

Studium a optimalizace mechanického chování laminátových krytů nádrží

Bc. Simona Harangozóová

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. Simona HARANGOZÓOVÁ**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Studium a optimalizace mechanického chování laminátových krytů nádrží**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii k dané problematice
2. Sestavte FEM modely laminátových skořepinových modelů krytů s odlišnou geometrií
3. Pomocí napěťově – deformačních FEM analýz studujte mechanické chování krytů v závislosti na geometrických parametrech krytu
4. Vypracujte analýzy stabilitního chování těchto konstrukcí pro základní typy zatížení
5. Získané výsledky vyhodnoťte a stanovte doporučení pro praktické použití

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Šuba, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, UTB Zlín, 2005.
2. Hugo, J. a kolektiv.: Konstrukční plastické hmoty, jejich vlastnosti a využití ve strojírenství, SNTL Praha, 1965.
3. Šejnoha, J., Bitnarová, J.: Stabilita skořepin: doplňkové skriptum, ČVUT Praha, 1999.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství

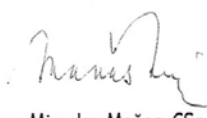
Datum zadání diplomové práce: **14. února 2006**

Termín odevzdání diplomové práce: **31. května 2006**

Ve Zlíně dne 16. ledna 2006


prof. Ing. Josef Šimoník, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Abstrakt česky

Tato práce byla vypracována na téma: „Studium a optimalizace mechanického chování laminátových krytů nádrží“.

První část je zaměřena na lamináty, jejich druhy, vlastnosti, zkoušení a použití.

V další části jsou sestaveny FEM modely laminátových skořepinových krytů a pomocí napěťově – deformačních analýz je sledováno jejich mechanické chování v závislosti na geometrických parametrech.

V závěru práce jsou získané výsledky vyhodnoceny a je stanoveno doporučení pro praktické projektování laminátových krytů.

Klíčová slova: laminátové kryty, FEM modely, napěťově – deformační analýza

ABSTRACT

Abstrakt v anglickém jazyce

This work was elaborated on the topic: „Study and optimization mechanical behaviour laminate cover tank“.

The first part of my work is intended on the laminates, its kind, property, testing and practical application.

In the next part there are combined FEM models laminate shell cover and by means of stress – deformation analysis is tracking its mechanical behaviour in depend on the geometric parametres.

At the end of my work acquire results are evaluation and there is seting recommendation for practical projecting laminate cover.

Keywords: laminate cover, FEM model, stress – deformation analysis

Děkuji mému vedoucímu doc. Ing. Oldřichovi Šubovi, CSc., za rady, odborné vedení a pozornost, kterou mi věnoval při vypracování diplomové práce.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího diplomové práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uvedena jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala.

Ve Zlíně, 07.02.2006

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 LAMINÁTY	10
1.1 POJIVO A VÝZTUŽE LAMINÁTŮ	11
1.1.1 Výztuž	11
1.1.2 Pojivo	14
1.2 VÝROBA LAMINÁTŮ	17
1.2.1 Ruční kladení	17
1.2.2 Navíjení (filament winding).....	18
1.2.3 Lisování ve formě	19
1.3 VLASTNOSTI LAMINÁTŮ	20
2 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ LAMINÁTŮ	21
2.1 VLASTNOSTI SKELNÝCH LAMINÁTŮ PŘI STATICKÉM NAMÁHÁNÍ	21
2.2 NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ.....	28
2.2.1 Spojování laminátových částí	30
2.3 ZÁKLADY VÝPOČTU SOUČÁSTÍ Z VYZTUŽENÝCH PLASTICKÝCH HMOT	31
2.3.1 Základní vztahy	32
2.4 PRVKY NAMÁHANÉ TAHEM	34
2.4.1 Jednoduchý laminát.....	34
2.4.2 Složený laminát.....	36
2.5 PRVKY NAMÁHANÉ TLAKEM.....	37
2.5.1 Krátké prvky.....	38
2.5.2 Stabilita prutů	39
2.6 OHYB LAMINÁTOVÝCH ČÁSTÍ.....	42
2.6.1 Ohyb jednoduchého laminátového nosníku	42
2.6.2 Ohyb složeného laminátového nosníku	43
3 LAMINÁTOVÉ KRYTY	46
3.1 VÝHODY LAMINÁTOVÝCH KRYTŮ	47
STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	48
II PRAKTICKÁ ČÁST	49
4 MODEL Y LAMINÁTOVÝCH SKOŘEPINOVÝCH KRYTŮ	50
4.1 CHARAKTERISTIKA A STRUKTURA LAMINÁTU	50
4.1.1 Laminát tloušťky 4 mm.....	51
4.1.2 Laminát tloušťky 5,5 mm.....	52
4.1.3 Laminát tloušťky 7 mm.....	53
4.2 MODEL Y SKOŘEPINOVÝCH KRYTŮ	54
4.2.1 Parametry krytů.....	54
5 NAPĚŤOVĚ – DEFORMAČNÍ ANALÝZA	57

5.1	NAPĚŤOVĚ – DEFORMAČNÍ ANALÝZA PŘÍMÝCH KRYTŮ DÉLKY 6 METRŮ	58
5.1.1	Napětí	58
5.1.2	Deformace	58
5.1.3	Stabilita	59
5.1.4	Přehled výsledků	59
5.2	NAPĚŤOVĚ - DEFORMAČNÍ ANALÝZA PŘÍMÝCH KRYTŮ DÉLKY 12 METRŮ.....	60
5.2.1	Napětí	60
5.2.2	Deformace	60
5.2.3	Stabilita	61
5.2.4	Přehled výsledků	61
5.3	NAPĚŤOVĚ – DEFORMAČNÍ ANALÝZA PŘÍMÝCH KRYTŮ DÉLKY 18 METRŮ	62
5.3.1	Napětí	62
5.3.2	Deformace	62
5.3.3	Stabilita	63
5.3.4	Přehled výsledků	63
5.4	NAPĚŤOVĚ – DEFORMAČNÍ ANALÝZA LOMENÝCH KRYTŮ DÉLKY 6 METRŮ	64
5.4.1	Napětí	64
5.4.2	Deformace	64
5.4.3	Stabilita	65
5.4.4	Přehled výsledků	65
6	STUDIUM MECHANICKÉHO CHOVÁNÍ KRYTŮ.....	66
6.1	MECHANICKÉ CHOVÁNÍ KRYTŮ TLOUŠŤKY 4 MM	66
6.2	MECHANICKÉ CHOVÁNÍ KRYTŮ TLOUŠŤKY 5,5 MM	68
6.3	MECHANICKÉ CHOVÁNÍ KRYTŮ TLOUŠŤKY 7 MM	70
6.4	POROVNÁNÍ PŘÍMÝCH A LOMENÝCH KRYTŮ TLOUŠŤKY 5,5 MM	72
6.5	SOUHRNNÉ ZHODNOCENÍ MECHANICKÉHO CHOVÁNÍ KRYTŮ	74
6.6	BEZPEČNOST KRYTŮ.....	76
6.6.1	Bezpečnost krytů délky 6 metrů.....	76
6.6.2	Bezpečnost krytů délky 12 metrů.....	77
6.6.3	Bezpečnost krytů délky 18 metrů.....	78
7	DOPORUČENÍ PRO PRAKTICKÉ PROJEKTOVÁNÍ.....	79
7.1	KRYTY Z LAMINÁTU TLOUŠŤKY 4 MM	79
7.2	KRYTY Z LAMINÁTU TLOUŠŤKY 5,5 MM	79
7.3	KRYTY Z LAMINÁTU TLOUŠŤKY 7 MM	79
	ZÁVĚR.....	81
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	82
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ	84
	SEZNAM TABULEK.....	86
	SEZNAM PŘÍLOH.....	87

ÚVOD

Snahy o zvyšování spotřeby použití materiálů odolných proti korozi, které snižují ztráty vzniklé korozi kovů, leží v centru zájmu nejen ekologických hnutí, ale jsou prioritou všech vyspělých společností. Použití materiálů s velkou antikorozi odolností 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. Lamináty se svým spektrem vlastností vyrovnají 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 lamináty, ve kterých jsou pojivem organické polymery a výztužemi jsou různé typy anorganických či organických vláken.

Skutečností, která vedla k obrovskému rozvoji laminátů v posledních dvaceti letech a která je odlišuje od tradičních materiálů, je i to, že lamináty jsou obvykle vyráběny v jednom kroku zároveň s konečným tvarem dílce či výrobku. To znamená, že jsou do značné míry šity na míru konečné aplikaci, a to nejen svou strukturou a vlastnostmi, ale i výrobní technologií. Nejvýznamnější předností laminátů s organickými matricemi je kombinace snadné tvarovatelnosti málo pevného polymeru s pevností a tuhostí vyztužujících vláken.

Cílem diplomové práce je využití výborných vlastností laminátů při konstruování krytů na nádrže a navrhnutí optimálního řešení geometrických parametrů pro praktické využití.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LAMINÁTY

Laminát je vrstvená hmota vzniklá spojením několika vrstev výztuže vhodnými pryskyřicemi.

Nevyztužená pryskyřice má nízkou hustotu a je snadno zpracovatelná s relativně dobrou stabilitou při působení širokého spektra prostředí a chemikálií. Nevýhodami, které omezují či úplně vylučují jejich použití v konstrukčních aplikacích, je velmi nízký modul pružnosti, nízká pevnost, křehkost a relativně malá kríповá odolnost.

Vlákna mají sice požadovanou tuhost a pevnost, jsou však velmi křehká a náchylná k poškození v některých agresivních prostředích. Je navíc velmi obtížné udržet je v požadovaném prostorovém uspořádání, zvláště pokud působí tlakové složky napětí nebo když má namáhání mnohosměrný charakter. Jestliže však vyrobíme kompozitní materiál tím, že prostorově vhodně umístíme skleněná, uhlíková či organická vlákna (nazývaná výztuž) v pryskyřici, která se potom nazývá pojivem, dostaneme novou entitu s vlastnostmi nedosažitelnými jednotlivými komponentami samotnými (kompozit). Tyto materiály jsou lehké, pevné, tuhé, houževnaté, mají vysokou odolnost proti krípu a jsou snadno vyrobitelné ve velmi komplikovaných tvarech. Nejvýznamnější předností kompozitů s organickými matricemi je kombinace snadné tvarovatelnosti nepevné pryskyřice s pevností a tuhostí vyztužujících vláken.

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 materiálech leží v oblasti 0,7-0,8.

K intenzivnímu výzkumu vlastností laminátů došlo za druhé světové války v USA ve Velké Británii. Vedla k tomu snaha nahrazovat nedostatek kovů, potřebných pro vojenské

účely, jinými materiály. Postupem času se lamináty staly z pouhé náhražky kovů samostatným konstrukčním materiálem vynikajících vlastností [1].

1.1 Pojivo a výztuže laminátů

Ačkoliv lamináty vlivem zvýšené teploty částečně měknou, jsou zařazovány mezi termosetové kompozitní materiály složené ze dvou fází: výztuže a pojiva.

1.1.1 Výztuž

Výztuž je nosným prvkem v laminátech a určuje jejich mechanické vlastnosti (pevnost, houževnatost, modul pružnosti, apod.). Jako výztuže jsou používány zpravidla vláknité materiály. Nejčastěji se používají výztuže ze skleněných vláken. Pro výrobky, na které jsou kladeny speciální požadavky, mohou být používána vlákna kevlarová případně uhlíková. Speciálně se pak používají vlákna kovová či keramická.

Skleněná vlákna

Průmyslově vyráběná skleněná vlákna tvoří v kompozitech součást nesoucí zatížení a dodávají kompozitu tuhost a pevnost. Přes velmi dobré mechanické vlastnosti a nízkou cenu mají skleněná vlákna i některé nedostatky, jako je relativně nízký modul pružnosti a navíc jsou poměrně křehká, což znesnadňuje manipulaci a některé aplikace.

Nejběžnější skleněná vlákna se ve světě vyrábějí především ze skloviny označované jako sklo E. Základem E-skla je soustava oxidů SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , B_2O_3 . Dříve se vlákna vyráběla dvoustupňově, nejprve se ze sklářského kmenu vytvořily tavením při teplotě $1550\text{ }^\circ\text{C}$ 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 mm. 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, která zlepšuje vazbu mezi vláknem a pryskyřicí.

Ostatní typy skleněných vláken

- typ S (vojenské účely), jehož základem je soustava SiO_2 , Al_2O_3 , 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.
- 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 SiO_2 , CaO , MgO , Na_2O_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 . Oproti sklu E vykazuje vysokou odolnost vůči kyselinám.
- 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.

Tab. 1. Vlastnosti jednotlivých druhů 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	-	-

Uhlíková vlákna

V uhlíkových vláknech se pojí vysoká pevnost, modul pružnosti a tepelná odolnost s nízkou měrnou hmotností.

Uhlíková vlákna se většinou 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*“). 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*“).

Tab. 2. Vybrané vlastnosti některých vyztužujících vláken.

Vlákno	Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Deformace do lomu [%]
Sklo	2,54	70 - 85	2200 - 3500	2,5
Borová vlákna	2,65	420	3500	0,8
SiC	2,60	250	2200	0,9
Uhlík	1,86	300 - 800	2700	0,7
Kevlar 29	1,45	60	2700	5,0
Kevlar 49	1,45	130	2900	2,5
Kevlar 149	1,45	190	2600	2,5

Forma výztuží:

Pokud jsou na kompozitní výrobky kladeny požadavky týkající se namáhání ve více než jednom směru jsou jako výztuže používána rouna, tkaniny, pleteniny, rohože aj.

a) *roving – skleněný pramenec* ... nekonečná skleněná vlákna malého průřezu sdružená do svazků pro další zpracování. Může být používán pro technologii strojního navíjení (výroba laminátových trubek), technologii stříkání či výrobu dalších výztuží.

- b) *závojevé rohože* ... velmi tenké plošné materiály tvořené krátkými neuspořádanými vlákny. Používají se na povrchu laminátu pro vyztužení vrstev čisté pryskyřice. Zpravidla bývají z chemicky odolného materiálu. Má především estetické vlastnosti, protože je možno ji dezénovat, což vede k možnosti kontinuální výroby kompozitů s předem upraveným povrchem.
- c) *rohože* ... plošné materiály tvořené krátkými neuspořádanými vlákny. Plošná hmotnost bývá větší jako u závojeových rohoží. Vyrábějí se z různých druhů skel.
- d) *tkaniny* ... plošné materiály tkané z nekonečných vláken, dodávají výrobkům dobré mechanické vlastnosti. Spolu s rohožemi je to nejčastěji používaný druh výztuže pro nejrozšířenější metodu výroby laminátů – ruční kladení.
- e) *prepregy* ... předimpregnované výztuže. Výztuže předem napuštěné pryskyřicí, která polymeruje působením tlaku a tepla při výrobním procesu lisování [1].

1.1.2 Pojivo

Pojivo je polymerní materiál, kterým se impregnuje výztuž. Pojivo rozvádí mechanické namáhání rovnoměrně na všechna vlákna výztuže a chrání je před mechanickým nebo chemickým poškozením, tj. dodává laminátu odolnost proti chemickým, povětrnostním a jiným vlivům.

Jako pojivo se nejčastěji používají nenasycené polyesterové pryskyřice, pak tyto kompozity nazýváme polyesterové skelné lamináty. Pokud od kompozitů požadujeme, aby měli speciální vlastnosti pro různé oblasti použití (např. chemickou odolnost proti velmi agresivním médiím), používáme jako matrici jiné typy pryskyřic, např. vinylesterové, epoxidové, fenolické nebo furanové pryskyřice.

U pryskyřic je důležité, že je lze zpracovávat bez zvýšené teploty a tlaku. K tomu se většinou používají několika složkové systémy, kde se obvykle jedna složka přidává až těsně před zpracováním. Základními složkami pro zpracování jsou: samotná pryskyřice, urychlovač a iniciátor.

Nenasycené polyesterové pryskyřice

Jde o roztok lineárních nenasycených polyesterů, obsahujících ve svých molekulách reaktivní dvojnou C=C vazbu, v reaktivním rozpouštědle schopném polymerace. Tímto rozpouštědlem je nejčastěji styren. Krátké řetězce jsou v průběhu procesu vytvrzování vzájemně spojovány styrenovými můstky. Síťovací radikálová reakce je zahájena pomocí volných radikálů vzniklých termickým štěpením. 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 tvrzení za snížené teploty je součástí iniciačního činidla i tzv. urychlovač, který snižuje bariéru pro zahájení reakce štěpení radikálu.

Vinylesterové pryskyřice

Vinylestery jsou reaktoplasty velmi vhodné pro výrobu kompozitů vyztužených skleněnými i uhlíkovými vlákny. Hodí se výborně pro náročné aplikace, zejména do agresivního chemického prostředí a pro kompozity vystavené velkému mechanickému namáhání. Ve většině aplikací nevyžadujících speciální elektrické vlastnosti a dlouhodobé použití při vysokých teplotách je možno pomocí vinylesterů nahradit dražší a mnohými technologiemi hůře zpracovatelné epoxidové pryskyřice, které vyžadují delší dobu vytvrzování a vyšší teploty.

Během řady let používání prokázaly sklem vyztužené vinylesterové roury, nádrže, podzemní zásobníky a další výrobky vynikající trvanlivost v aplikacích v chemickém průmyslu, v těžbě a zpracování ropy nebo v průmyslu papírenském. Kompozity z vinylesterových pryskyřic se také osvědčily při konstrukcích sanitární techniky a domácích plaveckých bazénů.

Epoxidové pryskyřice

Sloučeniny, které obsahují v molekule epoxidovou skupinu. Výsledkem velmi dobrých mechanických, elektrických vlastností a velké reaktivity jsou aplikace epoxidových pryskyřic v lepidlech, zalévacích a lisovacích hmotách, pojivech pro lamináty a v pryskyřicích pro lakování. Při vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty a dochází jen k malému celkovému polymeračnímu smrštění (okolo 2 %). Tato vlastnost je velmi výhodná pro výrobky s požadovanou přesností rozměrů a pro výrobu kompozitů, kde je v důsledku minimálního smrštění minimalizováno vnitřní pnutí i ve velkých dílcích. Epoxidová pryskyřice má v porovnání s již zmíněnými polyesterovými a vinylesterovými pryskyřicemi nejlepší přilnavost k povrchově neupravené skleněné výztuži. Vytvrzené epoxidové pryskyřice také vykazují nejlepší mechanické a především elektrické vlastnosti. Mají dobré elektroizolační vlastnosti v široké oblasti teplot, cenná je i jejich značná odolnost vůči vodě, roztokům kyselin a některým rozpouštědlům.

Fenolické pryskyřice

Jsou reaktoplasty s vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí, které vznikají nejčastěji jako reakční produkt reakce fenolu s formaldehydem. Název dvoustupňová pryskyřice je používán pro pryskyřice s molárním poměrem formaldehyd/fenol menším než 1 a za přítomnosti kyselého katalyzátoru. Jednostupňové pryskyřice jsou vyráběny reakcí formaldehydu s fenolem, přičemž molární poměr formaldehyd/fenol je větší než 1 a reakce je katalyzována alkalickým katalyzátorem.

Velké využití nachází tato pryskyřice při výrobě brzdových destiček a jiných frikčních součástí, jako jsou například brusné kotouče, ve kterých je fenolická pryskyřice pojivem vlastních brusných částic. Použití fenolických matric při výrobě tažených kompozitních profilů vede k materiálům, které mají výrazně sníženou hořlavost.

Největší předností této pryskyřice je její vynikající termomechanická, povětrnostní a elektrická odolnost. Kontinuální použití fenolformaldehydu vyztuženého skleněnými vlákny při teplotě 260 °C po dobu 1 roku vedlo k poklesu jeho pevnosti pouze o 25 % ve srovnání s tepelně nenamáhaným kompozitem. Ani po mnoha letech nedochází při vnější expozici k výraznějšímu poklesu mechanických vlastností, i když dochází ke zhoršení povrchového lesku a kvality povrchu [1].

1.2 Výroba laminátů

1.2.1 Ruční kladení

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.

Výhodami ručního kladení jsou především jednoduchost technologie, minimální náklady na nástroje, prakticky neomezená variabilita tvarů a velikostí, flexibilita konstrukce a jednoduché dokončovací operace.

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 jsou vyráběny lodě, skladovací nádrže, rovné plochy, bazény a různé prototypy.

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 [1].

Tab. 3. Porovnání nákladů a efektivnosti různých technologií výroby kompozitů.

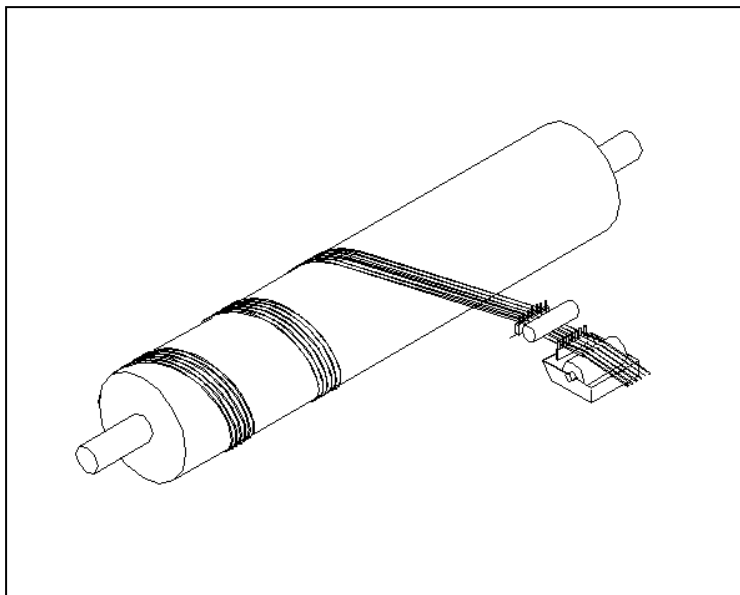
Technologie	Výrobní cyklus	Cena zboží vyrobeného za 1 hod
Ruční kladení	5 hod	600 Kč
Navíjení	4 hod	100 – 6000 Kč
Lisování	3 min	800 – 4000 Kč

1.2.2 Navíjení (filament winding)

Tato technologie je založena na kontinuálním navíjení svazku vláken či jinak upravených výztuží na kruhovou, smrštiteľnou formu. Vlákna jsou navíjena buď již navlhčena pryskyřicí, nebo se provlhčují 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.

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.

Nevýhodami je vysoká cena navíjecích strojů, nesnadné odstraňování vnitřních forem a poměrně nízká produktivita u výroby tlakových nádrží, kde je nutno používat některé speciální postupy [1].



Obr. 1. Schéma navíjení rovingu na jádro.

1.2.3 Lisování ve formě

Tento proces je vhodný pro masovou výrobu laminátových 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 laminát vytvrzen [1].

1.3 Vlastnosti laminátů

Nejvýznamnější předností laminátů 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 korozivních, především kyselých prostředí, nízkou tepelnou vodivost, elektrickou nevodivost a zanedbatelný útlum elektromagnetického záření.

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.

Mezi vlastnosti kompozitů patří především:

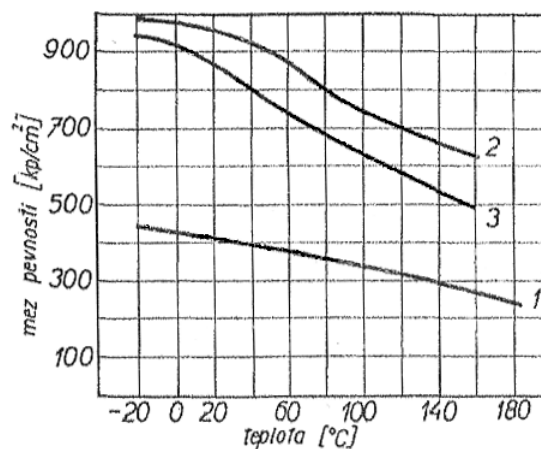
- vynikající odolnost proti korozi v širokém spektru agresivních prostředí kyselých i zásaditých,
- nízká měrná hmotnost (4krát lehčí než ocel, o 50 % nižší než hliník),
- snadná údržba (nejsou nutné nátěry),
- jednoduchá tvarovatelnost výztuží i pryskyřic,
- vynikající tepelné a elektrické izolační 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) [2].

2 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ LAMINÁTŮ

Mezi konstrukčními plastickými hmotami zaujímají mimořádné postavení anizotropní materiály, obsahující vyztužující, různým pravidelným způsobem uspořádaná plniva. Tato plniva propůjčují výslednému materiálu charakteristické vlastnosti. Od ostatních plastických hmot se liší nejen tím, že materiál nemá ve všech směrech stejné vlastnosti, ale i tím, že jeho vlastnosti jsou dány spojením viskózně-elastického chování pojiva a téměř ideální elastické chování výztuže [3].

2.1 Vlastnosti skelných laminátů při statickém namáhání

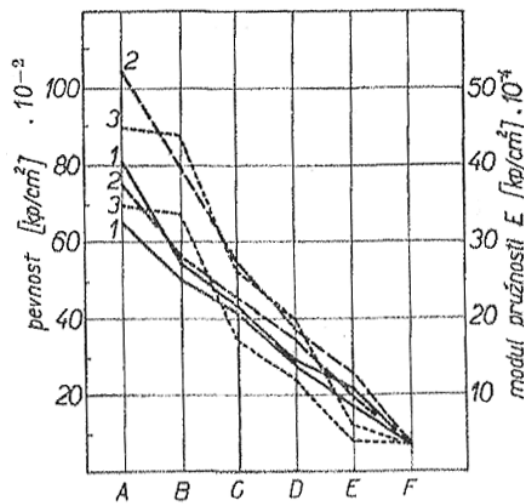
Poměrně jednoduchým případem jsou fenolické vrstvené hmoty typu tvrzené tkaniny a tvrzeného papíru. Závislost mechanických vlastností na směru působení síly se z těchto materiálů uplatňuje jen v některých případech, a to zvláště tam, kde je třeba využít vyšší pevnosti v ohybu při síle působící rovnoběžně s vrstvami, nebo vyšší pevnosti v tlaku při síle působící kolmo na vrstvy. Zásadně zde platí, že pevnost v ohybu je vyšší než pevnost v tahu, popř. krutu, což je znázorněno na obr.2.



Obr. 2. Závislost meze pevnosti v tahu a ohybu na teplotě (1 – tah, 2 a 3 – ohyb).

Z teplotní závislosti pevnosti je patrné, že při ohybu klesá pevnost s teplotou více než při tahu. Tento jev se vyskytuje u všech vrstvených plastických hmot.

Mnohem složitější je popis mechanického chování plastických hmot vyztužených skelnými vlákny. Zde kromě již zmíněné, značně se uplatňující anizotropie (či ortotropie), je důležitý komplex vlastností výztuže a komplex vlastností plniva (obr.3).



Obr. 3. Vliv skleněné výztuže na vlastnosti.

A – paralelní vlákna

1 – pevnost v tahu

B – jednosměrné tkaniny

2 – pevnost v ohybu

C – orientované rohože

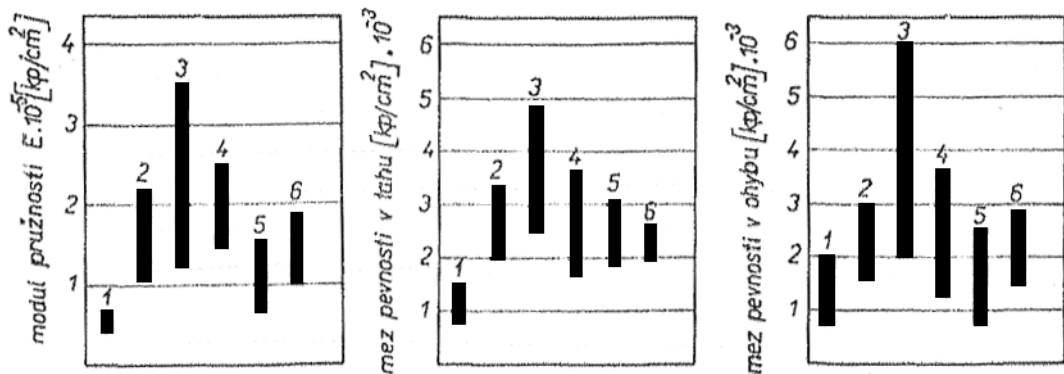
3 – modul pružnosti

D – křížové tkaniny

E – rohože

F – nevyztužená polyesterová pryskyřice

Pryskyřice určují u sklem vyztužených plastických hmot předně ty fyzikální vlastnosti, které jsou ovlivňovány vnějšími vlivy, jako je teplota, koroze apod., ovlivňují však značně i mechanické vlastnosti (obr.4).



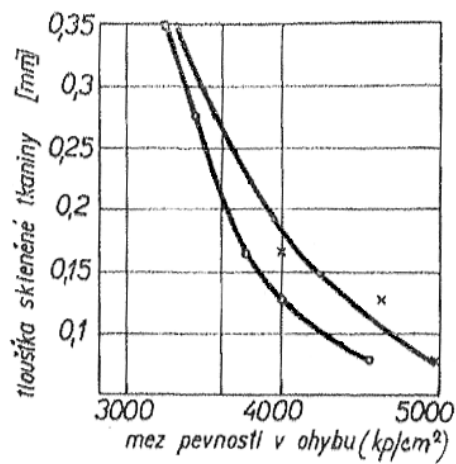
Obr. 4. Vliv pryskyřice na mechanické vlastnosti skelných laminátů.

- 1 – fenolické vrstvené hmoty s organickou výztuží
- 2 – polyesterové lamináty
- 3 – epoxidové lamináty
- 4 – fenolické lamináty
- 5 – silikonové lamináty
- 6 – melaminové lamináty

Na mechanické vlastnosti mají vliv:

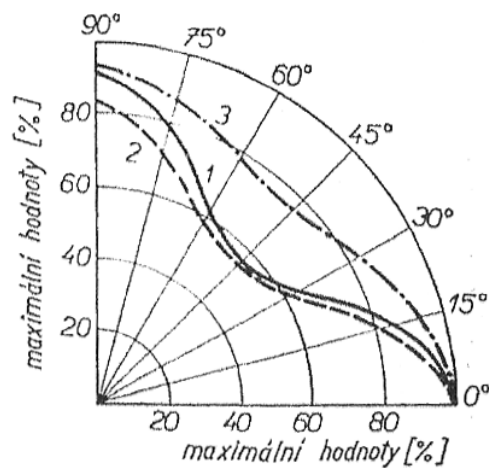
- textilní vlastnosti plniva (vazba, jakost pramenců, pevnost a tloušťka u tkanin, orientace a spojení vláken v rohožích atd.),
- obsah plniva v materiálu a jeho spojení s pryskyřicí,
- mechanické, přesněji termomechanické chování pryskyřice.

Textilní vlastnosti výztuže mají vliv na vlastnosti laminátu jak z hlediska technologického (např. propojení pryskyřicí), tak z hlediska čistě mechanického. Vliv tloušťky tkaniny na mez pevnosti u polyesterového skelného laminátu můžeme vidět na obrázku 5.



Obr. 5. Vliv tloušťky tkaniny.

Na obrázku 6 je příklad ortotropie polyesterového skelného laminátu z tkaniny; z obrázku, který je poněkud zjednodušen, je patrné, že modul pružnosti v tahu a tlaku je totožný, kdežto pevnost v tahu a tlaku v závislosti na směru působící síly se vzájemně liší.



Obr. 6. Závislost vlastností laminátu na směru působící síly.

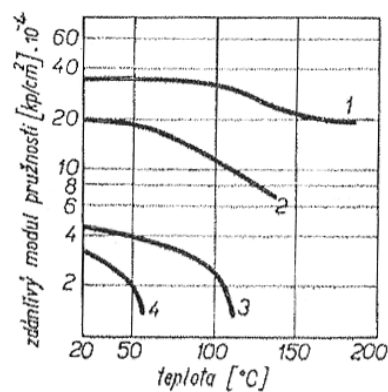
1 – modul pružnosti (tah, tlak)

2 – mez pevnosti v tahu

3 – mez pevnosti v tlaku

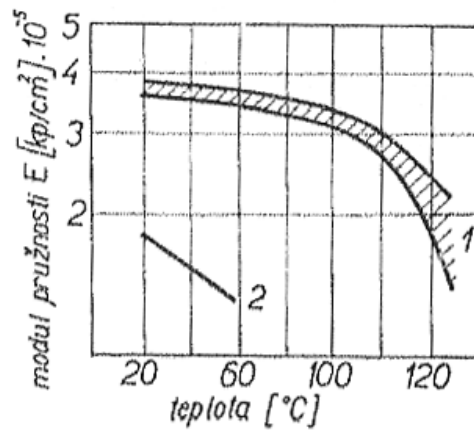
Přítomnost polymeru ve skelném laminátu způsobuje, že tento materiál má do jisté míry mechanické chování společné všem plastickým hmotám: jeho deformace při zatížení vzrůstá s časem, přičemž rychlost deformace je značně závislá na teplotě.

Při úvaze o modulu pružnosti skelných laminátů je třeba v první řadě uvážit otázku viskoelastické lineariry. Nebezpečí nelinearity vzrůstá, čím více se vzdaluje směr síly a čím více se blíží teplota k teplotě měknutí pryskyřice. Ze závislostí uvedených na obrázku 7 vyplývá praktické pravidlo, že laminát se nemá používat jako namáhaný materiál při vyšší teplotě, než je teplota tvarové stálosti za tepla pojiva pryskyřice, má být naopak poněkud nižší. Při teplotách okolo teploty měknutí pryskyřice a nad ní je rychlost tečení již dosti vysoká. Toto doporučení platí zejména pro ohybové namáhání.



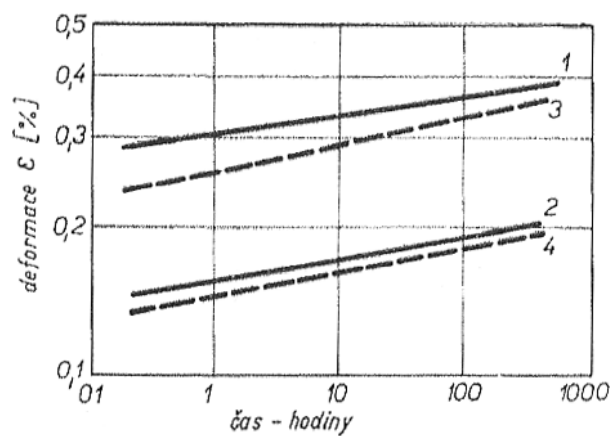
Obr. 7. Závislost modulu pružnosti skelných laminátů a pryskyřice bez plniva na teplotě.

Při čistém tahu není závislost modulu pružnosti na teplotě v oblasti měknutí pryskyřice nápadná, přesto se uplatňuje zde počítat s poklesem krátkodobého modulu pružnosti asi o 25 %. U modulu pružnosti ve smyku se udává pokles až o 40 %. Na obrázku 8 je znázorněna teplotní závislost modulu pružnosti epoxidového a polyesterového skelného laminátu. Ze srovnání obou křivek je patrné, že u polyesterového laminátu je prudší pokles dán již blízkostí teploty měknutí pryskyřice.



Obr. 8. Závislost modulu pružnosti
na teplotě.

Jak velký vliv má termomechanické chování pryskyřice na vlastnosti laminátu, ukazuje obrázek 9, který srovnává tečení epoxidového a polyesterového laminátu.



Obr. 9. Křivky tečení skelných laminátů při
namáhání v tahu.

1 – polyester, 457 kp/cm^2 , 20°C

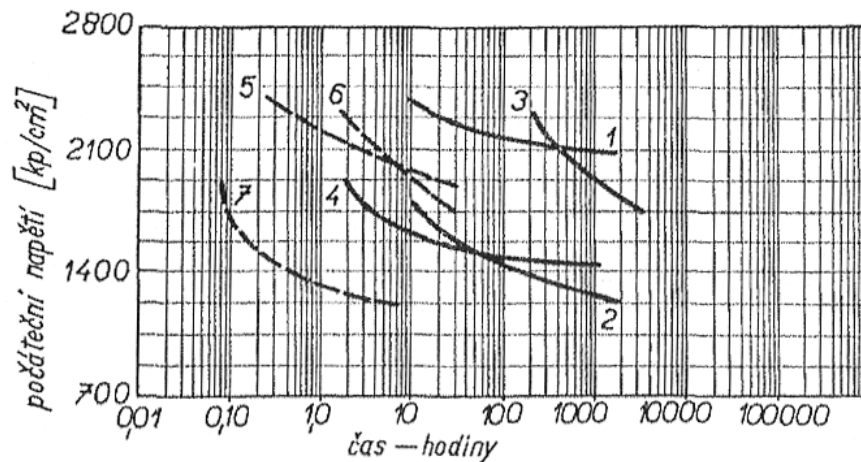
2 - polyester, 221 kp/cm^2 , 20°C

3 – epoxid 110, 400 kp/cm^2 , 140°C

4 - epoxid 110, 200 kp/cm^2 , 140°C

Velkým problémem je stanovení hodnoty modulu pevnosti E a přesné určení Poissonova poměru μ u skelných laminátů. Hodnoty se mění se směrem namáhání vzhledem k orientaci výtzuže s teplotu a s časem.

Na obrázku 10 je znázorněn rozdíl v pevnosti epoxidových, fenolických a polyesterových skelných laminátů. Plné křivky znázorňují lom, čárkované křivky 0,1 % deformace [3].



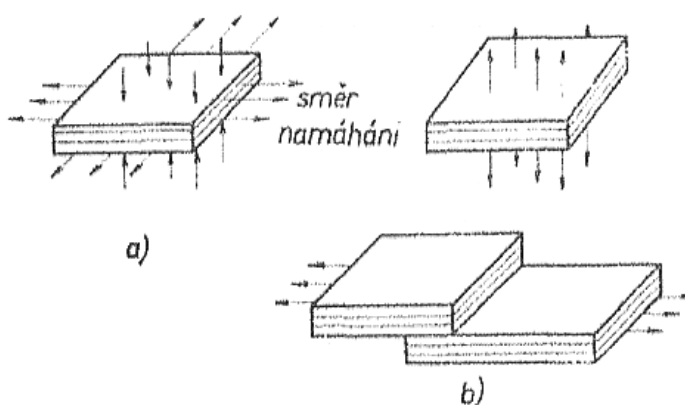
Obr. 10. Pokles pevnosti s časem při konstantním zatížení skelného laminátu při 25°C.

- 1 – epoxidová pryskyřice (lisováno)
- 2 – epoxidová pryskyřice (ruční vrstvení)
- 3 – fenolická pryskyřice
- 4 – polyesterová pryskyřice (ruční vrstvení)
- 5 – epoxidová pryskyřice
- 6 – fenolická pryskyřice
- 7 – polyesterová pryskyřice

2.2 Navrhování konstrukčních prvků

Základní vlastností vrstvených hmot je anizotropie jejich mechanických vlastností. To znamená, že při jejich používání musíme dbát na to, aby byly namáhány v směru maximální pevnosti. Je nutné si uvědomit, že cena vrstvených hmot je ve srovnání s běžnými konstrukčními materiály poměrně vysoká a je tedy nutné, aby jejich výhodných mechanických vlastností bylo využito účelně.

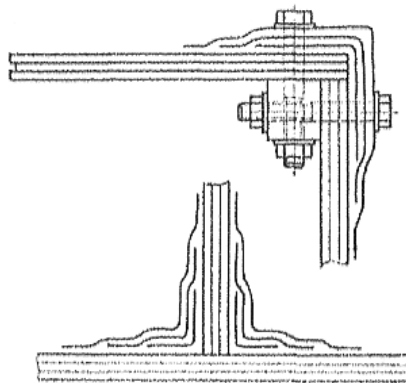
Je třeba se pokud možno vyhnout tahovému namáhání ve směru kolmém na vrstvy a namáhání smykovými silami působícími v rovině vrstev (obr.11b). Nejvýhodnější je namáhání v tahu silami působícími rovnoběžně s vrstvami a namáhání tlakem kolmo na vrstvy (obr.11a).



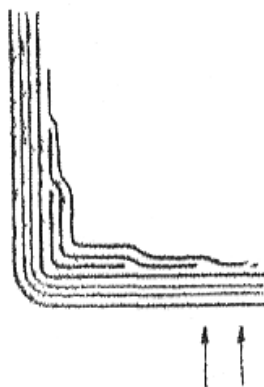
Obr. 11. Namáhání vrstvy laminátu.

Pevnost vrstvených hmot lze srovnat s pevností konstrukčních ocelí, modul pružnosti je však podstatně nižší. Na to je zejména nutno dbát u konstrukcí, kde je požadována dostatečná tuhost, a v případech, kdy směr tlakového namáhání je rovnoběžný s vrstvami. Vlivem nízkého modulu pružnosti jsou štíhlé konstrukce vystaveny nebezpečí, že u nich dojde ke ztrátě stability značně dříve, než je vyčerpána pevnost materiálu. U prvků namáhaných tlakem je tedy zvláště důležité, aby směr namáhání souhlasil se směrem maximálního modulu pružnosti.

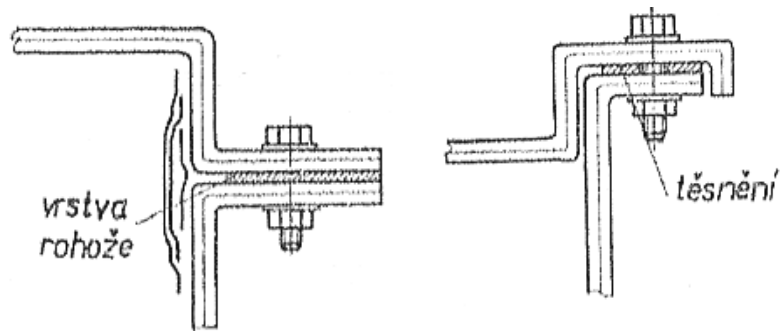
Součásti je nutno navrhovat tenkostěnné, popř. vyztužené prolisy a žebry. Přechody musí být pozvolné a je nutno se vyhýbat náhlým změnám tvaru. Koncentrace napětí je v laminátových konstrukcích nebezpečná, neboť jde o materiál, který nemá téměř žádnou (nebo jen velmi malou) plastickou rezervu. Je nutné vyhnout se nevhodným konstrukčním tvarům, které by ještě zvětšovaly koncentraci napětí. Náhlá změna počtu vrstev může vyvolat značnou koncentraci napětí, což může být snadno odstraněno pozvolnou redukcí délky jednotlivých vrstev. Na to je nutno pamatovat při spojování laminátových desek (obr.12), vyztužování koutů (obr.13), při zhotovování vodotěsných spojů (obr.14), při místním vyztužení pro upevnění kovových částí, žeber (obr.15) apod. [3].



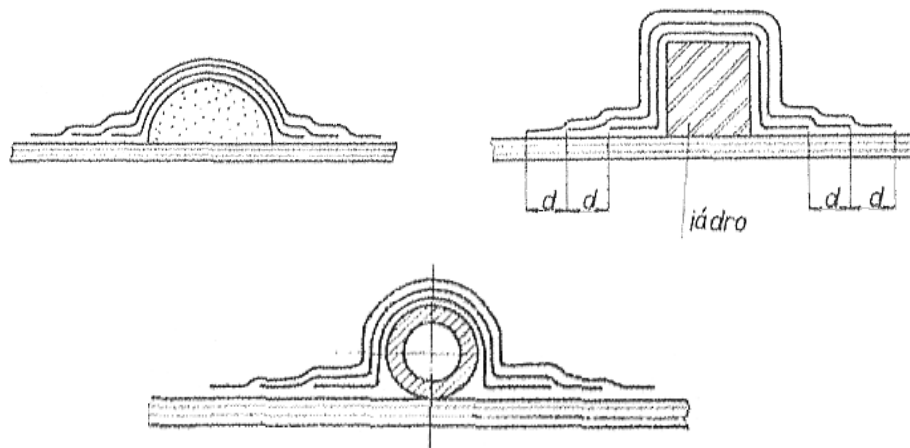
Obr. 12. Příklady spojení kolmých laminátových stěn.



Obr. 13. Vyztužení koutů.



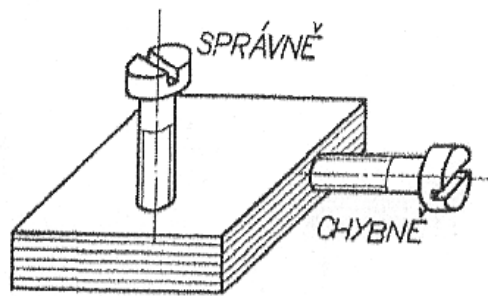
Obr. 14. Konstrukční spojení laminátových výrobků.



Obr. 15. Konstrukční vyztužení laminátové stěny.

2.2.1 Spojování laminátových částí

Nejvhodnějším způsobem spojování laminátových částí je lepení. To však vyžaduje dobrou kvalitu povrchu spojovaných dílů a často složité lepicí přípravky. Proto je mnohdy výhodnější použít jako spojovacích prvků šroubků a nýtů. Otvory pro šrouby a nýty mohou být buď vrtané nebo zhotovené již při vrstvení. Počet a průměr šroubů je nutno volit tak, aby měrný tlak laminátem a šroubem nebyl příliš velký. Pokud je to možné, snažíme se vyhnout ve vrstvené hmotě řezání závitů. Nedoporučuje se řezání závitů s osou ve směru vrstev. Šrouby pak mohou způsobit rozvrstvení materiálu [3].



Obr. 16. Spojování šrouby.

2.3 Základy výpočtu součástí z vyztužených plastických hmot

O způsobu výpočtu rozměrů, namáhání a deformací součástí z plastické hmoty rozhoduje chování materiálu, které závisí na mnoha činitelích, jako je teplota, délka doby a způsob namáhání, prostředí, apod.

Vyztužené plastické hmoty je možné z mechanického hlediska dělit na dvě základní skupiny:

- hmoty, u nichž je výztuž rozložena nepravidelně, náhodně (je-li použito skleněných rohoží, textilních odstřížků, sekaných vláken, apod.). V těchto případech vzniká nehomogenní materiál, jehož mechanické vlastnosti se mohou v různých místech od sebe lišit. Tato nepravidelnost mechanických vlastností je však pouze místního rázu. Navenek se dostatečně velký element takového materiálu chová jako homogenní, izotropní látka, jejíž vlastnosti jsou rovny průměrným hodnotám vlastností, stanovených v různých místech a směrech. Při návrhu a výpočtu součástí postupujeme tedy jako u izotropního, homogenního prvku.

- hmoty, u nichž je výztuž orientována v jednom nebo několika směrech. Ve směru orientace výztuže nabývá materiál význačných mechanických vlastností. Vlastnosti takového materiálu (např. laminát vyztužený skleněnou tkaninou nebo jednosměrně orientovanými vlákny) závisí na směru namáhání. Pak hovoříme o anizotropii jeho vlastností, která může mít charakter, určený uspořádáním výztuže. Známe-li elastické

vlastnosti takového materiálu v jeho hlavních směrech, můžeme z nich početně stanovit hodnoty elastických vlastností pro libovolný směr.

Vzhledem k velké pevnosti laminátů, nízkému modulu pružnosti a poměrně vysoké ceně vyztužující tkaniny se lamináty uplatňují hlavně v tenkostěnných konstrukcích. Ve většině případů jde tedy o rovinnou napjatost ortotropní stěny.

V obou případech – pro izotropní i pro neizotropní vyztužené hmoty – je nutné podle druhu pryskyřice a podle teploty rozlišovat mezi případy, kdy je třeba uvažovat vliv časové závislého přetváření, a případy, kdy kríповé deformace nebo relaxace napětí jsou zanedbatelné [3].

2.3.1 Základní vztahy

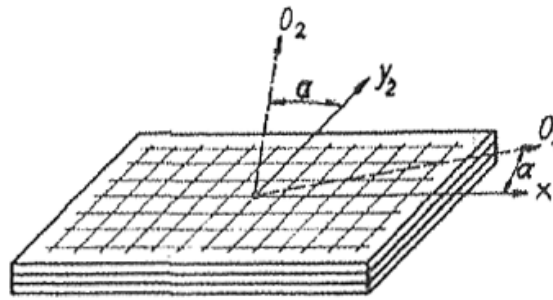
Závislost mezi složkami napětí a deformace při rovinné napjatosti u pravoúhlé souřadné soustavy, jejíž osy a příslušné složky označíme indexy 1 a 2, která vznikne ze základní soustavy x, y pootočením o úhel α , takže osa x přejde v osu o_1 a osa y v osu o_2 , můžeme napsat:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= a_{11}\sigma_1 + a_{12}\sigma_2 + a_{16}\tau_{12} \\ \varepsilon_2 &= a_{21}\sigma_1 + a_{22}\sigma_2 + a_{26}\tau_{12} \\ \gamma_{12} &= a_{16}\sigma_1 + a_{26}\sigma_2 + a_{66}\tau_{12}\end{aligned}\tag{1}$$

kde: a_{ij} konstanty závislé na materiálu

$\sigma_{1,2}$ složky normálových napětí ve směru příslušných os

τ_{12} smykové napětí



Obr. 17. Základní souřadná soustava (x,y).

Konstanty a_{ij} můžeme pro daný úhel α vyjádřit pomocí základních elastických konstant (pro rovinnou napjatost je třeba znát E_x , E_y , G_{xy} a μ_{xy}).

Mezi μ_{yx} a μ_{xy} platí vztah:

$$\frac{\mu_{xy}}{E_x} = \frac{\mu_{yx}}{E_y} \quad (2)$$

Splývá-li soustava o_1, o_2 se základní soustavou x, y , tj., když $\alpha = 0$, je a_{16} a a_{26} rovno 0; pak můžeme složky deformace vyjádřit:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{xy}}{E_x} \cdot \sigma_y \\ \varepsilon_y &= -\frac{\mu_{xy}}{E_x} \cdot \sigma_x + \frac{\sigma_y}{E_y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G_{xy}} \cdot \tau_{xy} \end{aligned} \quad (3)$$

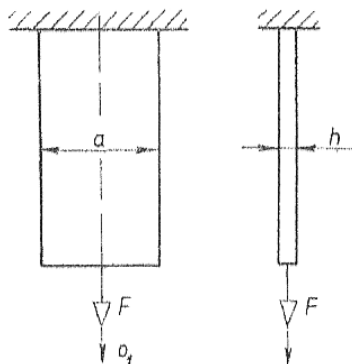
Protože:

$$\begin{aligned}a_{11} &= \frac{1}{E_1} \\a_{22} &= \frac{1}{E_2} \\a_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \\a_{12} &= \frac{\mu_{12}}{E_1} = a_{21} = \frac{\mu_{21}}{E_2}\end{aligned}\tag{4}$$

Lamináty jsou anizotropní nejen pokud jde o elastické vlastnosti, ale také pokud jde o jejich pevnost. Experimentálně bylo zjištěno, že závislost meze pevnosti v tahu na směru namáhání je podobná jako u modulu pružnosti v tahu [3].

2.4 Prvky namáhané tahem

2.4.1 Jednoduchý laminát



Obr. 18. Jednoduchý prvek
namáhaný na tah.

Pokud uvažujeme prvek o průřezu $S = a \cdot h$, zatížený silou F , působící v ose prutu o_1 , lze předpokládat, že napětí je po průřezu rozloženo rovnoměrně. Pro jeho velikost tedy platí:

$$\sigma_1 = \frac{F}{a \cdot h} \quad (5)$$

Pro dovolené napětí platí vztah:

$$\sigma_{dov} = \frac{1}{\chi} \cdot \sigma_{Pt} \quad (6)$$

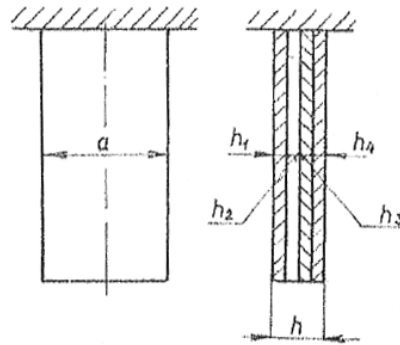
a z rovnice

$$\frac{F}{a \cdot h} = \frac{1}{\chi} \cdot \sigma_{Pt} \quad (7)$$

lze stanovit potřebný průřez nebo dovolené namáhání.

Jestliže jde o materiál izotropních vlastností, dosadíme za hodnotu meze pevnosti v tahu hodnotu získanou trhací zkouškou. U ortotropního laminátu je nutno dosadit hodnotu meze pevnosti v tahu σ_{Pt} v uvažovaném směru o_1 [3].

2.4.2 Složený laminát



Obr. 19. Složený prvek
namáhaný na tah.

Je-li laminátová část složena z n vrstev o průřezích S_1, S_2, \dots, S_n , které mají ve směru o_1 různé hodnoty modulu pružnosti v tahu E_1, E_2, \dots, E_n , a různé hodnoty meze pevnosti v tahu, nelze předpokládat rovnoměrné rozložení napětí v průřezu. Je nutno vyjít z podmínky, že deformace jednotlivých vrstev jsou stejné a jsou rovny deformaci součásti jako celku

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_n \quad (8)$$

Pro napětí v jednotlivých vrstvách $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ (pokud předpokládáme stejné hodnoty Poissonových poměrů) tedy platí:

$$\frac{\sigma_1}{E_1} = \frac{\sigma_2}{E_2} = \dots = \frac{\sigma_n}{E_n} \quad (9)$$

Z podmínky (8) a (9) vyplývá pro napětí σ_i v i -té vrstvě

$$\sigma_i = \frac{F}{D} \cdot E_i \quad (10)$$

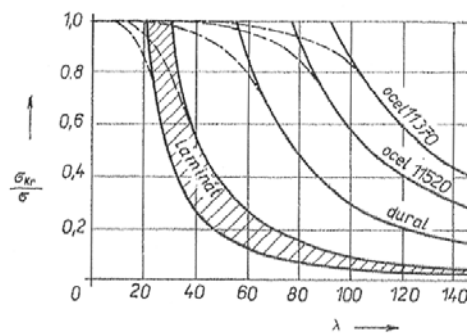
- kde: F zatížení části
 E_i modul pružnosti i-té vrstvy
 D tuhost v tahu

Za únosnost složené laminátové části považujeme mezní namáhání, při kterém dojde k porušení některé z jeho vrstev. To vznikne u vrstvy s nejmenším prodloužením na mezi pevnosti [3].

2.5 Prvky namáhané tlakem

Chování laminátů při namáhání tlakem je poměrně složité, a proto je třeba dbát při návrhu tlačných prvků velké opatrnosti. U prutů z ortotropního materiálu je nutné si uvědomit, že orientace vláken, která způsobovala vysoké mechanické vlastnosti při tahu, nemusí při tlaku působit stejně příznivě.

Relativně nízký modul pružnosti v tlaku (je zhruba stejný jako v tahu) způsobuje, že lamináty jsou materiálem málo vhodným pro tlačné prvky. Ačkoliv se pevností v tahu mohou srovnávat s kovovým materiálem, je srovnání z hlediska vzpěrné únosnosti pro ně velmi nepříznivé (obr.20).



Obr. 20. Závislost poměru $\frac{\sigma_{Kr}}{\sigma}$ na štíhlosti λ pro různé druhy materiálů.

2.5.1 Krátké prvky

U krátkých prutů, kde je vyloučeno vybočení, můžeme použít u jednoduchého laminátu vztahu:

$$F = \sigma \cdot S \quad (11)$$

tj, předpokládáme rovnoměrné rozložení napětí c zatíženém průřezu.

Mezní únosnost laminátového sloupu tedy stanovíme ze vztahu:

$$F_{\max} = \sigma_{Pd} \cdot S \quad (12)$$

Deformaci při mezním dovoleném zatížení σ_d stanovíme:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_d}{E \cdot S} \quad (13)$$

Není-li udána hodnota dovoleného namáhání σ_d , je nutno pro dlouhodobě namáhané části vyjít z hodnoty časové pevnosti v tlaku a redukovat ji podle druhu namáhání zvoleným koeficientem bezpečnosti.

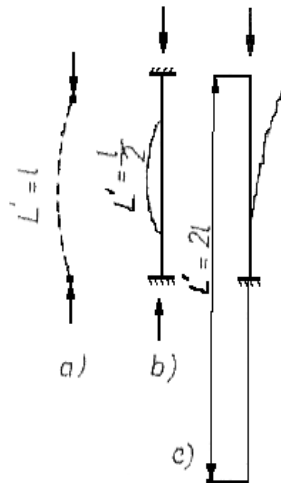
Při krátkodobém namáhání jsou hodnoty modulů pružnosti v tahu a tlaku téměř stejné. Vzhledem k tomu, že kríповý modul při tlakovém namáhání klesá rychleji než při namáhání tahovém, což je u některých typů vrstvených hmot zvláště výrazné při zvýšených teplotách, dosazujeme u dlouhodobě namáhaných prvků hodnotu modulu pružnosti v tlaku.

2.5.2 Stabilita prutů

Je-li tlačný laminátový prut natolik štíhlý, že vzniká nebezpečí vybočení, je nutno posuzovat únosnost takového prutu se zřetelem na jeho stabilitu.

Je nutno rozlišovat dva případy:

1. případ, kdy závislost napětí – deformace materiálu je ve směru osy prutu při σ_{Kr} lineární (např. jsou-li vyztužující vlákna rovnoběžná s osou prutu):



Obr. 21. Velikost vzpěrné délky L' při různém způsobu uložení prutu.

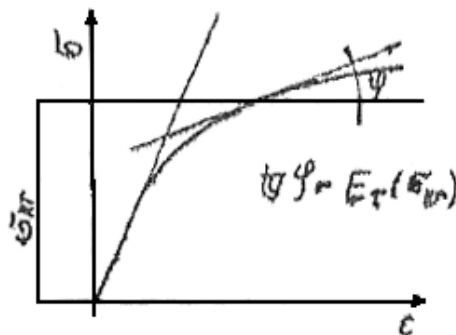
Zde je možno použít Eulerovi teorie a kritické napětí σ_{Kr} určit za vztahu:

$$\sigma_{Kr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{L}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \quad (14)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{S}} \quad (15)$$

- kde: i poloměr setrvačnosti
 I nejmenší moment setrvačnosti vzhledem k ose jdoucí těžištěm
 L vzpěrná délka
 λ štíhlost prutu

2. případ, kdy při kritickém napětí σ_{Kr} je překročena mez úměrnosti materiálu v tlaku:



Obr. 22. Stanovení tečnového modulu pružnosti za mezí úměrnosti.

Zde se použije Engesserovy – Shanleyovy koncepce a kritické napětí σ_{Kr} se stanoví z výrazu:

$$\sigma_{Kr} = \frac{\pi^2 \cdot [E_\tau(\sigma_{Kr})]}{\lambda^2} \quad (16)$$

$$E_\tau(\sigma_{Kr}) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (17)$$

kde: $E_\tau(\sigma_{Kr})$ tečnový modul pružnosti, určený z pracovního diagramu (obr.22)

Výrazy (14) a (16) platí jen pro jednoduchý laminát. Výsledné mechanické vlastnosti složeného laminátu závisí na vlastnostech a uspořádání jednotlivých vrstev. Proto je třeba před stanovením kritického namáhání určit polohu neutrální osy, hodnotu modulu pružnosti a poloměr setrvačnosti (štíhlostní poměr) [3]. Tyto hodnoty se určí ze vztahů:

Poloha neutrální osy

$$\chi = \frac{\sum_{j=1}^n E_j S_j \chi_j}{\sum_{j=1}^n E_j S_j} \quad (18)$$

Ohybová tuhost

$$EI = \sum_{j=1}^n E_j I_j \quad (19)$$

Modul pružnosti

$$E = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^n E_j S_j \quad (20)$$

Poloměr setrvačnosti

$$i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n E_j I_j}{\sum_{j=1}^n E_j S_j}} \quad (21)$$

kde: χ_j vzdálenost j-té vrstvy od zvolené základny

E_j modul pružnosti j-té vrstvy

I_j moment setrvačnosti j-té vrstvy

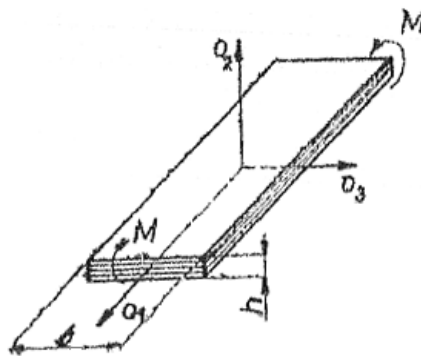
S_j plocha průřezu j-té vrstvy

2.6 Ohyb laminátových částí

Při výpočtu ohýbaných částí se můžeme setkat s celou řadou případů kombinací vrstev různých typů, mechanických vlastností a vzájemné orientace.

Nejjednodušším případem je ohyb nosníku ve tvaru pravoúhlého hranolu, zatíženého kolmo k vyztužujícím vrstvám.

2.6.1 Ohyb jednoduchého laminátového nosníku



Obr. 23. Ohyb jednoduchého nosníku.

Rozhodující jsou jeho vlastnosti ve směru podélné osy nosníku o_1 . To záleží na orientaci základní souřadné soustavy laminátu vzhledem k ose o_1 .

Mezní ohybový moment, popř. rozměry nosníku se určí ze vztahu:

$$M = W \cdot \sigma_{od} \quad (22)$$

$$W = \frac{1}{6} \cdot b h^2 \quad (23)$$

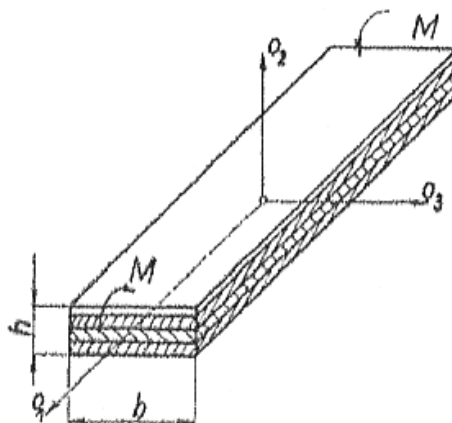
kde: σ_{od} dovolené namáhání v ohybu
 W průřezový modul (obdélníkové průřezu o rozměrech b a h)

Pro stanovení průhybu jednoduše podepřeného nosníku vycházíme ze vztahu:

$$\gamma_{\max} = \frac{5ql^4}{384E_1I_3} + \frac{ql^2}{8SG_{12}} \quad (24)$$

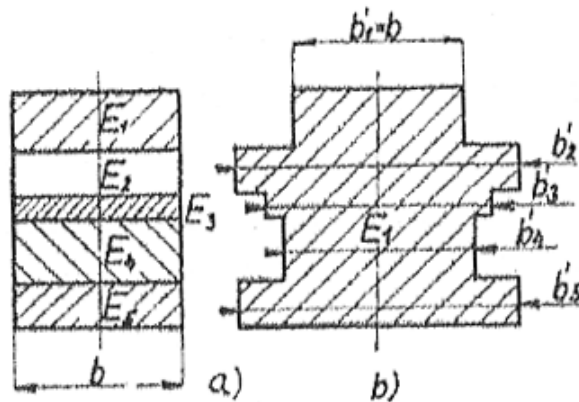
kde: l rozpětí nosníku
 E_1 modul pružnosti v tahu ve směru osy o_1
 I_3 moment setrvačnosti vzhledem k o_3
 q rovnoměrné zatížení
 S plocha průřezu

2.6.2 Ohyb složeného laminátového nosníku



Obr. 24. Ohyb složeného nosníku.

Uvažujme nosník, vyrobený z několika vrstev o různých mechanických vlastnostech, rovnoběžných se směrem podélné osy nosníku.



Obr. 25. Nahrazení složeného nosníku jednoduchým.

Řešení problému ohybu složeného nosníku převedeme na řešení ohybu izotropního nosníku tak, že průřez složeného nosníku nahradíme ekvivalentním průřezem, redukuje-li šířky jednotlivých vrstev v poměru modul pružnosti. To lze udělat jen tehdy, působí-li ohybový moment v rovině kolmé na vrstvy.

Z daných modulů pružnosti jednotlivých vrstev E_1, E_2, \dots, E_n zvolíme jeden (ten největší) za základní. Předpokládejme, že je to modul E_1 . Potom šířku každé vrstvy redukuje dle vzorce:

$$b'_j = \frac{E_j}{E_1} \cdot b \quad (25)$$

Tloušťky jednotlivých vrstev zůstávají zachovány. Tím je složený nosník nahrazen nosníkem s ekvivalentním průřezem a modulem pružnosti E_1 (obr. 25b).

Označíme-li plochy průřezů vrstev S_j před redukcí a S'_j po redukcii, stanovíme polohu neutrální osy ze vztahu:

$$\chi = \frac{\sum_{j=1}^n E_j S_j \chi_j}{\sum_{j=1}^n E_j S_j} = \frac{\sum_{j=1}^n S'_j \cdot \chi_j}{\sum_{j=1}^n S'_j} \quad (26)$$

kde: χ_j vzdálenost těžiště j-té vrstvy od zvolené základny

χ vzdálenost neutrální osy od této základny

Moment setrvačnosti ekvivalentního průřezu I' vzhledem k neutrální ose stanovíme:

$$I' = \sum_{j=1}^n \left(\frac{b'_j h_j^3}{12} + S'_j \cdot \eta_j^2 \right) \quad (27)$$

kde: h_j tloušťka j-té vrstvy

η_j vzdálenost těžiště vrstev od neutrální osy = $|\chi - \chi_j|$

Normálové napětí u složeného nosníku nemusí nabývat kritické hodnoty v nejkrajnějším vlákně průřezu, jako je tomu u izotropního nosníku, ale je nutno je kontrolovat pro každou vrstvu [3].

$$W_j = \frac{I' \cdot E_1}{E_j \cdot y_j} \quad (28)$$

$$\sigma_j = \frac{M}{W_j} \quad (29)$$

3 LAMINÁTOVÉ KRYTY

Překrytí se provádí nad nádržemi s chemikáliemi, nádržemi čistíren odpadních vod a ostatními objekty, u kterých je nutné provést jejich zakrytí. Zamezují vytvoření námrazy na obslužných lávkách, zadržují nebezpečné aerosoly, snižují tepelné ztráty a zabraňují úniku nežádoucích pachů.

Překrytí se provádí na základě projektu a statického výpočtu, který určuje rozměry a tloušťku jednotlivých dílů. Tvary překrytí vychází z válcových skořepin, u překrytí kruhových nádrží jsou díly preferovány jako část komolého kužele. Všechny díly jsou vyráběny jako stohovatelné, aby byla zajištěna snadná a ekonomická přeprava. Rozpětí podpěr vychází ze statického výpočtu, podle potřeby může být i přes 10 metrů. Vnější stranu překrytí je možné chránit vrstvou odolnou proti UV záření. Výrobky je možné modifikovat pro užití v korozně různě náročných prostředích. Spojování je prováděno nerezovými šrouby, v případě potřeby jsou spoje utěsněny gumovým těsněním.

Vstupní materiál

Pro překrytí se standardně používá polyesterové pryskyřice ortoftalového typu. Pro náročnější aplikace se používá vinylesterových pryskyřic. Jako výztuže se používají skleněné rohože nebo tkaniny [2].



Obr. 26. Příklad překrytí.

3.1 Výhody laminátových krytů

Mezi hlavní výhody výrobků z laminátu oproti výrobků z jiných materiálů jsou:

- dlouhá životnost,
- malá měrná hmotnost,
- velká mechanická pevnost v širokém rozmezí teplot,
- dobré tepelné a zvukové izolační vlastnosti,
- odolnost proti povětrnostním vlivům,
- velká rázová pevnost a pružnost,
- možnost vhodnou volbou základních surovin měnit výsledné vlastnosti výrobků,
- dobrá chemická odolnost proti širokému spektru agresivních médií,
- snadná manipulace,
- rychlá montáž, demontáž a oprava havarovaných dílů,
- minimální údržba,
- možnost barevných kombinací,
- nízká cena v porovnání s jiným technickým řešením [2].



Obr. 27. Kryty čistíren odpadních vod.

STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

V teoretické části diplomové práce jsme se zabývali lamináty. Jejich druhy, složením, výrobou, namáháním a vlastnostmi. V další části se budeme zabývat použitím laminátů jako materiálů na výrobu krytů na nádrže.

Díky výborným vlastnostem laminátů se v praxi můžeme setkat s mnoha způsoby jejich použití. Jedním ze způsobů je výroba laminátových krytů na čističky odpadních vod a nádrže určené k jiným účelům. Naším cílem je u vybraného laminátu studovat jeho mechanické vlastnosti. Zvolíme si různé tloušťky, délky a ostatní rozměry krytu, zhotovíme několik modelů a provedeme napěťově - deformační analýzy. Z výsledků těchto analýz budeme zkoumat změny mechanických vlastností v závislosti na rozdílných parametrech.

V závěru práce vyhodnotíme mechanické vlastnosti našeho laminátu a stanovíme doporučení pro jeho praktické použití na výrobu krytů.

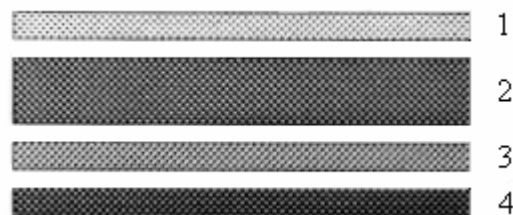
II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 MODELÝ LAMINÁTOVÝCH SKOŘEPINOVÝCH KRYTŮ

4.1 Charakteristika a struktura laminátu

Při výrobě laminátových skořepinových krytů se jako pojivo nejčastěji používají polyesterové či vinylesterové pryskyřice a jako výztuž se používají skleněné rohože a tkaniny.

Struktura laminátu



Obr.28. Struktura laminátu.

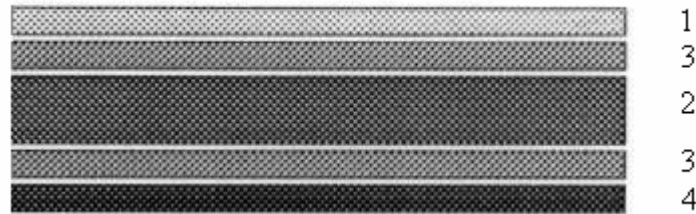
1 ... TOPCOAT

2 ... COMBI 800/450

3 ... ROHOŽ 450

4 ... GELCOAT

4.1.1 Laminát tloušťky 4 mm



Obr.29. Struktura laminátu tloušťky 4 mm.

Struktura laminátu

1 ... topcoat ... Aropol K-530 TB

2 ... 1x tkanina ... COMBI ... 800/450 g/m²

3 ... 2x rohož ... 450 g/m²

4 ... gelcoat ... Crystic 93 PA Grey 6057

pryskyřice ... Aropol M-105 TA

poměr - sklo : pryskyřice ... 36,5 : 63,5

Hodnoty

Hodnoty modulů průřezu v tahu a ohybu a velikost pevností v tahu a ohybu byly získány měřením vzorků laminátu o tloušťce 4 mm na trhacím stroji.

$$E_o = 4\,950 \text{ MPa}$$

$$R_{m_o} = 135 \text{ MPa}$$

$$E_t = 9\,900 \text{ MPa}$$

$$R_{m_t} = 120 \text{ MPa}$$

4.1.2 Laminát tloušťky 5,5 mm



Obr.30. Struktura laminátu tloušťky 5,5 mm.

Struktura laminátu

1 ... topcoat ... Crystic 2000 Orange AC

2 ... 2x tkanina ... COMBI ... 800/450 g/m²

3 ... 2x rohož ... 450 g/m²

4 ... gelcoat ... Crystic 93 PA Grey 6057

pryskyřice ... Aropol M-105 TA

poměr - sklo : pryskyřice ... 50,3 : 49,7

Hodnoty

Hodnoty modulů průřezu v tahu a ohybu a velikost pevností v tahu a ohybu byly získány měřením vzorků laminátu o tloušťce 5,5 mm na trhacím stroji.

$$E_o = 7\,500 \text{ MPa}$$

$$R_{m_o} = 190 \text{ MPa}$$

$$E_t = 11\,850 \text{ MPa}$$

$$R_{m_t} = 150 \text{ MPa}$$

4.1.3 Laminát tloušťky 7 mm



Obr.31.Struktura laminátu tloušťky 7mm.

Struktura laminátu

1 ... topcoat ... Crystic 2000 Orange AC

2 ... 3x tkanina ... COMBI ... 800/450 g/m²

3 ... 2x rohož ... 450 g/m²

4 ... gelcoat ... Crystic 93 PA Grey 6057

pryskyřice ... Aropol M-105 TA

poměr - sklo : pryskyřice ... 53,7 : 46,3

Hodnoty

Hodnoty modulů průřezu v tahu a ohybu a velikost pevností v tahu a ohybu byly získány měřením vzorků laminátu o tloušťce 7 mm na trhacím stroji.

$$E_o = 7\,900 \text{ MPa}$$

$$R_{m_o} = 200 \text{ MPa}$$

$$E_t = 12\,600 \text{ MPa}$$

$$R_{m_t} = 150 \text{ MPa}$$

4.2 Modely skořepinových krytů

Navrhujeme skořepinové kryty na nádrže obdélníkového průřezu. Šířka i délka nádrže může být různá, liší se podle potřeby a použití nádrže.

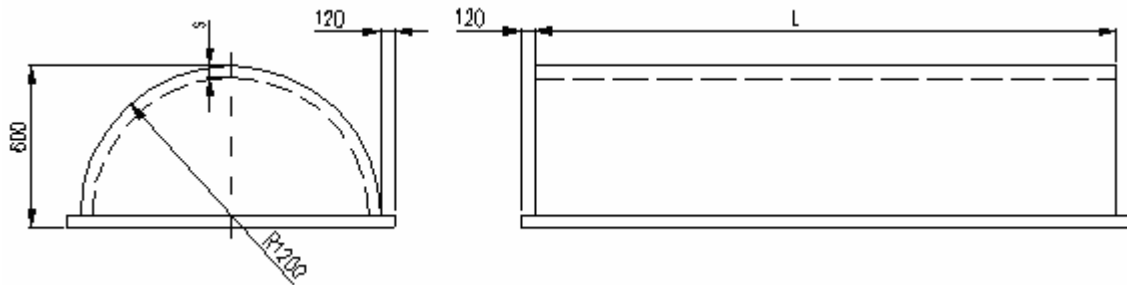
Jednotlivé kryty jsou kladeny vedle sebe a spojeny šrouby. Kratší strana krytu je potom přišroubována k okraji nádrže. Počet krytů záleží na délce nádrže.



Obr.32. Ukázka pokládání krytů

4.2.1 Parametry krytů

Abychom mohly sledovat změny mechanického chování v závislosti na parametrech krytů, budeme porovnávat kryty se třemi různými tloušťkami a délkami. Tloušťky odpovídají třem použitým laminátům, a to $s_1 = 4\text{mm}$, $s_2 = 5,5\text{mm}$ a $s_3 = 7\text{mm}$. Délky krytů (šířka nádrže) jsme zvolili $L_1 = 6\text{m}$, $L_2 = 12\text{m}$ a $L_3 = 18\text{m}$.

Základní rozměry přímého krytu*Obr.33. Základní rozměry přímého krytu*

$$s_1 = 4 \text{ mm}$$

$$L_1 = 6000 \text{ mm}$$

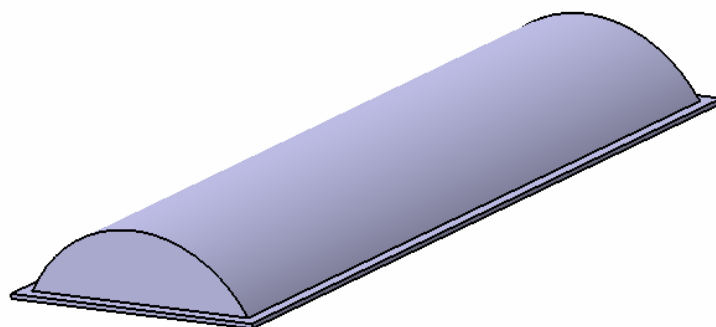
$$s_2 = 5,5 \text{ mm}$$

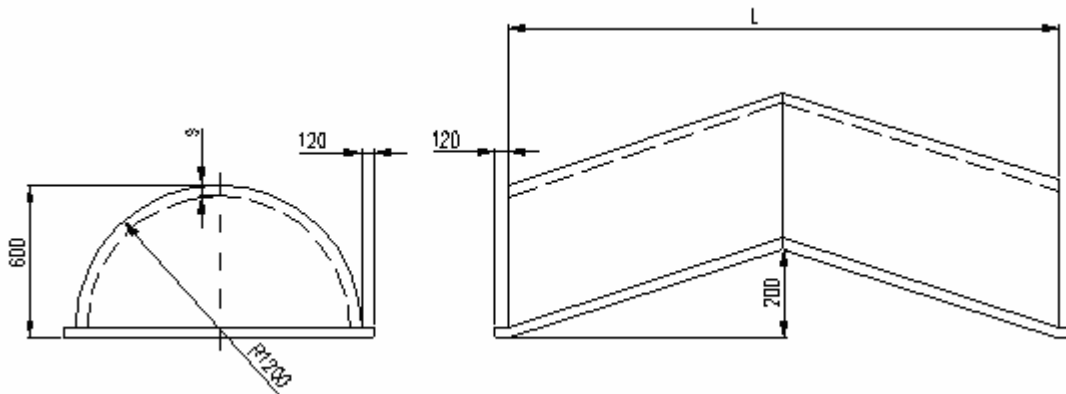
$$L_2 = 12\,000 \text{ mm}$$

$$s_3 = 7 \text{ mm}$$

$$L_3 = 18\,000 \text{ mm}$$

Poloměr zaoblení, výšku krytu a zkosení je zvolené podle skutečných rozměrů krytů, které se používají v praxi.

*Obr.34. 3D pohled přímého krytu*

Základní rozměry lomeného krytu*Obr.35. Základní rozměry lomeného krytu*

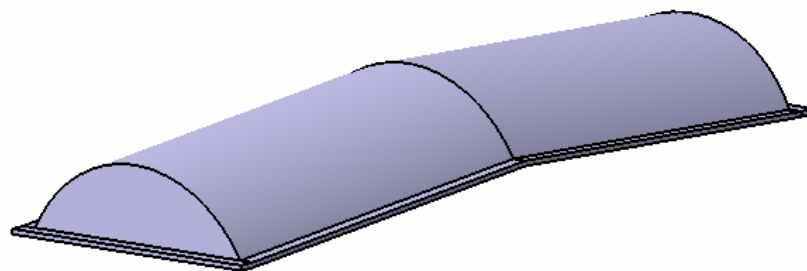
$$s_1 = 4 \text{ mm}$$

$$L_1 = 6000 \text{ mm}$$

$$s_2 = 5,5 \text{ mm}$$

$$L_2 = 12\,000 \text{ mm}$$

Na některých nádržích bývají použity také kryty, které mají určité zkosení sloužící např. pro lepší odtok vody. Abychom posoudily jaký vliv má zkosení na mechanické vlastnosti, bude provedena také analýza lomených krytů vyrobených z laminátu tloušťky 5,5 mm a výsledky budou porovnány s výsledky přímých krytů.

*Obr.36. 3D pohled lomeného krytu*

5 NAPĚŤOVĚ – DEFORMAČNÍ ANALÝZA

V této kapitole se budeme zabývat napětově – deformační analýzou navržených modelů laminátových krytů pomocí programu COSMOS GeoStar 2.5.

Jednotlivé modely krytů jsme zatěžovaly nejprve ve směru na ně kolmém, což představuje např. sníh působící na kryt. Druhé zatížení, ve směru normály, představuje působení větru.

Základní parametry, které se v programu použily jsou: zvolené tloušťky a délky modelů, modul pružnosti jednotlivých struktur laminátu a Poissonova konstanta, která je pro všechny modely stejná, a to $\nu = 0,28$.

U modelů krytů sledujeme tři základní mechanické vlastnosti, které se mění v závislosti na odlišných geometrických parametrech a způsobech zatížení:

- a) **pevnost** – únosnost (kontrola napětí)
- b) **deformace**
- c) **stabilita** – bezpečnost.

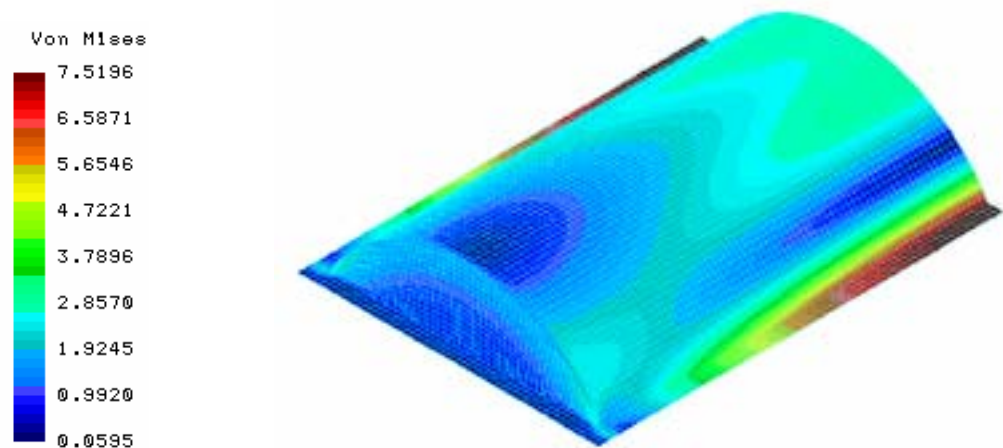
Okrajové podmínky simulují skutečnost, že model je součástí určitého celku. Zadané zatížení představuje namáhání krytů v provozu. Velikost zatížení působícího na kryt je 1000 Pa/m^2 .

Protože jsou modely symetrické, budeme v programu COSMOS GeoStar pracovat pouze s jednou polovinou symetrie.

5.1 Napětově – deformační analýza přímých krytů délky 6 metrů

Na následujících obrázcích je vidět velikost napětí, deformace a stability krytů vyrobených z laminátu tloušťky 5,5 mm.

5.1.1 Napětí



$$\sigma = 7,519 \text{ MPa}$$

5.1.2 Deformace

měřítko 2 : 1



$$\delta_{\max} = 22,76 \text{ mm}$$

5.1.3 Stabilita



$$b = 2,236$$

5.1.4 Přehled výsledků

Hodnoty napětí, deformace a stability pro jednotlivé tloušťky krytů délky 6 metrů jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab.4. Přehled výsledků krytů délky 6 metrů.

Označení krytu	Napětí [MPa]	Deformace [mm]	Stabilita + [1]	Stabilita – [1]
4_6000_Y	11,353	63,22	0,6589	-0,60297
4_6000_4	10,809	76,53	0,6268	-0,63076
5,5_6000_Y	7,5196	22,76	2,238	-2,566
5,5_6000_4	6,832	26,08	2,136	-2,809
7_6000_Y	5,5863	13,82	4,502	-5,801
7_6000_4	4,9211	15,04	4,311	-6,545

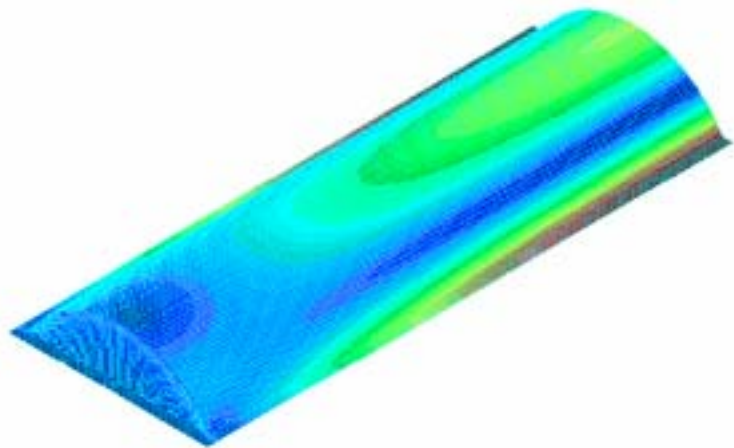
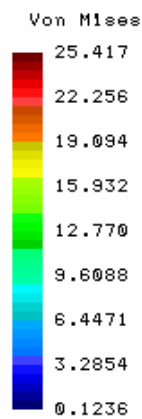
Y ... zatížení ve směru kolmém

4 ... zatížení ve směru normály

5.2 Napětově - deformační analýza přímých krytů délky 12 metrů

Na následujících obrázcích je vidět velikost napětí, deformace a stability krytů vyrobených z laminátu tloušťky 5,5 mm.

5.2.1 Napětí



$$\sigma = 25,417 \text{ MPa}$$

5.2.2 Deformace

měřítko 3,5 :1



$$\delta_{\max} = 160,52 \text{ mm}$$

5.2.3 Stabilita



$$b = 0,999$$

5.2.4 Přehled výsledků

Hodnoty napětí, deformace a stability pro jednotlivé tloušťky krytů délky 12 metrů jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab.5. Přehled výsledků krytů délky 12 metrů.

Označení krytu	Napětí [MPa]	Deformace [mm]	Stabilita + [1]	Stabilita – [1]
4_12000_Y	35,305	363,7	0,292	-0,19225
4_12000_4	29,419	334,7	0,30273	-0,2301
5,5_12000_Y	25,417	160,52	0,999	-0,754
5,5_12000_4	21,039	141,117	0,981	-0,909
7_12000_Y	19,913	115,26	1,954	-1,613
7_12000_4	16,452	99,05	1,918	-1,947

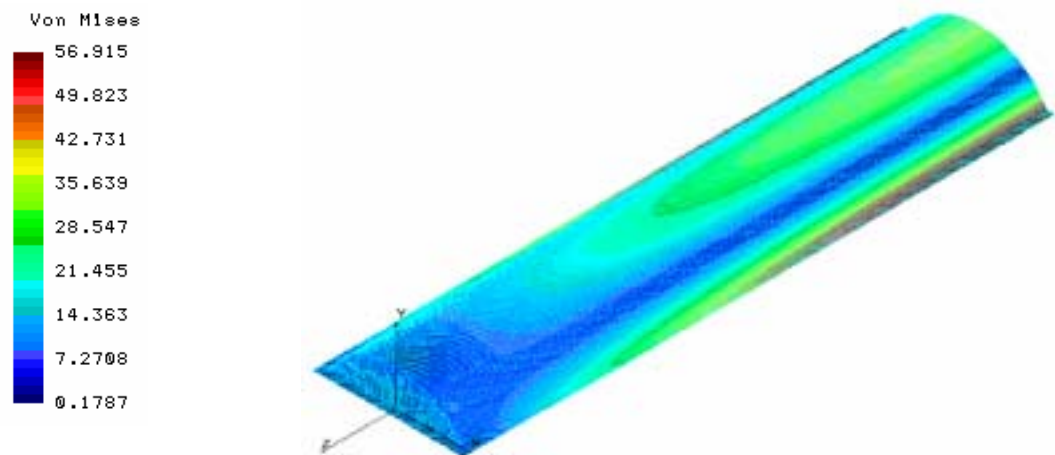
Y ... zatížení ve směru kolmém

4 ... zatížení ve směru normály

5.3 Napětově – deformační analýza přímých krytů délky 18 metrů

Na následujících obrázcích je vidět velikost napětí, deformace a stability krytů vyrobených z laminátu tloušťky 5,5 mm.

5.3.1 Napětí



$$\sigma = 56,915 \text{ MPa}$$

5.3.2 Deformace

měřítko 1,5 :1



$$\delta_{\max} = 737,9 \text{ mm}$$

5.3.3 Stabilita



$$b = 0,597$$

5.3.4 Přehled výsledků

Hodnoty napětí, deformace a stability pro jednotlivé tloušťky krytů délky 18 metrů jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab.6. Přehled výsledků krytů délky 18 metrů.

Označení krytu	Napětí [MPa]	Deformace [mm]	Stabilita + [1]	Stabilita – [1]
4_18000_Y	78,204	1564,11	0,2106	-0,0867
4_18000_4	64,600	1324,85	0,2066	-0,1048
5,5_18000_Y	56,915	737,9	0,597	-0,3357
5,5_18000_4	47,032	618	0,7214	-0,4058
7_18000_Y	44,744	546,5	1,003	-0,7164
7_18000_4	36,986	455,4	1,212	-0,866

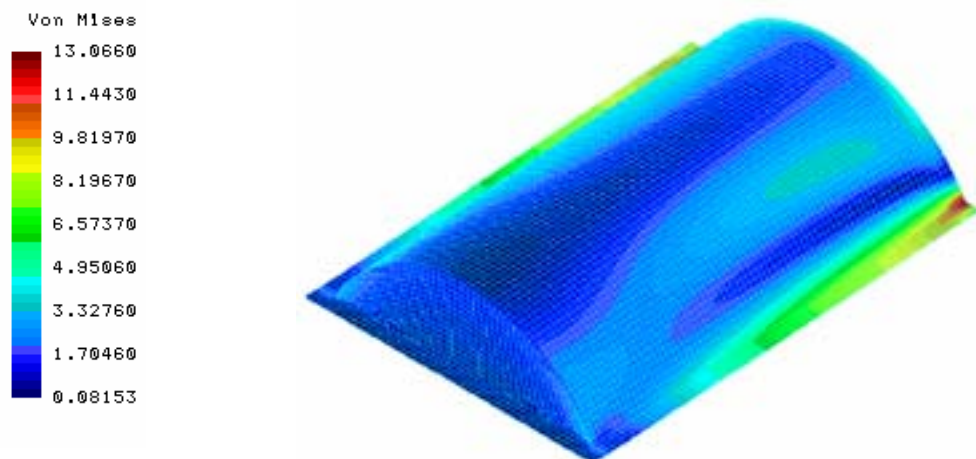
Y ... zatížení ve směru kolmém

4 ... zatížení ve směru normály

5.4 Napětově – deformační analýza lomených krytů délky 6 metrů

Na následujících obrázcích je vidět velikost napětí, deformace a stability lomených krytů vyrobených z laminátu tloušťky 5,5 mm.

5.4.1 Napětí



$$\sigma = 13,066 \text{ MPa}$$

5.4.2 Deformace

měřítko 10 : 1



$$\delta_{\max} = 24,757 \text{ mm}$$

5.4.3 Stabilita



$$b = 3,5897$$

5.4.4 Přehled výsledků

Hodnoty napětí, deformace a stability pro jednotlivé tloušťky lomených krytů jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab.7. Přehled výsledků lomených krytů délky 6 metrů.

Označení krytu	Napětí [MPa]	Deformace [mm]	Stabilita + [1]	Stabilita – [1]
5,5_6000_YS	13,066	24,757	3,5897	-2,0842
5,5_6000_4S	11,01	24,66	3,56	-2,31966
5,5_12000_YS	34,815	185,9	1,4727	-0,6366
5,5_12000_4S	28,417	161,81	1,462	-0,757

Y ... zatížení ve směru kolmém

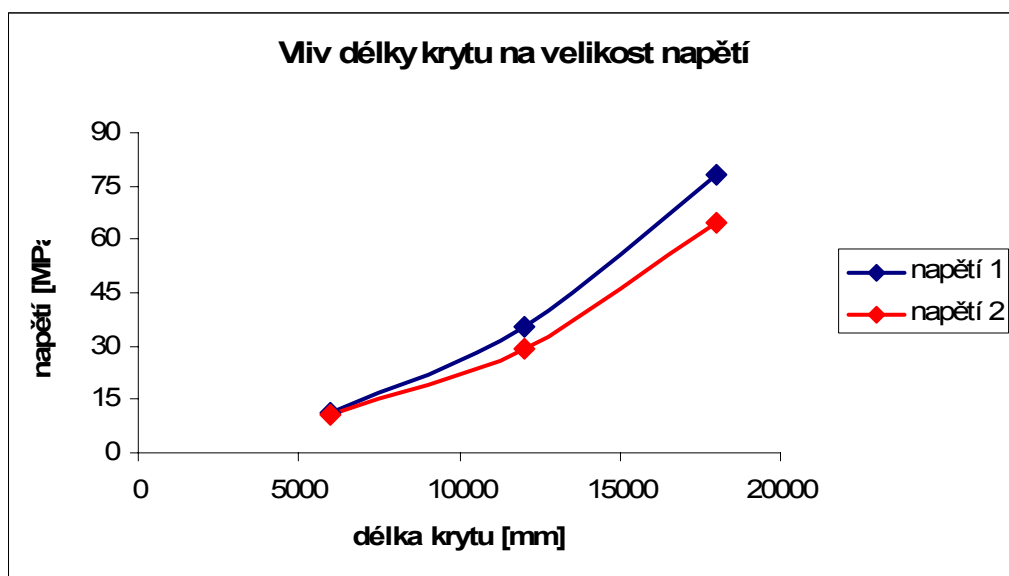
4 ... zatížení ve směru normály

6 STUDIUM MECHANICKÉHO CHOVÁNÍ KRYTŮ

V této kapitole se budeme zabývat sledováním mechanického chování navržených modelů laminátových krytů v závislosti na jejich rozdílných geometrických parametrech. Budou zpracovány hodnoty, které byly získány z napěťově – deformační analýzy.

6.1 Mechanické chování krytů tloušťky 4 mm

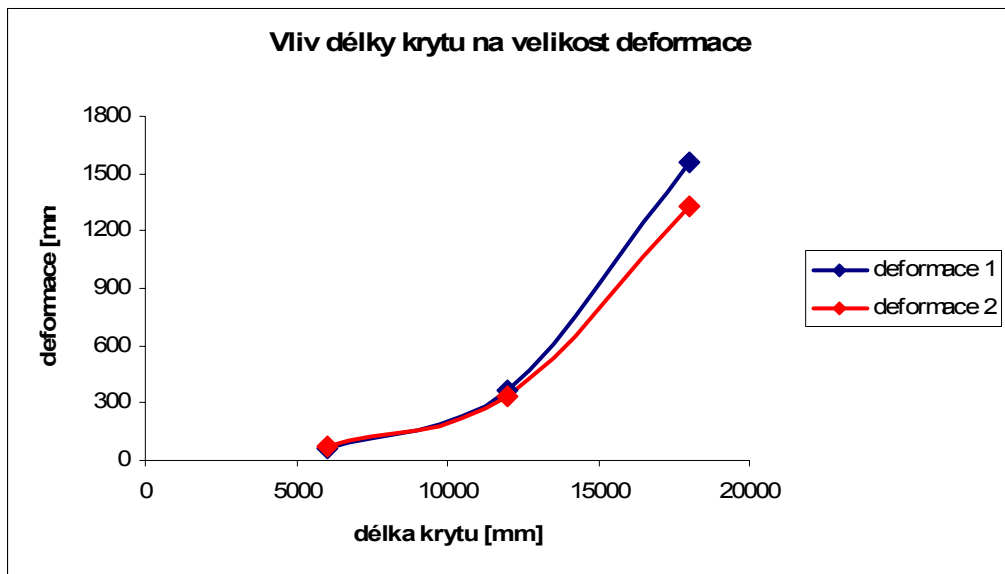
Na následujících grafech lze vidět rozdíl v napětí, deformaci a stabilitě u krytů tloušťky 4 mm v závislosti na různých délkách krytu.



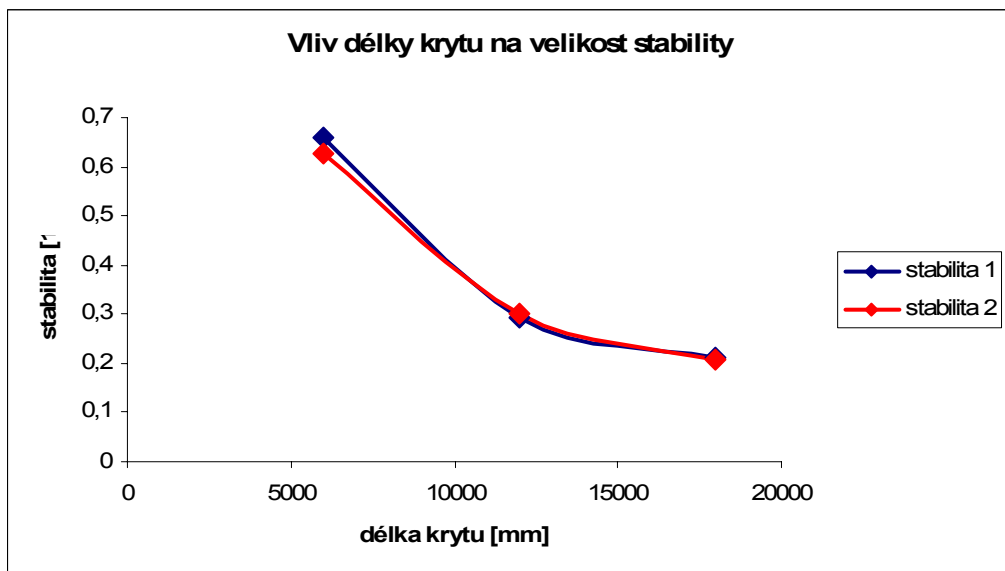
Napětí (deformace, stabilita) 1 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu v kolmém směru.

Napětí (deformace, stabilita) 2 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu ve směru normály.

Se vzrůstající délkou dochází uvnitř krytu k pozvolnému stoupaní napětí.



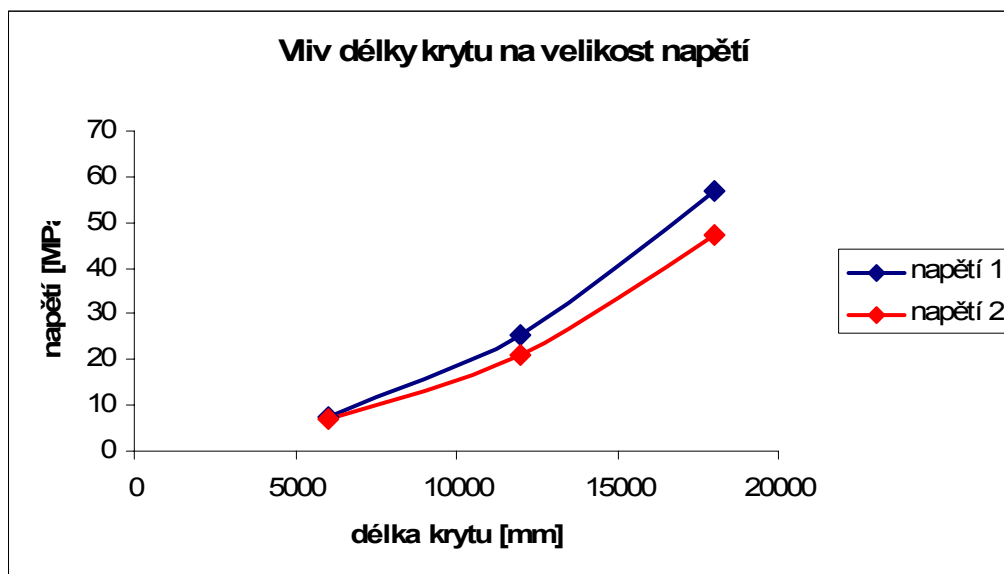
Se vzrůstající délkou dochází k výraznému růstu deformace krytu. Při délce 12 metrů je deformace krytu již větší, jako polovina jeho výšky.



U laminátu tloušťky 4 mm, je stabilita i při nejkratší délce krytu 6 metrů příliš malá, $b < 1$ a se vzrůstající délkou její hodnota ještě více klesá.

6.2 Mechanické chování krytů tloušťky 5,5 mm

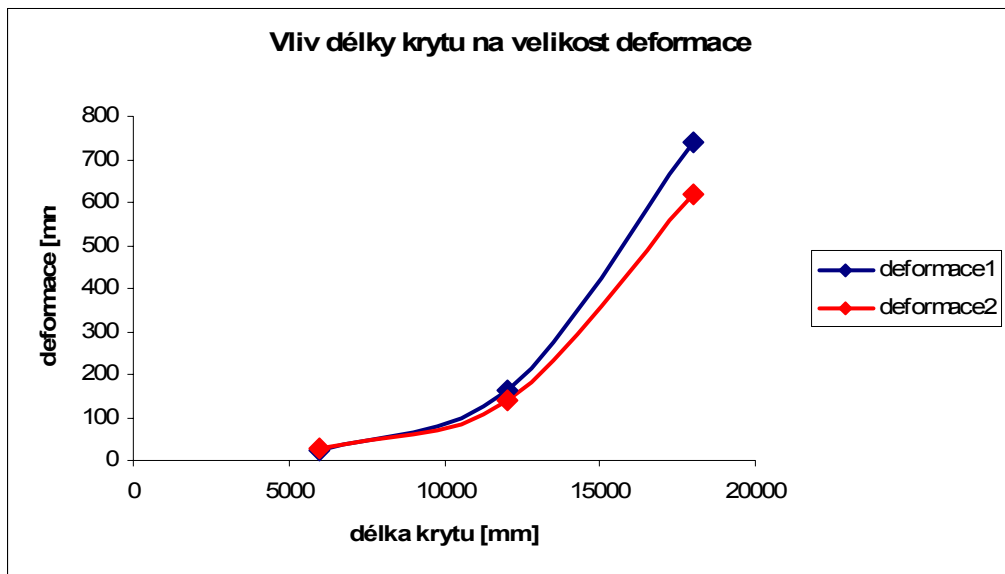
Na následujících grafech lze vidět rozdíl v napětí, deformaci a stabilitě u krytů tloušťky 5,5 mm v závislosti na různých délkách krytu.



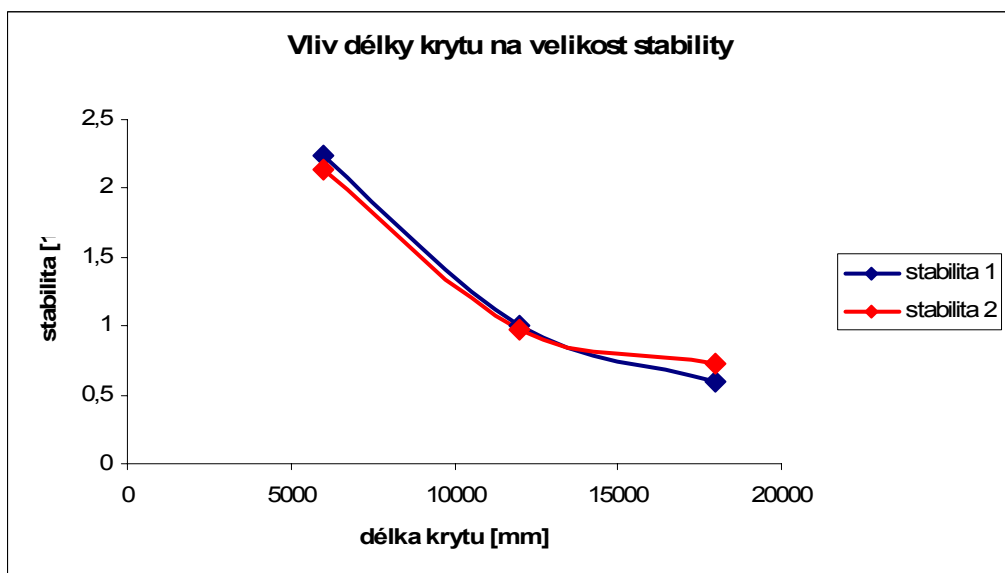
Napětí (deformace, stabilita) 1 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu v kolmém směru.

Napětí (deformace, stabilita) 2 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu ve směru normály.

Se vzrůstající délkou krytu dochází ke vzrůstu napětí. U délky 6 metrů se napětí tloušťky 5,5 mm i tloušťky 4 mm pohybuje v okolí hodnoty 10 MPa a jejich rozdíl není příliš výrazný. U délek 12 a 18 metrů jsou však rozdíly napětí těchto dvou tloušťek již výraznější.



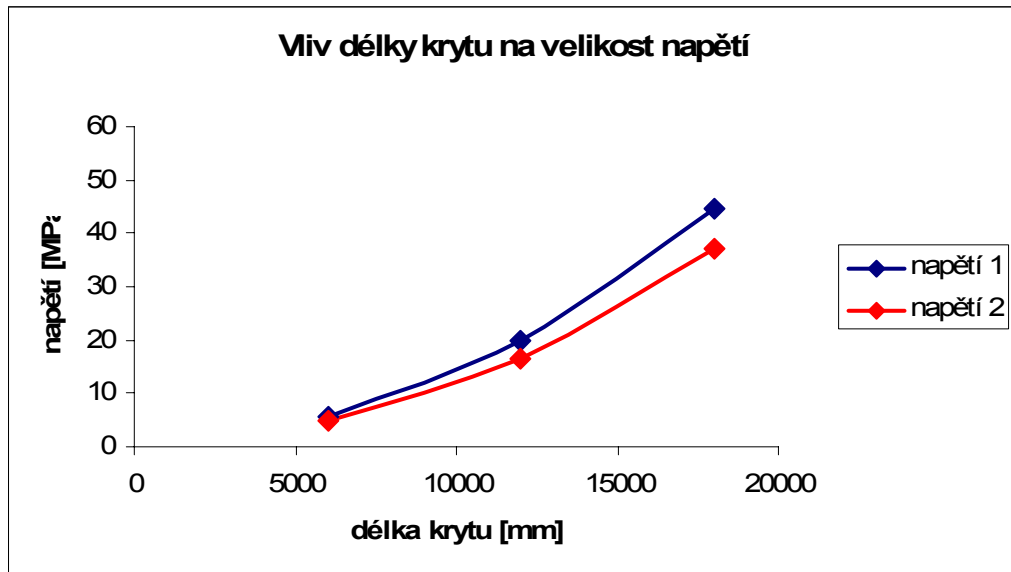
Se vzrůstající délkou dochází k výraznému růstu deformace krytu. Při délce 12 metrů se deformace krytu blíží k 1/3 jeho výšky a při délce 18 metrů je již větší jako jeho celá výška.



Stabilita se vzrůstající délkou klesá. Při délce 6 metrů je stabilita $b > 2$. V délce 12 metrů je však již těsně pod hranicí hodnoty 1.

6.3 Mechanické chování krytů tloušťky 7 mm

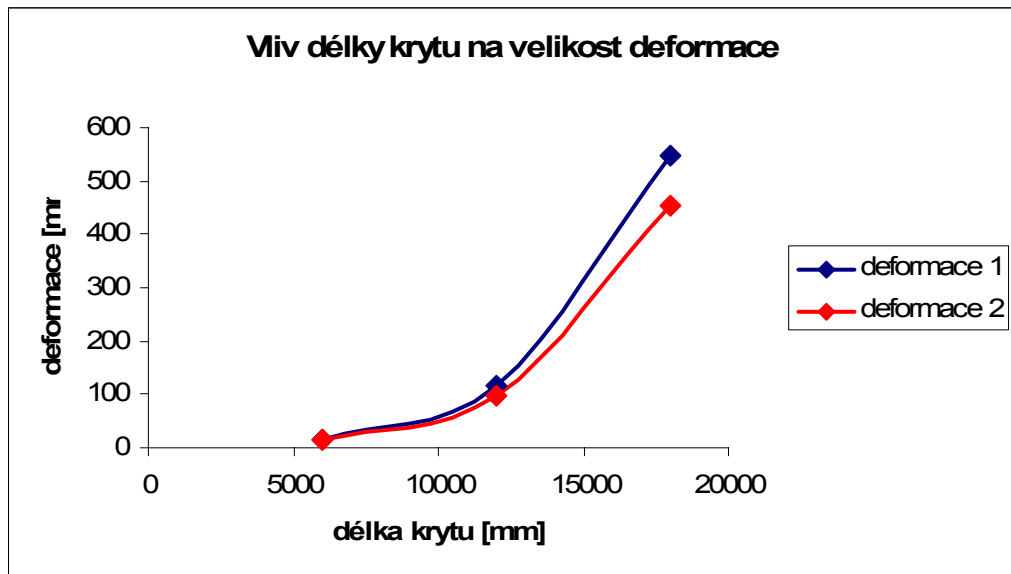
Na následujících grafech lze vidět rozdíl v napětí, deformaci a stabilitě u krytů tloušťky 7 mm v závislosti na různých délkách krytu.



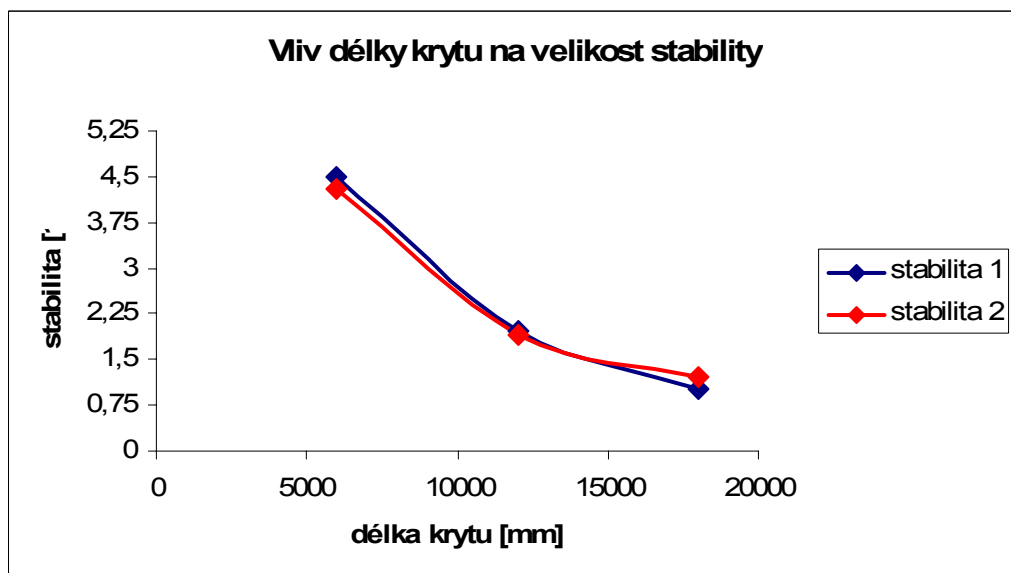
Napětí (deformace, stabilita) 1 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu v kolmém směru.

Napětí (deformace, stabilita) 2 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu ve směru normály.

Se vzrůstající délkou dochází u krytů k pozvolnému stoupaní napětí. Hodnoty napětí jsou ve srovnání s ostatními tloušťkami nejmenší.



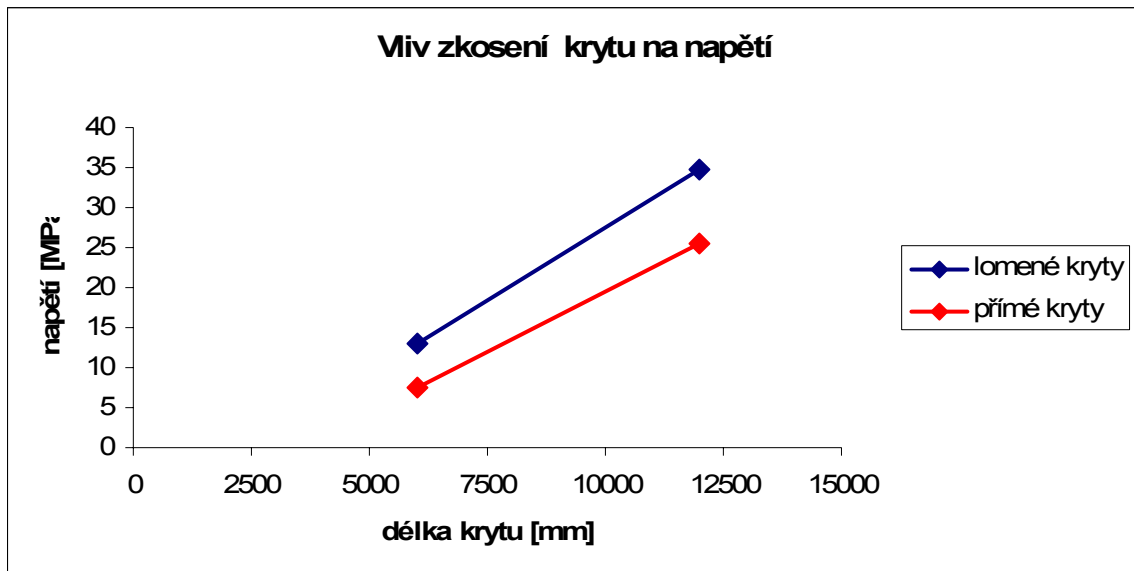
Se vzrůstající délkou dochází ke vzrůstu deformace. Do délky 12 metrů je stoupání pozvolné, ale při délce krytu 18 metrů dosahuje deformace hodnot a okolo 500mm, což je skoro celá výška krytu.



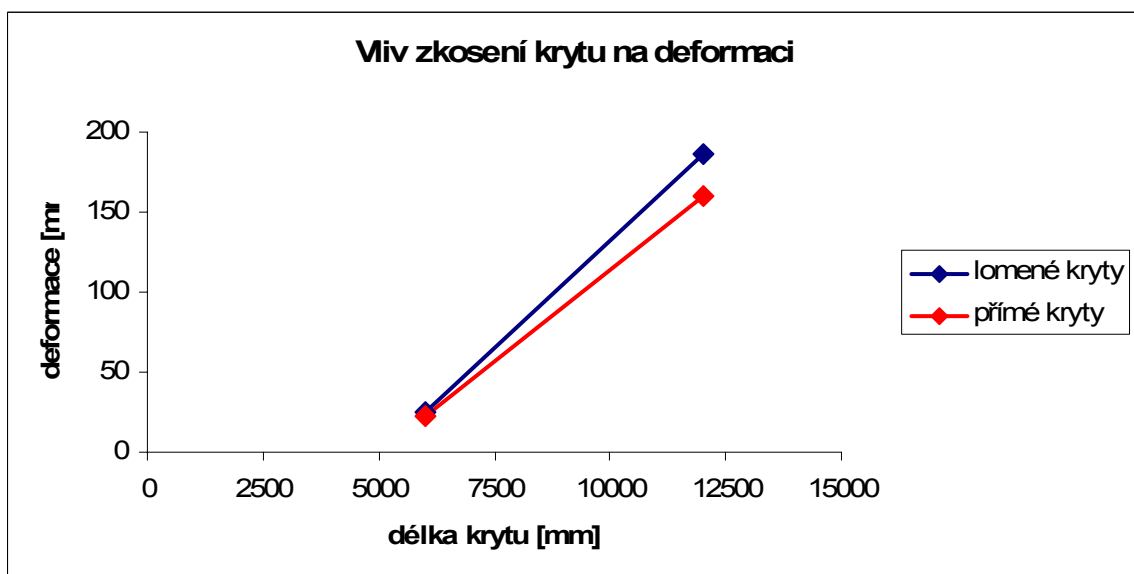
Stabilita se vzrůstající délkou klesá. Při délce 6 metrů je stabilita $b > 4$. Při délce 12 metrů klesla stabilita na hodnotu blížíci se 2, a při délce 18 metrů je stabilita pouze v okolí hodnoty 1.

6.4 Porovnání přímých a lomených krytů tloušťky 5,5 mm

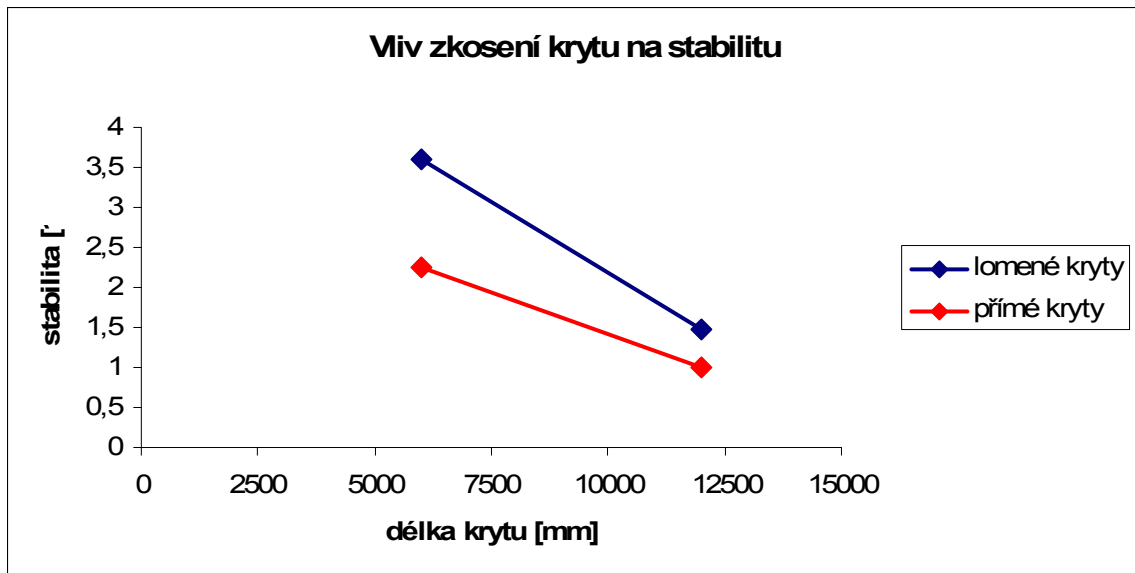
Porovnání se provádí u krytů namáhaných v kolmém směru.



Při délce 6 metrů je napětí u přímého krytu téměř o polovinu menší jako u krytu lomeného. Při délce 12 metrů se však rozdíl hodnot začíná zmenšovat.



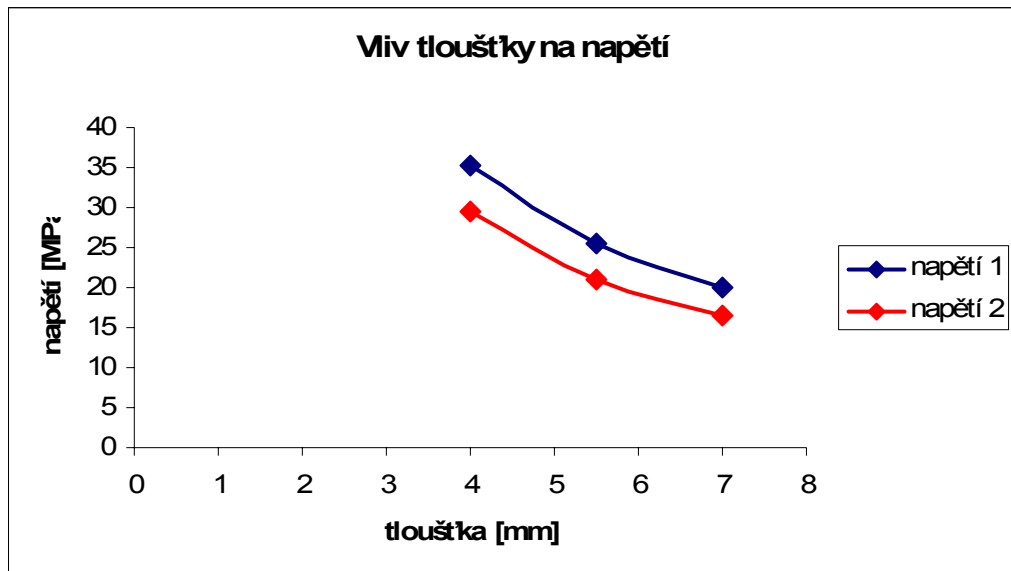
Deformace u krytů délky 6 metrů je téměř stejná, liší se pouze o necelé 2 mm. Se vzrůstající délkou však dochází i k růstu rozdílu deformace mezi lomeným a přímým krytem.



Lomené kryty mají větší stabilitu jako kryty přímé. Se vzrůstající délkou klesá jak stabilita krytů, tak i rozdíl hodnot mezi přímými a lomenými kryty. Při délce 12 metrů je stabilita přímého krytu $b < 1$.

6.5 Souhrnné zhodnocení mechanického chování krytů

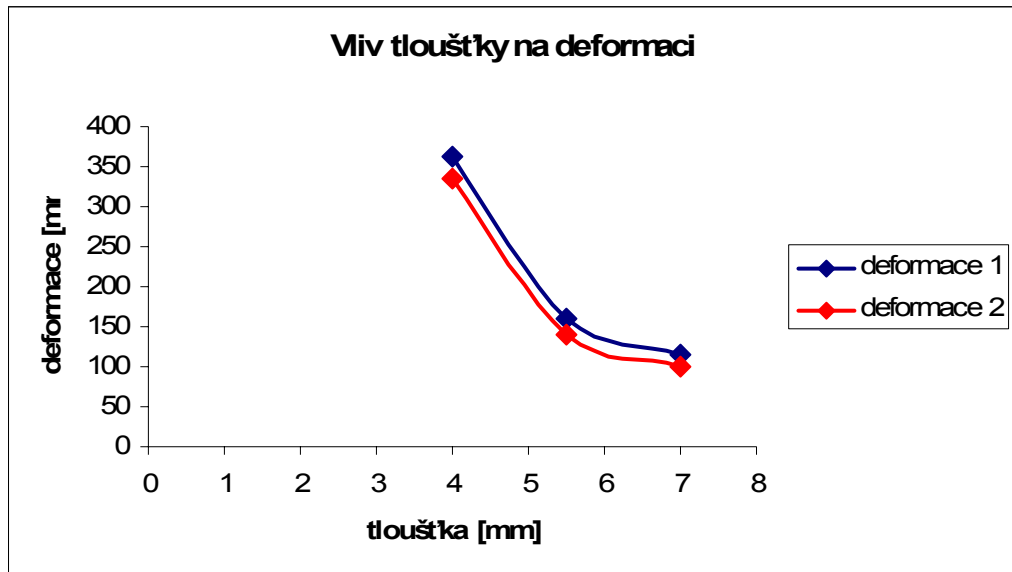
Celkové porovnání krytů bylo provedeno pro délku 12 metrů.



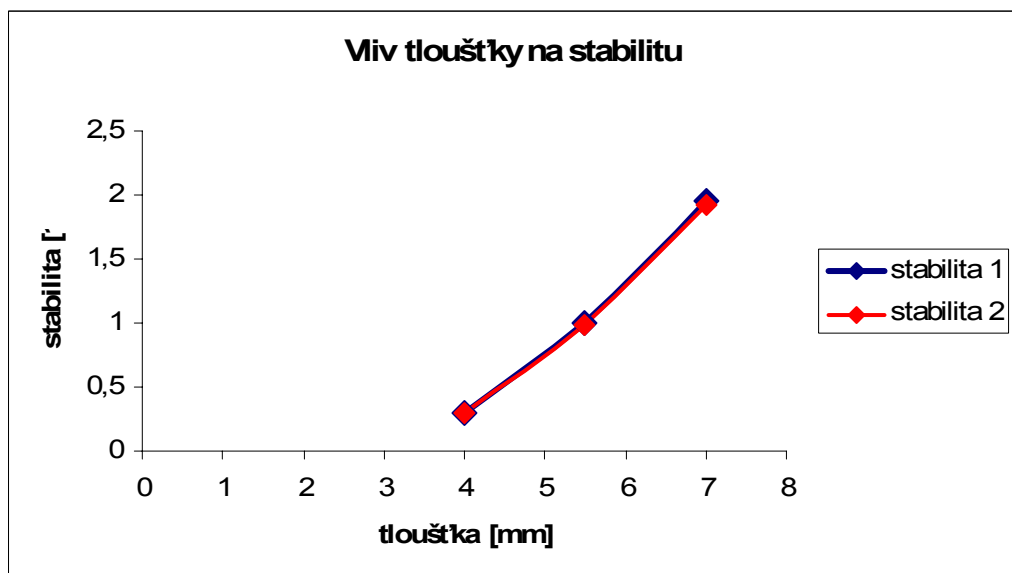
Napětí (deformace, stabilita) 1 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu v kolmém směru.

Napětí (deformace, stabilita) 2 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu ve směru normály.

Pokud se zaměříme pouze na tloušťku laminátu zjistíme, že se vzrůstající tloušťkou napětí uvnitř laminátu pozvolna klesá.



Se vzrůstající tloušťkou laminátu dochází k poklesu deformace krytu. Po tloušťku 5,5 mm je pokles prudký - kryt tloušťky 4 mm má téměř dvojnásobnou deformaci jako kryt tloušťky 5,5 mm. Se zvětšující se tloušťkou je pak pokles již mírnější.

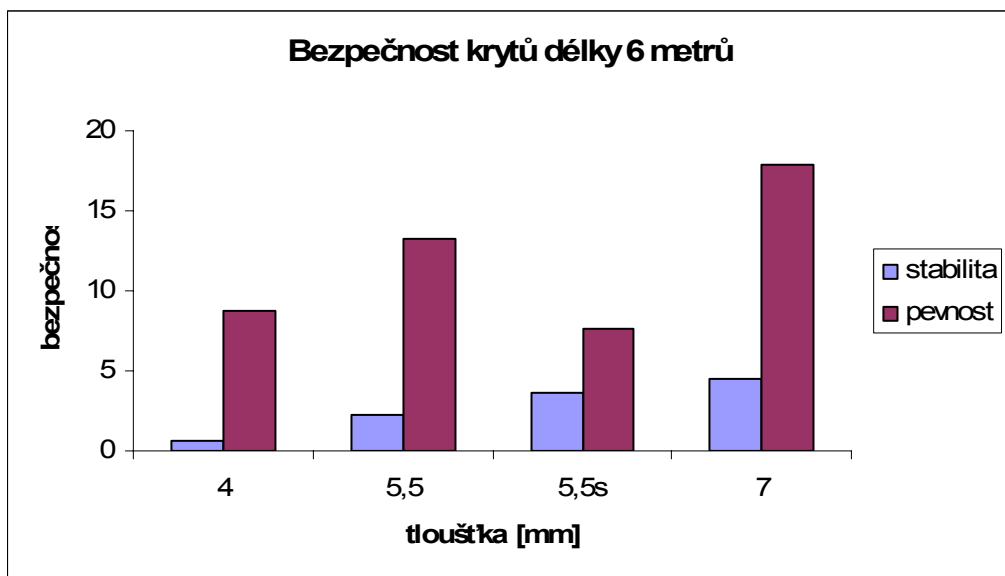


Stabilita se vzrůstající tloušťkou stoupá. Je to dáno ohybovou tuhostí, kdy se vzrůstající tloušťkou roste stabilita s třetí mocninou.

6.6 Bezpečnost krytů

U krytů je důležitá také bezpečnost. Zaměřili jsem se na kontrolu pevnosti a také stability, která je vlastně sama bezpečností.

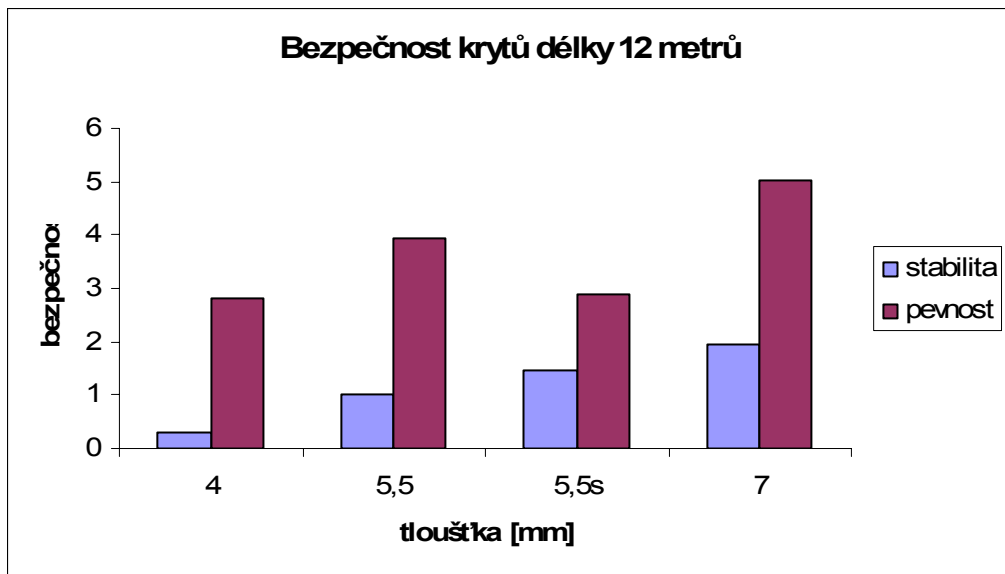
6.6.1 Bezpečnost krytů délky 6 metrů



Jak je vidět z grafu, je pevnost laminátu při délce krytů 6 metrů nevyužita. U tloušťky 7 mm dosahuje bezpečnost pevnosti blízko k hodnotě 20.

Stabilita vyhovuje pouze u tloušťky 5 mm a to přímého i lomeného krytu a tloušťky 7 mm. U krytů z laminátu tloušťky 4 mm nedosahuje stabilita ani hodnoty 1, čili zde žádná bezpečnost není, a proto je tato tloušťka nevyhovující.

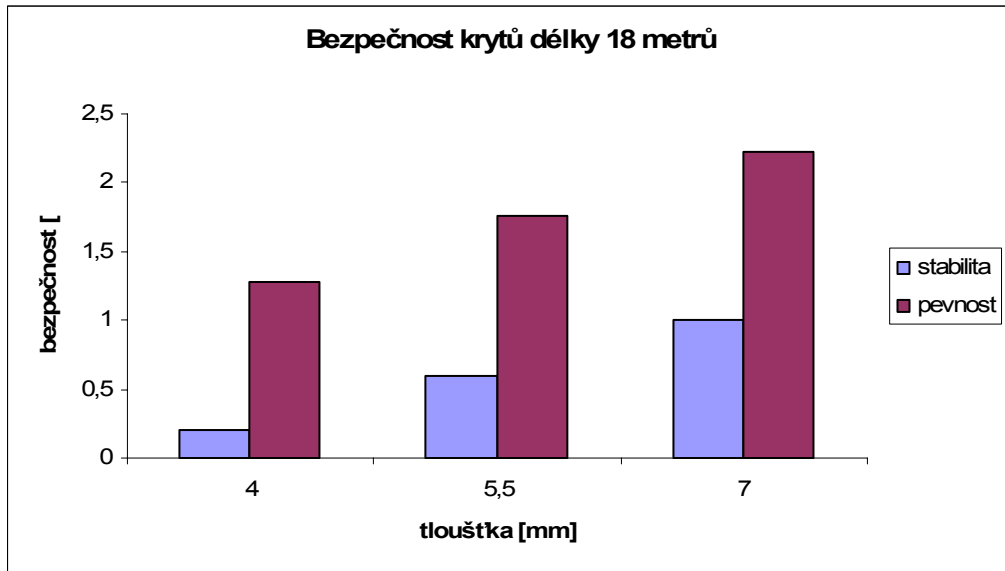
6.6.2 Bezpečnost krytů délky 12 metrů



U krytů délky 12 metrů je bezpečnost pevnosti opět dostačující, i když hodnoty jsou oproti předchozímu případu menší.

Poklesly také hodnoty stability u jednotlivých tloušťek. Stejně jako předtím, má tloušťka 4 mm stabilitu nedostačující. U tloušťky 5,5 mm je vidět, že u přímých krytů je stabilita na hranici hodnoty 1, kdežto u krytů lomených stabilita tuto hranici překračuje. Největší bezpečnost má opět kryt vyrobený z laminátu o tloušťce 7 mm.

6.6.3 Bezpečnost krytů délky 18 metrů



U krytů délky 18 metrů je bezpečnost pevnosti dostačující u všech tloušťek, ale hodnoty jsou proti krytům délky 12 metrů méně jak poloviční.

Poklesly také hodnoty stability u jednotlivých tloušťek. Vyhovující stabilitu má pouze kryt vyrobený z laminátu o tloušťce 7 mm, kdy $b > 1$. Kryty tloušťky 4 mm a 5,5 mm mají stabilitu nedostačující, tj. nezaručují žádnou bezpečnost..

7 DOPORUČENÍ PRO PRAKTICKÉ PROJEKTOVÁNÍ

Po provedení napět'ově – deformační analýzy a vyhodnocení výsledků bylo zjištěno, jakým způsobem se mění napětí, deformace a stabilita u krytů v závislosti na různých geometrických parametrech.

7.1 Kryty z laminátu tloušťky 4 mm

U laminátu tloušťky 4 mm jsme zjistily, že nemůže být použit ani na kryt délky 6 metrů, protože stabilita dosahovala velikosti pouze v okolí hodnoty 0,6 – kryt nezajišťoval žádnou bezpečnost.

Tato tloušťka by šla použít pouze u krytů s délkou do 4 metrů.

7.2 Kryty z laminátu tloušťky 5,5 mm

Laminát tloušťky 5,5 mm vyhovoval pouze u délky 6 metrů, kde napětí i deformace dosahovala malých hodnot a stabilita byla dostatečná.

Při délce 12 metrů již dochází k porušení stability a také deformace dosahují vysokých hodnot – téměř 1/3 výšky krytu.

U lomených krytů jsou hodnoty napětí i deformace větší jako u krytu přímého. Jediné co vychází lépe je stabilita. Tyto kryty by mohli být vyrobeny i v délce 12 metrů.

7.3 Kryty z laminátu tloušťky 7 mm

Laminát tloušťky 7 mm lze použít na délky 6 a 12 metrů. Při délce 6 metrů je u krytu dosaženo malého napětí i deformace a stabilita dosahuje hodnoty 4,5.

U délky 12 metrů sice stoupá deformace k hodnotám okolo 100 mm, ale stabilita je ještě stále větší jak 2. Pokud by tedy z estetického hlediska nevadila deformace krytu, lze laminát na tuto délku použít.

Při délce 18 metrů je již stabilita příliš nízká a deformace jsou velké téměř jak celá výška krytu.

ZÁVĚR

Lamináty jsou pro své výborné vlastnosti používány pro celou řadu výrobků a konstrukcí.

V diplomové práci jsme se zaměřili na laminátové kryty sloužící pro překrytí obdélníkových nádrží. Sestavili jsme několik modelů laminátových skořepinových krytů, které se lišili v některých parametrech, jako tloušťka, délka a zkosení.

Na navržených modelech byla následně provedena, v programu COSMOS GeoStar, napěťově – deformační analýza. Po vyhodnocení výsledků získaných z této analýzy bylo provedeno studium mechanického chování krytů v závislosti na geometrických parametrech a bylo stanoveno doporučení pro praktické projektování.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Termoplasty v praxi. Dostupný z WWW.
- [2] Polytex. Dostupný z WWW: <http://www-polytex.cz/>
- [3] HUGO, Jiří a kolektiv. Konstrukční plastické hmoty, jejich vlastnosti a využití ve strojírenství. SNTL, n.p., Praha, 1965.
- [4] ŠUBA, Oldřich. Dimenzování a navrhování výrobků z plastů. UTB, Zlín, 2005.
- [5] ŠEJNOHA, Jiří., BITTNAROVÁ, Jitka. Skořepiny, doplňkové skriptum. ČVUT, Praha 6, 1999.
- [6] ŠEJNOHA, Jiří., BITTNAROVÁ, Jitka. Stabilita skořepin, doplňkové skriptum. ČVUT, Praha, 1999.
- [7] ŠEJNOHA, Jiří., BITTNAROVÁ, Jitka. Pružnost a pevnost 10. ČVUT, Praha 6, 1996.
- [8] ŠEJNOHA, Jiří., BITTNAROVÁ, Jitka. Pružnost a pevnost 20. ČVUT, Praha 6, 1998.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	Konstanta závislá na materiálu [1].
σ	Normálové napětí [MPa].
τ	Smykové napětí [MPa].
ε	Normálová deformace [mm].
γ	Smyková deformace [mm].
E	Modul pružnosti v tahu [MPa].
G	Modul pružnosti v ohybu [MPa].
μ	Poissonova konstanta [1].
F	Zatěžující síla [N].
S	Průřez prvku [mm ²].
D	Tuhost v tahu [MPa].
σ_{Dov}	Dovolené normálové napětí [MPa].
χ	Poloha neutrální osy [mm].
π	Ludolfovo číslo [1].
λ	Štíhlost prutu [mm].
L [‘]	Vzpěrná délka [mm].
δ_{max}	Deformace [mm].
I	Moment setrvačnosti [mm].
M	Ohybový moment [Nmm].
W	Průřezový modul v ohybu [mm ³].
η	Vzdálenost těžiště vrstev od neutrální osy [mm].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma navíjení rovingu na jádro.....	19
Obr. 2. Závislost meze pevnosti v tahu a ohybu na teplotě.....	21
Obr. 3. Vliv skleněné výztuže na vlastnosti.....	22
Obr. 4. Vliv pryskyřice na mechanické vlastnosti skelných laminátů.....	23
Obr. 5. Vliv tloušťky tkaniny.....	24
Obr. 6. Závislost vlastností laminátu na směru působící síly.....	24
Obr. 7. Závislost modulu pružnosti skelných laminátů a pryskyřice bez plniva na teplotě.....	25
Obr. 8. Závislost modulu pružnosti na teplotě.....	26
Obr. 9. Křivky tečení skelných laminátů při namáhání v tahu.....	26
Obr. 10. Pokles pevnosti s časem při konstantním zatížení skleného laminátu při 25°C.....	27
Obr. 11. Namáhání vrstvy laminátu.....	28
Obr. 12. Příklady spojení kolmých laminátových stěn.....	29
Obr. 13. Vyztužení koutů.....	29
Obr. 14. Konstrukční spojení laminátových výrobků.....	30
Obr. 15. Konstrukční vyztužení laminátové stěny.....	30
Obr. 16. Spojování šrouby.....	31
Obr. 17. Základní souřadnicová soustava (x,y).....	33
Obr. 18. Jednoduchý prvek namáhaný na tah.....	34
Obr. 19. Složený prvek namáhaný na tah.....	36
Obr. 20. Závislost poměru na štíhlosti λ pro různé druhy materiálů.....	37
Obr. 21. Velikost vzpěrné délky L^c při různém způsobu uložení.....	39
Obr. 22. Stanovení tečného modulu pružnosti za mezí úměrnosti.....	40
Obr. 23. Ohyb jednoduchého nosníku.....	42

Obr. 24. Ohyb složeného nosníku.....	43
Obr. 25. Nahrazení složeného nosníku jednoduchým.....	44
Obr. 26. Příklad překrytí.....	46
Obr. 27. Kryty čistíren odpadních vod.....	47
Obr. 28. Struktura laminátu.....	50
Obr. 29. Struktura laminátu tloušťky 4 mm.....	51
Obr. 30. Struktura laminátu tloušťky 5,5 mm.....	52
Obr. 31. struktura laminátu tloušťky 7 mm.....	53
Obr. 32. Ukázka pokládání krytů.....	54
Obr. 33. Základní rozměry přímého krytu.....	55
Obr. 34. 3D pohled přímého krytu.....	55
Obr. 35. Základní rozměry lomeného krytu.....	56
Obr. 36. 3D pohled lomeného krytu.....	56

SEZNAM TABULEK

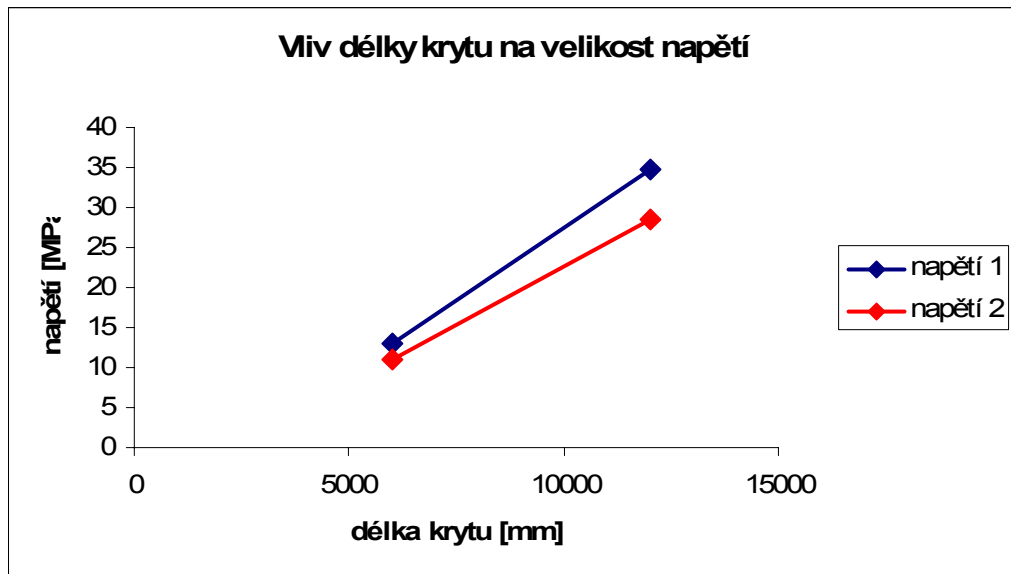
Tab. 1. Vlastnosti jednotlivých druhů skel.....	12
Tab. 2. Vybrané vlastnosti některých vyztužených vláken.....	13
Tab. 3. Porovnání nákladů a efektivnosti různých technologií výroby kompozitů.....	18
Tab. 4. Přehled výsledků krytů délky 6 metrů	59
Tab. 5. Přehled výsledků krytů délky 12 metrů.....	61
Tab. 6. Přehled výsledků krytů délky 18 metrů.....	63
Tab. 7. Přehled výsledků lomených krytů délky 6 metrů.....	65

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha I Lomené kryty tloušťky 5,5 mm
- Příloha II Porovnání přímých a lomených krytů
- Příloha III Celkové porovnání krytů délky 6 metrů
- Příloha IV Výsledky získané z programu COSMOS

PŘÍLOHA P I: LOMENÉ KRYTY TLOUŠŤKY 5,5 MM

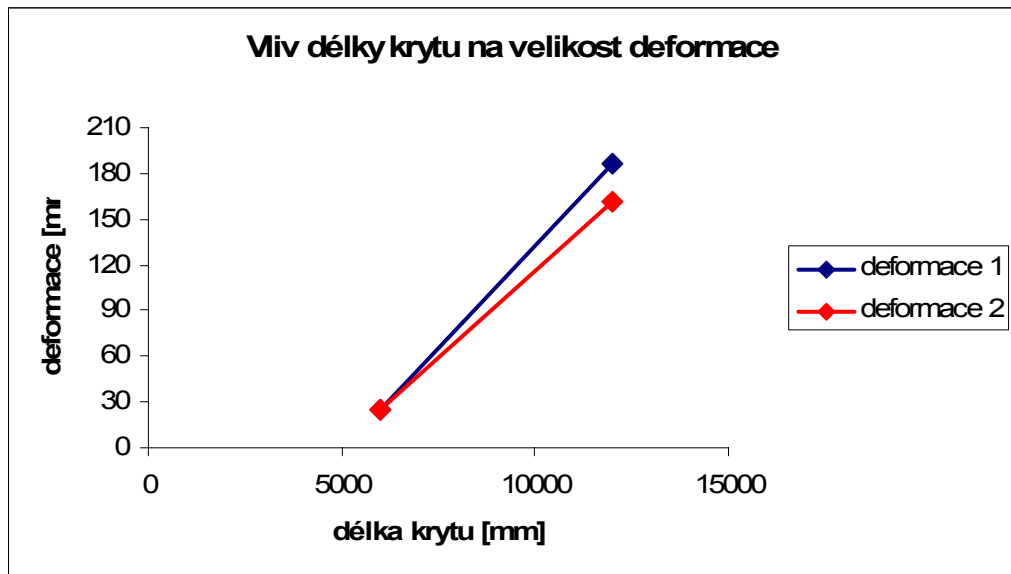
Na následujících grafech lze vidět rozdíl v napětí, deformaci a stabilitě u lomených krytů tloušťky 5,5 mm v závislosti na různých délkách krytu.



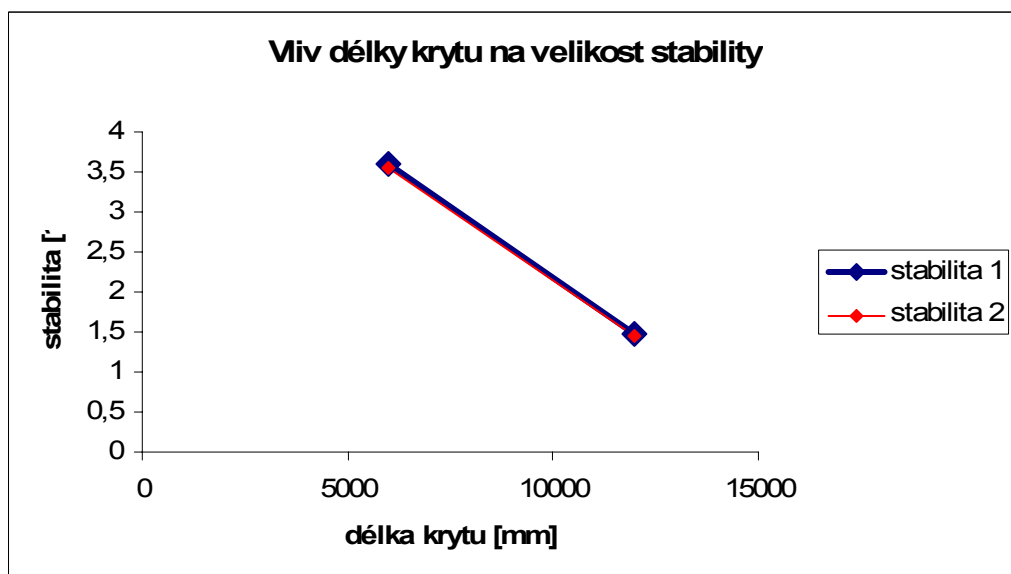
Napětí (deformace, stabilita)1 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu v kolmém směru.

Napětí (deformace, stabilita) 2 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu ve směru normály.

Se vzrůstající délkou vzrůstá i napětí v krytu.



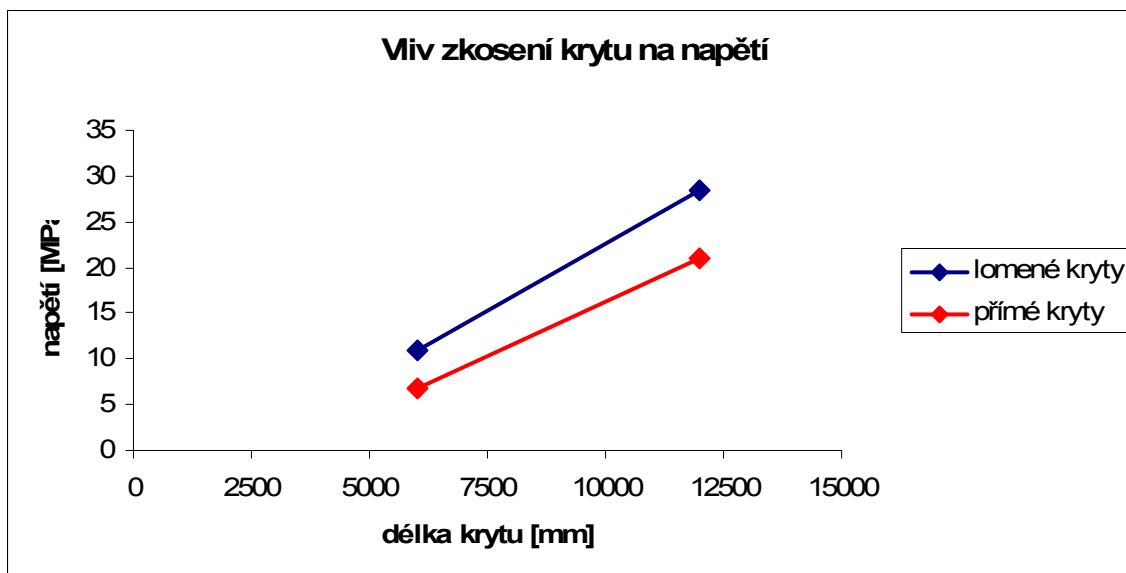
Se vzrůstající délkou dochází k výraznému vzrůstu deformace krytu.



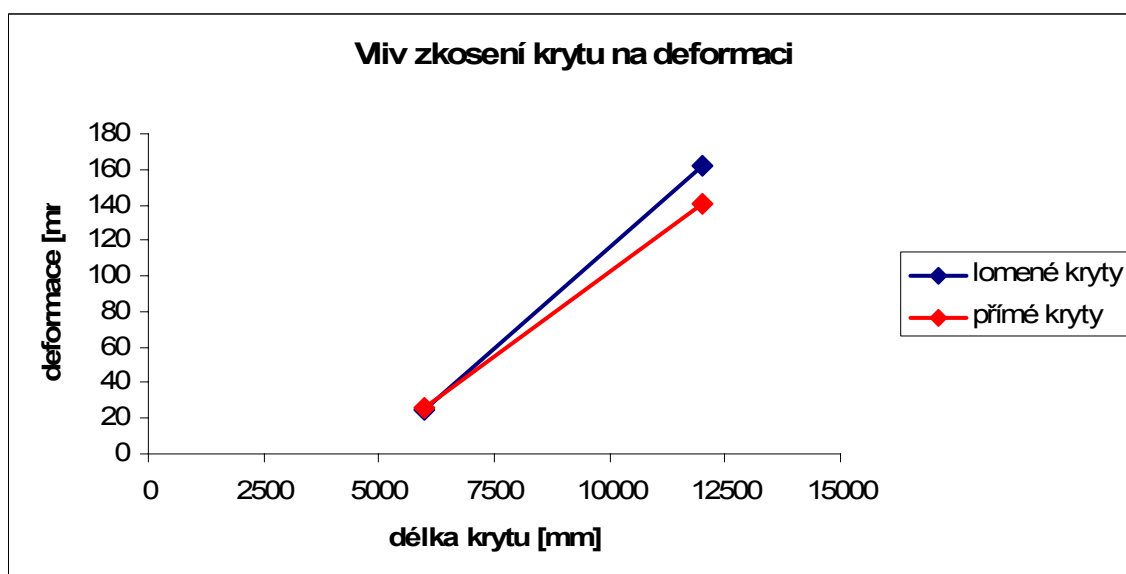
Se vzrůstající délkou dochází k výraznému poklesu stability.

PŘÍLOHA P II: POROVNÁNÍ PŘÍMÝCH A LOMENÝCH KRYTŮ

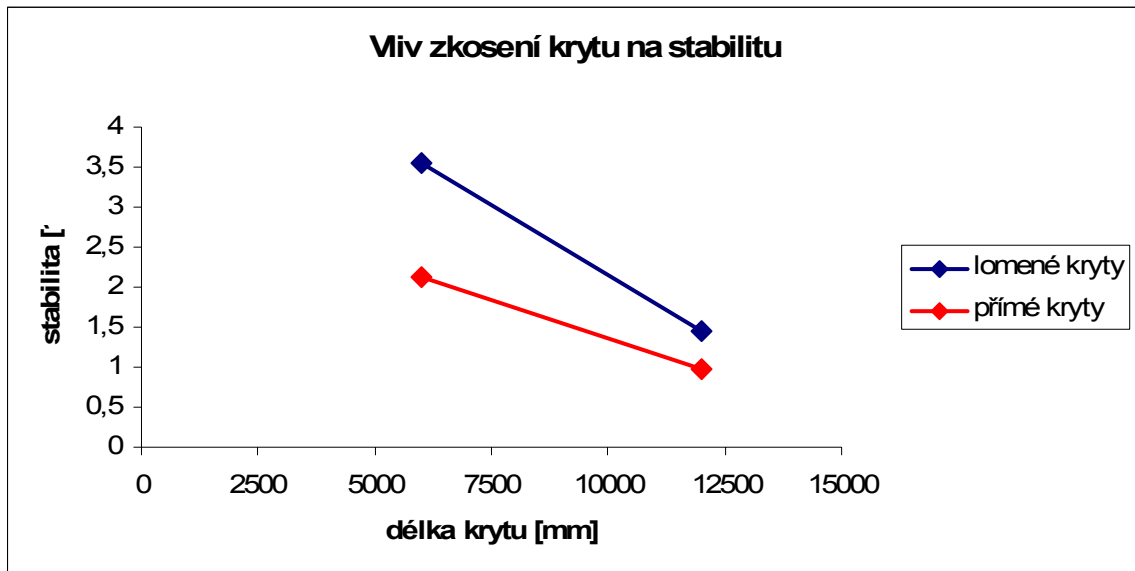
Porovnání se provádí u krytů namáhaných ve směru normály.



Při délce 6 metrů je napětí u přímého krytu téměř o polovinu menší jako u krytu lomeného. Při délce 12 metrů se však rozdíl hodnot začíná zmenšovat.

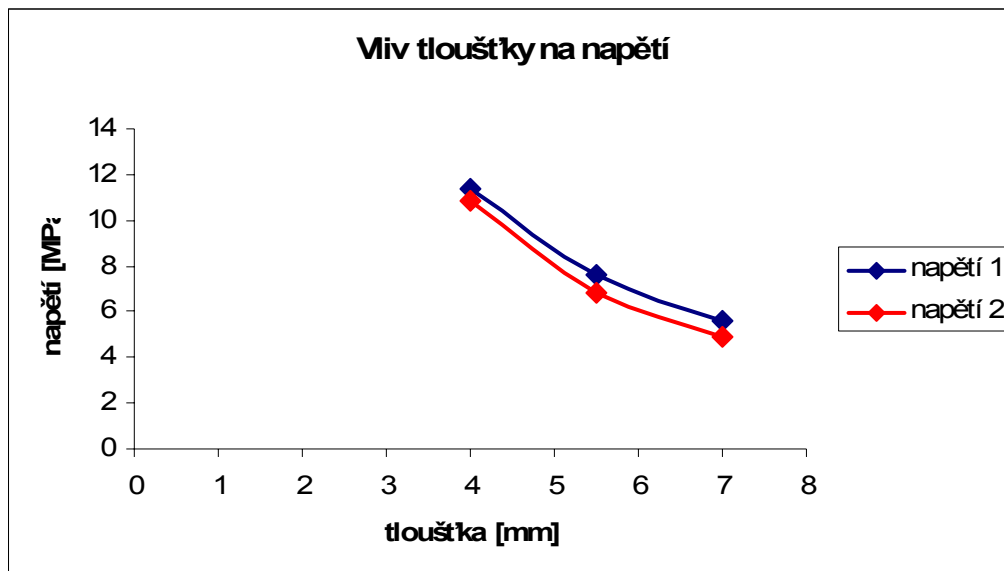


Deformace u krytů délky 6 metrů je jen nepatrně odlišná. Se vzrůstající délkou se však rozdíly deformace mezi lomeným a přímým krytem zvětšují.



Lomené kryty mají větší stabilitu jako kryty přímé. Se vzrůstající délkou klesá jak stabilita krytů, tak i rozdíl hodnot mezi přímými a lomenými kryty. Při délce 12 metrů je stabilita přímého krytu v blízkosti hodnoty 1.

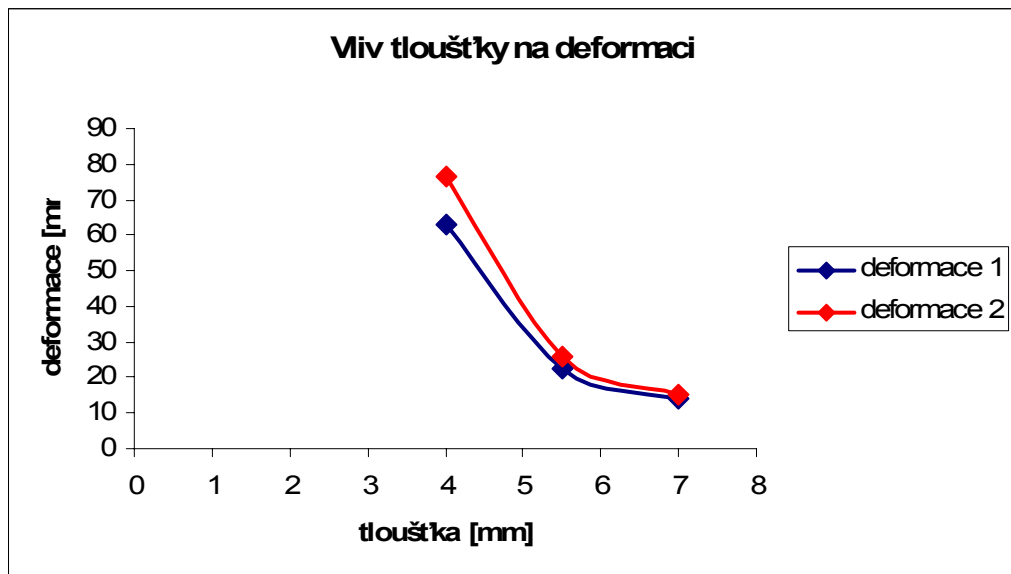
PŘÍLOHA P III: CELKOVÉ POROVNÁNÍ KRYTŮ DÉLKY 6 METRŮ



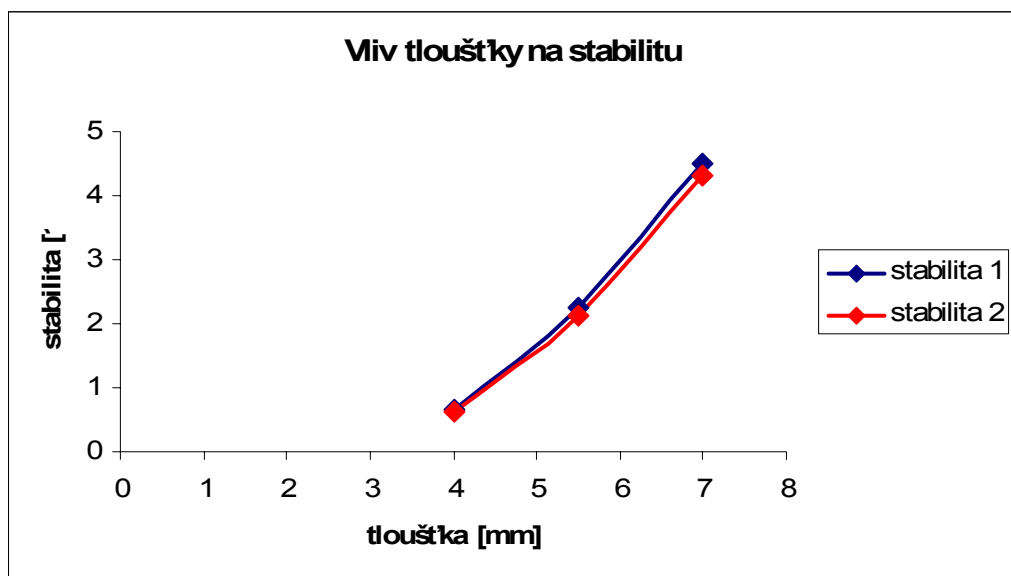
Napětí (deformace, stabilita) 1 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu v kolmém směru.

Napětí (deformace, stabilita) 2 - představuje napětí (deformaci, stabilitu) laminátu při zatěžování krytu ve směru normály.

Pokud se zaměříme pouze na tloušťku laminátu zjistíme, že se vzrůstající tloušťkou napětí uvnitř laminátu pozvolna klesá.



Se vzrůstající tloušťkou laminátu dochází k poklesu deformace krytu. Po tloušťku 5,5 mm je pokles prudký - kryt tloušťky 4 mm má více jak dvojnásobnou deformaci jako kryt tloušťky 5,5 mm. Se zvětšující se tloušťkou je pokles již mírnější.



Se vzrůstající tloušťkou dochází k výraznému vzrůstu stability.

PŘÍLOHA P IV: VÝSLEDKY ZÍSKANÉ Z PROGRAMU COSMOS

Označení krytu	Napětí [MPa]	Deformace [mm]	Stabilita + [1]	Stabilita – [1]
4_6000_Y	11,353	63,22	0,6589	-0,60297
4_6000_4	10,809	76,53	0,6268	-0,63076
4_12000_Y	35,305	363,7	0,292	-0,19225
4_12000_4	29,419	334,7	0,30273	-0,2301
4_18000_Y	78,204	1564,11	0,2106	-0,0867
4_18000_4	64,600	1324,85	0,2066	-0,1048
5,5_6000_Y	7,5196	22,76	2,238	-2,566
5,5_6000_4	6,832	26,08	2,136	-2,809
5,5_12000_Y	25,417	160,52	0,999	-0,754
5,5_12000_4	21,039	141,117	0,981	-0,909
5,5_18000_Y	56,915	737,9	0,597	-0,3357
5,5_18000_4	47,032	618	0,7214	-0,4058
7_6000_Y	5,5863	13,82	4,502	-5,801
7_6000_4	4,9211	15,04	4,311	-6,545
7_12000_Y	19,913	115,26	1,954	-1,613
7_12000_4	16,452	99,05	1,918	-1,947
7_18000_Y	44,744	546,5	1,003	-0,7164
7_18000_4	36,986	455,4	1,212	-0,866
5,5_6000_YS	13,066	24,757	3,5897	-2,0842
5,5_6000_4S	11,01	24,66	3,56	-2,31966
5,5_12000_YS	34,815	185,9	1,4727	-0,6366
5,5_12000_4S	28,417	161,81	1,462	-0,757