká viskozita jejich taveniny při zpracování. Viskozita většiny nepolárních termoplastů je o 2 - 4 řády vyšší než u běžných reaktoplastů. To vede ke vzniku defektů (bubliny, nesmočené pramence vláken, problematické smáčení tkanin atd.) při smáčení výztuže, a tím ke vzniku kompozitů s nedostatečnými užitnými vlastnostmi. Pro odstranění tohoto problému je třeba jako vstupní surovinu používat už termoplastem preimpregnovaná vlákna, což s sebou přináší podstatné zvýšení ceny hotových kompozitních profilů, jelikož daný produkt musí projít zpracovatelským zařízením alespoň dvakrát. [9]

Pojmem nenasycené polyesterové pryskyřice (z anglického *unsaturated polyesters* = UP) je rozuměn roztok lineárních nenasycených polyesterů, obsahujících ve svých molekulách reaktivní dvojnou C=C vazbu, v reaktivním rozpouštědle schopném polymerace. Tímto rozpouštědlem je nejčastěji styren. Krátké oligomerní řetězce UP jsou v průběhu procesu vytvrzování vzájemně spojovány styrenovými můstky. Aby reakce probíhala s technologicky přijatelnou rychlostí, je nutno vytvrzování provádět za zvýšené teploty. Teplota vytvrzování je dána typem použitých iniciátorů, které se od sebe liší právě teplotou, při které je jejich rozpad maximální. V případě UP tvrzených za snížené teploty je součástí iniciačního činidla i tzv. urychlovač (akcelerátor), který snižuje potenciálovou bariéru pro zahájení reakce štěpení radikálu. Jinými slovy, pro zahájení reakce vytvrzování je při použití akcelerátoru dostatečná nižší teplota než při jeho absenci, a to mnohdy až o 60 °C. [7]

Tab.3. Srovnání vlastností roztoku a vytvrzené pryskyřice[2]

Název	Vlastnosti roztoku s UP	Vlastnosti vytvrzené pryskyřice
styren	nízká viskozita, dobrá reaktivita, dobrá mísitelnost	vysoká mez pevnosti, vysoký modul
paramethylstyren	vysoká viskozita, nepatrně zkrácená doba vytvrzování	nízké poměrné prodloužení, vyšší tepelná odolnost, menší smrštění při vytvrzování
parabutylstyren	vysoká viskozita	lepší odolnost proti venkovní expozici
chlorstyren	vysoká viskozita, krátká vytvrzovací doba	dobrá odolnost proti venkovní expozici, nehořlavost
divinylbenzen	vysoká viskozita, velmi reaktivní	tvrdší, křehké pryskyřice, malý přídavek ke styrenu pozitivně ovlivní tepelnou odolnost
diacetonakrylamid	velmi vysoká viskozita, velmi dlouhá vytvrzovací doba	dobrá tepelná odolnost
hydroxyethylakrylát a hydroxypropylakrylát	vysoká viskozita, dlouhá vytvrzovací doba	lepší tepelná odolnost, méně pevný, nízké smrštění při vytvrzování
methylmetakrylát	nízká viskozita	dobrá odolnost proti venkovní expozici, menší zápach, velmi průzračné pryskyřice, velké smrštění při vytvrzování

3.2 Vlákná, tkaniny, rohože

Nejčastěji používanou výztuží ve vláknových kompozitech vyráběných tažením, navíjením i jinými technikami jsou skleněná vlákna. První zmínka o skleněných vláknech pochází z knihy Antonia Neriho, publikované ve Florencii v roce 1612. Už tehdy byly překvapivé jejich neobvyklé vlastnosti, především vysoké pevnosti ve srovnání se sklem tabulovým, i přes velmi podobné chemické složení. Příčinu vysoké pevnosti skleněných vláken ve srovnání s masivním sklem poprvé interpretoval Griffith, který tak položil základ velmi mladé a perspektivní disciplíny - lineární elastické lomové mechaniky (LEFM). Ve stručnosti lze Griffithovu interpretaci shrnout tak, že pevnost tuhého tělesa je na rozdíl od modulu pružnosti, který je termodynamickou fenomenologickou veličinou, veličinou stochastickou (náhodnou) a rozhoduje o ní distribuce a velikost defektů. Každý materiál má z tohoto hlediska jakousi kritickou velikost defektu. Je-li v tělese z daného materiálu přítomen defekt kritické velikosti, dojde při působení i velmi malých vnějších napětí ke katastrofickému lomu tělesa v důsledku lokálního překonání meze pevnosti koncentrací napětí na defektu. Je tedy zřejmé, že kromě TD stavu materiálu bude o pevnosti rozhodovat geometrie tělesa a zatěžování (velký vliv tloušťky tělesa). V souladu s touto interpretací je zřejmé, že pravděpodobnost existence kritického nebo nadkritického defektu snižujícího pevnost je mnohem nižší v tenkých vláknech než ve skleněných tělesech o vyšší tloušťce. V důsledku toho mají vlákna zhruba 20krát vyšší pevnost v tahu než např. skleněná tyčovina či tabulové sklo.

Průmyslově vyráběná skleněná vlákna, jejichž průměr je v rozmezí 5 - 20 μm (nejčastěji 12 - 15 μm), tvoří v kompozitech součást nosící zatížení a dodávají kompozitu tuhost a pevnost (proto termín „výztuž“). Matrice (pojivo, pryskyřice) tato vlákna pouze chrání proti vlivům prostředí a manipulace, pojí je dohromady do požadovaného tvaru a přenáší na ně zatížení působící na kompozitní dílec. Přes velmi dobré mechanické vlastnosti a nízkou cenu mají skleněná vlákna i některé nedostatky, jako je relativně nízký modul pružnosti (72 GPa u E-skla a 85 GPa u S-skla) a navíc jsou poměrně křehká, což znesnadňuje manipulaci a některé aplikace (balistická ochrana). [3]

Vláknové výztuže prodělaly poměrně bouřlivý rozvoj především v 60. a 70. letech, kdy byla na trh uvedena první komerční uhlíková vlákna (vysoký modul pružnosti až 600 GPa). Na konci 70. let se začala objevovat i další vlákna, která mají vysoký modul pružnosti v tahu (120 - 190 GPa) a navíc nejsou křehká.

Mezi tato vlákna patří aramidová vlákna (aromatické polyamidy komerčně nazývané KEVLAR) a vlákna z ultravysokomolekulárního polyethylénu PE-UHMW komerčně nazývaná DYNEEMA v Evropě (firma DSM) a SPECTRA v USA (firma Allied Signal).

Hlavním technologickým strukturním parametrem řídícím vlastnosti výsledného kompozitu je tedy při daném typu vláken a pryskyřice obsah vláken. Tento obsah se z důvodu podstatně odlišných hustot matrice a výztuže vyjadřuje v objemových procentech (objem vláken/celkový objem kompozitu) $\times 100 \%$ nebo v objemovém zlomku (objem vláken/celkový objem kompozitu). Objemový zlomek jednosměrně orientovaných vláken v pultrudovaných materiálech leží v oblasti 0,7-0,8. Z technologického hlediska je výhodnější udávat hmotnostní podíl vláken v kompozitu, který lze použít přímo pro dávkování ve výrobě. Mezi objemovým zlomkem vláken v_f a hmotnostním zlomkem w_f platí jednoduchý vztah, kde s_f , s_c jsou hustoty materiálu vláken a matrice a v_f je objemový zlomek vláken. [6]

$$w_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} v_f$$

(1)

3.2.1 Skleněná vlákna

Nejběžnější skleněná vlákna se ve světě vyrábějí především ze skloviny označované jako sklo E. Základem E-skla je soustava oxidů $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$. Dříve se vlákna vyráběla dvoustupňově, nejprve se ze sklářského kmenu vytvořily tavením při teplotě 1550°C kuličky o průměru 10 - 20 mm, které se dále tavily v platinových kelímcích, ze kterých se vytahovalo vlákno. Nověji jsou v provozu kontinuální technologie, tzn. na jednom konci pece se sází sklářský kmen a na druhém se z platinových vaniček vytahuje vlákno. Toto vlákno má průměr nejčastěji od 3,5 do 20 μm . Najednou se táhne 51 až 408 vláken. Vytažený pramenec vláken se navíjí na buben. Ještě před samotným navinutím je vlákno, které je samo o sobě velmi abrazivní a lámavé, opatřeno lubrikací a apreturou. Samotná lubrikace je nevhodná, protože sice zlepšuje manipulovatelnost s vlákny, vlákna však mají téměř nulovou adhezi k polymerní matici. Proto se již ve výrobě vláken opatřují tzv. apretační vrstvou, která zlepšuje vazbu mezi vláknem a pryskyřicí. Jde nejčastěji o organické silany s charakteristickou strukturou X-R-SiY_3 . R je většinou alifatický uhlovodíkový řetězec o různé délce, X je vhodná koncová skupina schopná potenciálně reagovat s pryskyřicí a Y je nejčastěji ethoxy skupina, methoxy skupina nebo chlor. Vazba Si-Y je snadno hydrolyzovatelná a pomocí vzniklých silanolů může dojít k povrchové kondenzaci tenké adhezivní vrstvy vázané k povrchu vláken siloxanovými vazbami. Komerčně se vlákna charakterizují podobně jako textilní vlákna délkovou hmotností (hmotnost na jednotku délky), která se udává v jednotkách tex, vyjadřujících hmotnost jednoho kilometru vláken v gramech. Běžně se používají skleněné rovingy s 1000 - 4000 texy (tex = hmotnost 1 km vlákna).[11]

Tab. 4. Vlastnosti jednotlivých typů skel

Sklo	E	S	D	C	L
Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	2540	2490	2160	2490	4300
Pevnost v tahu [GPa]	3,5	4,65	2,45	2,8	1,68
Modul pružnosti v tahu [GPa]	73,5	86,8	52,5	70,0	51,1
Poměrné prodloužení do meze pevnosti [%]	4,8	5,4	4,7		
Dielektrická konstanta, 20°C , 10^6 Hz	5,8	4,53	3,56	6,24	9,49

Ostatní typy skleněných vláken

- Dalším typem skloviny je typ S (vojenské účely) a jeho komerční verze S2 (Owens-Corning, USA) či R (Vetrotex, Francie), jehož základem je soustava $\text{SiO}_2\text{.Al}_2\text{O}_3\text{.MgO}$. Toto sklo má vyšší pevnost v tahu a vyšší modul pružnosti ve srovnání s E-sklem. Pevnost v tahu je vyšší o 33 % modul pružnosti o 12 %. Tato vlákna se používají v letecké a raketové technice, největšího využití dosahují při konstrukci listů rotorů helikoptér (Sikorski, UTC). Jeho použití při extrémních podmínkách (náhrada uhlíkových vláken) je omezeno snižováním pevnosti v tahu při teplotách vyšších nad 600 °C.
- Sklo typu D má mechanické vlastnosti horší než sklo typu E, avšak používá se zejména pro svoji nízkou dielektrickou konstantu. Využití je tedy především v elektrotechnice, elektronice, energetice.
- Sklo typu C je chemicky odolné sklo v soustavě $\text{SiO}_2\text{.CaO.MgO.Na}_2\text{O}_2\text{.B}_2\text{O}_3\text{.Al}_2\text{O}_3$. Oproti sklu E vykazuje vysokou odolnost vůči kyselinám, jeho mechanické vlastnosti jsou však s porovnáním s E-sklem mnohem horší.
- Sklo typu L je speciální sklo s vysokým obsahem olova. Olovo především zvyšuje nepropustnost vyrobeného laminátu pro rentgenové záření. Aplikace tohoto typu skla najdeme v lékařství, vědeckých přístrojích a vojenství.[12]

3.2.2 Uhlíková vlákna

V uhlíkových vláknech se pojí vysoká pevnost, modul pružnosti a tepelná odolnost s nízkou měrnou hmotností. Díky specifické pevnosti a modulu pružnosti (na jednotku hmotnosti) je překonávají pouze monokrystaly (whiskery) Al_2O_3 . Uhlíková vlákna se vyrábějí z viskózních nebo polyakrylonitrilových (PAN) vláken a alternativně i z tzv. anizotropní smoly zvlákněvané v tavenině. Prvním výrobním krokem přípravy uhlíkových vláken (C-vlákna) je karbonizace primárního vlákna, při níž se nesmí surovina roztavit a nesmí zreagovat na nedefinované produkty. Proto se např. zvlákněné smoly zesílují opatrným naoxidováním do netavitelného reaktoplastu. Zvláknuje se pod napětím, aby se v případě zvláknování ze smoly vytvořila orientace molekul ve směru osy vlákna.

Čím je tato orientace dokonalejší, tím má vlákno vyšší modul pružnosti a pevnost. Z materiálového i energetického hlediska jsou výhodnější suroviny, které dávají při karbonizaci vyšší výtěžky: Viskózní vlákna dávají asi 15 – 20 %, akrylonitrilová až 55 % a ze smol bývá výtěžek až 80 % hmoty výchozích látek. Technologie výroby C-vláken je relativně komplikovaná a v dobré kvalitě ji zvládá na větší škále pouze několik málo firem.

Tab. 5. Vlastnosti vybraných druhů vláken

Vlákno	Uhlíkové	Grafitové	Whisker (monokrystal)	Skleněné	Ocelové
Průměr [μm]	7 - 10	5 - 7	-	12 - 14	13
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,6	2,0	2,26	2,5	7,87
Pevnost v tahu [GPa]	2,5 - 3,5	2 - 2,5	20	3,5	4,2
Modul pružnosti [GPa]	250 - 300	400 - 500	500 - 1000	70 - 85	210
Měr. pevnost [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot 10^9$]	1,55 - 2,2	1 - 1,25	8,85	1,4	0,53
Měr. modul [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot 10^8$]	156 - 188	200 - 250	220 - 440	28	27
Tepl. tání [$^{\circ}\text{C}$]	3650	3650	3650	700	1400

Uhlíková vlákna se většinou z praktických důvodů dělí podle hodnot modulu pružnosti a pevnosti. Vlákna získaná při 900 °C až 1500 °C jsou pevnější, nazývají se vysokopevnostní uhlíková vlákna (označovaná HS = „*high strength*“). Tato vlákna jsou levnější než vysoko-modulová vlákna. Další karbonizací HS vláken při teplotě 2000 °C až 2800 °C se získají vlákna grafitová, která mají menší tahovou pevnost, ale vynikají vyšším modulem pružnosti v tahu (vysokomodulová vlákna = HM = „*high modulus*“). Polyakrylonitrilové vlákno se nejprve v tahu dluží, aby se molekuly dobře uspořádaly, následuje (opět pod napětím) oxidační cyklizace a nakonec karbonizace při 1000 °C. Vzniklé vysokopevnostní vlákno se může dále grafitizovat při vyšších teplotách na vysoko-modulové vlákno.

Význam uhlíkových vláken neustále stoupá. V poslední době s růstem výrobních kapacit klesá i jejich cena. U nízko-modulových (230 GPa) vysoko-pevnostních (3 GPa) uhlíkových vláken je současná cena kolem 8 USD/kg rovingu (svazek přímých vláken). U vysoko-modulových vláken (600 - 700 GPa) je však cena např. v porovnání se skleněnými vlákny až stonásobná, tj. kolem 300 USD/kg rovingu. [4]

3.2.2.1 *Forma výztuží*

Formy vláknových výztuží jsou pro většinu typů vláken stejné a odpovídají potřebám výrobců kompozitů či jiných zpracovatelů. Individuální vlákna a jejich pramenec jsou z výroby navinutá na bubnech. Pramenec tvoří svazek mající běžně 200 - 400 vláken (podle tex). Pro výrobky, kde převládá jeden rozměr (tyčovina, jednosměrný prepreg atd.) se používá převážně tohoto typu vyztužujících vláken. Pokud jsou však na kompozitní výrobky kladeny požadavky týkající se namáhání ve více než jednom směru a vrstvení jednosměrných lamin není z technologických důvodů výhodné (pultruze, navíjení, RTM), jsou jako výztuže používána rouna, tkaniny, pleteniny a rohože. Dalším důvodem používání takového typu výztuží je rychlejší růst tloušťky stěny výrobku při výrobě, snadnější manipulace a zvýšení odolnosti proti šíření křehkých lomů. Vlastnosti FRC obsahujícího tento typ výztuže se stávají více kvaziizotropní na úkor zvyšující se tloušťky stěny výrobku. Terminologicky se používají následující formy výztuže:

- Roving - Tento pojem označuje formu výztuže ve tvaru nekonečných vláken bez křutu. Jejich společným znakem je pramenec tvořený individuálními vlákny navinutý na cívku. Tvoří základ většiny pultrudovaných výrobků.
- Vyztužující rohož (Reinforcing Mat) - Tato netkaná výztuž se vyrábí z nasekaných rovingů (krátká a středně dlouhá vlákna) jejich slabým naimpregnováním pryskyřicí nebo termoplastem a tepelným slisováním do ploché kontinuální rohože. Obsah organického pojiva se podle použití pohybuje v rozmezí 5 - 30 hmot. %. Vyrábí se v různých plošných hmotnostech. Jelikož je maximální obsah vláken v této formě výztuže prostorově limitovaný (náhodné uspořádání protáhlých objektů), použití této formy výztuže v pultrudovaném kompozitním výrobku zvyšuje objemový podíl pryskyřice, což vede k nižším tuhostem a pevnostem. Výrobek má však v ploše kvaziizotropní vlastnosti.

- Tkanina (Woven Fabrics) - Stejným způsobem jako běžné textilie se z rovingů vyrábí tato tkaná výztuž. Výrobky mají různou plošnou hmotnost, jsou tkány různými způsoby vazeb. Výhodou ve srovnání s netkanou výztuží je větší obsah vláken a tudíž vyšší tuhost a pevnost výsledného kompozitu.
- Povrchová rohož (Surfacing Mat) na vlastnosti má na rozdíl od předešlé velmi jemnou strukturu a nízkou plošnou hmotnost. Velmi často je vyrobena z polyesteru a nemá na mechanické vlastnosti kompozitního profilu žádný vliv. Má především estetické vlastnosti, protože je možno ji dezénovat, což vede k možnosti kontinuální výroby kompozitů s předem upraveným povrchem. Mnohdy je tento typ roušek používán pro omezení textury povrchu, která by jinak v důsledku vláknového charakteru výztuže vznikla. Jako důležitá komponenta slouží tyto povrchové roušky i z důvodů zvýšení odolnosti FRC proti vlivům UV záření.

Ve všech těchto výrobcích lze různé typy výztuží (roving, rohož, tkanina) nebo druhy vláken (sklo, Kevlar, uhlík) kombinovat, a vyrábět tak *hybridní* kompozity (smíšená výztuž). Tato možnost dává materiálovému inženýrovi další stupeň volnosti při tvorbě a výrobě materiálu šitého na míru požadované aplikaci nebo výrobku.

3.2.2.2 Tkané, pletené a jiné mnohosměrné dlouhovláknové výztuže

Tkané, pletené a jiné mnohosměrné výztuže jsou používány poměrně často pro vyztužování polymerních matric, především u velkoplošných kompozitních dílců. Dalšími důvody pro relativně široké použití těchto výztuží jsou snadnější manipulace ve srovnání s rovingy a dále snadnější 2D a 3D prostorové uspořádání vláken. Nezanedbatelnou výhodou kompozitů na bázi tohoto typu výztuží je i zvýšená odolnost výsledných kompozitů proti šíření lomu, a to jak lomu statického, únavového, tak i lomu dynamického při zatížení rázem. Tato odolnost je silně závislá na stavbě tkaniny či typu pleteniny. Dochází zároveň k potlačení individuality jednotlivých vláken či pramenců vláken. Jednoduché tkaniny se při namáhání chovají jako systémy se dvěma nezávislými jednosměrně orientovanými vlákny svírajícími navzájem úhel 90°. Vazba je poměrně velmi tuhá a nepřizpůsobivá, a je proto nevhodná pro výrobu kompozitních dílců s komplikovanějším tvarem. Ohebnost takové tkaniny závisí kromě typu vazby také na typu vláken a na průměru jednotlivých vláken.

Nízkomodulová, jemná vlákna povedou ke tkanině flexibilnější ve srovnání s tkaninou se stejnou vazbou, ale s vysokomodulovými vlákny nebo s vlákny s větším průměrem. Tyto relativně husté tkaniny se poměrně špatně a pomalu impregnují pryskyřicí. To má za následek vznik četných defektů, jako jsou neimpregnované svazky, vznik dutin v místech křížení svazků vláken či různý stupeň smočení vláken ve směru tloušťky vrstvy.

Tloušťka tkaniny tohoto typu je navíc silně závislá na tom, zda byl při její výrobě použit přímý roving nebo tzv. yarn (příze), což je v podstatě roving se zákrutem. Tkanina vyrobená z rovingu je vždy tenčí ve srovnání se stejnou tkaninou vyrobenou z příze vláken stejného typu. Velkou komplikací, kterou použití tkaných a pletených výztuží přináší pro předpověď vlastností kompozitů, je vysoký a málo definovaný stupeň neorientovanosti vláken a skutečnost, že v některých směrech (např. 45°) je tuhost takové tkaniny závislá spíše na velikosti tření mezi svazky vláken než na vlastnostech vláken samotných, a je tedy velmi těžko předpověditelná jednoduchými modely. Vlákna se ve svazcích kolem sebe vzájemně ohýbají a tím se snižuje jejich vyztužující efektivita. K popisu tohoto efektu se používá anglický termín „crimp“ označovaný symbolem C. Crimp je poměrem rozdílu délky přímého úseku vláken, L_y , a délky tkaniny vytvořené z těchto vláken (L_{fab}), k délce tkaniny:

$$C = \frac{L_y - L_{fab}}{L_{fab}} \cdot [100\%] \quad (2)$$

Hodnota C může být velmi rozdílná ve směru podélném a příčném. Pro jednoduchou vazbu je C v intervalu 8 - 12 %. Deformovatelnost dvouosých tkanin při působení smykových sil v jednom z hlavních směrů závisí na tření mezi jednotlivými svazky vláken. Při malé frikci mezi velmi tuhými vlákny dochází již při malých smykových napětích k trvalé deformaci tkaniny. Pokud je frikce mezi křížícími se svazky vláken velká a vlákna jsou flexibilní, je smyková deformace tkaniny řízena ohybovými vlastnostmi vláken [25].

Mezi flexibilní tkaniny patří především tkaniny vyrobené z polymerních vláken, jejichž svazky mají navíc zákrut. V důsledku toho dochází při deformaci tkaniny spíše k rotacím a ohýbání vláken než k jejich tahové deformaci. Tento typ deformace tkaniny je vratný a používá se v textilním průmyslu. U strukturních a konstrukčních kompozitů je taková struktura výztuže v důsledku obvykle nízké deformovatelnosti polymerní matrice téměř nepoužitelná. Výjimkou jsou kompozity s kaučukovými matricemi, jako jsou například pneumatiky s nekovovým kordem. Jinou skupinou jsou kompozity na bázi termoplastických polyuretanů využívané jako součásti cévních implantátů.

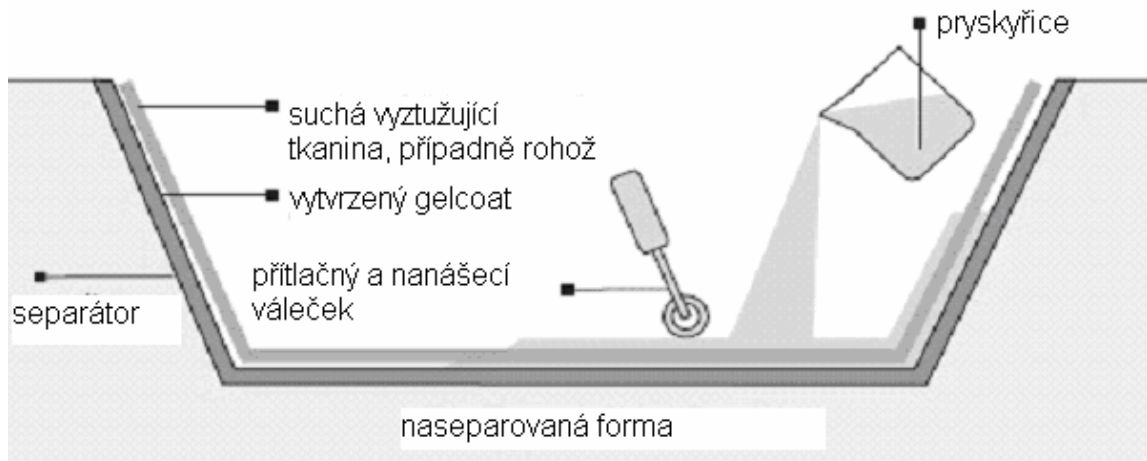
4 VÝROBNÍ METODY VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ

4.1 Ruční kladení

Ruční kladení se někdy nazývá i kontaktní lisování a jde o proces, ve kterém je nanášení pryskyřice i výztuže prováděno ručně na vhodný povrch pozitivní nebo negativní formy. Podle toho, na který povrch jsou komponenty nanášeny, je dosaženo kvality povrchu vytvrzeného kompozitního dílce. Jde o jednu z omezujících zvláštností tohoto výrobního procesu, totiž že pouze jedna strana výrobku má kvalitní povrch. Po položení výztuže a provlhčení pryskyřicí je připravený ruční kompozit ponechán k vytvrzení. Jednotlivými fázemi jsou:

- povrchová úprava formy separačním činidlem
- gel coat pokud je třeba
- katalyzovaná pryskyřice
- výztuž
- další vrstva pryskyřice je válečkem vtlačena do výztuže a je přitom vytlačen přebytek vzduchu tvořícího bubliny tyto dva kroky jsou opakovány tak dlouho, až je vytvořena požadovaná tloušťka stěny
- vytvrzení v klidu
- vyjmutí z formy.

Výhodami ručního kladení jsou především jednoduchost technologie, minimální náklady na nástroje a prakticky neomezená variabilita tvarů a velikostí. Flexibilita konstrukce, možnost jednoduše aplikovat gel coat a jednoduché dokončovací operace jsou největšími výhodami tohoto výrobního procesu. Nevýhodou je nereprodukovatelnost odpadu, který lze jen těžko znovu zpracovat, relativně velký objem odpadu, náročnost na lidskou práci, pouze jeden kvalitní povrch, malá produktivita a kvalita výrobku silně závislá na zkušenosti a schopnostech pracovníka. Touto technikou byly vyrobeny lodě, skladovací nádrže, rovné plochy, bazény a různé prototypy. [25]



Obr. 1. Technologie ručního kladení[26]

4.2 Metoda vakuového vaku

Tato metoda je pouze zlepšením metody ručního kladení v poslední fázi vytvrzování. Tenký film nepropouštějící vzduch je položen na volný povrch ručně kladeného kompozitu, forma je evakuována a tlakem filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin. Postupné kroky této metody jsou následující:

- ruční naklazení laminátu,
- fólie je položena přes volný povrch kompozitního dílce,
- prostor formy je evakuován,
- ručně je film dotlačen na kompozit a všechny přebytečný vzduch je vytlačen ven,
- vytvrzení FRC,
- film je stržen z laminátu a výrobek je dokončen.

Výhodami tohoto výrobního postupu je možnost připravit materiály s minimálním obsahem vzduchových bublin, dosáhnout vyššího obsahu vyztužení, všechny výhody ručního kladení jsou zachovány, je vynikající pro sendvičové struktury.

Nevýhodami jsou velký obsah odpadu, požadavek na velmi zručnou pracovní sílu a časová náročnost celého procesu. Navíc není možno zarovnat okraje výrobku ještě před jeho vytvrzením, což prodražuje celý proces. Hlavními aplikacemi jsou vojenské a letecké součásti, kde cena nehraje hlavní roli a důležité jsou především fyzikální vlastnosti. [25]

4.3 Metoda tlakového vaku

Tato metoda je pouze zlepšením metody vakuového pytle přidávkem tlakového pytle. Tenký film nepropouštějící vzduch je položen na volný povrch ručně kladeného kompozitu, forma je evakuována a tlakem filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin. Navíc je přes vakuový pytel převlečen tlakový, který jeho účinky ještě zlepšuje. Postupné kroky této metody jsou následující:

- ruční naklazení laminátu,
- fólie je položena přes volný povrch kompozitního dílce,
- prostor formy je evakuován, nad formou je vytvořen přetlak cca 0,3 MPa
- ručně je film dotlačen na kompozit a všechen přebytečný vzduch je vytlačen ven,
- vytvrzení FRC,
- film je stržen z laminátu a výrobek je dokončen.

Výhodami tohoto výrobního postupu je možnost připravit materiály s minimálním obsahem vzduchových bublin, dosáhnout vyššího obsahu výztuží, všechny výhody ručního kladení jsou zachovány, je vynikající pro sendvičové struktury. Metoda je vhodná i pro cylindrické díly a umožňuje dosáhnout kvalitních dílů, které mají různé konkávní i konvexní části. Nevýhodami jsou velký obsah odpadu, požadavek na velmi zručnou pracovní sílu a časová náročnost celého procesu. Navíc není možno zarovnat okraje výrobku ještě před jeho vytvrzením, což prodražuje celý proces. Tlakový pytel je poměrně drahý. Hlavními aplikacemi jsou vojenské a letecké součásti, kde cena nehraje hlavní roli a důležité jsou především fyzikální vlastnosti, které jsou stejné jako u vakuového pytle. [25]

4.4 Vytvrzování v autoklávu

Toto je pouze zdokonalení metody tlakového pytle. Jedná se o vytvrzení kompozitu pomocí tepla a tlaku v uzavřené nádobě (autoklávu) s přesně říditelnými parametry vytvrzování. Postupné kroky v tomto procesu jsou:

- příprava laminátu ve formě jako u metody vakuového pytle,
- přenos takto připraveného výrobku do autoklávu,

- působením tepla a tlaku v autoklávu je kompozit vytvrzen,
- součástka je vyjmuta, vakuový pytel stržen a výrobek je dokončen.

Výhodami je další zvýšení obsahu výztuží, mohou být použita jádra na odlehčení kompozitů, mohou být v jednom kroku zabudovány další součásti, najednou může být vytvrzeno mnoho částí v jednom autoklávu. Nevýhodou je vysoká cena autoklávů, metoda je velmi pracná a velikost vyráběných dílů je diktována velikostí autoklávu. Rovněž formy musí být z lepších materiálů, a jsou tudíž dražší než v předchozích metodách. Je produkováno poměrně hodně odpadu. Typickými produkty jsou součásti křídel letadel, nosy letadel, trysky raket, elektronické součásti, teplotní štíty atd. [25]

4.5 Navíjení (filament winding)

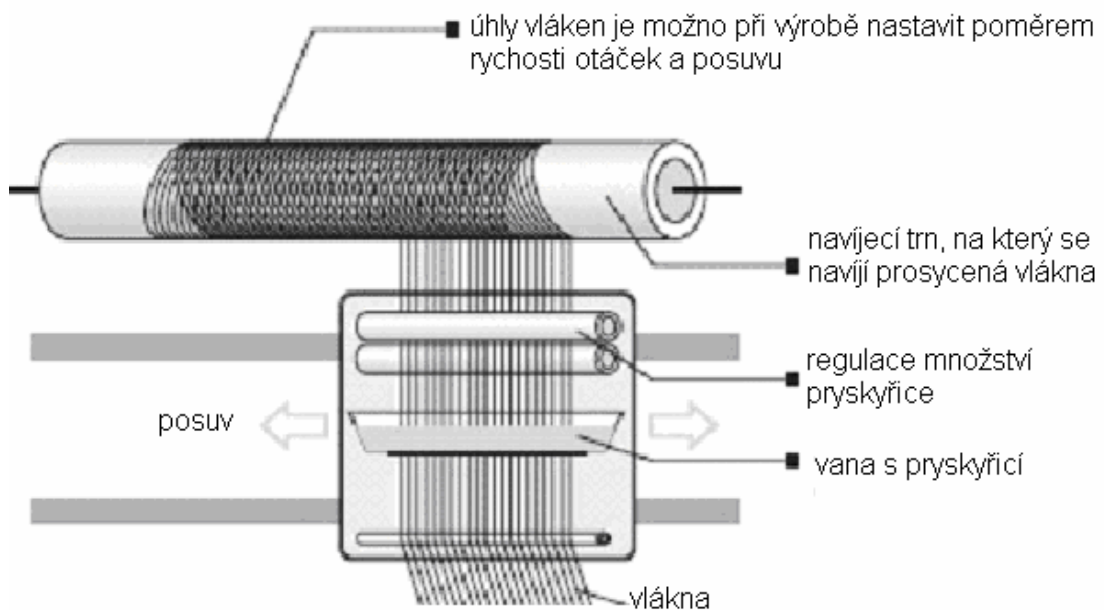
Tato technologie je založena na kontinuálním navíjení svazku vláken či jinak upravených výztuží na kruhovou, smrštitelnou formu. Vlákna jsou navíjena buď již navlhčena pryskyřicí, nebo se provlhcují až po navinutí. Požadovaných vlastností kompozitu se dosahuje přesným uspořádáním a orientací pramenců vláken a výztuží. Vytvrzení se provádí na jádře, které je potom z vytvrzeného výrobku vyňato. Postup této technologie je následující:

- do rotačního zařízení je upnuto jádro, které je buď vyjímatelné nebo se po skončení procesu stane součástí výrobku,
- jsou navinuty výztuže za předem naprogramovaného předpětí, složení, orientace atd.,
- navíjená stopa je měněna podle požadavků designu a výpočtu vlastností tak dlouho, až je výrobek hotov,
- kompozit je i s jádrem vložen do pece, kde se vytvrzuje při neustálé rotaci,
- po vytvrzení je jádro vyndáno a výrobek je dokončen.

Výhodou je použití nejlevnější formy výztuže - rovingu. Proces má poměrně velmi dobrou produktivitu a může být vysoce automatizovaný. Hodí se především pro výrobu potrubí, kolen, zásobníků paliv, velkých součástí s konkávním povrchem. Poskytuje výrobky s vynikajícími fyzikálními vlastnostmi. Neexistuje žádný limit pro délku vyráběných trubek, s výhodou se tohoto procesu používá pro výrobu tlakových nádob. Jsou vyráběny i celá tělesa

vagonů pouliční dráhy, touto technikou byly vyrobeny zásobníky až o průměru 18 m. Vyni

kající vlastnosti potrubí takto vyrobeného se využívají pro dopravní spojení vrtných plošin s pozemními skladovacími terminály. Metoda je vhodná i pro vyztužení pušek a pro sportovní potřeby (hůlky, rybářské pruty). Nevýhodami je vysoká cena navíjecích strojů, nesešné odstraňování vnitřních forem a poměrně nízká produktivita u výroby tlakových nádrží, kde je nutno používat některé speciální postupy.



Obr. 2. Technologie navíjení [26]

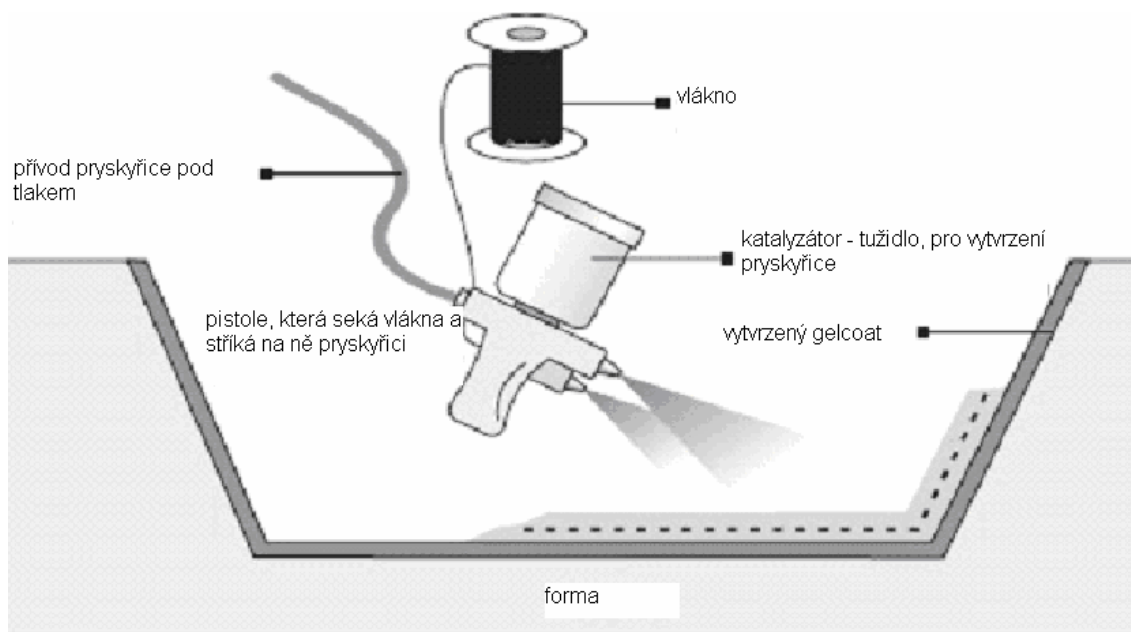
4.6 Metoda nanášení kompozitu do formy sprejem

Tato metoda spočívá v tom, že se na povrch formy nastříká katalyzovaná směs krátkých skleněných vláken a matrice, je slisována a vytvrzena. Celý proces se skládá z následujících kroků:

- příprava povrchu formy,
- správné namíchání katalyzátorů, aditiv, vláken atd.,
- nastříkání směsi ve větraném prostoru,
- nastříkaná směs je zaválečkována a udusána ručně,
- vytvrzení a dokončení.

Výhodou tohoto výrobního postupu je jeho přenosnost, nízká cena zařízení (cca 5 - 8 tisíc USD), pokud je proces automatizován je produktivita poměrně dobrá a reprodukovatelnost výrobků rovněž. Není žádné omezení velikosti výrobku. Nevýhodou je především nesnadné

dosažení přesných tolerancí, vlastnosti materiálů jsou horší než u předchozích technologií. Požadavky na kvalitní a schopnou pracovní sílu jsou poměrně vysoké. Využití takto vyrobených kompozitů je stejné jako u ručního kladení s tím, že touto metodou jsou navíc vyráběny velké díly, jako jsou panely, lodě, zásobníky atd.



Obr. 3. Technologie nanášení sprejem[26]

4.7 Metoda lisování se vstřikem matrice (RTM)

Tato metoda patří do skupiny metod pracujících s uzavřenou formou. Do této formy je vložena suchá výztuž, forma je uzavřena a je do ní pod tlakem vstříknuta katalyzovaná pryskyřice. Vytvrzování se děje většinou při pokojové teplotě. Postup výroby je následující:

- obě strany formy jsou nejdříve navoskovány (separace) a poté je nanesen gel coat,
- po vytvrzení gel coatu je do formy vložena suchá výztuž dle schématu daného typem výrobku,
- do uzavřené formy je potom vstříknuta pryskyřice pod tlakem 0,2-0,35 MPa tak, aby

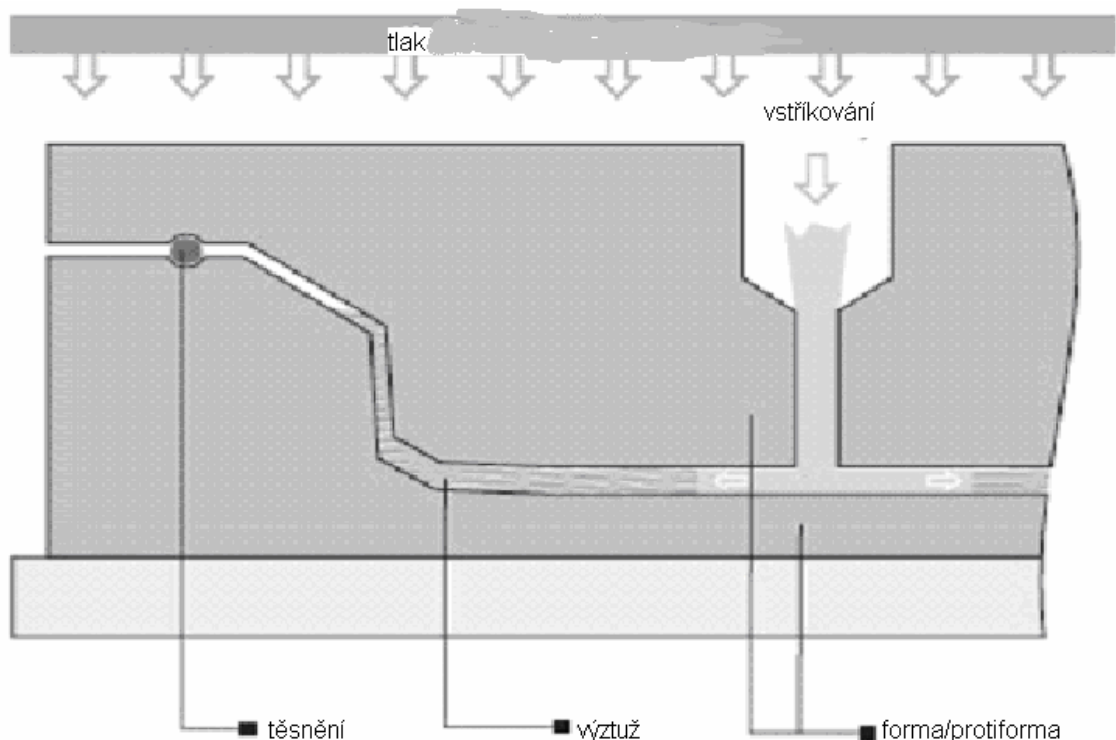
došlo k úplnému prosycení výztuže a pryskyřice začala vytékat odtokovými otvory, tyto

otvory jsou potom uzavřeny a forma je uzavřená ponechána až do úplného vytvrzení,

- forma je otevřena a díl je vytažen,

- výrobek je dokončen.

Výhodou RTM metody je to, že je možno vyrobit kompozitní díly, které mají po obou stranách dobrý povrch, přičemž například barva může být na každé straně jiná. Velmi přesně je také možno řídit tloušťkové tolerance. Protože jde o nízkotlaký proces při pokojové teplotě, je možno použít nástroje vyrobené z plastů a tím se významně celý proces zefektivňuje. Další výhodou je snadné vlamínování různých přírub a jiných součástí. Vyrábí se i poměrně velké plošné výrobky 5 - 19 m². Mezi nevýhody patří nutnost velmi těžkých a drahých kovových forem, není možno dosáhnout vysokého obsahu skla, a proto jsou fyzikální vlastnosti těchto materiálů nižší než u jiných procesů a většinou se FRC díly vyrobené touto metodou nepoužívají v konstrukčních aplikacích jako nosné prvky.



Obr. 4. Technologie vysokotlakého nanášení[26]

4.8 Metoda lisování ve formě

Tento proces je vhodný pro masovou výrobu FRC dílů. Při této metodě jsou ve formě umístěny najednou všechny komponenty, jako je pryskyřice, výztuže, aditiva, plniva, barviva, vnitřní mazadla, separační činidla atd. Při uzavření formy vyšším tlakem materiál teče a vyplňuje prostor formy ve tvaru konečného výrobku. Potom je FRC vytvrzen. Základními vstupními materiály jsou BMC (Bulk Molding Compound = premix), SMC (Sheet Molding

Compound), prepreg a preform s pryskyřicí. Výrobní kroky jsou:

-vyhřívaná forma je vložena do lisu s předepsanou kapacitou, tlakem, rychlostí uzavírání, teplotou atd.,

-vstupní materiál je vložen do otvoru formy a forma je uzavřena,

-po vytvrzení je forma otevřena a výrobek vyňat, forma je znovu naplněna pro další výrobní cyklus.[25]

4.9 Lisování z prepregů

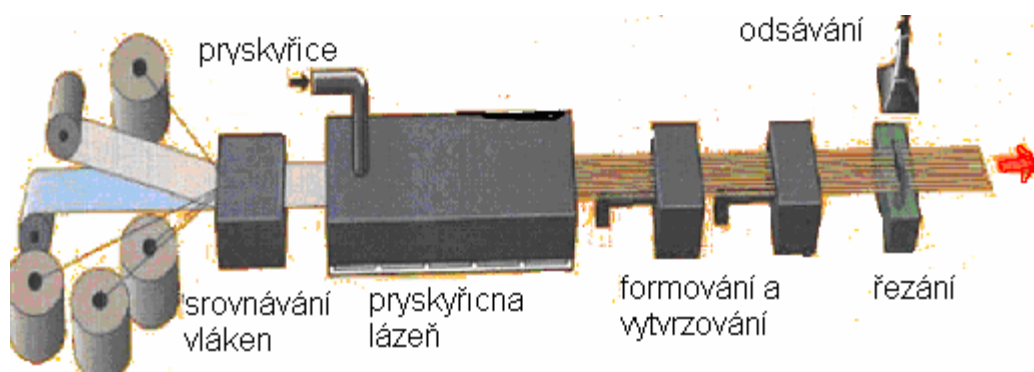
Prepreg je zkrácený název pro preimpregnovanou vyztužující tkaninu. Prepreg tedy obsahuje přesný poměr pryskyřice a výztuže a je ve formě velmi tenkých (0,1 - 0,5 mm) vrstev, které se mohou předem navrženým způsobem ve formě klást, aby bylo dosaženo požadovaného prostorového uspořádání výztuže, a tím i požadovaných fyzikálních vlastností. Touto metodou jsou produkovány velmi reprodukovatelné, homogenní díly, které obsahují velmi přesně a rovnoměrně výztuž i matrici. Postup vkládání do formy je stejný jako u ručního kladení. Výhodami použití prepregu je velmi přesné a předem definované uložení výztuže, což má za důsledek velmi dobré a izotropní vlastnosti hotového dílce. Není třeba se zabývat neustálou kontrolou poměru mezi pryskyřicí a výztuží atd. Nevýhodou je především vyšší cena prepregu ve srovnání se samotnou pryskyřicí a samotnou výztuží, poměrně veliký odpad, nutnost skladovat prepregy při nízkých teplotách. Tento proces je většinou omezen na aplikace v letectví a kosmonautice pro jeho vysokou finanční náročnost. Typickými produkty jsou radarové dómy (radomy), klapky náběhové a brzdové, dveře, vstupní panely, kryty komunikačních přístrojů, kryty turbín atd. [25]

4.10 Tažení kompozitních profilů (pultruze)

Tato technologie je založena na tažení svazků vláken, rohoží a tkanin pryskyřičnou lázní, kde dochází k prosycení výztuže. V následném kroku je prosycená výztuž tvarována do požadovaného průřezu a zároveň je celý kompozit vytvrzen v kontinuální vytvrzovací hlavě. Výrobní kroky pultruze jsou:

- soustava vláken, rohoží a rovin je tažena s předepsaným předpětím,
- výztuž je tažena do pryskyřičné lázně,
- vstup do předtvarovacího prostoru, tvarovací a vytvrzovací hlavy (v případě velké tloušťky stěn je třeba modifikovat vytvrzování zapojením mikrovlnného předehřívacího zařízení,
- za vytvrzovací hlavou je tažné zařízení, které je nositelem pohybu celé linky,
- za tažným zařízením je pila, která automaticky řeže profil na požadovanou délku.

Největšími výhodami pultruze jsou FRC velmi dobrých vlastností, prakticky neomezená variabilita tvaru průřezů, nekonečná délka vyrobeného profilu, vysoká produktivita, minimální nároky na lidskou práci, vysoký stupeň automatizace, vysoká reprodukovatelnost fyzikálních vlastností. Mezi nevýhody patří poměrně velké investiční náklady na pořízení technologie, relativně drahý provoz, nutnost velmi kvalitního řídicího systému. [26]

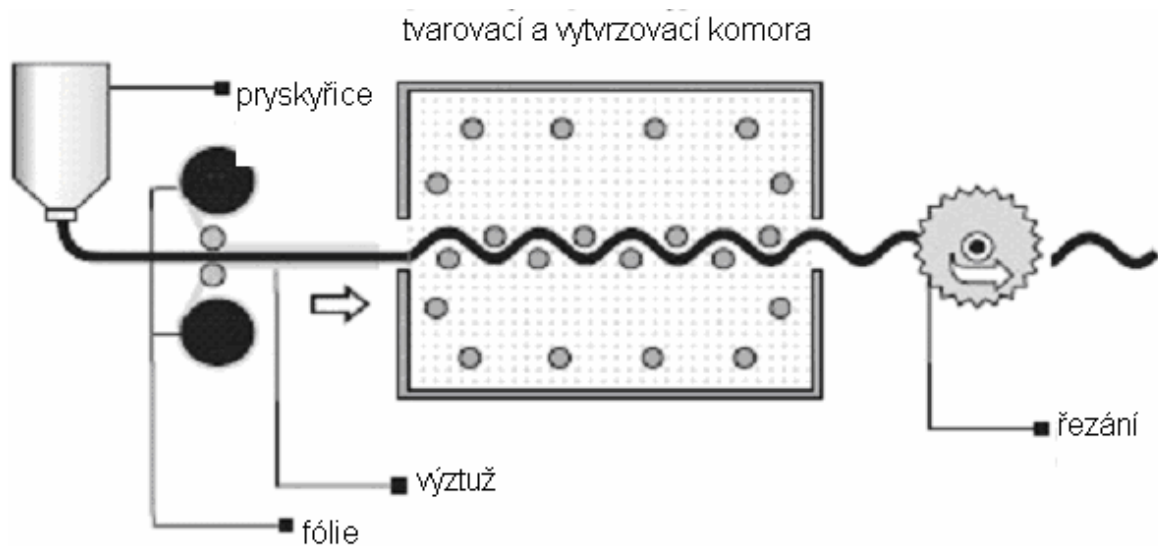


Obr. 5. Výrobní postup pultruze[27]

4.11 Kontinuální laminace FRC

Tato metoda je jednou z nejstarších a byla v plné míře rozvinuta i v ČR. Celý proces spočívá v tom, že se na kontinuální lince pohybující se nějakou předem stanovenou rychlostí deponuje výztuž, pryskyřice i všechny katalyzátory a aditiva i s vakuovým pytlek, celá směs se kontinuálně tvaruje a následně i vytvrzuje, čímž do jisté míry připomíná pultruzi. Jednotlivé výrobní kroky je možno shrnout do následujícího schématu:

- příprava povrchu formy (separační médium),
- nanesení pryskyřice na pohybující se pás,
- nanesení výztuží,
- rozložení materiálu systémem válečků,
- simultánní aplikace tepla pro vytvrzení FRC,
- řezání vytvrzeného profilu a odstranění separační fólie.



Obr. 6. Technologie kontinuálního laminování

Mezi hlavní výhody patří možnost vyrábět „nekonečnou“ délku FRC profilu o daném průřezu, je možno vyrábět různé tloušťky, nízké jsou náklady a minimální odpad nastává při naběhnutí kontinuální výroby.

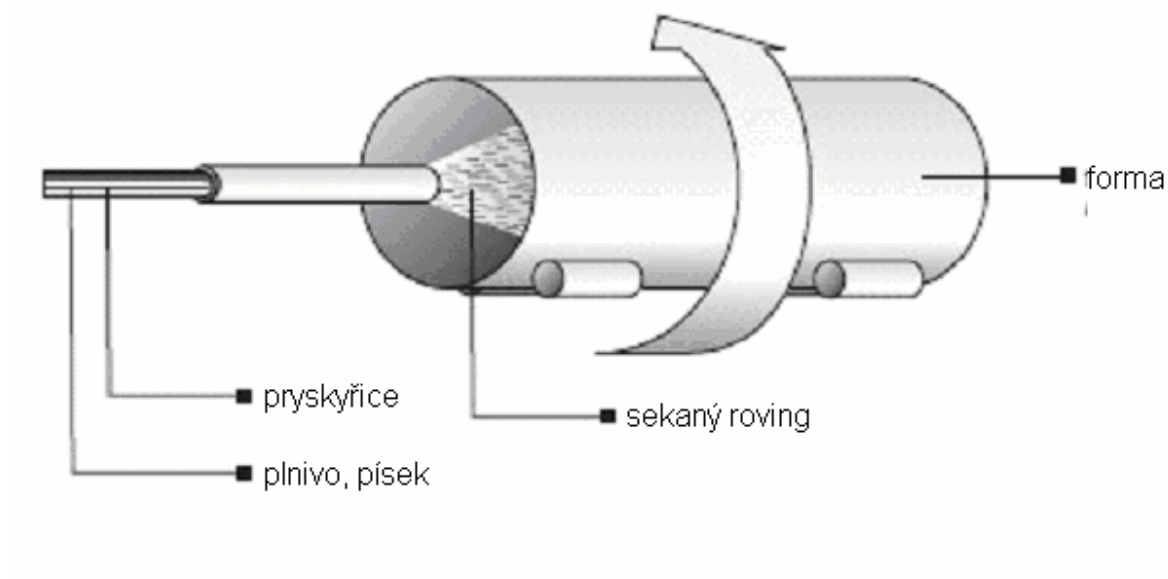
Mezi nezanedbatelné výhody tohoto procesu patří i oboustranně kvalitní povrch. Vysoká cena výrobního zařízení je jednou z hlavních nevýhod tohoto procesu výroby FRC. Je třeba vyrábět kontinuálně a ve velkých objemech, aby se investice do technologie vrátila. Velmi nesnadno se mění tvar vyráběného dílu. Hlavními aplikacemi jsou střešní krytiny, různé dělicí příčky, kryty klimatizace atd.

4.12 Odstředivé lití FRC

Toto je poměrně nový způsob výroby FRC výrobků založený na principu působení odstředivé síly. Vyrábějí se tak především válcové nebo oválné dlouhé předměty v délkách až 9 m. Nanášení pryskyřice a její dezinfekce jsou prováděny odstředivou silou v průběhu rotace formy. Jednotlivé výrobní kroky je možno rozdělit následujícím způsobem:

- výztuž je vložena do formy pokryté separačním materiálem,
- forma začne rotovat kolem podélné osy a je do ní vpravena pryskyřice,
- potřebná rychlost pro dosažení dostatečného tlaku na pryskyřici je nastavena,
- forma je zahřátá na teplotu vytvrzování a FRC je vytvrzen,
- rotace formy je zastavena a výrobek je vyjmut.

Tato metoda má mnoho výhod, jako je například minimum nutných nástrojů, proces je snadno automatizovatelný s vynikající uniformitou výroby. Je možno dosáhnout poměrně dobrých povrchů na obou stranách výrobku, odpad je minimální a FRC s minimálním obsahem defektů může produkovat prakticky negramotná výrobní síla. Nevýhodami je jednak poměrně vysoká cena technologického zařízení a nutnost vyrobit formy, které jsou velmi přesně vybalancovány i pro vysoké úhlové rychlosti otáčení. Nejčastěji jsou touto metodou vyráběny trubky, paraboly radarů, velké skladovací nádoby atd. [25]



Obr. 7. Technologie odstředivého lití[26]

5 KOMPOZITOVÉ POCHŮZKOVÉ ROŠTY

5.1 Hlavní výhody výběru materiálu:

Materiál je lehký (4 × lehčí než ocel), dobře se s ním manipuluje zejména ve stísněných prostorách nebo ve výškách. Pro obor energetiky je významnou vlastností jeho elektrická nevodivost. U venkovních aplikací je ceněn pro svoji velmi vysokou provozní životnost, která se pohybuje v desítkách let.

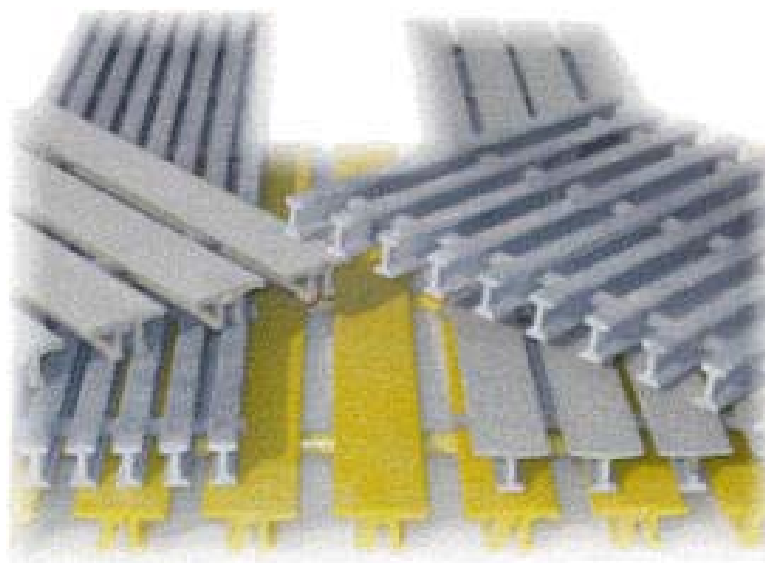
Základní materiálové vlastnosti:

- Vysoká pevnost, rázová odolnost.
- Stupeň hořlavosti B nebo až A (viz ČSN 73 0823).
- Elektricky nevodivý materiál.
- Nízká hmotnost
- Barevná stálost
- Vysoká odolnost chemikáliím a UV záření, nekorozivnost.
- Optická hustota kouře a toxické plyny při tepelném namáhání jsou na základě atestu vyhovující. Pro prostory, kde se může vyskytovat důlní plyn jsou dodávány materiály se speciálními vlastnostmi.[26]

5.1.1 Skládané rošty

PREFAPOR (výrobce PREFA KOMPOZITY a.s.) je obchodní název pochůzkových roštů, které jsou složené z tažených kompozitních profilů PREFEN. Nosné profily, opatřené protiskluzovou vrstvou, jsou navzájem spojeny kruhovými tyčemi a zajištěny proti posunutí mechanicky, všechny spoje jsou navíc slepeny epoxidovým lepidlem. Rošty PREFAPOR jsou součástí pochůzkových systémů, které mohou být také z kompozitních profilů. Používají se jako pochůzkové plochy jak v průmyslových aplikacích tak i pro komerční využití například u veřejné dopravy. V průmyslu se využívá jejich unikátních vlastností tam, kde působí agresivní prostředí. Největší uplatnění dosud u nás mají ve vodním hospodářství na ČOV a ve vodojemech, v chemickém průmyslu, energetice, ve strojírenství, v potravinářství a jinde. Výhody skládaných roštů oproti litým: Materiál (polyesterová izoftalická pryskyřice) odolává velmi agresivnímu prostředí (chemikáliím, UV záření, povětrnostním

vlivům). Kromě inhibitorů obsahuje podpovrchovou polyesterovou roušku. Rošty mají vyšší provozní životnost, vyšší odolnost rázům (větší objem výztuže), mohou se dodávat panely větších délek (výroba není omezena rozměrem formy jako u lití). Nevýhody skládaných roštů oproti litým: Skládané rošty jsou podepřeny jen ve směru kolmém na osu nosných profilů (na dvou protilehlých stranách), oproti tomu lité (mřížované) rošty mohou být uloženy na všech čtyřech stranách. To může být výhodou z hlediska tuhosti. V některých případech jsou lité rošty vhodnější, pokud jimi procházejí armatury.



Obr. 8. Fotografie skládaných roštů [27]

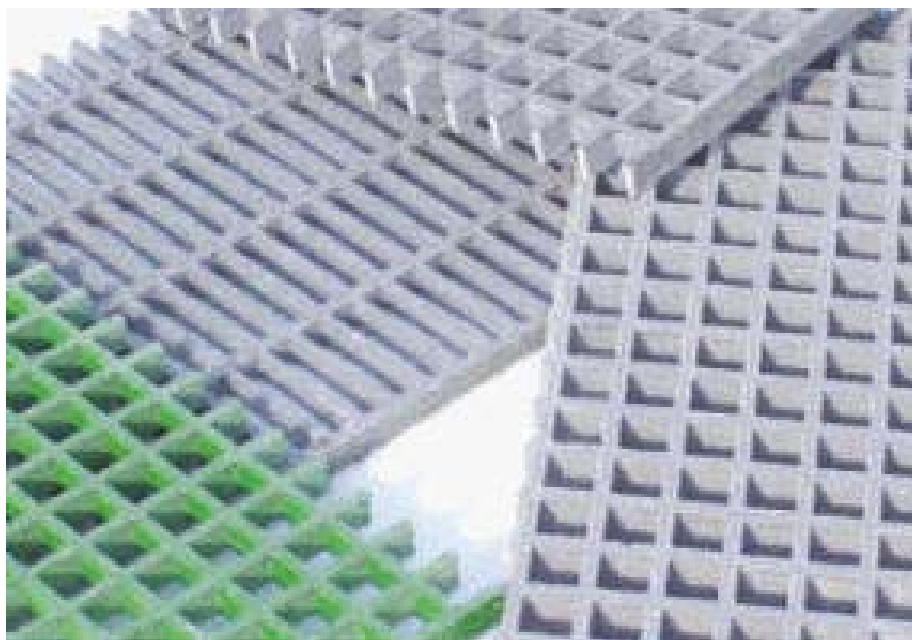
5.1.2 Lité rošty

PREFAGRID (výrobce PREFA KOMPOZITY a.s.) je obchodní název pochůzkových roštů, které jsou vyrobené technologií lití do formy. Tyto rošty, tvaru mříží, jsou z polyesterové pryskyřice vyztužené jen přímým skelným rovingem (bez rohoží a roušky jako u skládaných roštů). Pochůzný povrch je opatřen protiskluzovou vrstvou, kterou tvoří křemičitý písek zalitý do epoxidové pryskyřice. Rošty PREFAGRID jsou součástí pochůzkových systémů, které mohou být také z kompozitních profilů. V průmyslu se využívá jejich unikátních vlastností tam, kde působí agresivní prostředí. Největší uplatnění dosud u nás mají ve vodním hospodářství na ČOV a ve vodojemech, v chemickém průmyslu, energetice, ve strojírenství, v potravinářství a jinde.

Výhody litých roštů oproti skládaným - mohou být uloženy na všech čtyřech stranách. To je výhoda z hlediska tuhosti. Horní vrstva pásnice roštů je opatřena epoxidovou vrstvou, která obsahuje zrnka křemičitého písku.

Nevýhody litých roštů oproti skládaným - menší odolnost agresivnímu prostředí (chemikáliím, UV záření, povětrnostním vlivům) než u roštů z tažených profilů (ty mají speciální podpovrchovou polyesterovou roušku). Lité rošty mají nižší provozní životnost, menší odolnost rázům (menší objem výztuže) než tažené. Mohou se dodávat panely omezených standardních rozměrů závislých na rozměru formy.

Materiál - kompozit, kde pojivo je standardně z polyesterové pryskyřice, pro speciální aplikace z polyesterové nebo epoxidové, s přísádky absorberů UV záření. Výztuhu tvoří skelná vlákna ve formě přímých rovingů bez rohoží a bez podpovrchové ochranné roušky (jako u skládaných roštů). Vláknová výztuha je jen z rovingů, které jsou kladeny na sebe v obou kolmých směrech. U těchto roštů dochází při namáhání často k poruše vlivem smykového napětí na stojinách v rovině rovnoběžné s povrchem. U skládaných roštů je tato nevýhoda odstraněna pomocí plošných výztuh – skelných rohoží.



Obr. 9. Fotografie litých roštů[27]

6 Mechanika vláknových kompozitů

6.1 Základní pojmy

Obrovskou výhodou vláknových kompozitů je možnost měnit jejich elastické vlastnosti a pevnost „pouhou“ změnou výztuže (typ vláken) a prostorového uspořádání výztuže (jednosměrné, vícesměrné), jejího druhu (roving, rohož, tkanina atd.), poměru mezi obsahem výztuže a pojiva a změnou technologie výroby. Použitím stejných základních komponent (vlákna, pryskyřice) můžeme tedy efektivně vyrobit velkou škálu odlišných materiálů. Tato možnost u tradičních materiálů jako ocel, hliník či dřevo prakticky neexistuje nebo je velmi omezená. Jestliže má konstruktér ve svém návrhu použít kompozity místo tradičního materiálu, musí z výše uvedených důvodů znát alespoň základní vztahy dovolující kvantifikovat závislost modulu pružnosti vláknových kompozitů na obsahu výztuže, její prostorové orientaci a typu. To mu umožní kvalifikovaně se orientovat v nabídce kompozitů a snížit na minimum pravděpodobnost neúspěchu. Stejně je tomu u nutnosti znát způsob výpočtu pevnostních charakteristik při konstruování kompozitních výrobků s požadovanými bezpečnostními parametry. To platí v nezmenšené míře i pro materiálového inženýra, který by zase měl reagovat na požadavky konstruktéra a navrhovat materiály co nejlépe vyhovující požadavkům dané aplikace. [10]

Na poli kompozitních materiálů se setkáváme s pojmy, které charakterizují strukturu a symetrii této struktury a které mají zásadní význam pro mechanickou odezvu vláknových kompozitů. Jako *homogenní* označujeme jednofázovou, jednokomponentní látku, jejíž fyzikální vlastnosti jsou ve všech bodech tělesa stejné. Jestliže se materiál skládá ze dvou a více komponent nebo fází téže komponenty, říkáme, že je *heterogenní*. Běžně jsou jednotlivé komponenty kompozitních materiálů tvořeny chemicky odlišnými jednofázovými (homogenními) látkami. Komponenty však mohou být i dvou- a vícefázové, jako je tomu u semikrystalických polymerních matric (PP, PE, PEEK), kde jednu fázi tvoří krystalické domény a druhou amorfní domény. Další významnou charakteristikou kompozitů je symetrie jejich fyzikálních vlastností, která je zároveň odlišuje od většiny tradičních konstrukčních materiálů.

Termín *izotropní* indikuje, že materiálové vlastnosti jsou ve všech směrech stejné (nejsou funkcí orientace). To znamená, že všechny roviny procházející jedním bodem tělesa vyrobeného z tohoto materiálu jsou rovinami symetrie materiálových vlastností. Jako *ortotropní* označujeme materiál, který má tři vzájemně kolmé roviny symetrie materiálových vlastností. Jelikož jsou vlastnosti určovány strukturou, lze říci, že stejné roviny jsou i rovinami symetrie struktury kompozitu. V nejjednodušším případě vrstvy s jednosměrně orientovanými vlákny to znamená, že vrstva má jiné vlastnosti ve směru vláken a jiné ve směru kolmém na ně. Jestliže vlastnosti materiálu nevykazují žádné roviny symetrie, hovoříme o *anizotropním* materiálu. [7]

V teorii laminátů se setkáváme s pojmem *kvaziizotropní*, který znamená, že daný laminát nebo kompozit je možno v makroskopickém měřítku (celý dílec) považovat za izotropní v rovině vláknité výztuže. Mikroskopicky je však takový materiál anizotropní. Je zřejmé, že s klesající symetrií vlastností narůstá počet materiálových konstant (parametrů), které je nutno znát k úplnému popisu vztahů mezi napětím a deformací daného kompozitního tělesa.

Existující teorie mechanické odezvy vláknových kompozitů umožňuje předpověď hodnoty jejich tuhosti, pevnosti, tepelné roztažnosti a hodnoty dalších fyzikálních parametrů, jestliže jsou známy vlastnosti složek, jejich objemové zastoupení (používané z důvodu podstatného rozdílu v hustotách matric a vláken), geometrie a prostorové uspořádání výztuže vzhledem k vnějším napětím a pevnost adheze mezi jednotlivými komponentami. Výpočtová schémata jsou poměrně složitá a odpovídající optimální aproximace se vztahují k přesně definovaným třídám materiálů. Je však možno většinu těchto postupů rozdělit na standardní etapy či kroky. Zpravidla se mechanika kompozitů dělí na mikromechaniku a makromechaniku.

Mikromechanika se zabývá výpočtem vlastností laminy (kompozitní vrstvy) z odpovídajících vlastností jednotlivých komponent a z informací o geometrii, orientaci, uspořádání, mezifázové adhezi a objemovém zlomku výztuže. Mikromechanické výpočty jsou nejdůležitější při odlaďování materiálových vlastností a dovolují vypočítat limitující faktory při zlepšování vlastností kompozitů. [7]

Srovnání experimentálně zjištěných vlastností s teoretickými limitami umožňuje smysluplně zjistit, zda daný kompozit již dosáhl svého maxima užitečných vlastností (blíží se horní limitě) nebo zda jeho potenciál ještě nebyl zcela využit (je od horní limity dostatečně vzdálen).

Tato úroveň je rozhodující z hlediska materiálového inženýra, protože je to obvykle ta úroveň, na které se mění složení materiálu. Makromechanika umožňuje na základě znalostí vlastností jednotlivých vrstev (lamin) spočítat vlastnosti mnohvrstevnatého kompozitu - laminátu - z údajů o počtu, orientaci, tloušťce a uspořádání vrstev (lamin). Přitom je zanedbávána mikrostruktura kompozitu (heterogenita) a jednotlivé vrstvy jsou považovány za homogenní a ortotropní. Makromechanické výpočty se tedy vztahují buď k tzv. „transformované lamině“ nebo se vztahují ke konkrétnímu tvaru dílce či kompozitního profilu a převládajícímu způsobu jeho namáhání (laminát). Makromechanické výpočty navíc umožňují eliminovat předem materiálové varianty nevhodné pro řešení konkrétního problému a navrhnout optimální počet vrstev a jejich orientaci vůči působícímu - zpravidla víceosému - namáhání. Ukazuje se, že laminátová teorie je použitelná pro predikci mechanických vlastností i v případě kompozitů s krátkými náhodně uspořádanými vlákny, jak ukázali Tsai a Halpin na počátku 70. let 20. století.

Vrstva s jednosměrně orientovanými kontinuálními nebo krátkými vlákny (pravidelně a rovnoměrně rozmístěnými v matrici) představuje základní stavební jednotku vláknových kompozitů - *laminu*. Vrstva je ortotropní a má tedy 3 vzájemně kolmé roviny symetrie, které se protínají v hlavních materiálových osách. Tato symetrie umožňuje charakterizovat laminu při vhodně orientovaném jednoosém vnějším namáhání pouze 4 nezávislými materiálovými konstantami, kterými jsou v případě elastické odezvy (malé deformace) modul pružnosti v tahu ve směru vláken E_x (někdy je označován E_1), modul pružnosti v tahu ve směru kolmém na směr vláken E_y (někdy označován E_2), smykový modul pružnosti v rovině xy G_{xy} (někdy označován G_{12}) a Poissonův poměr ν_{xy} (ν_{12}) (pro napětí působící ve směru vláken).

Lomová mechanika (přesněji lineární elastická lomová mechanika = LEFM) je poměrně mladá disciplína formulovaná komplexně pro polymery teprve na počátku 80. let 20. století Williamsem, zabývá se předpovědí efektu přítomnosti defektů na pevnost materiálů homogenních izotropních materiálů. V posledním desetiletí došlo i k rozvoji matematického aparátu teorie do oblasti ortotropních materiálů - vláknových kompozitů. Aplikace lo-

mové mechaniky se však orientují do mikromechaniky, kde se pomocí LEFM a numerických metod jako FEM (metoda konečných prvků) mohou spočítat kritické hodnoty napětí či deformací nutné pro dosažení mezního stavu – lomu v žádaném směru při zahrnutí mikrostruktury kompozitu do výpočtů.[10]

6.2 Ohyb složených výrobků

6.2.1 Definice tuhosti

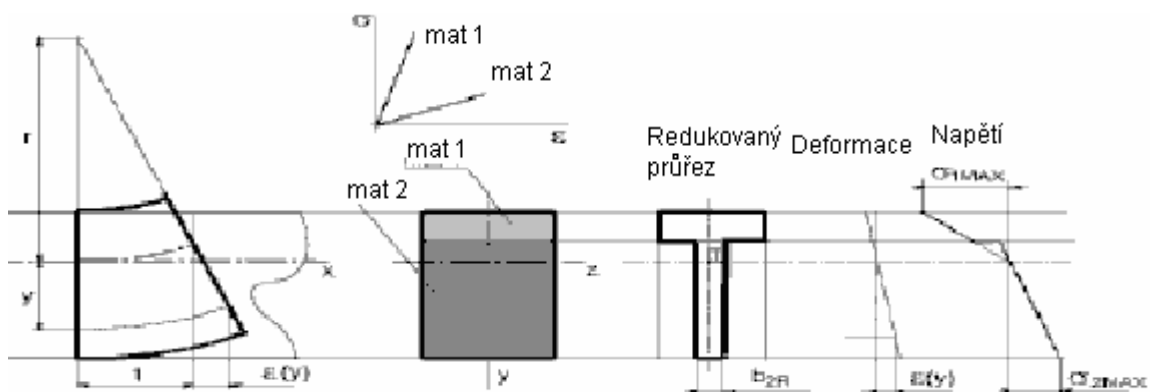
Deformace a napjatost při rovinném ohybu prutu složeného ze dvou materiálů s moduly pružnosti E_1 , E_2 , $E_1 > E_2$ jsou znázorněny na Obr. 10: Ohyb složeného výrobku. Tak jako při ohybu homogenního prvku je část průřezu stlačována, část protahována. Do neutrální osy - osy nulových ohybových napětí - klademe osu souřadného systému. Technická teorie ohybu je i v případě složených prvků založena na představě o zachování rovinnosti průřezů. Pro poměrnou deformaci odtud vyplývá vztah

$$\varepsilon(y) = \frac{1}{r} y, \quad (3)$$

kde r je poloměr zakřivení střednice prutu. Rovnováha mezi vnější dvojicí sil - ohybovým momentem M a vnitřními silami v průřezu je vyjádřena vztahem

$$M = \int_{(S)} \sigma(y) y dS = \int_{(S_1)} \sigma_1(y) y dS + \int_{(S_2)} \sigma_2(y) y dS. \quad (4)$$

6.2.2 Ohyb složeného výrobku:



Obr. 10. Ohyb složeného výrobku

S použitím Hookova zákona a vztahu pro ohybovou deformaci dostaneme pro křivost střednice prutu vztah

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{E_1 J_1 + E_2 J_2}, \quad (5)$$

kde výraz ve jmenovateli na pravé straně vztahu představuje ohybovou tuhost složeného průřezu. Pro případy prutů složených z různých materiálů je ohybová tuhost zřejmě

$$K_O = \sum_{i=1}^n E_i J_i, \quad (6)$$

kde J_i je kvadratický moment i -té části průřezu, tvořené materiálem s modulem pružnosti E_i , k neutrální ose průřezu.

Výraz pro ohybovou tuhost K_O lze psát ve tvaru

$$K_O = E_I \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_I} J_i = E_I J_R \quad (7)$$

kde J_R nazveme kvadratickým momentem redukované plochy složeného průřezu k neutrální ose. Rovnici pro ohybovou křivost tak můžeme psát ve tvaru formálně shodném s příslušnou rovnicí pro homogenní pruty:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{E_I J_R}. \quad (8)$$

Ohybové napětí v obecném místě o pořadnici y a v i -té části průřezu je pak

$$\sigma_I(y) = E_i \varepsilon(y) = E_i \frac{1}{r} y = \frac{E_i}{E_I} \frac{M}{J_R} y. \quad (9)$$

Poloha neutrální osy složeného průřezu vyplývá z podmínky nulového součtu sil ve směru střednice x (v průřezu působí pouze dvojice sil M). Tato podmínka klade polohu neutrální osy, a tedy i počátku souřadného systému do těžiště tzv. redukované plochy. Redukovaná plocha složeného průřezu je plošný útvar, který vznikne z původního průřezu redukcí šířek jednotlivých i -tých částí průřezu v redukčním poměru E_i / E_1 . Za vztažný modul pružnosti se obvykle volí modul maximální. Z uvedeného vyplývá praktický postup při určení napětí a deformace ohýbaných složených a vrstvených prvků:

1. Plochu daného složeného průřezu rozdělíme na jednotlivé obdélníky. Materiál s nejvyšší hodnotou modulu pružnosti označíme číslem 1. [1]

6.2.2.1 Redukce šířek

2. Vypočteme redukované šířky jednotlivých částí podle vztahu

$$b_{R_1} = \frac{E_i}{E_1} b_i. \quad (10)$$

Šířkami se rozumí rozměry ve směru normály k rovině ohybu xy , tj. ve směru pořadnice z .

3. Sestrojíme redukovanou plochu průřezu. Určíme polohu těžiště redukované plochy a kvadratický moment J_R této plochy k ose z , tj. k ose procházející těžištěm.

4. Vypočteme maximální hodnoty ohybových napětí v jednotlivých i -tých částech průřezu podle uvedeného vztahu.

5. Při výpočtu ohybových deformací prutu počítáme s ohybovou tuhostí $E_1 J_R$.

Rovinnost ohybu vyjadřuje podmínka nulového ohybového momentu k ose y . Tato podmínka je vždy splněna v případech průřezů geometricky (svým tvarem) i fyzikálně (co do materiálového složení) souměrných k ose y . [1]

6.3 Bimodulární ohyb prutů vyztužených dlouhými vlákny

Plasty vyztužené jednosměrně dlouhými vlákny svým mechanickým chováním patří mezi tzv. bimodulární materiály, tj. materiály, vykazující výrazněji odlišné hodnoty modulu pružnosti v tahu a tlaku. Ohyb prutu vyztuženého dlouhými vlákny je pak zvláštním případem ohybu složeného prutu. Rozhraní obou myšlených materiálů s navzájem odlišnými moduly pružnosti $E_+, E_- < E_+$ spadá do neutrální osy průřezu. Její poloha vyplývá z podmínky nulového součtu osových sil v průřezu:

$$\int_{(S)} dN = 0. \quad (11)$$

Ohybová napětí v krajních vláknech průřezu, tj. v $y=e_-, y=e_+$ určíme s pomocí vztahu

$$\sigma_i(y) = E_i \frac{1}{r} y = \frac{E_i}{E_1} \frac{J}{J_R} y.$$

Zřejmě tak bude

$$\sigma_{+MAX} = \frac{M}{J_R} e_+, \sigma_{-MAX} = \frac{E_-}{E_+} \frac{M}{J_R} e_-, \quad (12)$$

kde J_R je opět kvadratický moment redukované plochy průřezu k neutrální ose. Co do únosnosti průřezu v ohybu připadají v úvahu dva mezní stavy: buď dostoupí max. tahové napětí hodnoty meze pevnosti v tahu, nebo max. tlakové napětí dosáhne hodnoty meze pevnosti v tlaku. O tom, která z obou možností nastane, rozhodují nejen materiálové parametry – podíly E_+/E_- , σ_{P-}/σ_{P+} , ale i tvar průřezu [1].

Ohybové momenty příslušející hodnotám napětí na mezích pevnosti jsou podle (12)

$$M_+ = \sigma_{P+} \frac{J_R}{e_+}, \quad M_- = \sigma_{P-} \frac{E_+ J_R}{E_- e_-}. \quad (13)$$

Skutečným mezním momentem, při jehož působení dochází v průřezu k poruše, je menší z momentů M_- , M_+ .

Vyjádřeme se nyní k pojmu tzv. „modulu pružnosti v ohybu“ bimodulárního materiálu. Vzorek pro ohybovou zkoušku má průřez obdélníkového tvaru, takže podmínka (10) poskytuje pro polohu neutrální osy vztah

$$\frac{e_+}{e_-} = \eta \quad (14)$$

s označením $\eta^2 = E_- / E_+$. Poněvadž $e_+ / e_- = h$, je

$$e_- = \frac{h}{1 + \eta}, \quad e_+ = \frac{\eta h}{1 + \eta}. \quad (15)$$

6.4 Ortotropní materiály

Ortotropní materiály jsou případem elastického chování, vykazujícího symetrii elastických vlastností ke třem vzájemně kolmým rovinám. Průsečnice těchto rovin jsou tzv. přirozenými resp. materiálovými souřadnými osami ortotropie. Elastické chování ortotropního materiálu ve 3D je určeno devíti nezávislými elastickými konstantami. Značný praktický význam mají případy rovinné ortotropie, které jsou vlastní případům stěn výrobků

s orientací makromolekul při zpracování, především však stěnám příp. vrstvám vyztuženým vláknovou výztuží. O ortotropii rovinného typu hovoříme tehdy, existuje-li symetrie elastických vlastností plošného prvku ke dvěma vzájemně kolmým osám.

Srovnání deformační odezvy izotropního, ortotropního a obecně anizotropního plošného prvku je znázorněno na Obr. 11. Izotropní prvek vykazuje při namáhání jednoosým normálovým napětím pouze normálové deformace: prodloužení ve směru působícího napětí a příčnou kontrakci. Jeho pravé úhly se při této deformaci nemění. Se změnou směru zatížení zůstává deformační odezva beze změny.

Ortotropní plošný prvek, jehož osy 1, 2 jsou totožné s materiálovými (přirozenými) osami ortotropie L, T se chová při jednoosém namáhání normálovým napětím resp. při ohřevu co do charakteru deformace obdobně jako izotropní prvek – tj. dochází pouze k normálovým deformacím, nikoliv změně pravého úhlu vzorku. Hodnoty deformací resp. teplotních dilatací však pro směry 1 = L, 2 = T nabývají rozdílných hodnot. Matice poddajnosti je proto

$$[C^*] = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_T & 0 \\ -\nu_L/E_L & 1/E_T & 0 \\ 0 & 0 & 1/2G_{LT} \end{bmatrix} \quad (16)$$

kde v důsledku její symetrie platí

$$\nu_L/E_L = \nu_T/E_T \quad (17)$$

Index u Poissonova poměru má zde význam složky napětí, která kontrakci způsobuje. Modul pružnosti ve smyku G_{LT} je nezávislou elastickou konstantou, takže lineárně elastické chování plošného ortotropního prvku je určeno celkem čtyřmi nezávislými elastickými konstantami. Sloupec (α^*) je v přirozeném souřadném systému

$$(\alpha^*) = \begin{bmatrix} \alpha_L \\ \alpha_T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Inverzí matice poddajnosti (16) získáme matici tuhosti plošného ortotropního prvku (v přirozeném souřadném systému L, T):

$$[S^*] = [C^*]^{-1} = \begin{bmatrix} E_L^{**} & \nu_T E_L^{**} & 0 \\ \nu_L E_T^{**} & E_T^{**} & 0 \\ 0 & 0 & 2G_{12} \end{bmatrix} \quad (19)$$

s označením $E_i^{**} = E_i / (1 - \nu_i \nu_j)$, $i, j = L, T$. Kdybychom nyní pootočili lokální souřadný systém plošného vzorku shodného ortotropního materiálu o určitý úhel vůči přirozenému (materiálovému) souřadnému systému L, T, byla by jeho mechanická i teplotní deformační odezva na vnější namáhání zcela obecná – prvek by se choval navenek jako anizotropní. Tak např. při namáhání pouhým normálovým napětím ve směru 1 by se prvek nejen prodloužil ve směru 1, zúžil ve směru 2, ale vykázal by i smykovou deformaci, jak je znázorněno na Obr. 4 c. Matice poddajnosti v souřadném systému 1, 2 by byla obecně zcela zaplněna devíti elastickými konstantami:

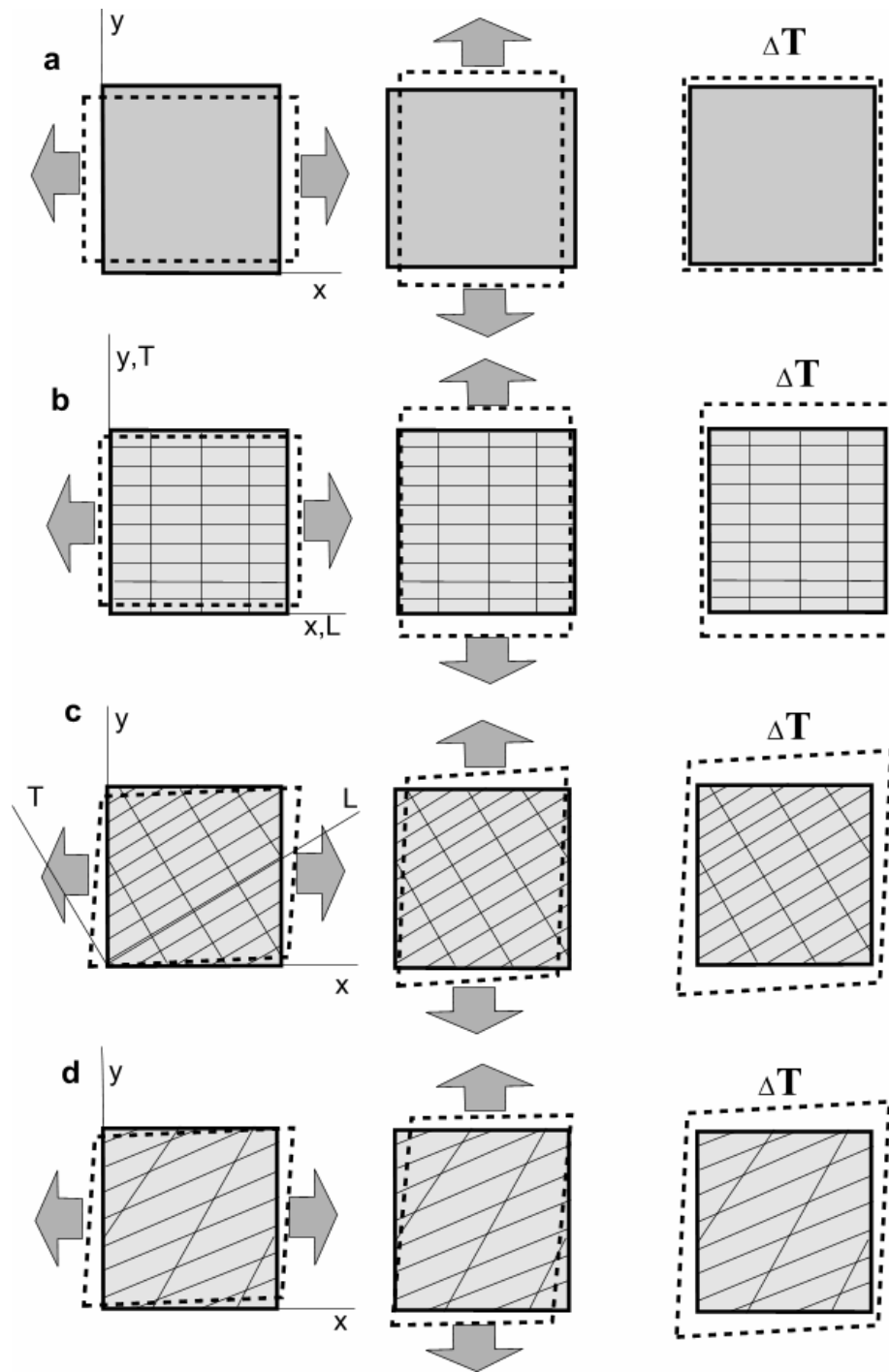
$$[C^*] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31}/2 & C_{11}/2 & C_{33}/2 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Těchto devět konstant C_{ij} ovšem závisí na čtyřech elastických konstantách v přirozené matici poddajnosti (16) transformačním vztahem $[C^*]' = [T] [C^*] [T]^{-1}$. Sloupec koeficientů teplotní roztažnosti je nyní

$$(\alpha^*)^{1,2} = [T] \begin{bmatrix} \alpha_L \\ \alpha_T \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_{12} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

kde α_{12} je koeficient teplotní smykové dilatace prvku v souřadném systému 1, 2.

Jak je znázorněno na obr. 11, má chování obecně anizotropního materiálu zdánlivě shodný charakter. Anizotropní prvek však nevykazuje přirozený souřadný systém, v němž by se prvky matice poddajnosti C_{ij} , $i \neq j$ rovnaly nule. Elastické chování anizotropního plošného prvku je tak určeno šesti navzájem nezávislými elastickými konstantami. [1]



Obr. 11. Srovnání deformační odezvy izotropního, ortotropního a obecně anizotropního plošného prvku [1]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této práce byla optimalizace mechanických a deformačních vlastností kompozitních konstrukčních prvků – pochůzných roštů dodaných firmou PREFA KOMPOZITY a.s. Vzhledem ke způsobu namáhání těchto roštů byly zkoumány vlastnosti v ohybu. Cílem bylo navržení různých modifikací pochůzkových stavebních prvků a nalezení optimálních parametrů pro jejich praktické využití – tj. najít takové rozměrové parametry, které by nejlépe splnily požadavek na napěťově-deformační chování, tj. průhyb a napětí. Hodnoty průhybů a napětí budou sledovány v konečně-prvkovém softwaru COSMOS/M, který umožňuje po zadání geometrie a materiálových, průřezových a zatěžujících hodnot provádět optimalizační a parametrické studie dané stavební konstrukce. Výsledkem práce by měla být doporučení pro aplikace, kde by měly být uvedeny vybrané typy navržených roštů, splňující deformačně-napěťové podmínky.

8 STUDIUM OHYBOVÉHO CHOVÁNÍ VYZTUŽENÝCH PRUTŮ

Úkolem tohoto bodu praktické části bylo zjistit chování kompozitního pochůzkového roštu při ohybové zkoušce. Zkušební tělesa byla dodána firmou PREFA KOMPOZITY a.s., Zkouška ohybem dává důležité konstrukční podklady pro ty polymerní materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, což je velmi častý případ. Jsou to nejen nosníky, ale např. samonosné střešní konstrukce z laminátů, obkladový materiál ve stavebnictví, který se prohýbá svou vlastní vahou, střešní krytiny, apod. Ohybová zkouška také umožňuje stanovit modul pružnosti E u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek.

8.1 Metodika statických ohybových zkoušek

8.1.1 Základní charakteristiky

Při ohybové zkoušce se jedná o namáhání tlakem a tahem současně. Napětí je v principu rozloženo tak, že v horních vrstvách je tahové, směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové. Napětí v ohybu σ_O se určí podle rovnice:

$$\sigma_O = \frac{M_O}{W_O} \quad [\text{MPa}], \quad (22)$$

$$M_{O_{\max}} = \frac{F \cdot L_p}{4}, [\text{N.mm}] \quad (23)$$

kde $M_{O_{\max}}$ je maximální ohybový moment (N.mm) při zatížení F, L_p – vzdálenost mezi podporami, W_O je modul průřezu zkušební tělesa (mm^3).

$$\text{pro obdélník: } W_O = \frac{bh^2}{6} \quad [\text{mm}^3] \quad \text{pro profil I: } W_O = \frac{BH^3 - bh^3}{6H} \quad [\text{mm}^3] \quad (24)$$

kde b (mm), h (mm), B (mm) a H (mm) jsou rozměry profilu – zkušební tělesa – dle tabulek. Průhyb představuje vychýlení (mm) plochy tělesa ze své původní polohy uprostřed rozpětí obou podpěr. Výsledkem ohybových zkoušek jsou ohybové křivky napětí - průhyb (deformace).

8.1.2 Podstata zkoušek

Zkušební těleso – tažený prut profilu I a nosníky nařezané z litého roštu, volně položené na dvou podpěrách, byly uprostřed mezi nimi za definovaných podmínek krátkodobě zatěžovány až do svého rozlomení – porušení.



*Obr. 12. Fotografie průběhu ohybové zkoušky profilu I,
délky 1000 mm na stroji ZWICK*

Přístroj použitý pro praktické testování vzorků třibodovým ohybem měl tyto parametry: ZWICK AUGUST-NAGEL-STR.11, D-89079 ULM, TYP 145665, WERK-NR 122480/93, AB-NR 321147.

Technické údaje stroje:

maximální zkušební síla 20 kN

strojová výška 1284 mm

celková výška	2012 mm
celková šířka	630 mm
šířka pracovního prostoru	420 mm
hmotnost	150 kg

Zkušební stroj Zwick 145 665 se používá pro praktické testování vzorků. Univerzální program pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem je vhodný pro:

- zkoušky tahem a tlakem plastů, textilu, pěnových materiálů, vlákny zpevněných kompozitů, laminátů, papíru, lepenky a dřeva.
- zkoušky tahem a tlakem kovů.
- zkoušky tří a čtyřbodovým ohybem pro všechny typy materiálů.
- nastavení a regulace teploty pro teplotní komory.

8.1.3 Zkoušené výrobky

U měření ohybových vlastností byly použity tři druhy kompozitních litých pochůzkových roštů a jeden typ roštu taženého (avšak ve dvou délkách).

Tab. 6. Rozpis zkoušených výrobků

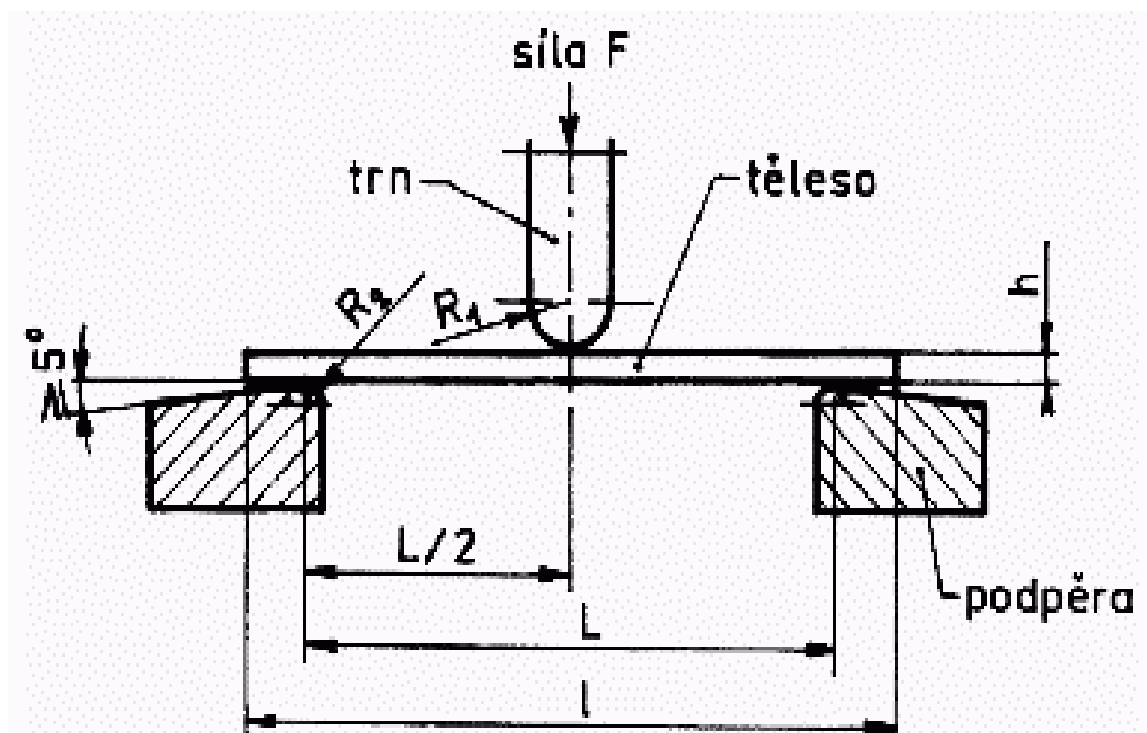
Typ roštu	Výška (mm)	Šířka (mm)	v (mm/min)	Hmotnostní obsah skelného vlákna %	Objemový obsah skelného vlákna %
Litý	25	5,2	10	30 %	15,7%
Litý	30	5,5	10	26 %	14%
Litý	38	6,3	10	20 %	9%
Tažený	25	15	10	80 %	68%

Hmotnostní obsah skelného vlákna byl zjištěn tzv. „vypálením“ pryskyřice. Při zjišťování obsahu výztuže bylo postupováno tak, že byl odebrán - odřezán vzorek kompozitního výrobku, ten se zvažil, posléze se přímým plamenem (hořákem) působilo tepelně na tento vzorek, kdy se při vysokých teplotách pryskyřice vypaří a zůstane jen roztavená skleněná výplň. Ohořelý zbytek – sklo, se po zchlazení zvaží a určí se hmotnostní podíl pryskyřice a skla. Z každého typu roštu byl odřezán vzorek hmotnosti 0,020 kg. Tato metoda je ne-

přesná, mnohem přesnější metodou zjištění hmotnostního obsahu skelné výztuže je metoda termogravimetrie (TGA), avšak tu se nepodařilo zajistit. Objemový obsah skleného vlákna byl zjištěn prostým přepočtem, pro který bylo nutné znát hustotu skla a hustotu matrice. Hustota E-skla je udávána v hodnotě 2540 kg/m^3 , hustota pryskyřice je 1100 kg/m^3 .

8.1.4 Zkušební zařízení

Vlastní uspořádání ohybové zkoušky může být různé, při ohybových zkouškách pochůzkových kompozitních roštů byl použit tříbodový systém, jehož systém je uveden na následujícím obrázku.



Obr. 13. Obrázek tříbodového systému ohybové zkoušky

Při tříbodové zkoušce je zkušební těleso podepřeno jako nosník na dvou podpěrách, vzdálených od sebe v určité vzdálenosti. Rozpětí podpěr je nastavitelné. Konstantní silou, působící uprostřed mezi podpěrami je těleso prohýbáno trnem tak dlouho, dokud se těleso nerozломí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty (ČSN EN ISO 178). V ČSN EN ISO 178: Plasty - Stanovení ohybových vlastností – je udána řada hodnot rychlostí zkoušky. Metoda se používá ke zjištění chování výrobků při namáhání ohybem a pro stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování tělesa

volně podepřeného dvěma podpěrami přitlačným trnem uprostřed jejich rozpětí (tříbodový ohyb). Metoda je vhodná následující materiály: vstřikované a vytlačované termoplasty, lisovací reaktoplasty a vlákny vyztužené reaktoplastové a termoplastové kompozity.

8.1.5 Provedení zkoušek

Zkoušené těleso bylo umístěno symetricky na obě podpěry a mezi nimi bylo zatěžováno. Rychlost pohybu mezi podpěrami a zatěžovacím trnem byla rovna 10 mm/min. Vzhledem k dodaným vzorkům byla dodržena u litých roštů rozteč podpěr ve vzdálenosti 246 mm a z dodaných bloků litých kompozitních prvků byly nařezány pásy o délce 300 mm. Pro poslední sérii tažených roštů délky 1000 mm byla na Ústavu výrobního inženýrství vyrobena podpora pro ohybovou zkoušku s maximální roztečí 690 mm, tudíž pro tyto vzorky byla použita. V průběhu zkoušky byla zaznamenávána síla působící na těleso a velikost odpovídajícího průhybu zkušebního tělesa.

8.2 Vyhodnocení zkoušek

Výsledkem zkoušky jsou ohybové křivky síla - průhyb, z kterých se mohou vyhodnotit všechny potřebné charakteristické hodnoty (napětí, průhyby, relativní deformace) ze zkoušky ohybem. Zkouška ohybem dává konstrukční podklady pro plasty, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb. Je zvláště vhodná pro křehké plasty, pro které je provedení tahové zkoušky obtížné. Normovaná zkušební metoda pro hodnocení ohybových vlastností plastů je uvedena v ČSN EN ISO 178 z 8/1998.

Pro návrhy a řešení kompozitních pochůzných roštů se používají následující normy:

ČSN 74 6930 "Podlahové rošty ocelové",

ČSN EN 1991-1-1 Zatížení konstrukcí – obecná zatížení

ČSN 73 2030 "Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí"

ČSN P ENV 1991-2-1 Zásady konstruování a zatížení konstrukcí

ČSN 73 0035 "Zatížení stavebních konstrukcí"

8.2.1 Ohybové zkoušky litých roštů

Pro ohybovou zkoušku litých roštů byly firmou PREFA KOMPOZITY a.s. dodány tři druhy kompozitních pochůzkových roštů, lišící se výškou a obsahem skelného vlákna, neboť při ručním zpracování nelze zaručit u všech výrobků stejné procento výztuže.

Výpočet efektivního modulu pružnosti pro lité kompozitní rošty:

série č. 1:

$$E_{C1} = E_1c_1 + E_2c_2 \quad (25)$$

$$E_{C1} = 0,157.70000 + 0,843.3600$$

$$E_{C1} = 14014\text{MPa}$$

série č. 2:

$$E_{C2} = E_1c_1 + E_2c_2$$

$$E_{C2} = 0,14.70000 + 0,86.3600$$

$$E_{C2} = 12896\text{MPa}$$

série č. 3:

$$E_{C3} = E_1c_1 + E_2c_2$$

$$E_{C3} = 0,09.70000 + 0,91.3600$$

$$E_{C3} = 9576\text{MPa}$$

E_1 – modul pružnosti vlákna

c_1 – podíl vláken v % (dle tab. 6)

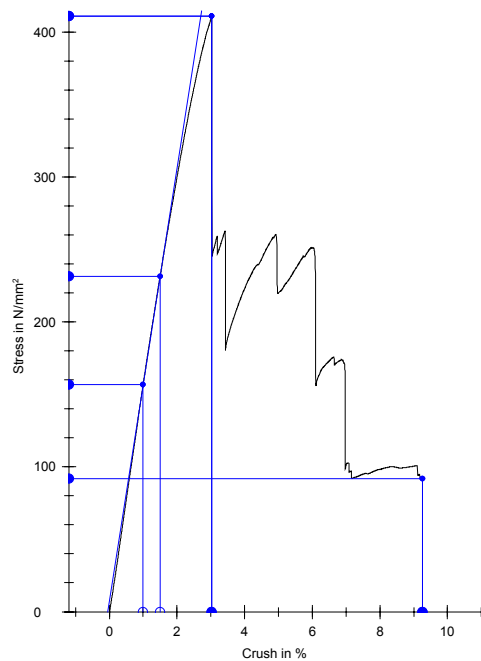
E_2 – modul pružnosti pryskyřice

c_2 – podíl pryskyřice v % ($1 - c_1$)

8.2.1.1 Série 1 – Litý rošt

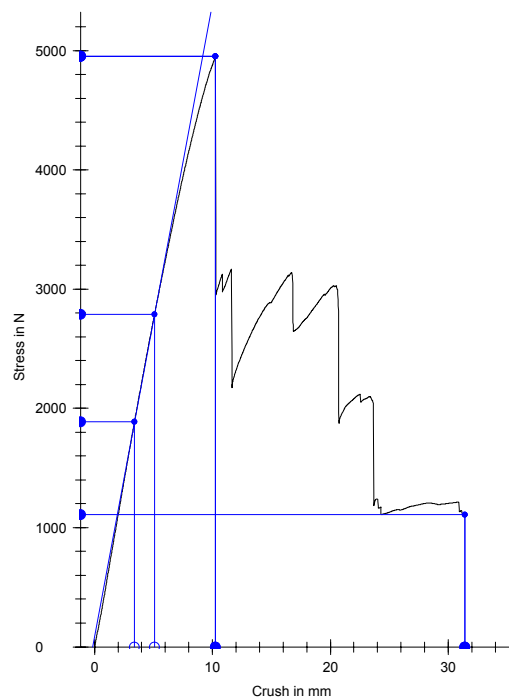
V první sérii pro ohybové zkoušky byly použity nařezané pásy z litého roštu výšky 25 mm, šířky 5,22 mm, rozteč 36 mm, velikost ok 30x 30 mm, rychlost posuvu trnu byla nastavena na 10 mm/min.

Z obr. 15., grafu závislosti síly a průhybu, je zřejmé, že působící síla dosáhla hodnoty 5000 N. V průběhu působení síly dochází k postupnému praskání vyztužujících vláken, po dosažení horní meze pevnosti v ohybu se v prutu přeručí většina výztuže, mez pevnosti prudce poklesne – vlákna dále praskají a mez pevnosti dále klesá a to až do úplného porušení.



Obr. 14. Diagram průběhu ohybové zkoušky
(napětí – deformace) série 1 - vzorek č. 2

Jak je dle obrázku č. 14 zřejmé, rošt je zatěžován silou až do doby svého poškození. Je možné vyčíst mez pevnosti v ohybu, průhyb v procentech.



Obr. 15. Diagram průběhu ohybové zkoušky
(síla – průhyb) série 1- vzorek č. 3

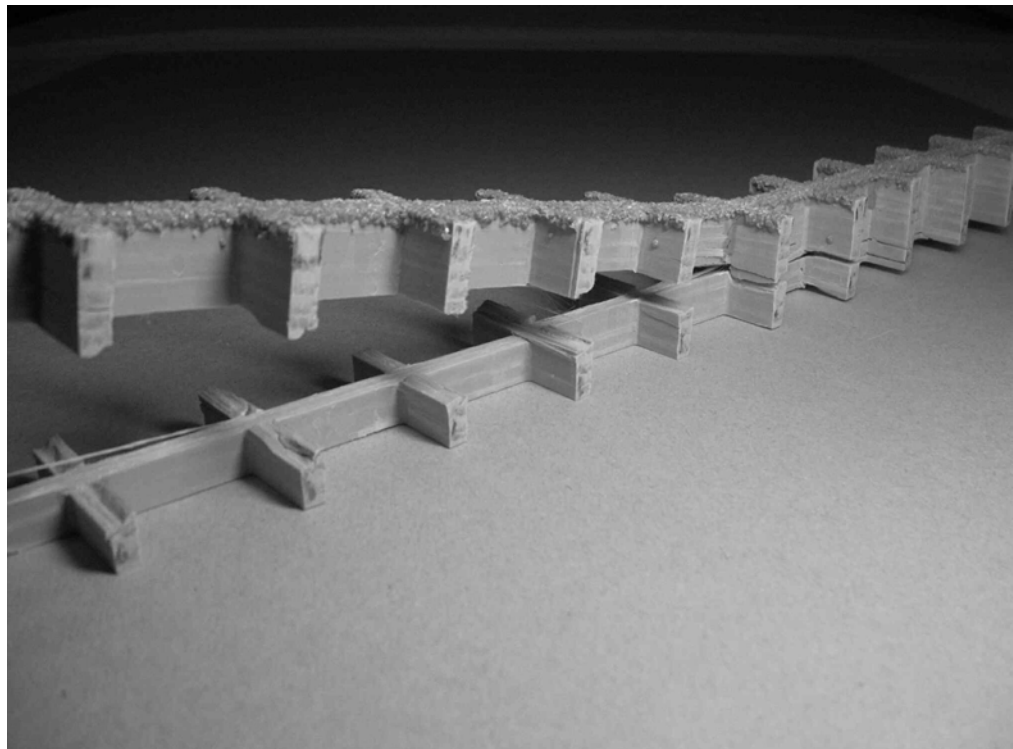
V následující tabulkách č. 7 a 8 jsou shrnuty výsledky a statistické hodnoty ohybové zkoušky série č. 1. U vzorku č. 4 nedošlo k přelomení, jinak ostatní vzorky byly porušeny.

Tab. 7. Výsledky z ohybové zkoušky série č. 1

	a0	b0	Rm	RB	E	Fmax %	Break	Fmax.	Break
Nr	mm	mm	N/mm ²	N/mm	N/mm	{epsilon}	{epsilon} %	{epsilon} mm	{epsilon} mm
1	25	5,22	345,78	69,14	14935,1 8	2,52	2,78	8,56	9,45
2	25	5,22	411,19	91,93	14940,7 4	3,03	9,25	10,27	31,4
3	25	5,22	405,59	226,3	14690,6 2	3,04	4,62	10,33	15,68
4	25	5,22	392,57	-	14729,0 1	2,93	-	9,95	-
5	25	5,22	388,81	365,2	15176,9 2	2,95	3,14	10,02	10,66

Tab. 8. Statistické hodnoty série č. 1

Sub-series 1	a0	b0	Rm	RB	E	FMax	ε Break	Fmax.	ε Break
n = 5	mm	mm	N/mm	N/mm	N/mm	ε %	%	ε mm	mm
X	25	5,22	388,79	188,15	14894,5	2,9	4,95	9,83	16,8
s	0	0	25,73	136,9	195,26	0,21	2,98	0,73	10,1
P 0,95 +	25	5,22	420,78	405,83	15137,26	3,16	9,68	10,73	32,86
P 0,95 -	25	5,22	356,8	29,53	14651,74	2,63	0,22	8,92	0,74



Obr. 16. Fotografie porušené části roštu (ze série 1) při ohybu

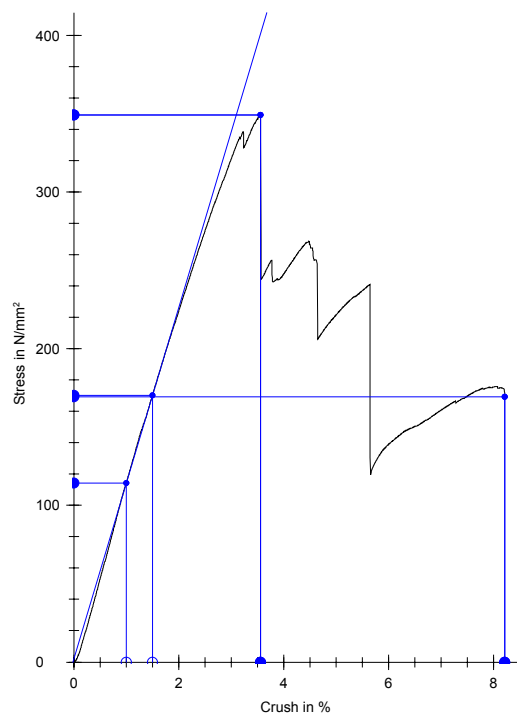
8.2.1.2 Série 2 – Litý rošt

Číslem 2, byla označena série obsahující pásy odebrané z litého pochůzkového roštu výšky 30 mm a šířky 5,5 mm, rozteč 36 mm, velikost ok 30 x 30, rychlost posuvu trnu byla zachována - 10 mm/min

Z následujícího grafu i výsledných tabulek je vidět, že proti sérii č. 1 tento druh roštu nedosahuje takové meze pevnosti v ohybu jako předchozí. I hodnoty modulu pružnosti E poklesly v průměru o 23%. Při této ohybové zkoušce došlo k porušení všech vzorků z této série.

Tab. 9. Výsledky z ohybové zkoušky série č. 2

	a0	b0	Rm	RB	E	Fmax %	Break	Fmax.	Break
Nr	mm	mm	N/mm ²	N/mm	N/mm	{epsilon}	{epsilon} %	{epsilon} mm	{epsilon}mm
6	30	5,5	349,45	169,3	11220,3	3,56	8,22	11,68	26,96
7	30	5,5	355,79	141,3	12608,2	3,09	6,94	10,15	22,78
8	30	5,5	361,44	105,9	11263,1	3,47	7,56	11,37	24,79
9	30	5,5	295,82	152,7	10176,1	3,23	9,46	10,55	28,93
10	30	5,5	365,24	130,8	11844,5	3,49	7,79	11,41	25,45

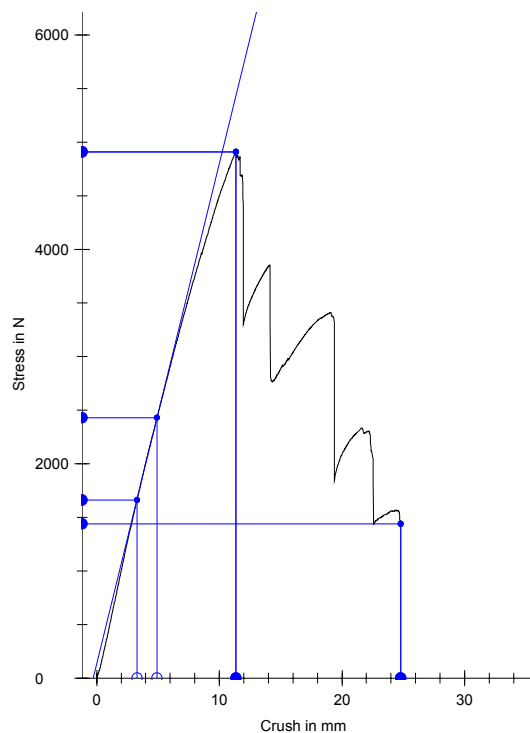


Obr. 17. Diagram průběhu ohybové zkoušky (napětí – deformace) série 2 - vzorek č. 5

Tab. 10. Statistické hodnoty série č. 2

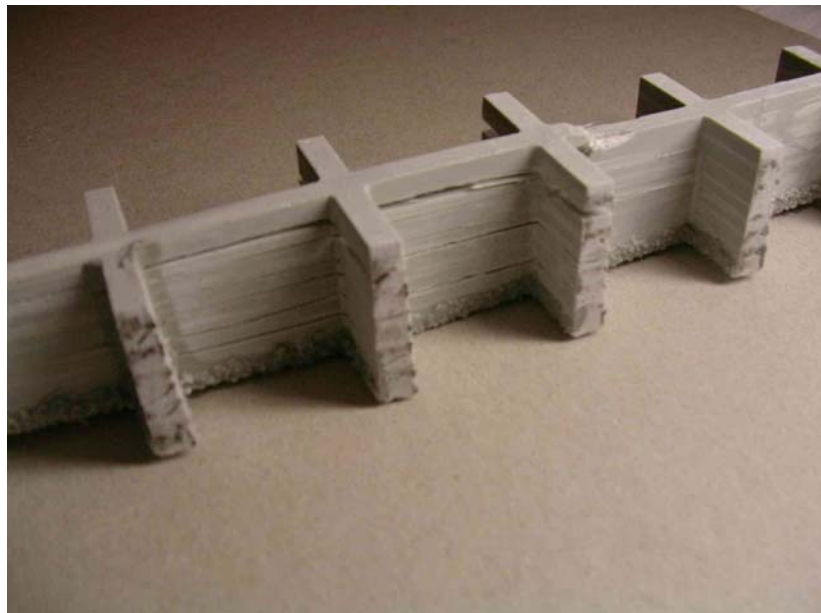
Sub-series 2	a0	b0	Rm	RB	E	FMax	ϵ Break	ϵ Fmax.	ϵ Break
n = 5	mm	mm	N/mm	N/mm	N/mm	ϵ %	%	mm	mm
x	30	5,5	355,5 6	138,86	11697,2 3	3,37	7,57	11,07	24,84
s	0	0	6	31,78	789,25	0,25	0,64	0,81	2,09
P 0,95 +	30	5,5	370,4 5	217,77	13656,6 2	3,99	9,15	13,08	30,03
P 0,95 -	30	5,5	340,6 7	59,96	9737,83	2,76	5,99	9,06	19,66

Průběh ohybové zkoušky u série č. 2 se nelišil od série č. 1. Při počátečním zatížení rošt nevykazoval žádné změny, postupně bylo slyšet praskání výztuže, při dosažení maximálního zatížení došlo k přerušení vláken a postupnému snižování meze pevnosti. Síla i nadále působila a to až do úplného porušení vzorků.



Obr. 18. Diagram průběhu ohybové zkoušky
(síla – průhyb) série 2 - vzorek č. 2

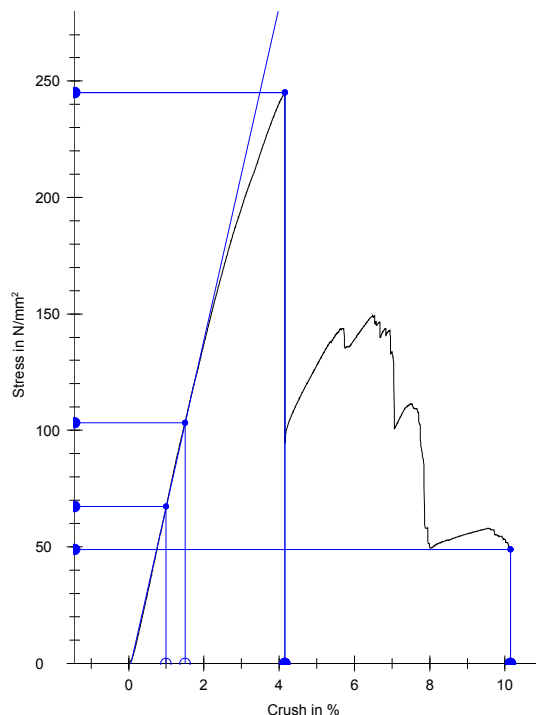
Z grafu síla – průhyb je zřejmé, že průběh chování u obou sérií litých roštů tj. 1 i 2 je téměř shodný. Síla opět dosáhla hodnoty 5000 N. Grafy z ohybových zkoušek série č. 2 byly téměř shodné.



Obr. 19. Fotografie porušené části roštu (série 2) při ohybu

8.2.1.3 Série 3 – Litý rošt

Poslední ohýbané vzorky z kategorie litých roštů byly označeny jako série 3, výška roštu 38 mm, šířka 6,3 mm, rozteč 36, velikost ok 30 x 30 mm, rychlost 10 mm/min.



Obr. 20. Diagram průběhu ohybové zkoušky
(napětí – deformace) série 3 - vzorek č. 1

Série číslo tři vykazovala nejmenší hodnoty ať už meze pevnosti v ohybu, tak i hodnoty modulu pružnosti. Ke zlomení tj. nevratné deformaci došlo u všech zatěžovaných nosníků.

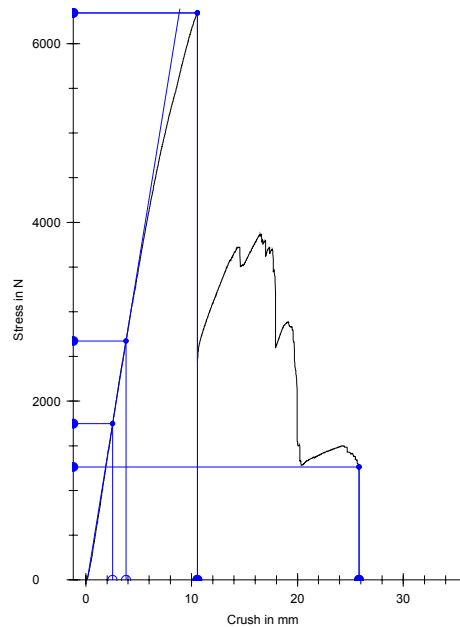
Tab. 11. Výsledky ohybové zkoušky série č. 3

	a0	b0	Rm	RB	E	Fmax %	Break%	Fmax. mm	Break mm
Nr	Mm	mm	N/mm ²	N/mm	N/mm	{epsilon}	{epsilon}	{epsilon}	{epsilon}
11	38	6,3	222,6	44,34	7277,4 8	3,67	6,48	9,34	16,47
12	38	6,3	237,4	47,47	7041,7 2	3,91	5,64	9,95	14,34
13	38	6,3	232,8	46,57	7241,6 8	3,63	5,16	9,24	13,13
14	38	6,3	245,0	48,76	7170,6 9	4,15	10,15	10,55	25,81
15	38	6,3	238,5	47,71	6959,2 3	4,04	5,23	10,26	13,3

Tab. 12. Statistické hodnoty série č. 3

Sub-series 3	a0	b0	Rm	RB	E	FMax	ε Break	ε Fmax	ε Break
n = 5	mm	mm	N/mm	N/mm	N/mm	ε %	%	mm	mm
x	38	6,3	235,3 1	46,97	7138,1 6	3,88	6,53	9,87	16,61
s	0	0	8,33	1,66	134,63	0,22	2,09	0,57	5,31
P 0,95 +	38	6,3	245,6 6	49,03	7305,5 4	4,16	9,13	10,58	23,21
P 0,95 -	38	6,3	224,9 6	44,9	6970,7 8	3,6	3,94	9,16	10,01

Dle grafu z obr. č. 21 je evidentní, že rošty ze série č. 3 byly zatěžovány silou převyšující 6000 N a k deformaci došlo téměř až při hodnotě 6500 N.



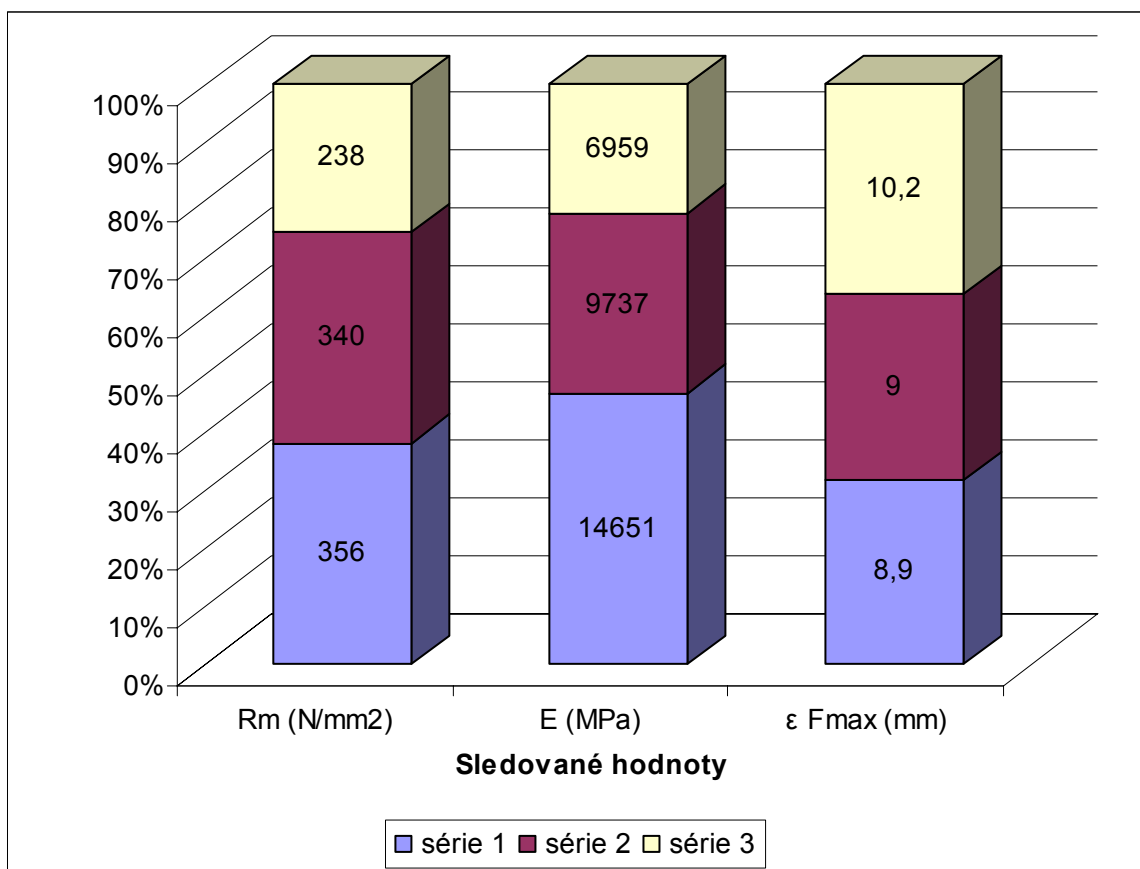
Obr. 21. Diagram průběhu ohybové zkoušky
(síla – průhyb) série 3 - vzorek č. 4



Obr. 22. Fotografie porušené části roštu ze série č. 3

8.2.1.4 Srovnání výsledků z ohybových zkoušek litých roštů:

V kategorii litých roštů byly firmou PREFA KOMPOZITY a.s. dodány tři druhy pochůzkových kompozitních roštů. Tyto se lišily nejen rozměrově (výška a šířka žeber), ale i obsahem skelného vlákna, jehož průměrná hodnota obsahu se v objemových procentech pohybovala kolem hodnoty 13 %. Stejnou veličinou byl u těchto roštů rozměr ok – 30 x 30 mm, tudíž i rozteč mezi jednotlivými oky. Srovnání sledovaných hodnot (mez pevnosti, modul pružnosti a průhyb) je v následujícím grafu. Nejlepší výsledky vykazovala série č.1, hodnoty meze pevnosti, ale i modulu pružnosti, dosáhly největších hodnot a hodnota průhybu byla ze všech sérií nejmenší. Druhá série má o něco nižší mez pevnosti a průhyb se téměř neliší, ale hodnota modulu pružnosti prudce klesla. Třetí série vykazuje nejméně vhodné vlastnosti. Modul pružnosti je dokonce dvojnásobně nižší než u první série. Toto mohlo být způsobeno obsahem skelných vláken, neboť série č. 3 měla méně výztuže než série č. 1. Byly spočteny hodnoty efektivního modulu v tahu, a naměřeny hodnoty modulu pružnosti v ohybu. Hodnoty modulu pružnosti v tahu převyšují hodnoty modulu pružnosti v ohybu, což je správné i z hlediska materiálové charakteristiky výrobku.



Obr. 23. Srovnání výsledků ohybových zkoušek litých roštů série 1 – 3

8.2.2 Ohybové zkoušky taženého profilu I:

Pro realizaci zatěžovacích zkoušek při působení účinku ohybové síly bylo dodáno 5 ks zkušebních těles profilu I o rozměrech 15x25 mm délky 1000 mm a 5 ks zkušebních těles stejného profilu o délce 300 mm. Staticky byl zkoušený nosník prostě podepřený na podporách v rozpětí $L_p = 690$ mm a $L_p = 246$ mm. Rychlost příčnicku byla 10 mm/min. Výsledkem realizovaných ohybových zkoušek jsou grafy zaznamenávající průběh zkoušky a tabulky s naměřenými hodnotami. U kompozitních nosníků profilu I namáhaných na ohyb se sledují tři vlivy:

1. napětí od skutečného zatížení – tj. vliv ohybového a smykového napětí. Ohybové napětí pro profily typu I určují lokální deformace vnějších vláken
2. stabilita daná odolností proti kroucení a bočním deviacím – pokud není nosník příčně podepřen, může vybočit či zkroutit se mimo rovinu zatížení.
3. průhyb v souvislosti se zatížením a dovoleným napětím. U dlouhých nosníků převládá vliv ohybového napětí, u krátkých nosníků převládá smykové napětí.

Výpočet efektivního modulu pružnosti pro tažený kompozitní profil I:

$$\begin{aligned} E_C &= E_1 c_1 + E_2 c_2 & (25) \\ E_C &= 0,68 \cdot 70000 + 0,32 \cdot 3600 \\ E_C &= 48752 \text{ MPa} \end{aligned}$$

E_1 – modul pružnosti skelného vlákna

c_1 – podíl vláken v % (dle tab. 6)

E_2 – modul pružnosti pryskyřice

c_2 – podíl pryskyřice v % ($1 - c_1$)

8.2.2.1 Profil I – $L = 300$ mm

Při ohybové zkoušce tohoto profilu došlo k porušení všech vzorků.

Výsledné hodnoty z ohybové zkoušky nelze považovat za směrodatné, neboť průřezové konstanty, které se zadávají na počátku zkoušky jako výchozí jsou v softwaru u zkušebního stroje omezené. Lze zadat pouze výška a šířka, tudíž rozměrové hodnoty jakýchkoliv profilů nelze do systému vložit. Tento rošt byl vzhledem ke své krátké délce namáhan na smyk.

Lze tedy spočítat průhyb profilu ze známých hodnot:

$$y = \frac{F.Lp^3}{48.E.J^*} = \frac{2500.246^3}{48.28333.16718} = 1,6mm \quad (26)$$

* J – kvadratický moment průřezu zjištěný v programu COSMOS/M pro dodaný profil I

Výsledky v tab. 13 a 14 jsou tedy jen orientační a hlavní důraz byl kladen na nosník ze série č.5, neboť série č. 4 byla převážně namáhána na smyk, vzhledem ke své délce.

Tab. 13. Výsledky ohybové zkoušky profilu I, L = 300 mm, série č. 4

	a0	b0	Rm	RB	E	ε FMax	ε Break	ε Fmax.	ε Break
Nr	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%	mm	mm
10	25	5	155,17	31,03	12077,26	1,47	6,04	5,45	22,42
11	25	5	132,60	34,12	11847,99	1,22	6,08	4,53	21,13
12	25	5	162,13	38,2	11668,34	1,34	7,13	5,45	21,87
13	25	5	144,25	32,56	12148,74	1,48	6,58	4,53	21,98
14	25	5	138,14	36,14	11987,46	1,24	6,22	4,53	22,24

Tab. 14. Statistické hodnoty ohybové zkoušky profil I, L = 300 mm, série č. 4

Sub-series 4	a0	b0	Rm	RB	E	FMax	ε Break	ε Fmax.	ε Break
n = 5	mm	mm	N/mm	N/mm	N/mm	ε %	%	mm	mm
x	25	5	146,4 6	34,41	11945,9 6	1,35	6,41	4,9	21,93
s	0	0	4	12,52	725,35	0,18	0,41	0,39	4,54

8.2.2.2 Profil I – L = 1000 mm

Tento nosník vykazoval velmi vysoké hodnoty průhybu, dimenzování kompozitních profilů se většinou provádí na přípustné deformace – průhyby a nikoliv na dovolené napětí, avšak je také užitečné kontrolovat smykové napětí. Ze zkoušek je zřejmé, že kompozitům do jisté míry deformace nevadí a po odlehčení se vrací do původního stavu bez deformační hystereze. Jelikož má kompozitní rošt nízký modul pružnosti není limitní maximální hmotnost dodávaných bloků, ale dosažená deformace.

U tohoto profilu došlo při ohybových zkouškách ke stejné „chybě“ jako u roštu délky 300 mm – nebylo možné do softwaru měřicího stroje zadat veškeré průřezové hodnoty, neboť

tento je přednastaven pouze pro obdélníkové či čtvercové profily. Byla tedy spočtena hodnota modulu pružnosti.

Výpočet modulu pružnosti v ohybu vzhledem k průřezové charakteristice profilu:

$$y = \frac{FLp^3}{48EJ} \Rightarrow E = \frac{FLp^3}{48.y.J} \quad (26)$$

$$\frac{E_{SK}}{E_{MĚŘ}} = \frac{\frac{FLp^3}{48.y.J_I}}{\frac{FLp^3}{48.y.J_{OBD}}} \Rightarrow \frac{E_{SK}}{E_{MĚŘ}} = \frac{J_{OBD}}{J_I} = \frac{6510}{16718} = 0,39 \quad (27)$$

$$E_{SK} = 0,39 \cdot E_{MĚŘ}$$

$$E_{SK} = 0,39 \cdot 72196 = 28333 \text{ MPa}$$

E_{SK} – modul pružnosti skutečný (průřez I)

$E_{MĚŘ}$ – modul pružnosti naměřený (průřez obdélník)

J_{OBD} – kvadratický moment průřezu obdélníku

J_I – kvadratický moment průřezu profilu I

Výpočet průhybu taženého profilu:

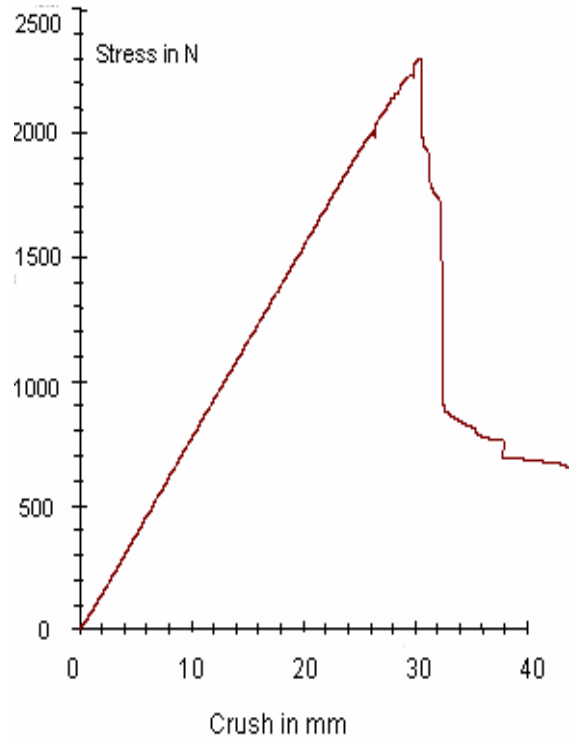
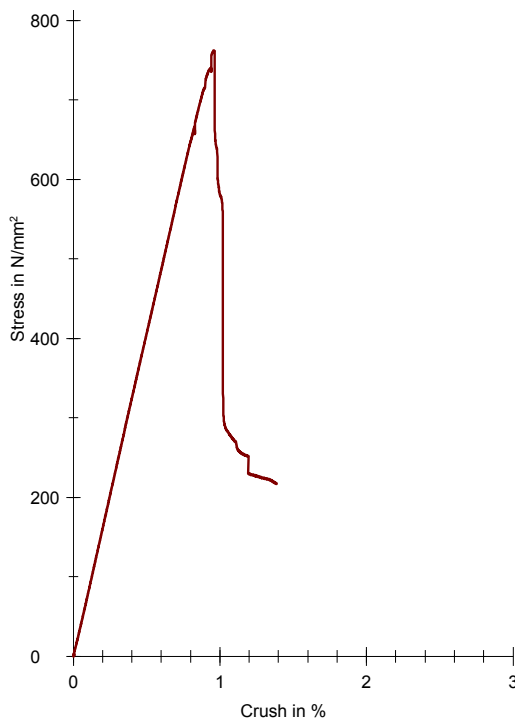
$$y = \frac{F.Lp^3}{48.E.J^*} = \frac{2500.690^3}{48.28333.16718} = 36 \text{ mm} \quad (26)$$

Dovolené ohybové napětí dle výrobce:

$$\sigma_{o,dov} = \frac{\sigma_{o,max}}{n} = \frac{210}{2,5} = 84 \text{ MPa} \quad (27)$$

n – bezpečnostní koeficient

Uvedené grafy a tabulky z ohybových zkoušek tažených profilů jsou pouze orientační. Hodnota modulu pružnosti byla přepočítána dle kvadratického momentu průřezu pro daný profil. Rozdíl mezi průhybem spočteným a naměřeným je minimální, avšak lze jej přisoudit k již zmíněnému rozdílu mezi profilem zadaným a skutečným.



Obr. 25. Diagram průběhu ohybové zkoušky – délka 1000 mm – napětí - deformace

Obr. 26. Diagram průběh ohybové zkoušky - délka 1000 mm – síla - průhyb

Tab. 15. Výsledky ohybového zkoušky profilu I, délky 1000 mm, série č. 5

Nr	a0 mm	b0 mm	Rm N/mm	RB N/mm	E N/mm	FMax % {epsilon}	Break % {epsilon}	Fmax. mm {epsilon}	Break mm {epsilon}
1	25	5	718,3	607,7	72393,1	0,9	0,9	29,3	29,9
2	25	5	811,8	628,2	72390,9	1,0	-	32,0	-
3	25	5	657,5	697,4	72256,0	0,8	0,8	26,2	26,3
4	25	5	701,4	689,9	71482,6	0,9	0,9	28,2	28,5
5	25	5	747,1	624,2	72458,6	1,0	-	30,1	-

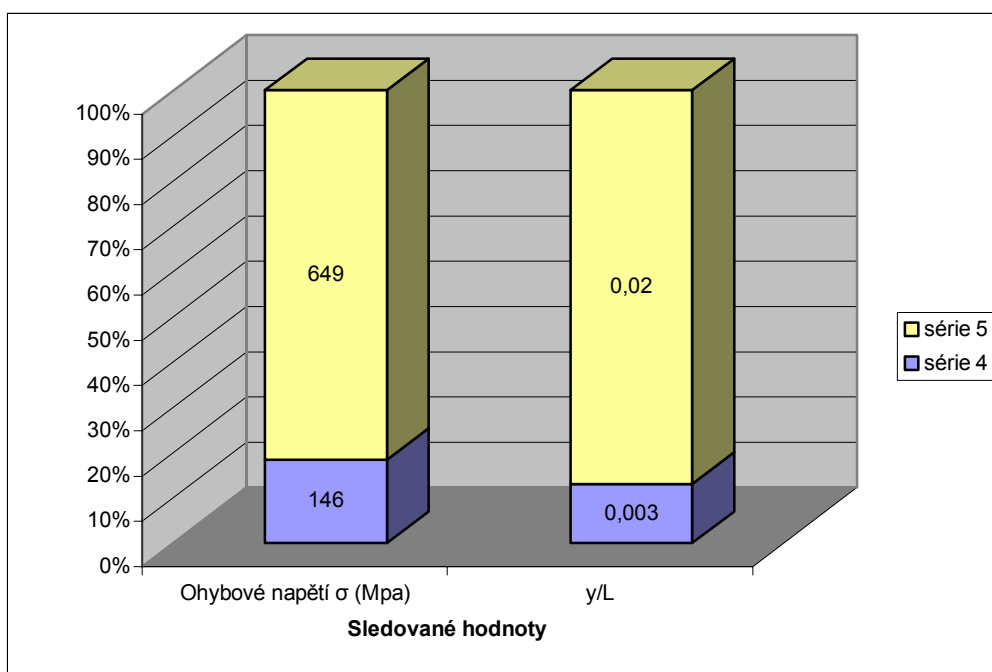
Tab. 16. Statistika ohybové zkoušky profilu I, délky 1000 mm, série č. 5

Sub-series 5	a0 mm	b0 mm	Rm N/mm	RB N/mm	E N/mm	ε FMax %	ε Break %	ε Fmax. mm	ε Break mm
n = 5	mm	mm	N/mm	N/mm	N/mm	%	%	mm	mm
x	25	5	727,2	649,28	72196,2	0,9	0,9	29,1	28,3
S	0	0	57,4	49,0	405,7	0,1	0,1	2,1	1,8
P 0,95 +	25	5	798,5	785,6	72700,6	1,0	1,0	31,8	32,8
P 0,95 -	25	5	655,9	542,2	71691,9	0,8	0,8	26,5	23,8

8.2.3 Porovnání získaných hodnot z ohybových zkoušek taženého profilu

Při ohybových zkouškách profilu I byly zatěžovány dvě série nosníků. Lišily se délkou a tudíž i rozpětím podpor. Jak již bylo uvedeno, výsledné hodnoty z ohýbacího testovacího zařízení jsou pouze orientační, jelikož není možné do připojeného softwaru zadat jako vstupní hodnotu všechny průřezové rozměry. První série délky 300 mm (podpora $L = 246$ mm) vykazovala proti sérii č. 2 ($L = 1000$ mm, podpora 690 mm) velmi nízkou hodnotu modulu pružnosti E i celkovou mez pevnosti v ohybu. U série č. 2 nedošlo ke zkroucení profilů, přestože nosník nebyl příčně podepřen. V praxi jsou tyto spojovány příčnými tyčemi – kruhovými drážkovanými pruty, které zajišťují rozteč nosných profilů. Hodnota efektivního modulu pružnosti u těchto profilů je dle vztahu (25) rovna v hodnotě 48 752 MPa. Tato hodnota byla použita pro návrhový model v druhém oddílu praktické části. Kde bylo sledováno chování prutu při spojitém zatížení.

Pro srovnání výsledků byly použity hodnoty z ohybových zkoušek pro profil I, obou délek.



Obr. 27. Graf srovnání hodnot z ohybových zkoušek profilu I, série č. 1 a 2

Z grafu je patrné, že profil I ze série č. 4 dosahuje velmi nízkých hodnot ohybového napětí proti sérii č. 5, toto je způsobeno velmi krátkou délkou nosníku, tento je tedy převážně namáhán na smyk. Mez pevnosti je zkreslená, vzhledem k omezeným možnostem při zadávání průřezu.

9 ANALÝZA NAPĚŤOVĚ-DEFORMAČNÍHO CHOVÁNÍ ROŠTŮ POMOCÍ FEM MODELŮ

9.1 ROŠTY LITÉ

9.1.1 Postup při řešení úlohy v konečně-prvkovém programu COSMOS/M.:

V tomto bodu praktické části bylo postupováno následovně:

Byly namodelovány variace litých roštů - různých rozměrových parametrů:

- a) roztečí (rozmezí 25 – 60 mm)
- b) výšek (20, 25, 30 a 40 mm)
- c) tloušťky (5, 6 a 7 mm).

Další měněnou hodnotou byl modul pružnosti, kde bylo pracováno s výsledky z ohybových zkoušek, jelikož při ohybových zkouškách byly u dodaných litých roštů naměřeny různé hodnoty modulu pružnosti, takže rozmezí bylo stanoveno v oblasti od 8000 MPa do 14000 MPa. Původní rozměr modelovaného roštu byl 1 x 1 m a předpokládané zatížení v hodnotě 4000 N/m² (dle ČSN EN 1991-1-1 patří pochůzkové rošty do kategorie stropních konstrukcí, balkónů a schodišť pozemních staveb. tady je užité zatížení udáváno v hodnotě 3000N/m², avšak při navrhování pochůzných balkónů lze uvažovat zatížení až 4000 N/m² (toto bylo potvrzeno i od výrobce)), avšak s využitím symetrie bylo možné modifikovat tento blok na rozměr 500 mm x 500 mm. Jednotlivé bloky byly zatěžovány silou 4000 N/4 = 1000 N. Bylo sledováno chování takto zatížených roštů. Těmito modifikacemi byly zjištěny hodnoty napětí a průhybů (deformace) pro tyto lité rošty. Za pomoci modelů a zadaných vstupních hodnot a okrajových podmínek tedy můžeme zjistit hodnoty deformací a ohybového napětí.

M_SF – vysíťování průřezu

SFGEN – vygenerování ploch

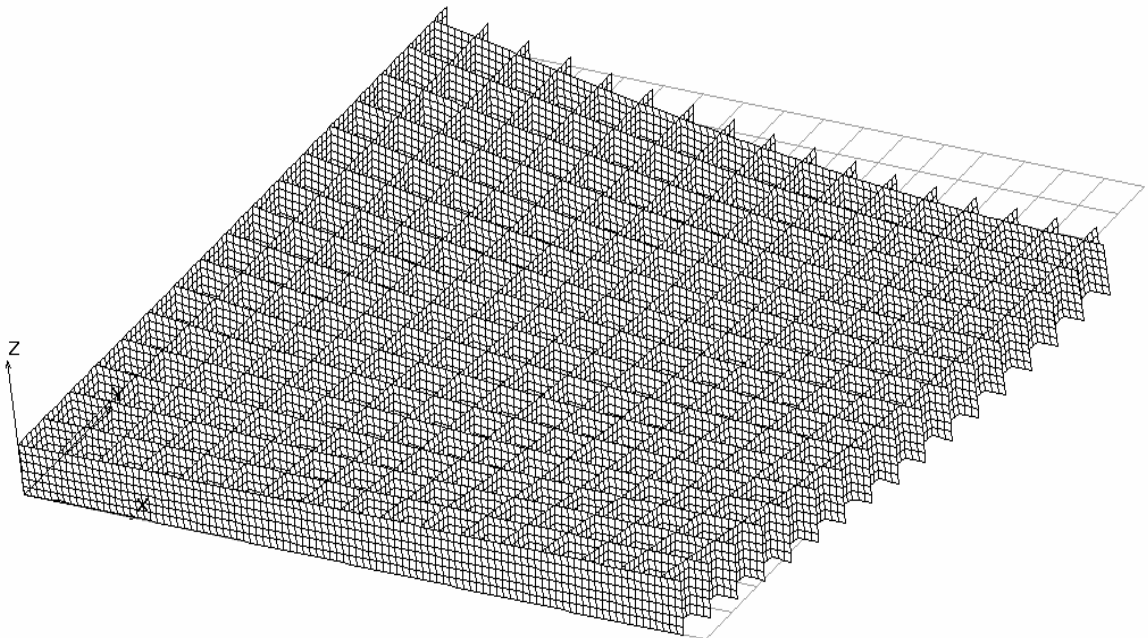
DCR – zadání okrajových podmínek uložení

FND – zadání síly na uzly

A_STAT – nastavení zamezení výskytu singulární matice

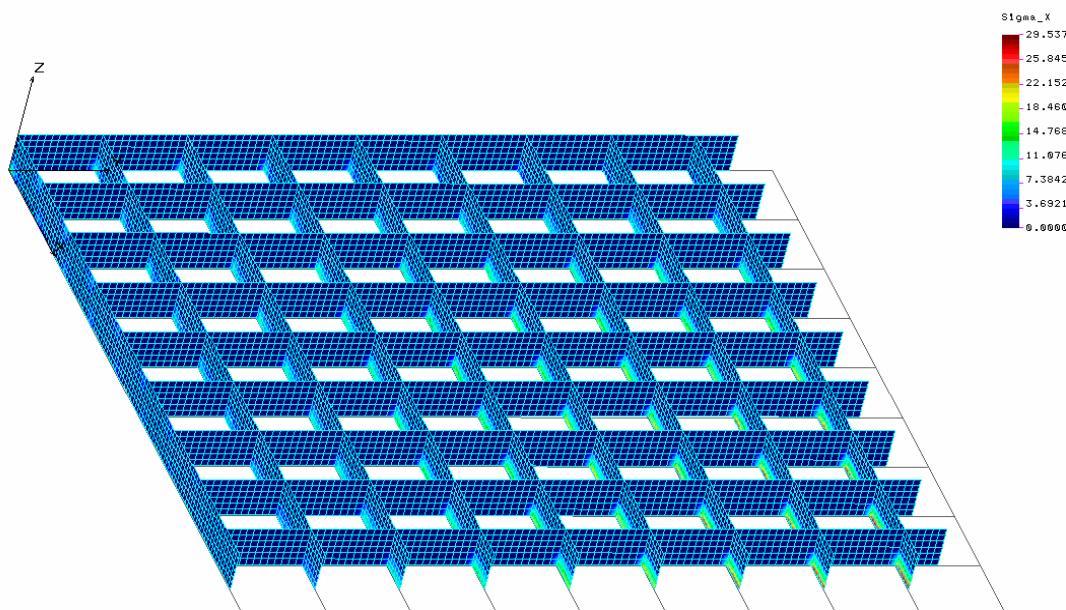
R_STAT – výpočet úlohy

Vypočtením úlohy je možné zjistit maximální průhyb roštu, hodnoty osového zatížení (jsou shodné ve směru x a y), také Von Misessovo napětí a další veličiny.



Obr. 29. Průhyb roštu v programu Cosmos/M

Rošty byly prostě podepřeny na okrajích a bylo zamezeno posunu ve směru x a y, toto uložení simuluje skutečné umístění výrobků při aplikacích v reálném prostředí. Zatížení 1000 N, které přísluší modelované ploše, bylo zadáno pro všechny uzly nejhornější vrstvy. Pomocí příkazu SELWIN je možné označit pouze uzly (případně lze vybrat i křivku, bod atd.) z horní vrstvy a dle počtu vylistovaných bodů rozpočítat zatížení pro jednotlivé uzly. Při zatížení spojitou silou je maximálního průhybu dosahováno uprostřed roštu. Na obrázku 29. je patrná simulace chování roštu po zatížení stanovenou silou.



Obr. 30. Osově napětí – osa X

9.1.2 Výsledky z modelování litých roštů:

Lité rošty byly namodelovány v rozměrech 500 x 500 mm (s využitím symetrie). Zatížení bylo zvoleno v hodnotě 4000 N/m². V následujících tabulkách jsou výsledné hodnoty průhybů a ohybového napětí, získané z konečně prvkového programu Cosmos/M. Byly voleny různé modifikace roštů, vybranými parametry pro změnu byla rozteč žebér, dále výška a šířka roštu, taktéž i hodnoty modulu pružnosti (bylo vycházeno z hodnot získaných při standardních ohybových zkouškách).

Tab. 17. Hodnoty napětí a průhybů v závislosti na změně E, h a s roštu - rozteč 25 mm

rozteč 25				E =10000	E=8000	E=14000
Tloušťka s (mm)	Výška h (mm)	Von Misses (MPa)	Osově napětí (MPa)	Průhyb /mm/	Průhyb /mm/	Průhyb /mm/
5	20	18,4	19,0	19,9	24,8	14,0
5	25	12,3	12,6	10,6	13,2	6,8
5	30	10,3	11,1	6,2	7,9	5,2
5	40	5,0	5,6	2,7	3,4	1,8
6	20	14,4	14,9	15,6	18,6	9,0
6	25	9,8	10,0	8,4	10,5	6,0
6	30	8,0	8,8	5,1	6,3	3,0
6	40	4,1	4,1	2,2	2,7	1,6
7	20	11,5	12,0	12,5	16,9	6,5
7	25	7,9	8,2	6,9	8,6	4,9
7	30	6,4	7,0	4,1	5,2	3,0
7	40	3,4	3,4	1,8	2,2	1,3

Tab. 18. Hodnoty napětí a průhybů v závislosti na změně E, h a s roštu - rozteč 30 mm

rozteč 30				E = 10000	E = 8000	E = 14000
Tloušťka s (mm)	Výška h (mm)	Von Misses (MPa)	Osové napětí (MPa)	Průhyb /mm/	Průhyb/mm/	Průhyb /mm/
5	20	22,3	23,1	23,7	29,6	16,9
5	25	14,9	15,4	12,6	15,0	9,0
5	30	10,6	10,9	7,5	9,3	5,3
5	40	6,1	6,3	3,2	4,0	2,3
6	20	17,5	18,2	18,7	23,3	13,3
6	25	11,9	12,3	10,1	12,6	7,2
6	30	8,6	8,8	6,0	7,5	4,3
6	40	5,0	5,1	2,6	3,3	1,9
7	20	14,1	14,6	15,0	18,8	10,7
7	25	9,7	10,0	8,2	10,3	5,9
7	30	7,0	7,2	5,0	6,2	3,5
7	40	4,2	4,2	2,2	2,7	1,6

Tab. 19. Hodnoty napětí a průhybů v závislosti na změně E, h a s roštu - rozteč 40 mm

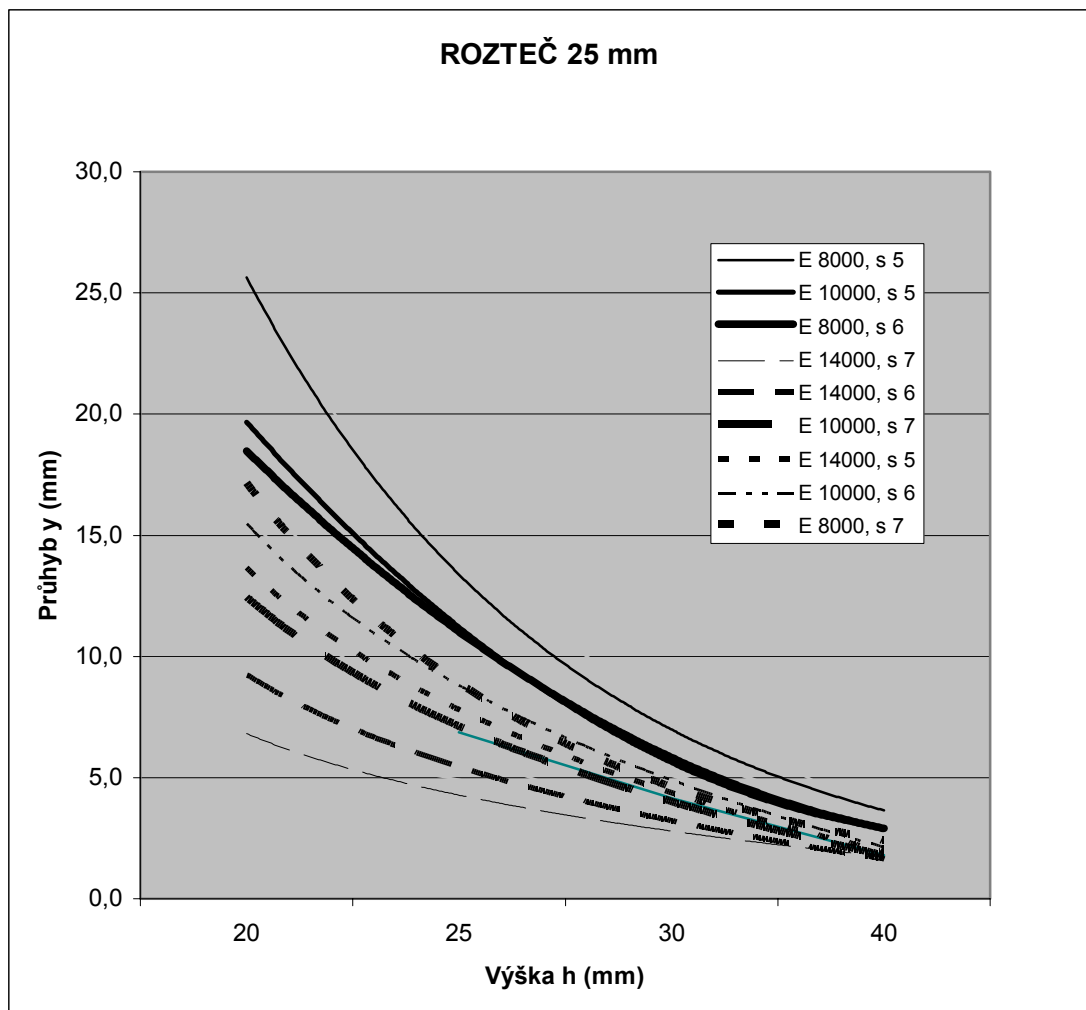
rozteč 40				E = 10000	E = 8000	E = 14000
Tloušťka s (mm)	Výška h (mm)	Von Misses (MPa)	Osové napětí (MPa)	Průhyb /mm/	Průhyb/mm/	Průhyb /mm/
5	20	29,7	31,7	32,3	40,4	23,1
5	25	20,4	21,0	17,5	21,9	12,5
5	30	14,5	14,9	10,4	13,0	7,4
5	40	8,4	8,5	4,5	5,6	3,2
6	20	23,4	25,0	25,5	31,9	18,3
6	25	16,3	16,8	14,1	17,6	9,7
6	30	11,7	12,0	8,4	10,5	6,0
6	40	6,8	7,0	3,6	4,6	2,6
7	20	18,9	20,2	20,6	25,8	14,7
7	25	13,4	13,8	12,0	14,5	8,3
7	30	9,7	10,0	7,0	8,7	5,0
7	40	5,7	5,8	3,1	3,8	2,2

Tab. 20. Hodnoty napětí a průhybů v závislosti na změně E, h a s roštu - rozteč 50 mm

rozteč 50				E = 10000	E = 8000	E = 14000
Tloušťka s (mm)	Výška h (mm)	Von Misses (MPa)	Osové napětí (MPa)	Průhyb /mm/	Průhyb/mm/	Průhyb /mm/
5	20	28,1	30,0	35,4	38,2	21,8
5	25	21,6	24,2	18,9	23,6	13,5
5	30	17,2	18,6	12,1	15,2	8,7
5	40	10,4	11,3	5,3	6,6	3,8
6	20	22,3	23,8	24,3	30,4	17,4
6	25	17,4	19,4	15,2	19,0	10,9
6	30	13,9	15,0	9,9	12,3	7,0
6	40	8,3	9,2	4,3	5,4	3,1
7	20	18,1	19,4	19,6	24,7	14,0
7	25	14,3	16,0	12,5	15,7	9,0
7	30	11,5	12,4	8,2	10,2	5,9
7	40	6,9	7,6	3,6	4,5	2,6

Tab. 21. Hodnoty napětí a průhybů v závislosti na změně E, h a s roštu - rozteč 60 mm

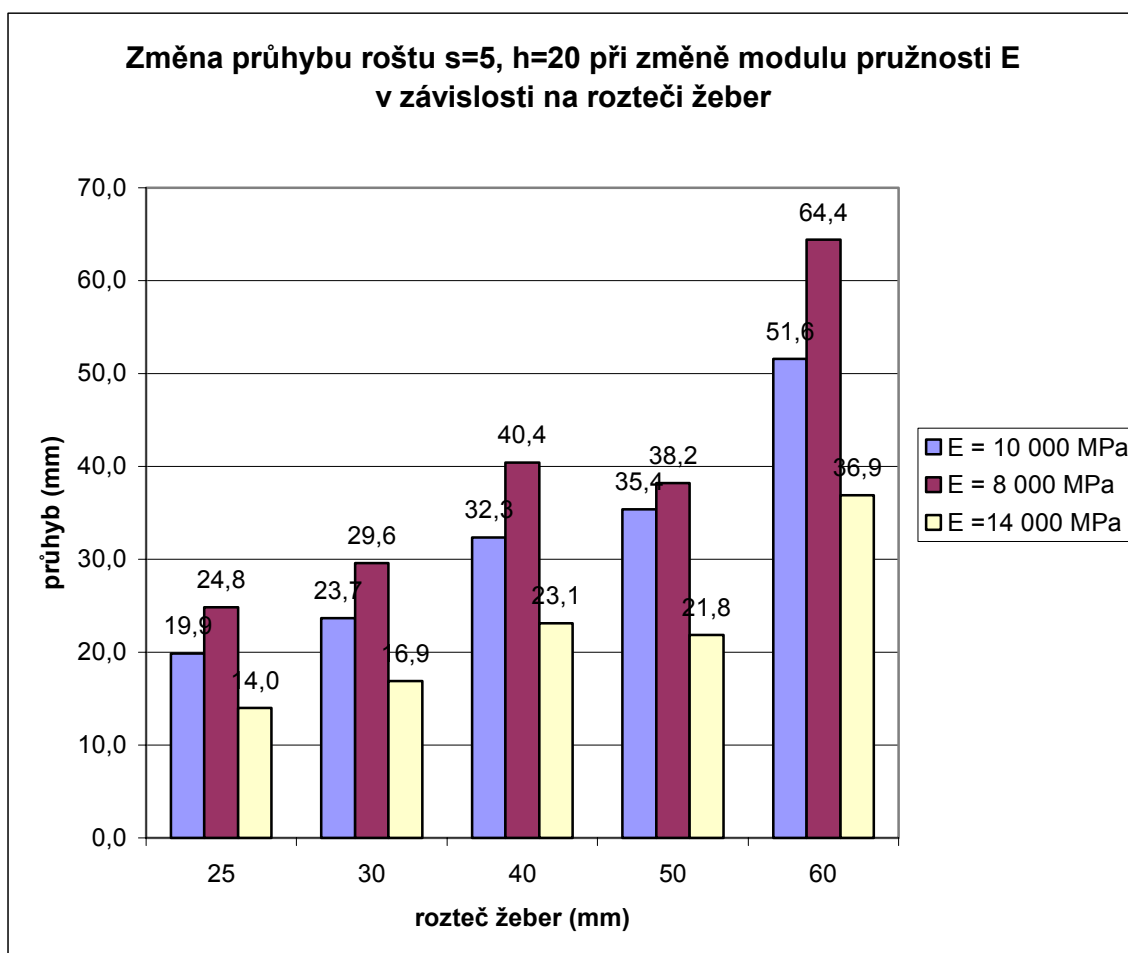
rozteč 60				E = 10000	E = 8000	E = 14000
Tloušťka s (mm)	Výška h (mm)	Von Misses (MPa)	Osově napětí (MPa)	Průhyb /mm/	Průhyb /mm/	Průhyb /mm/
5	20	46,1	47,7	51,6	64,4	36,9
5	25	30,8	31,7	27,5	34,4	19,7
5	30	21,9	22,5	16,3	20,4	11,7
5	40	12,7	12,9	7,1	8,8	5,0
6	20	36,5	37,8	41,0	51,2	29,3
6	25	24,8	25,5	22,2	27,6	15,8
6	30	17,8	18,2	13,2	16,6	9,4
6	40	10,4	10,6	5,8	6,4	4,1
7	20	29,6	30,6	33,2	41,5	23,7
7	25	20,4	21,0	18,3	22,8	13,0
7	30	14,8	15,2	11,0	13,8	7,9
7	40	8,7	8,9	4,9	6,1	3,4



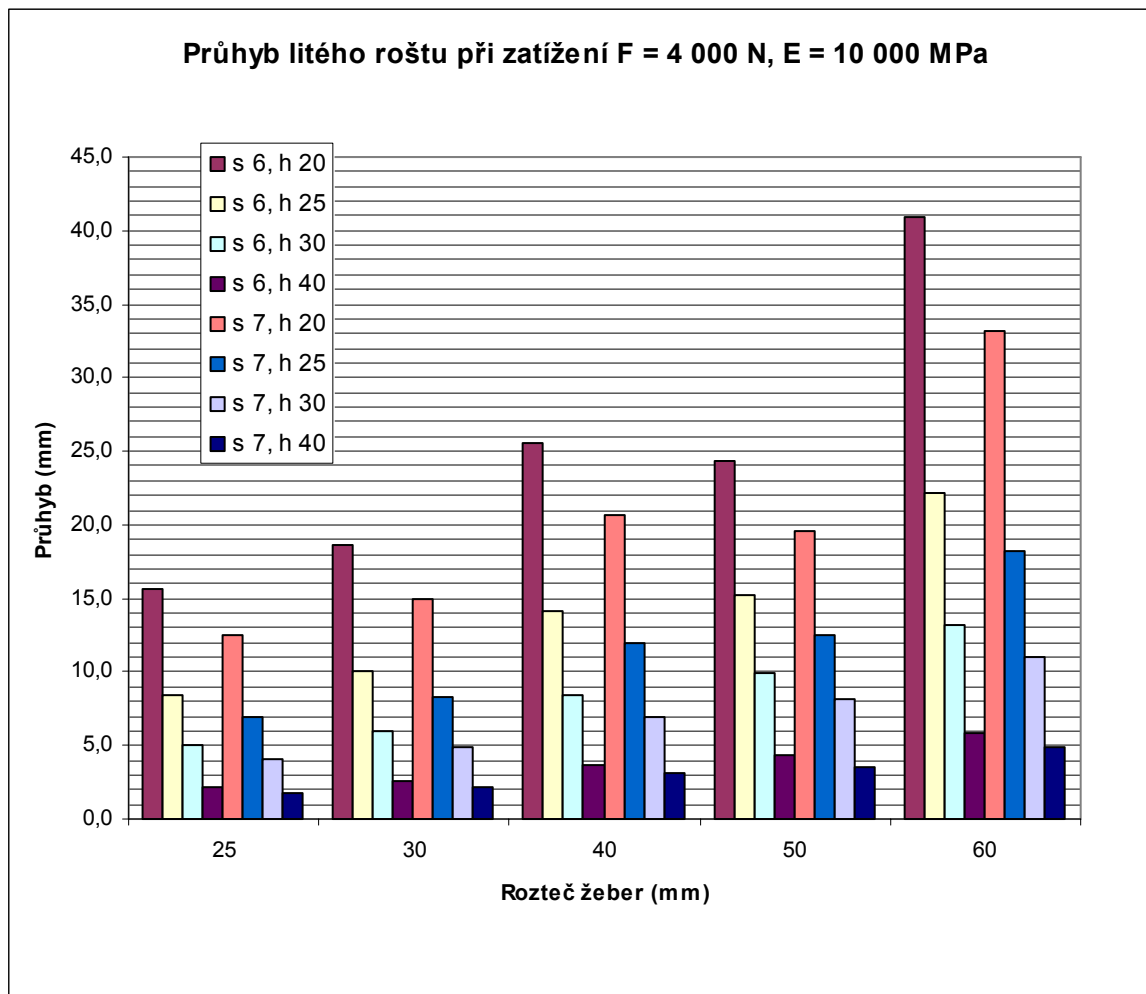
Obr. 31. Hodnoty průhybů v závislosti na změně modulu E, výšky a tloušťky roštu

Na obr. 31 jsou uvedeny výsledné hodnoty pro lité rošt s roztečí 25 mm, avšak nejen u tohoto, ale i u všech ostatních byly navrženy různé rozměrové modifikace. Obrázek znázorňuje jak se mění (klesá) hodnota průhybu v závislosti na zvětšení výšky roštu a také jak hodnoty průhybu ovlivňuje šířka žebra. Nejlepší vlastnosti vykazují rošty u kterých byl zadán maximální modul pružnosti $E = 14\,000$ MPa, proti tomu nejhorších vlastností – maximálních průhybů dosáhly rošty s nejnižším modulem pružnosti a také rošt s nejmenší šířkou žebra.

Na obr. 32 je znázorněno chování roštu s nejnižší navrženou šířkou žebra (5 mm) a nejmenší navržené výšky (20 mm) při změně modulu pružnosti a rozteči žebek. Hodnota modulu $E = 10\,000$ MPa je brána jako průměrná. Avšak žádný rošt se nedostal pod hranici 30 mm. Tento rošt také dosahoval nejvyšších hodnot osového napětí.



Obr. 32. Průhyb roštu $s=5$, $h=20$ při změně modulu E a rozteči žebek

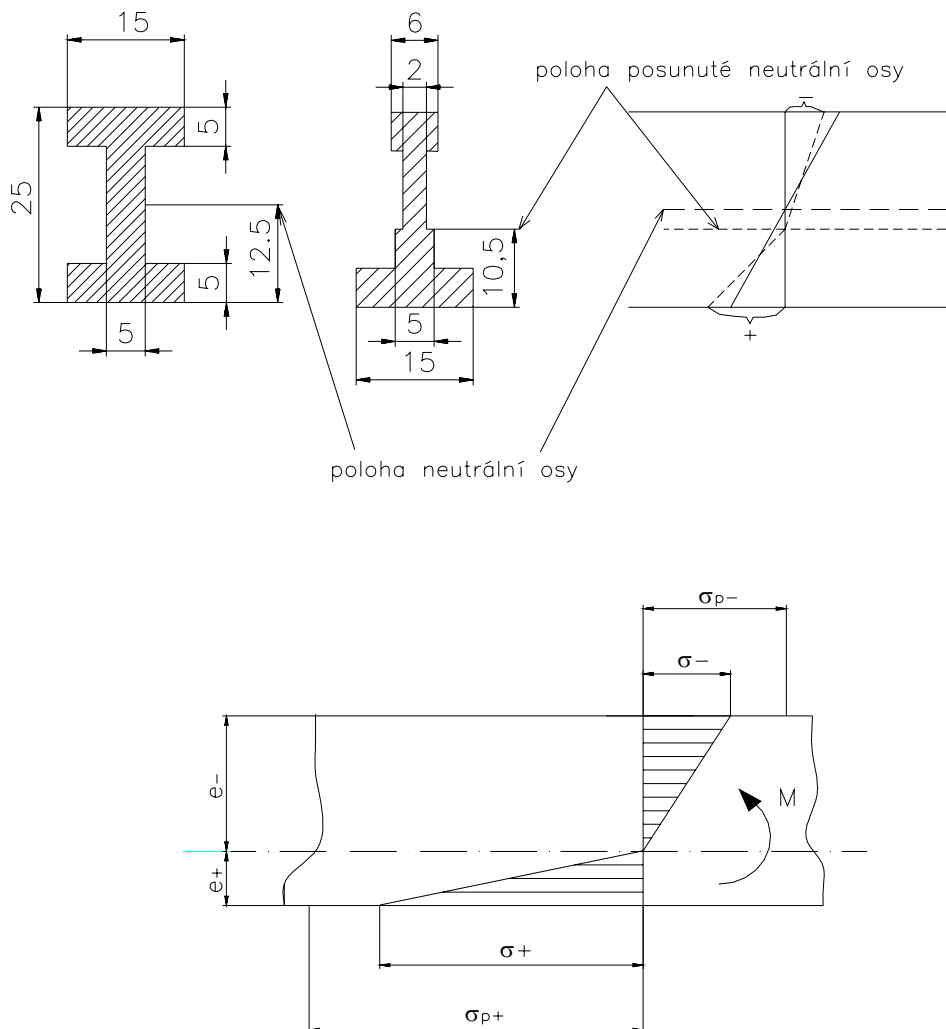


Obr. 33. Průhyby modelů litých roštů při zatížení $F = 4\,000\text{ N/m}^2$

Na obrázku 33 je patrné, že při zatížení silou $F = 4000\text{ N/m}^2$ dojde k největším průhybům u roštů s nejmenší výškou a šířkou žebra. Pokud by byla zadavatelem-zákazníkem stanovena maximální hodnota deformace pro požadovaný pochůzkový rošt je možné ze zadaného zatížení získat graf, kde by bylo patrné, který z navržených roštů splňuje tento požadavek a případně není nutné používat rošty, které by měly menší rozteč žeber avšak s úsporou materiálu volit i větší rozteč. Např. pro max. průhyb 10 mm tuto podmínku splňuje 22 navržených typů, šest z toho je s minimální navrženou roztečí 25 mm, dva navržené rošty jsou s roztečí maximální – tj. 60 mm. V grafu jsou zařazeny pouze rošty s tloušťkou žebra 6 a 7 mm, pro šířku 5 mm jsou hodnoty průhybu analogicky vyšší.

9.2 ROŠTY TAŽENÉ

9.2.1 I-profil - bimodularita



Obr. 34. Schéma profilu původního průřezu a redukovaného průřezu, průběh ohybového momentu + detail průběhu ohybového napětí

$$E_0 = 28\,333 \text{ MPa}$$

$$E_+ = 48\,752 \text{ MPa}$$

- hodnoty zjištěné v programu COSMOS/M pro redukovaný průřez

- redukovaná plocha	144,5 mm ²
- poloha těžiště	9 mm
- redukovaný kv. moment k neutrální ose	9805 mm ⁴

$$\frac{E_o}{E_+} = \left(\frac{2\eta}{1+\eta} \right)^2 \tag{28}$$

$$\sqrt{\frac{28333}{48752}} = \frac{2\eta}{1+\eta}$$

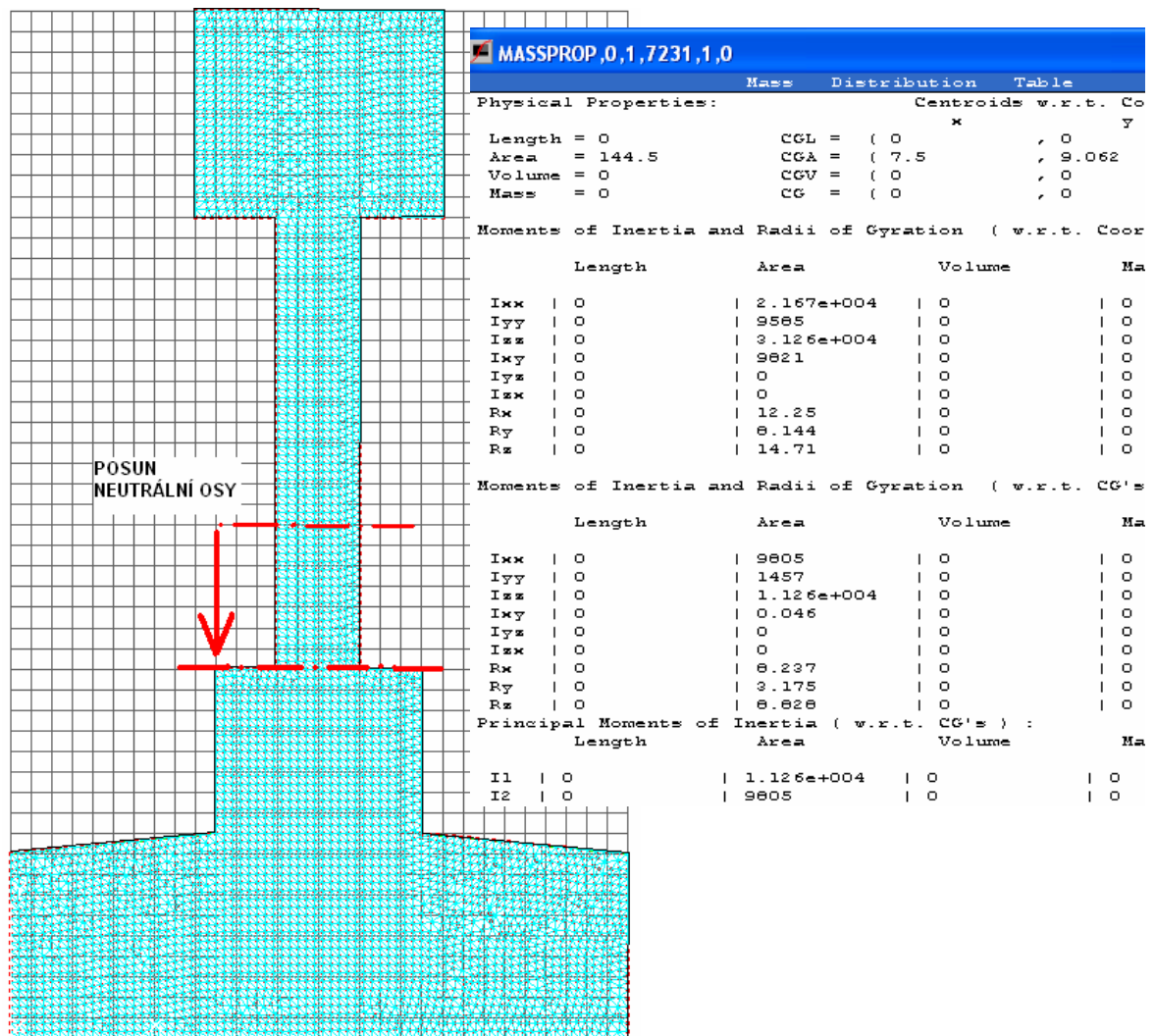
$$0,76 + 0,76\eta = 2\eta$$

$$0,76 = 1,24\eta$$

$$0,61 = \eta$$

$$\eta^2 = \frac{E_-}{E_+} \Rightarrow E_- = \eta^2 \cdot E_+ = 0,61^2 \cdot 48752 = 18313 \text{ MPa} \tag{29}$$

$$\frac{E_-}{E_+} = \frac{18313}{48752} = 0,376 = 0,4$$



Obr. 35. Schéma redukované profilu v COSMOS/M a vylistované hodnoty

- Ohybové momenty příslušející hodnotám napětí na mezích pevnosti byly spočteny

$$M_{+} = \sigma_{p+} \cdot \frac{J_R}{e_{+}} = 200 \cdot \frac{9805}{9} = 217889 \text{ N/mm} \quad (13)$$

$$M_{-} = \sigma_{p-} \cdot \frac{E_{+} \cdot J_R}{E_{-} \cdot e_{-}} = 80 \cdot \frac{28333 \cdot 9805}{18313 \cdot 16} = 75849 \text{ N/mm} \quad (13)$$

* hodnoty ze Zatěžovacích zkoušek litého a skládaného roštu, zpracované na VUT Brno, Fakulta stavební, ÚKaDK, p. Prof. Ing. Jindřichem Melcherem, DrSc., AI, 2004

- Mezní moment

$$M_m = M_{-} = 75849 \text{ N / mm}$$

Maximální moment z ohybové zkoušky dle vztahu (23) odpovídá pro nosník délky 1 m hodnotě 258750 N/mm. Tato hodnota se přibližuje hodnotě vypočtené.

- Výpočet mezního zatížení

pro $L = 1 \text{ m}$

$$M_m = \frac{q_m \cdot l^2}{8} \Rightarrow q_m = \frac{8 \cdot M_m}{l^2} = \frac{8 \cdot 75849}{1000^2} = 0,6 \text{ N/mm} \quad (30)$$

pro $L = 1,5 \text{ m}$

$$M_m = \frac{q_m \cdot l^2}{8} \Rightarrow q_m = \frac{8 \cdot M_m}{l^2} = \frac{8 \cdot 75849}{1500^2} = 0,26 \text{ N/mm}$$

pro $L = 2 \text{ m}$

$$M_m = \frac{q_m \cdot l^2}{8} \Rightarrow q_m = \frac{8 \cdot M_m}{l^2} = \frac{8 \cdot 75849}{2000^2} = 0,15 \text{ N/mm}$$

pro $L = 2,5 \text{ m}$

$$M_m = \frac{q_m \cdot l^2}{8} \Rightarrow q_m = \frac{8 \cdot M_m}{l^2} = \frac{8 \cdot 75849}{2500^2} = 0,09 \text{ N/mm}$$

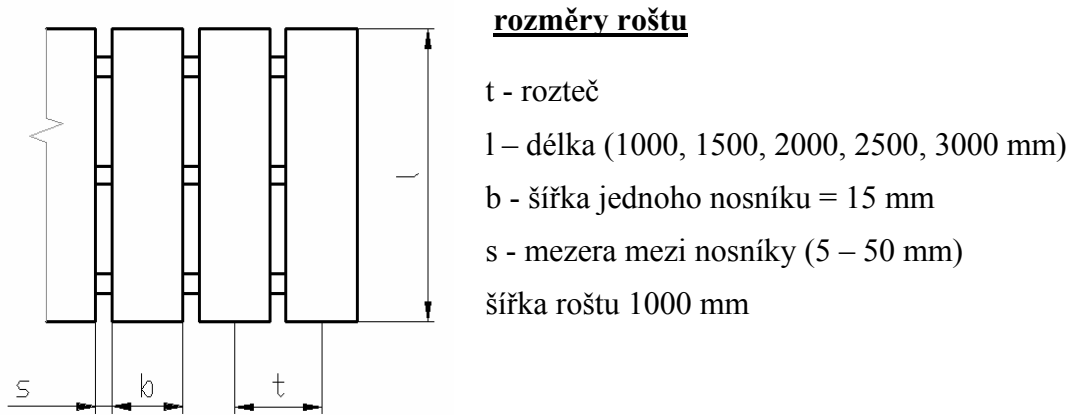
pro $L = 3 \text{ m}$

$$M_m = \frac{q_m \cdot l^2}{8} \Rightarrow q_m = \frac{8 \cdot M_m}{l^2} = \frac{8 \cdot 75849}{3000^2} = 0,06 \text{ N/mm}$$

Modifikace:

Byl navržen rošt šířky 1000 mm, délka byla navržena v rozpětí od 1000 mm – 3000 mm.

Rošt sestaven z nosníků v počtu od 16 do 50 – v závislosti na velikosti roztečí.



Tab. 22. Navržené modifikace hustoty roštu

s - mezera (mm)	t - rozteč (mm)	i -počet nosníků
5	20	50
10	25	40
15	30	33
20	34	28
25	40	25
30	45	22
35	50	20
40	55	18
45	60	17
50	65	16

- mezní zatížení q_m působící na 1 metr délky nosníku

$$q_m = M_m \cdot L$$

(31)

Tab. 23 . Výpočet zatížení na metr délky

Druh roštu	Mm N/mm	q _m N/m
rošt 1 = L 1m	0,607	606,8
rošt 2 = L 1,5m	0,270	269,7
rošt 3 = L 2m	0,152	151,7
rošt 4 = L 2,5m	0,097	97,1
rošt 5 = L 3m	0,067	67,4

Výpočet zatížení celého roštu:

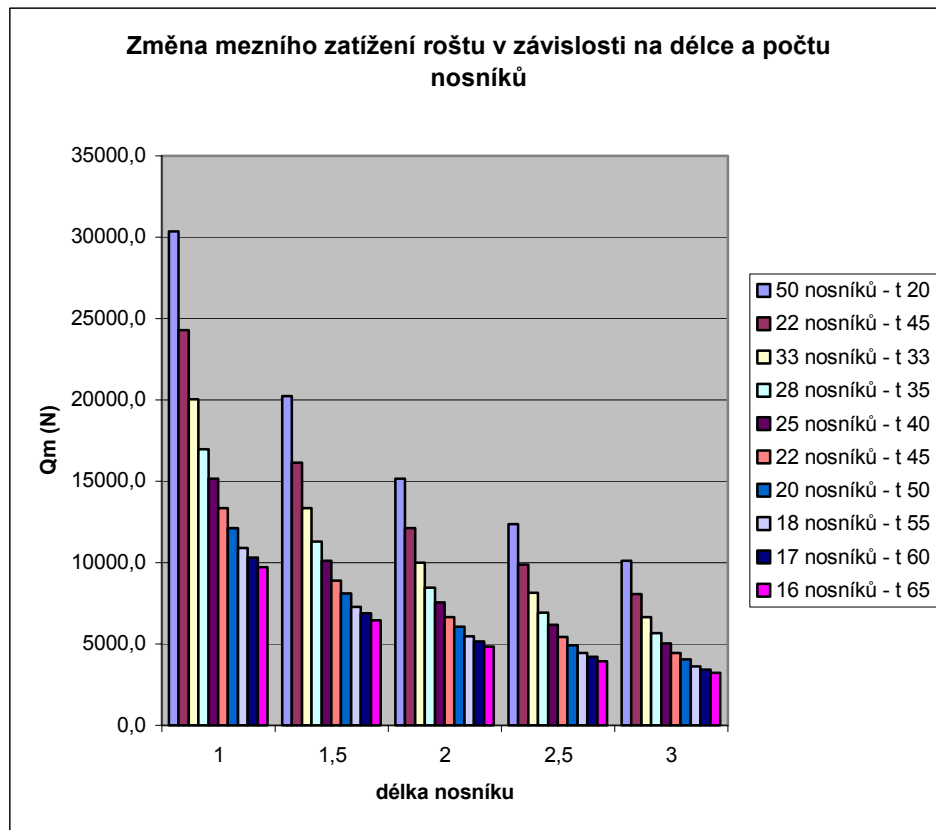
$$Q_{m1} = q_m \cdot i \quad (32)$$

Tab. 24. Hodnoty zatížení roštu (N) v závislosti na délce a počtu nosníků

i-počet nosníků	rošt 1 = L 1 m	rošt2 = L 1.5 m	rošt3 = L 2 m	rošt4 = L 2,5m	rošt5 = L 3 m
50	30339,6	20226,4	15150,0	12350,0	10100,0
40	24271,7	16160,0	12120,0	9880,0	8080,0
33	20024,1	13332,0	9999,0	8151,0	6666,0
28	16968,0	11312,0	8484,0	6916,0	5656,0
25	15169,8	10113,2	7575,0	6175,0	5050,0
22	13349,4	8899,6	6666,0	5434,0	4444,0
20	12135,8	8090,6	6060,0	4940,0	4040,0
18	10922,3	7281,5	5454,0	4446,0	3636,0
17	10315,5	6877,0	5151,0	4199,0	3434,0
16	9708,7	6472,4	4848,0	3952,0	3232,0

Výpočet dovoleného tlaku:

$$p = \frac{Q_m}{S} \quad (33)$$



Obr. 36. Graf změny mezního zatížení v závislosti na délce a rozteči nosníků

Tab. 25. Hodnoty mezního tlaku (MPa) pro jednotlivé plochy roštu

počet nosníků i	rošt1 = 1x1 m	rošt 2 = 1x1.5 m	rošt 3 = 1x2 m	rošt 4 = 1x2,5m	rošt 5 = 1x3 m
50	0,0303	0,0135	0,0076	0,0049	0,0034
40	0,0243	0,0108	0,0061	0,0040	0,0027
33	0,0200	0,0089	0,0050	0,0033	0,0022
28	0,0170	0,0075	0,0042	0,0028	0,0019
25	0,0152	0,0067	0,0038	0,0025	0,0017
22	0,0133	0,0059	0,0033	0,0022	0,0015
20	0,0121	0,0054	0,0030	0,0020	0,0012
18	0,0109	0,0049	0,0027	0,0018	0,0012
17	0,0103	0,0046	0,0026	0,0017	0,0011
16	0,0097	0,0043	0,0024	0,0016	0,0011

9.2.2 Konečněprvkový model I-profilu

V této části bylo postupováno následně: pro zadání vstupních hodnot do softwaru Cosmos/M bylo nutné zjistit hodnotu modulu pružnosti v ohybu. Tato byla přepočtena z ohybové zkoušky v kapitole 8.2.2.2.. Dále bylo nutné zjistit hodnotu redukovaného průřezu profilu I, která byla softwarem Cosmos/M spočtena a vyjádřena na začátku předchozí kapitoly. Následně byl v tomto softwaru namodelován prut s těmito zadanými hodnotami a bezpečným* zatížením pro délku 1 m.

* hodnota zatížení 600 N dělená bezp. koeficientem $n=2$

hodnoty zjištěné v programu COSMOS/M

- redukovaná plocha	144,5 mm ²
- redukovaný kv. moment k neutrální ose	9805 mm ⁴

hodnota zjištěná přepočtem z ohybové zkoušky:

- modul pružnosti v ohybu	28 333 MPa
---------------------------	------------

hodnota spočtená:

- bezpečné zatížení	300 N
---------------------	-------

Hodnota průhybu kterého dosáhl prut po zatížení se rovnala 20,54 mm (ve střední části).



DISLIST,1,1,1,11,1,0			
Node	UX	UY	Load case UZ
1	0.000e+000	0.000e+000	0.000e+000
2	0.000e+000	-2.662e+000	0.000e+000
3	0.000e+000	-8.412e+000	0.000e+000
4	0.000e+000	-1.449e+001	0.000e+000
5	0.000e+000	-1.893e+001	0.000e+000
6	0.000e+000	-2.054e+001	0.000e+000
7	0.000e+000	-1.893e+001	0.000e+000
8	0.000e+000	-1.449e+001	0.000e+000
9	0.000e+000	-8.412e+000	0.000e+000
10	0.000e+000	-2.662e+000	0.000e+000
11	0.000e+000	0.000e+000	0.000e+000

Obr. 37. Průhyb nosníku s vylistovanými hodnotami v jednotlivých uzlech

Hodnota vylistovaného momentu je $1,13 \cdot 10^5$ Nmm.

Výpočet průhybu taženého profilu:

$$y = \frac{F.l^3}{48.E.J_R} = \frac{300.1000^3}{48.28333.9805} = 25mm \quad (26)$$

Hodnoty spočteného a namodelovaného průhybu se částečně liší.

• **Kontrola**

$$\sigma_- = \frac{E_-}{E_+} \cdot \frac{M}{J_R} \cdot e_- = \frac{18313}{48752} \cdot \frac{1,13 \cdot 10^5}{9805} \cdot 16 = 69,26MPa \quad (12)$$

$$\sigma_+ = \frac{M}{J_R} \cdot e_+ = \frac{1,13 \cdot 10^5}{9805} \cdot 9 = 103,7MPa \quad (12)$$

Vzhledem k tomu, že pevnost profilu v tahu dosahuje hodnot až 220 MPa* a pevnost v tlaku až 100 MPa*, navržené zatížení vyhovuje.

Kontrola zatížení nosníku (namodelovaná i spočtená) byla provedena i ve výpočtovém modulu výrobce, který je volně dostupný na stránkách www.prefa.cz. Pro zadaný profil a bezpečné zatížení je hodnota průhybu téměř shodná (v modulu je rovna 23 mm). Tudíž model a jeho vlastnosti se od skutečného výrobku téměř neliší.

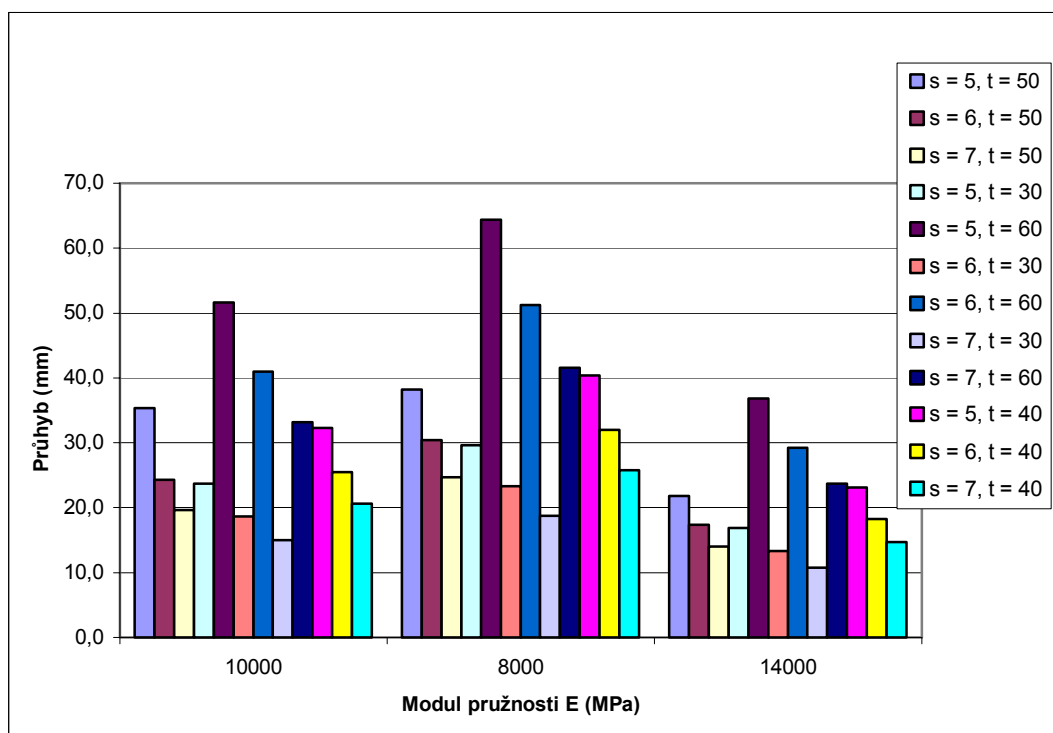
* hodnoty ze Zatěžovacích zkoušek litého a skládaného roštu, zpracované na VUT Brno, Fakulta stavební, ÚKaDK, p. Prof. Ing. Jindřichem Melcherem, DrSc., AI, 2004

10 DOPORUČENÍ PRO APLIKACE, SHRNUÍ

Tato diplomová práce pojednává o vlastnostech, výrobě a chování kompozitních pochůzkových roštů. Tyto jsou namáhány převážně na ohyb a proto byly provedeny ohybové zkoušky těchto produktů. Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, dle ČSN EN 1991-1-1, jsou tyto rošty zatěžovány v rozmezí 3000 – 4000 N/m². Toto zatížení je doporučeno i výrobcem. V praktické části – v části pracující s konečně-prvkovým softwarem COSMOS/M byly sledovány deformace takto namáhaných litých roštů. V doporučení pro aplikace jsou shrnuty výsledky namodelovaných litých roštů a porovnání s hodnotami deformací a napětí získanými ohybovými zkouškami výrobků.

10.1 Lité rošty

V grafu č. 36 jsou vyneseny výsledné hodnoty průhybů litých roštů výšky 20 mm, při zatížení 4000 N/m², jež je uvedeno v ČSN 730035, 1987 – Zatížení stavebních konstrukcí. Pokud je zákazníkem stanovena jako mezní hodnota deformace, je možno stanovit výsledné hodnoty rozměrů z takto vypracovaných grafů. Zde je evidentní, že ani jeden rošt se nedostal hodnotou průhybu pod hranici 10 mm.

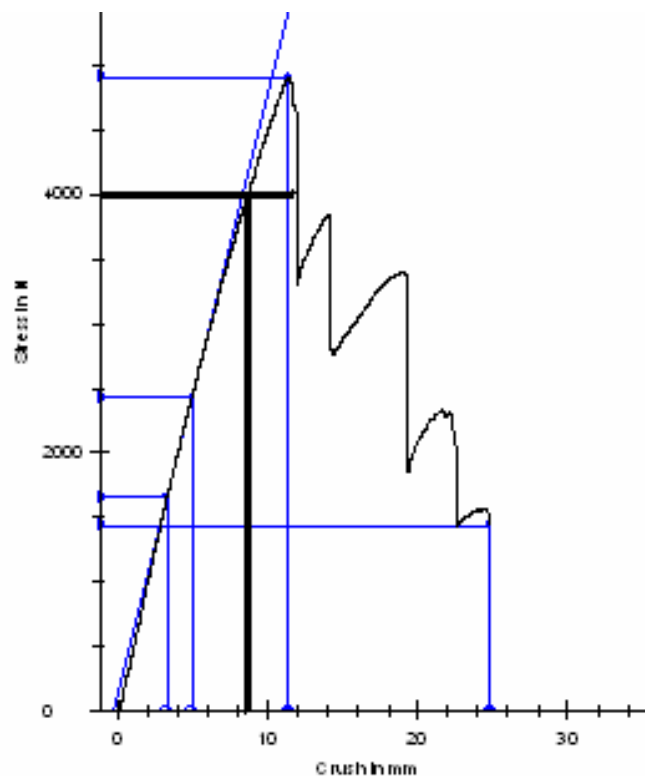


Obr 38. Deformace roštu výšky 20 mm, při zatížení silou 4 000 N/m²

Firmou PREFA KOMPOZITY a.s. byly dodány tři druhy litých roštů – liší se výškou a obsahem skleného vlákna (jehož obsah se při ruční výrobě nedá zaručit), se stejnými rozměry ok. Tak pro srovnání s výsledky ze softwaru Cosmos/M (modely roštů s roztečí 40 mm) byly použity hodnoty z ohybových zkoušek roštů s roztečí 36 mm – jež se rozměrově přiblížily roštu dodanému. Pro srovnání byl tedy vybrán model roštu s roztečí 40 mm, zatěžovaný silou 4000 N/m^2 , tloušťky 6 mm, který měl téměř shodné rozměry jako dodaný roštu – oka $30 \times 30 \text{ mm}$. Dle ohybové zkoušky je průměrný modul pružnosti série č. 2 roven 11700 MPa . Tak pro srovnání byly vzaty hodnoty modelů s modulem pružnosti $E = 10000 \text{ MPa}$.

Tab. 26. Hodnoty průhybů a napětí roštu s roztečí 40 mm, šířky 6 mm

Rozteč 40			E = 10 000 MPa
Tloušťka s (mm)	Výška h (mm)	σ_0 (MPa)	Průhyb /mm/
6	20	23,4	25,5
6	25	16,3	14,1
6	30	11,7	8,4
6	40	6,8	3,6



Obr. 39. Průběh ohybové zkoušky $F - y$, série 2: $h = 30 \text{ mm}$

Při srovnání hodnot z tabulky 26 – řádek č. 3 a obr. 39, jelikož srovnávané rošty mají téměř shodné parametry, a při stanovení průměrného modulu pružnosti pro sérii č. 3: 11700 MPa (viz tab. 10) je evidentní, že hodnoty průhybu namodelovaného roštu při hodnotě $F = 4000 \text{ N/m}^2$ se téměř rovnají výsledkům z ohybové zkoušky. Neboť hodnota průhybu u dodaných vzorků této série činí téměř 9 mm, hodnota modelu je 9,8 mm*. Tento rozdíl se dá považovat za minimální.

* hodnota získaná po přepočtu v programu COSMOS/M při změně modulu pružnosti pro daný model

Pro aplikace byly stanoveny maximální hodnoty průhybu ve výši 6 mm dle výpočtu:

Nášlapná plocha: $P=1 \times 1 = 1 \text{ m}^2$

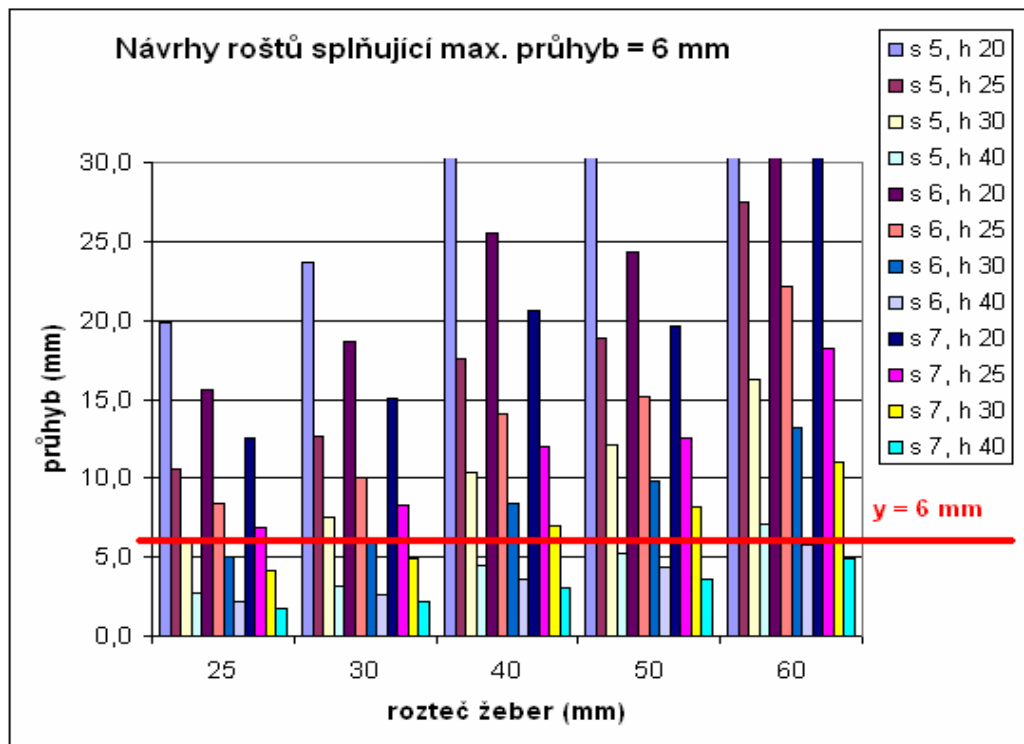
Celkové návrhové zatížení: $Z = 1 \times 4^{**} = 4 \text{ kN}$

** pro zatížení 4 kNm^2 (pro libovolné zatížení platí prostý přepočet)

$$\text{Zatížení roštu plochy } 1 \text{ m}^2: w = \frac{Z}{L} = \frac{4}{1} = 4 \text{ kNm}^{-1} \quad (35)$$

$$\text{Průhyb}^{***}: y = 0,0015 \times \frac{L^4}{b} \times Z = 0,0015 \times \frac{1}{1} \times 4000 = 6 \text{ mm} \quad (36)$$

***- vztah je uveden v příručce výrobce „Rošty a poklopy“



Obr. 40. Graf všech navržených roštů s hranicí povoleného průhybu

Dovolený průhyb splňují tyto navržené modely: (pro hodnotu $E = 10\,000$ MPa)

Tab. 27. Modely roštů splňující podmínku max. průhybu = 6 mm

			E = 10 000 Mpa
Rozteč (mm)	Tloušťka (mm)	Výška (mm)	y (mm)
25	5	40	2,7
25	6	30	5,1
25	6	40	2,2
25	7	30	4,1
25	7	40	1,8
30	5	40	3,2
30	6	30	6,0
30	6	40	2,6
30	7	30	5,0
30	7	40	2,2
40	5	40	4,5
40	6	40	3,6
40	7	40	3,1
50	5	40	5,3
50	6	40	4,3
50	7	40	3,6
60	6	40	5,8
60	7	40	4,9

Maximální hodnota dovoleného ohybového napětí byla stanovena na 130 MPa (průměrná hodnota z ohybových zkoušek litých roštů podělená bezpečnostním koeficientem 2,5 – dle doporučení výrobce). Nejmenší mez pevnosti dosahovala série č. 3, a to hodnoty 238 MPa, při dělení bezpečnostním koeficientem získáme hodnotu 95 MPa ta se přibližuje hodnotě dovoleného ohybového napětí stanoveného výrobcem tj. hodnotě 84 MPa. Uvedené podmínky splňují všechny navržené rošty.

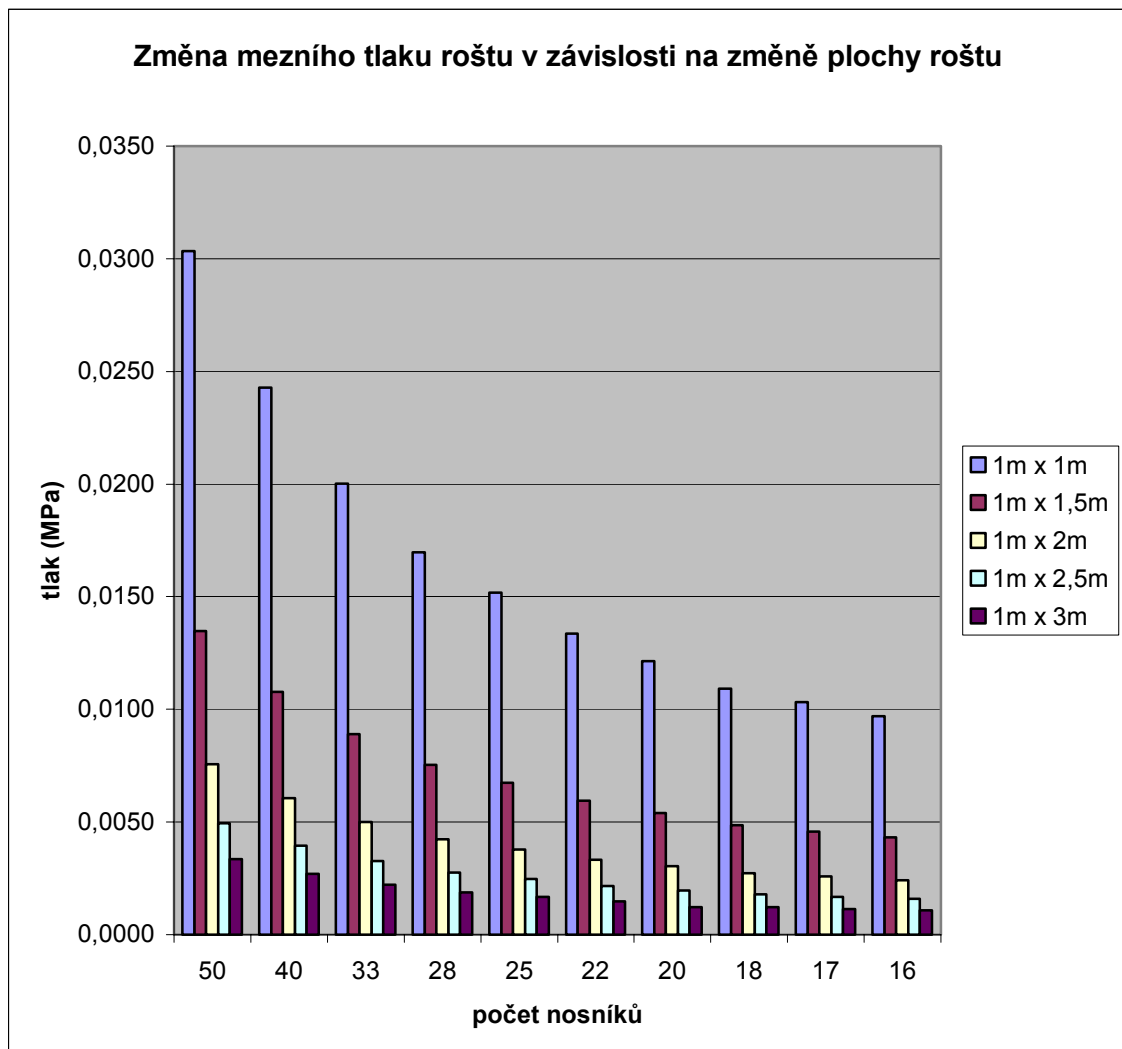
Tab. 28. Ohybové napětí navržených litých roštů pro $F = 4.000\text{ N}$

E = 10000 MPa		hodnota ohybového napětí σ (MPa)				
tloušťka s	výška h	t = 25	t = 30	t = 40	t = 50	t = 60
5	20	19,0	23,1	31,7	30,0	47,7
5	25	12,6	15,4	21,0	24,2	31,7
5	30	11,1	10,9	14,9	18,6	22,5
5	40	5,6	6,3	8,5	11,3	12,9
6	20	14,9	18,2	25,0	23,8	37,8
6	25	10,0	12,3	16,8	19,4	25,5
6	30	8,8	8,8	12,0	15,0	18,2
6	40	4,1	5,1	7,0	9,2	10,6
7	20	12,0	14,6	20,2	19,4	30,6
7	25	8,2	10,0	13,8	16,0	21,0
7	30	7,0	7,2	10,0	12,4	15,2
7	40	3,4	4,2	5,8	7,6	8,9

10.2 Tažené rošty

U tažených profilů byly navrženy rošty v délkovém rozpětí 1 až 3 m s různými roztečemi profilů. V kapitole 10.2.1. je propočítáno mezní zatížení pro všechny navržené modifikace. Na následujícím obrázku (41) je v grafu vyznačeno jak se mění mezní tlak pro jednotlivé pultruzní rošty v závislosti na délce a rozteči profilů. Tento výpočet je platný pro profil I, z rozměrové řady 15x25, jež standardně dodává firma PREFA KOMPOZITY a.s. s roztečí 25 mm. Avšak pro menší tlakové zatížení by bylo možno rozteč mezi jednotlivými profily zvětšit. Zajímavým případem jsou nosníky ve tvaru T a TT, avšak ty nebyly dodány.

Obr. 41. Změna mezního tlaku roštu v závislosti na změně plochy roštu



ZÁVĚR

Závěrem bych chtěla shrnout obsah této práce, pojednávající o kompozitních stavebních prvcích, mezi které patří kompozitní pochůzkové rošty. Kompozitní materiály v dnešní době získávají stále širší a širší uplatnění díky svým výborným vlastnostem, kde se skloubily vlastnosti skla jako plniva a pružné vlastnosti pojiva. Díky těmto vlastnostem a také díky své nízké hmotnosti, odolnosti vůči korozi a nevodivosti pro ně nalézáme velké pole působnosti. V této práci byly sledovány ohybové vlastnosti pochůzkových roštů, které jsou ve velkém množství dodávány na nejrůznější staveniště a také na místa, kde je zvýšená vlhkost – přehrady, jeskyně, čistírny odpadních vod, vodojemy, vodárny a oblasti s vysokým počtem srážek. Také místa se špatnou dostupností, vzhledem k tomu, že kompozitní prvky je možné rozdělit na potřebné části a až na místě složit. Dalším použitím je krytí zrcadel dálničních mostů a v neprůmyslové oblasti na koupalištích a v bazénech.

V teoretické části jsou rozebrány způsoby výroby kompozitních výrobků. Výrobních metod je docela široké spektrum, záleží pouze na výrobcích jak velké náklady hodlá do výroby investovat, neboť např. linka na výrobu profilů pultruzí je velmi vysokou investicí. Proti tomu ruční výroba litých roštů je asi čtvrtinovou investicí.

V praktické části bylo hlavním cílem sledování ohybových vlastností, neboť tyto stavební prvky jsou namáhány v první řadě na ohyb. Sledoval se tedy průhyb (deformace) a ohybové napětí. Návrhem a zpracováním v konečně prvkovém softwaru Cosmos/M byly zjištěny hodnoty ohybových napětí a deformací těchto roštů, z hodnot stanovených jako limitní byly tedy vybrány modely litých roštů, které splňují požadované vlastnosti jako doporučení pro výrobní aplikace. Pro tažené profily byly zpracovány návrhy pochůzných roštů s modifikovanými hodnotami rozteče a délky.

Spektrum sledování vlastností v oblasti kompozitních materiálů je velmi široké, neboť tyto materiály zčásti nahrazují výrobky nejen z oceli ale i jiné kovové materiály.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠUBA, O. Dimenzování a navrhování výrobků z plastů. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005. 112 s.
- [2] JANČÁŘ, O. Organické materiály a kompozity. VŠCHT Praha, 1998.
- [3] LINKA A., ŠILCOVÁ M. Vlastnosti vyztužujících vláken - zpracování experimentálních dat, XXI. Vyztužené plasty, Sborník mezin. konf. str. 33-39, Karlovy Vary 22.-24.5.2001, vydal DT Plzeň 2001.
- [4] GRÉGR J. Charakterizace povrchových vlastností speciálních vláken, STRUTEX, 8. nár. konf. prosinec 2001 Liberec, sb. str. 371-378, ISBN 80-7083-549-4.
- [5] GRÉGR J. Uhlíková vlákna - současný pohled, Vláknové kompozity (Seminář ČVUT, Kloknerův ústav, Praha, listopad 2002) Sborník anotací přednášek str. 8-11, ISBN 80-01-02666-3 (přednáška)
- [6] KOŠŤÁKOVÁ E., OCHERETNA L. Nanovlákna a možnosti jejich uplatnění v kompozitních materiálech, XIX. konference PRYSKYŘICE 2005, 31.10.-2.11.2005 Jetřichovice, sborník na CD, 12 stran.
- [7] AGARWAL, B.D., BROUTMAN, L.J. Vláknové kompozity, SNTL Praha, 1987
- [8] JONES, R.M. Mechanics of composite materials., Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1975
- [9] KRATOCHVÍL, B. Úvod do studia materiálů. VŠCHT Praha, 2005. 190 s.
- [10] NÁHLÍK, J. Diagnostika materiálů. VŠCHT Praha, 1990.
- [11] ŠAŠEK, L. Speciální technologie skla I. VŠCHT Praha, 1991.
- [12] ŠAŠEK, L. Speciální technologie skla II. VŠCHT Praha, 1991.
- [13] DUCHÁČEK, V. Základní pojmy z chemie a technologie polymerů, jejich mezinárodní zkratky a obchodní názvy. VŠCHT Praha, 1999.
- [14] MLEZIVA, J. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. Praha – Sobotáles, 2000,
- [15] KOTOUL, M., VRBKA J. Crack bridging and trapping mechanisms used to toughen brittle matrix composites, *J. Theoret. Appl. Fract. Mech.* **40** (2003) 23-44.

- [16] URBIŠ, R., Parametric study of the crack stability in metal particulate-reinforced ceramic matrix composites, in Proc. 5th Int. Conf. Computational methods in Contact Mechanics V, (eds J. Dominguez and C.A. Brebbia), Sevilla, 18.6.-20.6. 2001, pp. 87-96.
- [17] LEHNER, J., SURÝ, L. Silikátová vlákna v průmyslu a stavebnictví, SNTL, PRAHA, 1981
- [18] SLAVÍK, M., KOVAČIČ, V. Carbon fibers from today's viewpoint, Acta Montana 12 (126), 2002
- [19] ČSN 730035, 1987, Zatížení stavebních konstrukcí
- [20] ČSN EN 1991-1-1, 2004, Zatížení konstrukcí – obecná zatížení
- [21] ČSN P ENV 1991-2-1, 1997, Zásady navrhování a zatížení konstrukcí
- [22] PREFA KOMPOZITY, a.s., Rošty a poklopy – technická příručka
- [23] PREFA KOMPOZITY, a.s., Zábradlí, schodiště a žebříky – technická příručka
- [24] PREFA KOMPOZITY, a.s., Dimenzování profilů – technická příručka
- [25] <http://www.havel-composites.com>
- [26] <http://skripta.ft.vslib.cz/data/2006-03-16/12-56-47.pdf>
- [27] <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie/informace-o-technologie/>
- [28] MELCHER, J. Zatěžovací zkoušky (přehled výsledků), VUT Brno, Fakulta stavební, 2005

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
FRC	-	Vláknové kompozity
PP	-	Polypropylén
PE	-	Polyethylén
PEEK	-	Polyéteretherketon
PA	-	Polyamid
T _g	-	Teplota skleného přechodu
PMMA	-	Polymethylmethakrylát
PS	-	Polystyren
PC	-	Polykarbonát
T _m	-	Teplota tání
UP	-	Nenasycené polyesterové pryskyřice (unsaturated polyesters)
C	-	Uhlík
sf	-	Hustota vláken
sc	-	Hustota matrice
vf	%	Objemový zlomek
wf	%	Hmotnostní zlomek
C	%	Crimp – poměr rozdílu délky přímého úseku vláken a délky tkaniny
L _y	mm	Délka přímého úseku vláken
L _{faf}	mm	Délka tkaniny vytvořené z vláken L _y
E _{1(x)}	MPa	Modul pružnosti v tahu (směr 1,x)
E _{2(y)}	MPa	Modul pružnosti v tahu (směr 2,y)
G _{xy} , G ₁₂	MPa	Smykový modul pružnosti v rovině x, y
ε	%	Poměrné prodloužení

r	mm	Poloměr zakřivení střednice prutu
y	mm	Poloha neutrální osy
M_o	N/mm	Ohybový moment
σ_o	MPa	Napětí v ohybu
J_i	mm ⁴	Kvadratický moment i-té části průřezu
η	1	Poissonův poměr
W_o	mm ³	Modul průřezu tělesa
E	MPa	Modul pružnosti
J_R	mm ⁴	Kvadratický moment redukované plochy průřezu
b_{Rd}	mm	Redukovaná šířka
σ_{p+}	MPa	Ohybové napětí v tahu
σ_{p-}	MPa	Ohybové napětí v tlaku
G_{LT}	MPa	Modul pružnosti ve smyku
E_T	MPa	Modul pružnosti ve směru ortotropie T
E_L	MPa	Modul pružnosti ve směru ortotropie L

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Technologie ručního kladení

Obr. 2. Technologie navíjení

Obr. 3. Technologie nanášení sprejem

Obr. 4. Technologie vysokotlakého nanášení

Obr. 5. Výrobní postup pultruze

Obr. 6. Technologie kontinuálního laminování

Obr. 7. Technologie odstředivého lití

Obr. 8. Fotografie skládaných roštů

Obr. 9. Fotografie litých roštů

Obr. 10. Ohyb složeného výrobku

Obr. 11. Srovnání deformační odezvy izotropního, ortotropního a obecně anizotropního plošného prvku

Obr. 12. Fotografie průběhu ohybové zkoušky profilu I, délky 1000 mm na stroji ZWICK

Obr. 13. Obrázek třibodového systému ohybové zkoušky

Obr. 14. Diagram průběhu ohybové zkoušky (napětí – deformace) série 1 - vzorek č. 2

Obr. 15. Diagram průběhu ohybové zkoušky (síla – průhyb) série 1 - vzorek č. 3

Obr. 16. Fotografie porušené části roštu (ze série 1) při ohybu

Obr. 17. Diagram průběhu ohybové zkoušky (napětí – deformace) série 2 - vzorek č. 5

Obr. 18. Diagram průběhu ohybové zkoušky (síla – průhyb) série 2 - vzorek č. 2

Obr. 19. Fotografie porušené části roštu (série 2) při ohybu

Obr. 20. Diagram průběhu ohybové zkoušky (napětí – deformace) série 3 - vzorek č. 1

Obr. 21. Diagram průběhu ohybové zkoušky (síla – průhyb) série 3 - vzorek č. 4

Obr. 22. Fotografie porušené části roštu ze série č. 3

Obr. 23. Srovnání výsledků ohybových zkoušek litých roštů série 1 – 3

Obr. 25. Diagram průběhu ohybové zkoušky – délka 1000 mm – napětí - deformace

Obr. 26. Diagram průběhu ohybové zkoušky – délka 1000 mm – síla - průhyb

Obr. 27. Graf srovnání hodnot z ohybových zkoušek profilu I, délky 300 a 1000 mm

Obr. 28. Vylistování příkazů zadávaných do konečně-prvkového programu COSMOS/M

Obr. 29. Průhyb roštu v programu COSMOS/M, měřítko 1:5

Obr. 30. Osového napětí – osa X

Obr. 31. Hodnoty průhybů v závislosti na změně modulu E, výšky a tloušťky roštu – rozteč 25 mm

Obr. 32. Průhyb roštu $s=5$, $h=20$ při změně modulu E a rozteči žebek

Obr. 33. Průhyby modelů litých roštů při zatížení $F = 4\,000\text{ N/m}^2$

Obr. 34. Schéma profilu původního průřezu a redukovaného průřezu, průběh ohybového momentu + detail průběhu ohybového napětí

Obr. 35. Schéma redukované profilu v COSMOS/M a vylistované hodnoty

Obr. 36. Graf změny mezního zatížení v závislosti na délce a rozteči nosníků

Obr. 37. Průhyb nosníku s vylistovanými hodnotami v jednotlivých uzlech

Obr. 38. Deformace roštu výšky 20 mm, při zatížení silou $4\,000\text{ N/m}^2$

Obr. 39. Průběh ohybové zkoušky $F \times y$ série 2: $h = 30\text{ mm}$

Obr. 40. Graf všech navržených roštů s hranicí povoleného průhybu (pro $E = 10.000\text{ N}$)

Obr. 41. Změna mezního tlaku roštu v závislosti na změně plochy roštu

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Srovnání fyzikálních vlastností různých konstrukčních materiálů (vlastnosti jsou vztaženy k vlastnostem tažených profilů obsahujících 50 % skleněných vláken v polyestere-rové pryskyřici)

Tab. 2. Porovnání nákladů a efektivity různých technologií výroby kompozitů

Tab. 3. Srovnání vlastností roztoku a vytvrzené pryskyřice

Tab. 4. Vlastnosti jednotlivých typů skel

Tab. 5. Vlastnosti vybraných druhů vláken

Tab. 6. Rozpis zkoušených výrobků

Tab. 7. Výsledky z ohybové zkoušky série č. 1

Tab. 8. Statistické hodnoty série č. 1

Tab. 9. Výsledky z ohybové zkoušky série č. 2

Tab. 10. Statistické hodnoty série č. 2

Tab. 11. Výsledky ohybové zkoušky série č. 3

Tab. 12. Statistické hodnoty série č. 3

Tab. 13. Výsledky ohybové zkoušky profilu I, $L = 300$ mm, série č. 4

Tab. 14. Statistické hodnoty ohybové zkoušky profilu I, $L = 300$ mm, série č. 4

Tab. 15. Výsledky ohybové zkoušky profilu I, délky 1000 mm, série č. 5

Tab. 16. Statistika ohybové zkoušky profilu I, délky 1000 mm, série č. 5

Tab. 17. Hodnoty napětí a průhybů v závislosti na změně E , h a s roštu - rozteč 25 mm

Tab. 18. Hodnoty napětí a průhybů v závislosti na změně E , h a s roštu - rozteč 30 mm

Tab. 19. Hodnoty napětí a průhybů v závislosti na změně E , h a s roštu - rozteč 40 mm

Tab. 20. Hodnoty napětí a průhybů v závislosti na změně E , h a s roštu - rozteč 50 mm

Tab. 21. Hodnoty napětí a průhybů v závislosti na změně E , h a s roštu - rozteč 60 mm

Tab. 22. Navržené modifikace hustoty roštu

Tab. 23. Výpočet zatížení na délku profilu

Tab. 24. Hodnoty zatížení roštu v závislosti na délce a počtu nosníků

Tab. 25. Hodnoty mezního tlaku pro jednotlivé plochy roštu

Tab. 26. Hodnoty průhybů a napětí roštu s roztečí 40 mm, šířky 6 mm

Tab. 27. Modely roštů splňující podmínku max. průhybu = 15 mm

Tab. 28. Navržené rošty splňující dané podmínky max. osového napětí a průhybu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Materiálová charakteristika izoftalové polyuretanové pryskyřice Norpol 720-020

Příloha P I: Materiálová charakteristika izoftalové polyuretanové pryskyřice Norpol 720-020

CHARAKTERISTIKA VÝROBKU

NORPOL 720-020 je středně reaktivní isoftalová polyesterová pryskyřice s dobrou odolností vůči namáhání rázem a s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. NORPOL 720-020 je speciálně formulován tak, aby odolával vodě, olejům a méně agresivním chemikáliím a je obzvláště vhodný pro výrobu nádrží, trubek atd. NORPOL 720-020 neobsahuje urychlovač a není thixotropizován. NORPOL 720-020 je certifikován pro výrobu nádrží na benzin a motorovou naftu.

VLASTNOSTI VÝROBKU V KAPALNÉM STAVU PŘI 23°C

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Zkušební metoda
Viskosita			
- Kužel & deska	550-650	mPas(cP)	ISO 2884-19756
Hustota	1.10	g/cm ³	ISO 2811-1974
Číslo kyselosti (max.)	14	mgKOH/g	ISO 2114-1974
Obsah styrenu	38 ± 2	% hm.	JP B070
Bod vzplanutí	34	°C	ASTM D 3278-95
Doba želatinace: 0.25% Co urychlovač 4%	1% NORPOL No.1(MEKP)		15-20 minuty JP G020
Skladovatelnost	6	měsíců	-

MECHANICKÉ VLASTNOSTI VYTVRZENÉ PRYSKYŘICE

Vlastnost	Čistá	Laminát se	Jednotka	Zkušební metoda
	pryskyřice	se sklen.rohoží		
Obsah skla	-	33	% hm.	ISO 1172-1975
Hustota	1.20	1.46	g/cm ³	ISO 1183-87
Pevnost v tahu	78	225	MPa	ISO 527-1/2-1993
Protažení	3.5	2.0	%	ISO 527-1/2-1993
Pevnost v ohybu	140	190	MPa	ISO 178-1993
E modul v ohybu	3600	7500	MPa	ISO 178-1993
Rázová houževnatost, P 4 J	12	75	mJ/mm ²	ISO 179-1993
Objemové smrštění	7	-	%	ISO 3521-1976
Tvarová stálost za tepla	82	-	°C	ISO 75-1/2-1993
Tvrdoost dle Barcola	40	45	934-1	ASTM D 2583-87

VAHOVÉ ZMĚNY po 28 dnech

- destilovaná voda	+ 80	mg/zkuš. těleso	ISO 62-1980
- n-heptan	+ 1.2	mg/zkuš. těleso	ISO/R 175-1961
- n-heptan/o-xylen (60/40)	+ 2.5	mg/zkuš. těleso	ISO/R 175-1961

REDUKČNÍ FAKTOR - E modul v ohybu po 6 měsících

- destilovaná voda	0.90	E_v/E_o	ISO/R 462-1965
- n-heptan	0.99	E_v/E_o	ISO/R 462-1965
- n-heptan/o-xylen (60/40)	0.97	E_v/E_o	ISO/R 462-1965
Extrakce vody	0.12	milliequiv.	NaOH/zkuš. těleso TI 62404-1

BEZPEČNOSTNÍ ÚDAJE

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

OZNAČENÍ NEBEZPEČÍ

Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou označovány jako **X_a - Zdraví škodlivý**

POZNÁMKA

Údaje o vlastnostech výrobku a jeho zpracování byly získány laboratorním měřením a aplikačními zkouškami. Tento prospekt však může jen právně nezávazně poradit, zpracování je nutno přizpůsobit konkrétním podmínkám.