

Lisování uhlíkových kompozitů

Filip Motáň

2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip Motáň**
Osobní číslo: **T11272**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Lisování uhlíkových kompozitů**

Zásady pro vypracování:

I. Teoretická část

1. Literární rešerše v oblasti kompozitních materiálů, rozdělení a vlastnosti.
2. Predimpregnované materiály, způsob výroby, vlastnosti.
3. Zpracování predimpregnovaných materiálů, popis výrobních technologií a zařízení.

II. Experimentální část

1. Návrh materiálového složení uhlíkových kompozitů, stanovení počtu vrstev a návrh technologických podmínek zpracování.
2. Experimentální výroba vzorku vrstvené lamináty, sendvičové struktury s voštinovým jádrem.
3. Experimentální testování mechanických vlastností dle doporučení vedoucího práce.
4. Závěr bakalářské práce

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] Ehrenstein, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009.

[2] Jančář, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno, 2003

[3] Ptáček, L.: Nauka o materiálu II. CERM, s.r.o., Brno, 2002.

[4] Kořínek, Z.: Kompozity. Dostupné na: <http://www.volny.cz/zkorinek/>

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

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **23. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Román Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně12.5.2014.....


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídá k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá experimentálním testováním kompozitní sendvičové struktury vyztuženým pěnovým materiálem, pomocí technologie lisování. V teoretické části je popsáno rozdělení kompozitních materiálů, definice jednotlivých složek a přehled technologií výroby kompozitních materiálů. Praktická část dokumentuje výrobu kompozitního materiálu vyztuženého pěnou s různou hustotou jádra a různým počtem nosných vrstev.

Klíčová slova: lisování, kompozit, sendvičová konstrukce, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the experimental testing of composite sandwich structures using reinforced foam, using pressing technology. The theoretical part describes the classification of composite materials, the definition of individual components and an overview of technologies for the production of composite materials. The practical part documents the production of reinforced composite foam core with different density and different number of supporting layers.

Keywords: pressing, composite sandwich structure, mechanical properties

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D za poskytnuté rady a připomínky, které mi pomohly v řešení problematiky bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při řešení mechanických vlastností.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty technologické UTB ve Zlíně a může být využita ke komerčním účelům se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FT UTB. Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

.....

podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ	13
1.2 MATRICE	14
1.2.1 Kompozity s polymerní matricí	14
1.2.2 Epoxidové pryskyřice (EP)	14
1.2.3 Vinylesterové pryskyřice (VE)	14
1.2.4 Fenolické pryskyřice (PF)	14
1.2.5 Přehled mechanických vlastností některých typů matric	15
1.3 VÝZTUŽE.....	15
1.3.1 Částicové výztuže.....	15
1.3.2 Vláknové výztuže.....	16
1.3.3 Skleněná vlákna	18
1.3.4 Uhlíková vlákna	19
1.3.5 Aramidová vlákna	20
1.3.6 Srovnání skleněných, uhlíkových a aramidových vyztužených kompozitů.....	21
2 PREPREG MATERIÁLY	22
2.1 PREPREGY	22
2.1.1 Reaktoplastické prepregy	22
2.1.2 Vlastnosti vláken a tkaniny	24
2.1.3 Tkaniny	25
2.1.4 Využití prepregů.....	29
2.2 SENDVIČOVÉ STRUKTURY	30
3 ZPRACOVATELSKÉ TECNOLOGIE	32
3.1 VAKUOVÉ LISOVÁNÍ.....	32
3.2 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	35
4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	36
5 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ	37
5.1 LABORATORNÍ LIS	37
5.2 UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK 1456.....	38
5.3 CHARPYHO KLADIVO CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR	39
6 POUŽITÉ MATERIÁLY	40
6.1 PREPREG GURIT PH840-300-42	40
6.2 PĚNY AIREX T90.210 / T90.100 / T90.60.....	41
7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH STRUKTUR	43

7.1	STRUKTURY Č. 1, Č. 2, Č. 3	43
7.2	STRUKTURY Č. 4, Č. 5, Č. 6	44
7.3	STRUKTURY Č. 7, Č. 8, Č. 9	45
7.4	STRUKTURY Č. 10, Č. 11, Č. 12	46
8	TESTOVÁNÍ VYROBENÝCH STRUKTUR	47
8.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	47
8.1.1	Naměřené tahové vlastnosti materiálu struktura č. 1	48
8.1.2	Naměřené tahové vlastnosti materiálu struktura č. 2	49
8.1.3	Naměřené tahové vlastnosti materiálu struktura č. 2	50
8.1.4	Shrnutí výsledků tahových zkoušek	51
8.2	ZKOUŠKA 3-BODOVÝM OHYBEM	52
8.2.1	Ohybové vlastnosti pro pěny Airex T90.60 s různým počtem vrstev prepregu	53
8.2.2	Ohybové vlastnosti pro pěny Airex T90.100 s různým počtem vrstev prepregu	54
8.2.3	Ohybové vlastnosti pro pěny Airex T90.210 s různým počtem vrstev prepregu	55
8.2.4	Shrnutí výsledků ohybových zkoušek	56
8.3	RÁZOVÁ ZKOUŠKA OHYBEM	57
8.3.1	Rázové vlastnosti pro pěny Airex T90.60 s různým počtem vrstev prepregu	58
8.3.2	Rázové vlastnosti pro pěny Airex T90.100 s různým počtem vrstev prepregu	59
8.3.3	Rázové vlastnosti pro pěny Airex T90.210 s různým počtem vrstev prepregu	61
8.3.4	Shrnutí výsledků rázových zkoušek	62
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ	63
9.1	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TAHOVÉ ZKOUŠKY	63
9.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ OHYBOVÝCH ZKOUŠEK	65
9.3	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ RÁZOVÝCH ZKOUŠEK	68
	ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	71
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	74
	SEZNAM TABULEK	76
	SEZNAM PŘÍLOH	78

ÚVOD

Kompozitní materiály jsou nové technické materiály, které se v dnešní době využívají v automobilovém, leteckém, chemickém i stavebním průmyslu. Za hlavní důvody používání kompozitních materiálů můžeme považovat jejich zvýšenou tuhost, pevnost, stabilitu, houževnatost a odolnost vůči korozi nebo chemickému prostředí. Kompozitem se nazývá materiál, který je složen alespoň ze dvou materiálových složek. Každý materiál má jiné vlastnosti a takto složený kompozitní materiál vykazuje podstatně odlišné vlastnosti.

Stále se vyvíjí i jejich výrobní technologie. Jako jedna z prvních technologií pro výrobu kompozitních materiálů bylo tlakové lisování. Postupem času se technologie stále vyvíjely a v dnešní době se již používají technologie jako vakuové lisování, vytvrzování v autoklávu atd.

Teoretická část popisuje rozdělení kompozitních materiálů, popis jednotlivých složek, zpracovatelské technologie výroby.

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na výrobu polymerního kompozitního materiálu pomocí technologie tlakového lisování s pěnovou výplní. Práce zahrnuje dokumentaci výroby, sledování technologických parametrů a stanovení mechanických vlastností. Dále obsahuje srovnání jednotlivých struktur dle jejich mechanických vlastností.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitním materiálem, nebo kompozitem je nazýván materiál, ve kterém jsou specifickým způsobem kombinovány dva nebo více komponentů o výrazně se lišících fyzikálních a chemických vlastnostech. Kompozity mají v porovnání s jednotlivými komponenty (vlákna a pryskyřice) podstatně odlišné vlastnosti. Jestliže vyrobíme kompozitní materiál tím, že vhodně umístíme výztuž (skleněná, uhlíková nebo organická vlákna) v pryskyřici, která se poté nazývá pojivem nebo matricí, dostaneme nový materiál s vlastnostmi, které nelze docílit samostatnými komponenty.

Vlastnosti kompozitních materiálů jsou dány jejich výrobou a především použitým typem matrice a výztuže. Každý průmyslový podnik si připravuje kompozit „na míru“ a je si vědom všech jeho pozitivních i negativních vlastností. Přesto existuje několik obecných výhod i nevýhod při jejich využití.



Obr. 1 Využití kompozitů v letectví [1]

Výhody kompozitních materiálů:

- vysoká pevnost a tuhost
- nízká hmotnost
- odolnost vůči korozi
- dobré vlastnosti při statickém i dynamickém zatěžování
- dobré tlumicí vlastnosti
- možnost vyrábět designově složité díly

Nevýhody kompozitních materiálů:

- specifické, mnohdy složité způsoby výroby a zpracování
- horší mechanické vlastnosti ve směru kolmo k orientaci uložení vláken (týká se vláken vyztužených kompozitů)
- vysoké náklady při dimenzování náročných konstrukcí
- lokální poškození, např. po nárazu, se obtížně identifikuje a opravuje ve srovnání s konvenčními materiály
- pořizovací cena [2]

1.1 Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály lze klasifikovat podle řady parametrů. Rozdělujeme je podle:

Druhu matrice:

- kompozity s kovovou maticí
- kompozity s polymerní maticí
- kompozity s keramickou maticí
- kompozity s uhlíkovou maticí

Druhu vyztuže:

- kompozity vyztužené částicemi
- kompozity vyztužené vláknem
- kompozity vrstvené [3]

1.2 Matrice

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, který tvoří základní stavební prvek výsledného kompozitu. Hlavním úkolem matrice je přenos namáhání na jednotlivá vlákna, ochrana vláken před vlivy okolí, zajištění jejich geometrické polohy a tvarové stálosti výrobku. [4]

1.2.1 Kompozity s polymerní matricí

Kompozity s polymerní matricí jsou nejvíce rozšířenou skupinou kompozitů. Základním materiálem matrice je polyamid, polypropylen, epoxidové, polyesterové, vinylesterové, fenolické, formaldehydové a melaninové pryskyřice. Výztuže pak tvoří zejména skleněná, v menší míře uhlíková a aramidová vlákna. Polymerní kompozity se dále dělí na kompozity s termoplastickou a reaktoplastickou matricí. V praxi se nejčastěji využívají reaktoplasty. [4]

1.2.2 Epoxidové pryskyřice (EP)

Jde o sloučeniny obsahující reaktivní epoxidovou skupinu. Díky vysoké reaktivitě, která vede k zesíťovaným makromolekulárním produktům, dobrým mechanickým a elektrickým vlastnostem jsou aplikovány v lepidlech, zalévacích a lisovacích hmotách, pojivem pro lamináty a lékařských pryskyřicích. EP má lepší přilnavost k neupravené skleněné výztuži než VE a také lepší mechanické a elektrické vlastnosti. Vytvrzená EP je dobrým elektrickým izolantem v široké oblasti teplot, je odolná proti vodě, alkáliím, kyselinám a některým rozpouštědlům. [2]

1.2.3 Vinylesterové pryskyřice (VE)

Jsou vhodné pro výrobu kompozitů vyztužených skleněnými i uhlíkovými vlákny určených pro náročnější aplikace, do agresivního chemického prostředí a pro kompozity vystavené velkému mechanickému namáhání. [2]

1.2.4 Fenolické pryskyřice (PF)

Jde o termosety s vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí. PF jsou produkty reakce fenolu s formaldehydem. Běžné teploty zpracování jsou podle typu metody v intervalu 150-210 °C. PF jsou dvojího typu jednostupňová a dvoustupňová.

Používají se jako základ lepidel pro laminování dřeva a z velké části se používají při výrobě překližky a laminovaných papírových panelů. Největší předností je jejich vynikající termomechanická, povětrnostní a elektrická odolnost, [2]

1.2.5 Přehled mechanických vlastností některých typů matric

Tab. 1 Přehled mechanických vlastností některých typů matric [2]

Pryskyřice	Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Deformace do lomu [%]
Epoxidová	1,1-1,4	2,1-6,0	35-90	1-10
Polyesterová	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	1-5
Fenolická	1,3	4,4	50-60	1-3

1.3 Výztuže

Výztuž v kompozitních materiálech zajišťuje zvýšení mechanických vlastností (modulu pružnosti, pevnosti, tvrdosti atd.). Typ a způsob uložení má velký vliv na výsledné vlastnosti. [2]



Obr. 2 Rozdělení kompozitních materiálů dle výztuže [4]

1.3.1 Částicové výztuže

Částice jsou buď minerálního původu, kdy se zpracovávají průmyslově mechanickým mletím na určitý tvar a velikost nebo jsou vyráběna při chemické změně z přírodních zdrojů. Na druhu výrobního procesu závisí tvar a velikost částice.

Částicové výztuže se dále dělí na izometrické, které mají tvar koule nebo elipsoidu a anizometrické, které mají tvar destiček nebo jehlic. Částicové výztuže mají vlastnosti nezávislé na směru.

Zvýšení tuhosti a zlepšení tvarové stálosti se dosahuje použitím anorganických částic. Elastomerní částice v kompozitu zlepšují jeho houževnatost. Částice sulfidu a grafitu zvyšují odolnost proti otěru a zlepšují kluzné vlastnosti.

1.3.2 Vlákňové výztuže

Jeden rozměr vláknové výztuže je výrazně větší, než dva zbývající. Vlákna výztuže rozhodují o tahové a ohybové pevnosti kompozitu. Tyto vlastnosti ovlivňuje materiál vláken, jejich množství obsažené v matrici a jejich orientace. Orientací vláken lze optimalizovat pevnost a tuhost, odolnost proti únavě materiálu, teplotě a vlhkosti. Pevnost a tuhost konkrétního materiálu se významně mění podle směru uložení vláken. Nejvyšší pevnost ve směru vláken a podstatně horší pevnosti je dosaženo ve směrech mimo orientaci vláken.

Vláknové výztuže mohou být dlouhé, nepřerušované po celé délce výrobku nebo krátké. Vlákna mohou být uspořádána v jednom směru, ve dvou směrech nebo chaoticky (viz. Obr. 3).

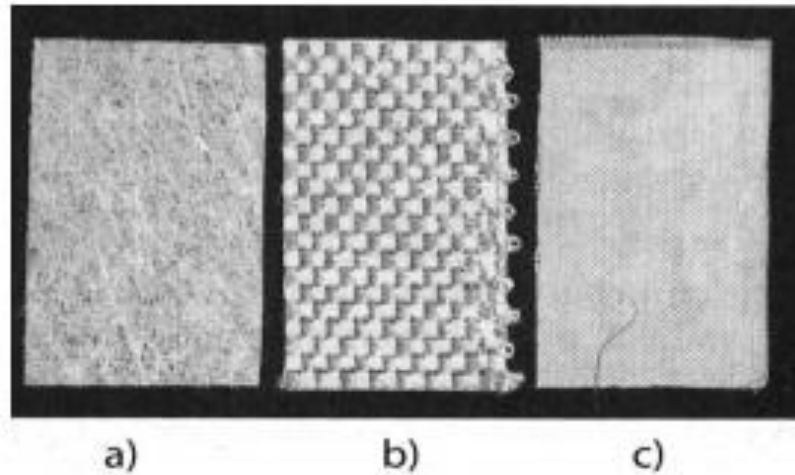


Obr. 3 Dělení vláknové výztuže [5]

Sdružením elementárních vláken vznikají prameny, které jsou dále zpracovány na následující polotovary:

- Mletá vlákna (prameny mají potřebnou délku)
- Sekané prameny
- Prameny bez zákrutů

- Jednoduchá a kabelová příze (pro výrobu technických tkanin)
- Rovingy
- Tkaniny
- Rohože (vznikají ukládáním nepravidelně orientovaných 50 mm dlouhých vláken)
- Prepregy (různě široké a obsahují tkaninu, rohož nebo rovingy v paralelním uspořádání)



Obr. 4 a) rohož, b) tkanina z rovingů, c) tkanina z vláken [4]



Obr. 5 Trojrozměrná tkanina výztuže příruby [4]

Nejpoužívanější jsou rovingy a tkaniny. Rovingy se dodávají na cívkách s nitřním nebo vnějším odtahem nebo ve formě pásek o určité šířce obsahující vlákna převážně v podélné orientaci (v příčném směru jsou vlákna pouze za účelem dodržení konstantní šířky pásky). Tkaniny mají různou textilní vazbu (viz. Obr. 6). Vedle požadavků na tuhost a pevnost

kompozitu o vhodné vazbě rozhoduje i tvarová členitost forem. Vzájemné uspořádání osnovy a útku (nití) vytváří tři základní typy vazeb:

- Plátňová vazba, která je nejpevnější a také nejméně poddajná při tvarování
- Keprová vazba, která je ohebnější, ovšem pouze při měkké povrchové úpravě vláken (na tkanině je vytvářen diagonální vzor) má nejčastěji využití (poměr ceny ke tvarovatelnosti).
- Atlasová vazba, která je nejméně pevnou textilní vazbou, ale nejlépe tvarovatelnou



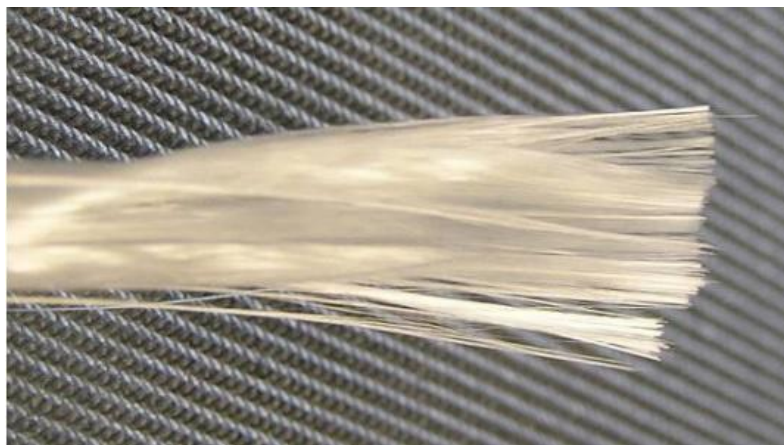
Obr. 6 Typy tkaní [4]

Druh materiálu vláken lze v tkaninách navzájem kombinovat i s jinými druhy vyztužujících vláken (ve směru menšího namáhání lze vlákna nahradit levnějšími skleněnými vlákny). Výsledkem jsou hybridní tkaniny. [6]

1.3.3 Skleněná vlákna

Nejběžnější skleněná vlákna (Obr. 7) se vyrábějí především ze skloviny označované, jako sklo E. Velmi často se používají především v kompozitech s plastovou maticí. Vlákna se nyní vyrábějí kontinuálně, tzn., že na jednom konci pece se sází sklářský kmen a na druhém se vytahuje vlákno. Potřebný průměr vláken se dosáhne dlužením proudu skla tekoucího tryskami (průměr 1 mm). Konečný průměr závisí na rozdílu vytékání skloviny a odtahování vlákna. Toto vlákno má nejčastěji od 3,5 do 20 μm . Jednotlivá vlákna se sdružují do pramene a navíjí na navíjecí zařízení. Najednou se táhne 51 až 408 vláken. Mez průtažnosti skleněného vlákna je kolem 3% a nemá viskoelastické chování jako syntetická vlákna. Tepelné vlastnosti skleněných vláken jsou lepší než u jiných materiálů. Dlouhodobé teplotní působení 250 °C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Jsou nehořlavá a tudíž ohnivzdorná. Modul pružnosti v tahu je přibližně stejný jako u hliníku a činí asi 1/3 hodnoty oceli. Vzhledem k nižší hustotě skla je hodnota měrné pevnosti vláken

velmi vysoká. Součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů. [2], [6], [7]



Obr. 7 Skleněná vlákna [8]

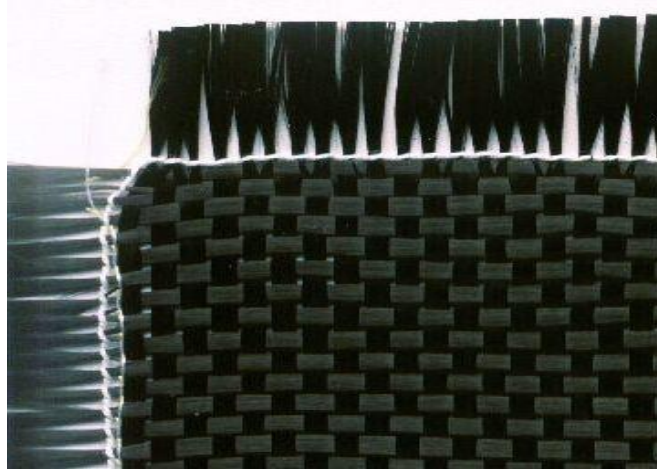
Tab. 2 Pevnosti skleněných vláken [4]

Vlákno	S sklo	E sklo	Pyrex
Pevnost výchozí [GPa]	7,0	3,7	2,0
Pevnost po zpracování [GPa]	5,0	2,8	1,6
Prodloužení při lomu [%]	5,0	3,0	2,0

1.3.4 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (Obr. 8) jsou technická vlákna o průměr mezi 5 až 10 μm tvořena převážně atomy uhlíku (přibližně 90 %, zbytek tvoří dusík, kyslík a vodík), které jsou spojeny dohromady v mikroskopické krystaly, jenž formuje samotné vlákno. Pro výrobu uhlíkových vláken se využívají dva výrobní postupy, z nichž jeden využívá polyakrylonitrilových vláken (PAN) a druhý vychází přímo ze surovin bohatých na uhlík. Výrobou je možné získat celou řadu vláken od vysoce pevných se středním, vysokým nebo extrémně vysokým modulem pružnosti. Uhlíková vlákna jsou považována za nejlepší výztuž pro kompozity, zvláště u materiálu zvaný uhlíkový laminát, kde je požadována nízká hmotnost, ale naopak vysoká odolnost vůči dynamickému namáhání. Mezi další

jejich vlastnosti patří také vysoká korozní odolnost, dobrá elektrická a tepelná vodivost, naopak při delším skladování dochází ke ztrátě jejich ohebnosti a při destrukci vykazují tříštivost. [4]



Obr. 8 Uhlíkové vlákno [9]

1.3.5 Aramidová vlákna

Aramidové vlákna (známá pod obchodním názvem kevlar Obr. 9) na bázi lineárních organických polymerů, jejich kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Výroba probíhá spřádáním z vysokoviskozního 20 % roztoku v koncentrované kyselině sírové. Kde se jednotlivá vlákna spojují a pro zlepšení zpracovatelnosti se mnohokrát propírají, neutralizují a propírají aviváží (pomocný prostředek pro zlepšení kluzných a zpracovatelských vlastností). Předností aramidových vláken je vysoká pevnost a tuhost. Molekuly jsou vzájemně spojeny vazbami vodíkových můstků. Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. Jsou nejlehčí vyztužující vlákna, z čehož plyne vysoká měrná pevnost v tahu. Aramidová vlákna ve formě kompozitu odolávají teplotě až 300 °C a neroztaví se, proto jsou vhodná pro protipožární ochranné obleky, neprůstřelné vesty. [4]



Obr. 9 Aramidové vlákno [10]

1.3.6 Srovnání skleněných, uhlíkových a aramidových vyztužených kompozitů

Vlastnosti nejdůležitějších vyztužujících vláken se liší nejen navzájem, ale také v závislosti na vlastnostech matrice, ve které jsou vlákna zabudována. Kromě anizotropie mechanických vlastností jsou to především hodnoty součinitelů teplotní roztažnosti. U všech typů matric jsou hodnoty součinitelů teplotní roztažnosti kladné a to přibližně $100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, zatímco u skleněných vláken je tato hodnota $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ u aramidových a uhlíkových vláken jsou tyto hodnoty dokonce záporné. To umožňuje aplikaci dílů s velkou rozměrovou stálostí i při střídavých teplotách. Chemická odolnost kompozitů je závislá na druhu matrice, avšak vlákna mohou být silně poškozena pronikajícími agresivními médii. Uhlíková vlákna jsou inertní, zatímco skleněná a aramidová vlákna vykazují v kyselém i alkalickém prostředí pokles pevnosti. Uhlíková vlákna jsou elektricky vodivá, zatímco skleněná a aramidová vlákna vykazují velký elektrický odpor. [4]

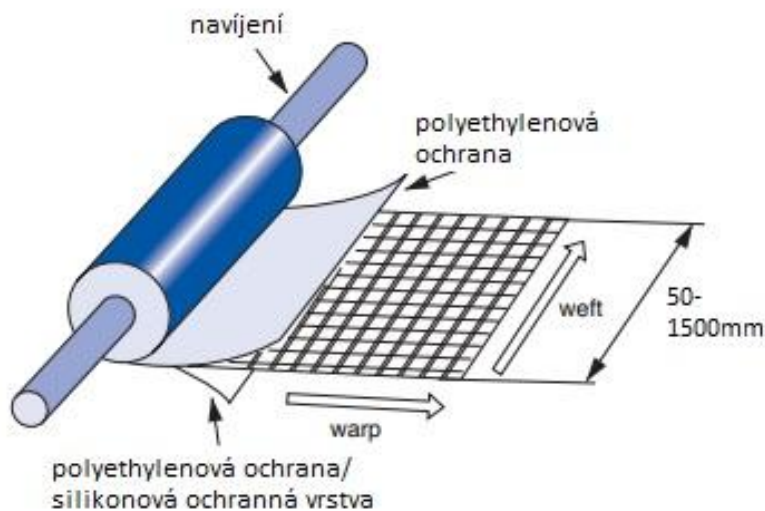
Tab. 3 Srovnání vlastností vybraných kompozitů [4]

Vlastnosti	Vlákna		
	Skleněná	Aramidová	Uhlíková
Hustota	+/-	++	+
Mez pevnosti v tahu	+	+	+
E-modul	-	+	++
Mez pevnosti v tlaku	+	-	+
Rázová houževnatost	+	+	-
Tlumení	-	+	-
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	+	++
Dielektrické vlastnosti	++	++	-
Adheze, přilnavost	++	-	+
Nasákavost	+	-	+
Cena	++	+/-	-

2 PREPREG MATERIÁLY

2.1 Prepregy

Pro výrobu materiálů lisováním nebo v autoklávu se nejčastěji používá před-impregnovaná výztuž, prepreg. Použití prepregů má velkou výhodu, že je oddělen složitý proces prosycování výztuže pojivem od dalšího zpracování. Tento postup, který má velký vliv na kvalitu a vlastnosti budoucího výrobku, se provádí za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek na speciálním zařízení. Při výrobě jednosměrně vyztuženého prepregu se odvíjejí pramence vláken ze stojanu s cívkami a vedou se rovnoběžně, vyrovnány v rovině přes stavitelný hřeben. Takto připravený pás vláken se ukládá na papírový nosič opatřený silikonovou vrstvou, na který byla předem nanesena vrstva pryskyřice. Pás je veden na vytápěný válec kalandru, kde pod tlakem dochází k prosycení výztuže pojivem. Pás prepregu, prosycený pryskyřicí a oboustranně chráněný nosným papírovým pásem, prochází chladicí zónou, kde se zastaví vytvrzovací reakce, dále přes ořezávací zařízení na navíjecí. Prepregy vyrobené na takovém zařízení mají všechna vlákna uložena rovnoběžně a nazývají se jednosměrné prepregy. [4],[6]

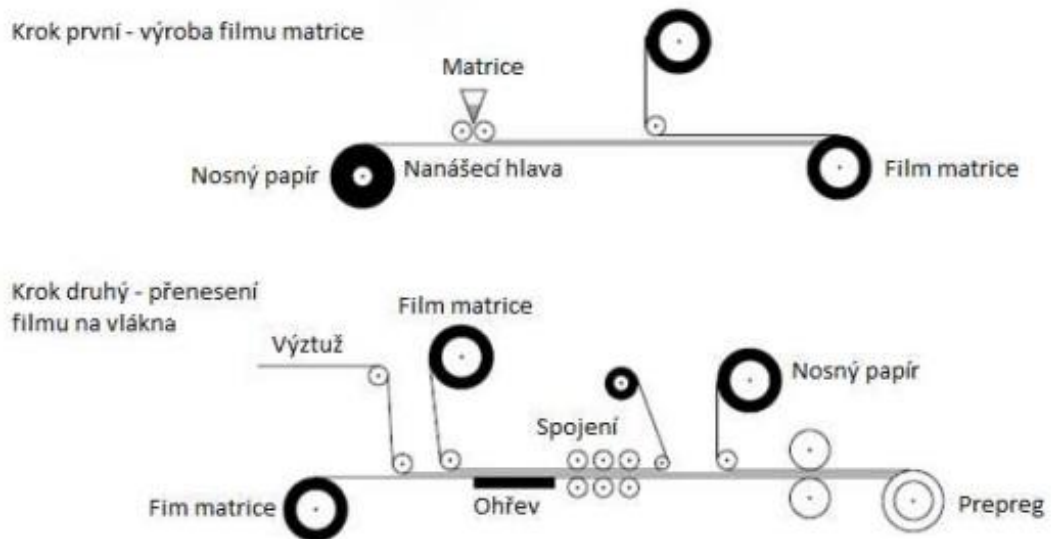


Obr. 10 Oboustranně impregnovaná tkanina [11]

2.1.1 Reaktoplastické prepregy

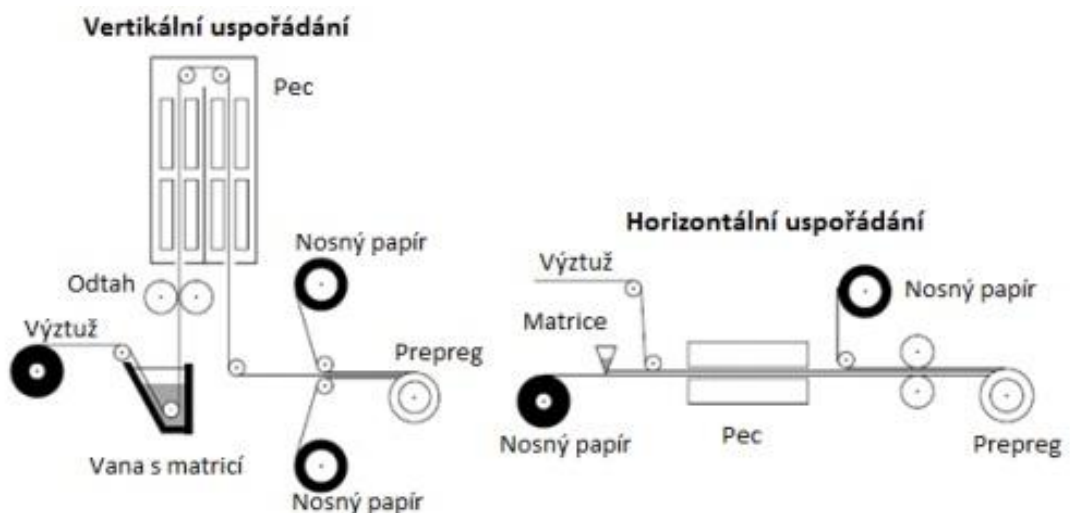
K vůli reaktoplastickému pojivu se musí až do doby zpracování skladovat v chladu přibližně při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, přesto jsou však skladovatelné nejvýše 6 měsíců (v závislosti na reaktivitě použitého pojiva). Přibližně 6 hodin před vlastním zpracováním se prepreg rozmrazí, pokud možno bez přístupu vzduchu aby nedošlo ke srážení vzdušné vlhkosti na

povrchu prepregu. Dále se z něj podle plánu připraví potřebné množství pro laminaci. Nastavení polohy přířezů se provádí mírným přitlačením pomocí ručního válečku nebo teflonovou stěrkou.



Obr. 11 Dvou kroková výroba prepregu [11]

Sériová výroba konstrukčních prvků například v leteckém průmyslu, je částečně automatizována – pás prepregu je ukládán pomocí číslicově řízených zařízení, takže je výroba ekonomická a reprodukovatelná. Dvou kroková výroba prepregů je popsána na Obr. 11. a jedno kroková v horizontálním a vertikálním uspořádání je zobrazena na Obr. 12.



Obr. 12 Jednokrokové vertikální a horizontální uspořádání výroby prepregů [11]

V praxi se využívá několik druhů prepregů a je možné je dělit dle geometrie výztuže:

Jednosměrný prepreg vyrobený z rovingů (výztuž ve tvaru nekonečných vláken bez krutu), který je určen pro mechanicky namáhané díly vyráběné kladením, navíjením pásů nebo pultruzí. Má poměrně malou tloušťku a dodává se v kotoučích různé šířky.

Vícevrstvý prepreg, u kterého jsou jednosměrně vyztužené vrstvy vůči sobě otočeny o určitý úhel a spojeny prošitím polyesterovou nití.

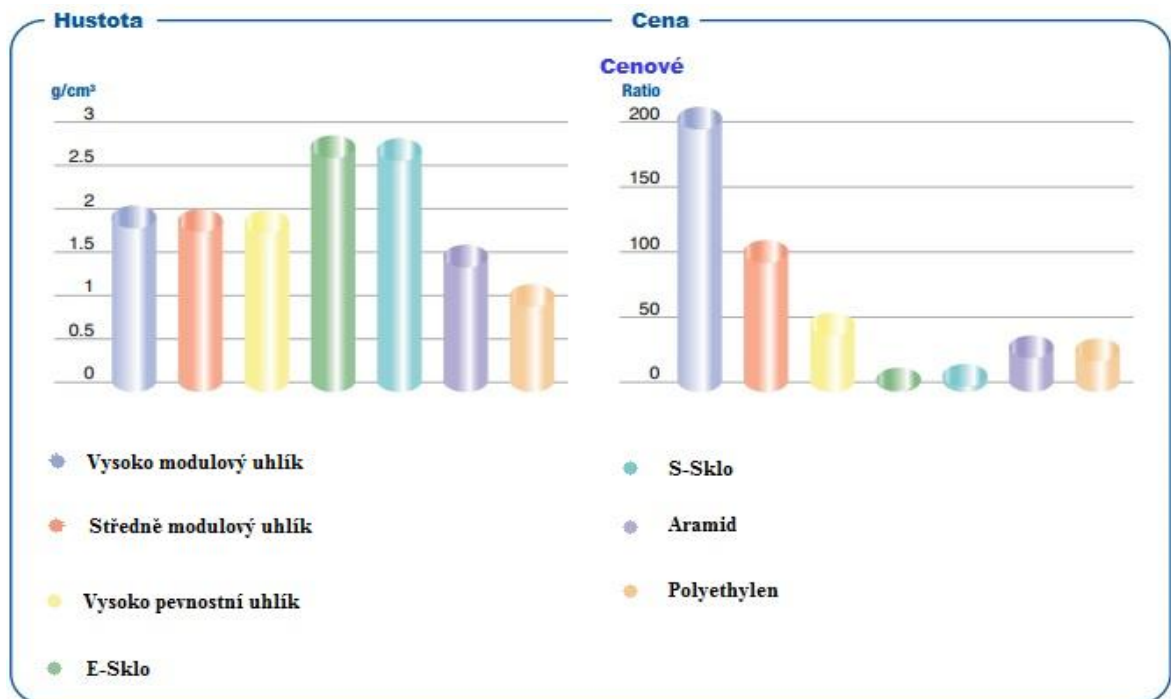
Kombinované prepregy, únosnější vrstvy s tkaninovou výztuží se dávají na mechanicky více namáhanou stranu výrobků (při namáhání v ohybu na taženou stranu), vrstvy s rohožemi na stranu vystavenou koroznímu prostředí (mají větší podíl pryskyřice).

Prepregy s prostorově vázanou výztuží, kde jsou vlákna pletená nebo tkána. [4],[6]

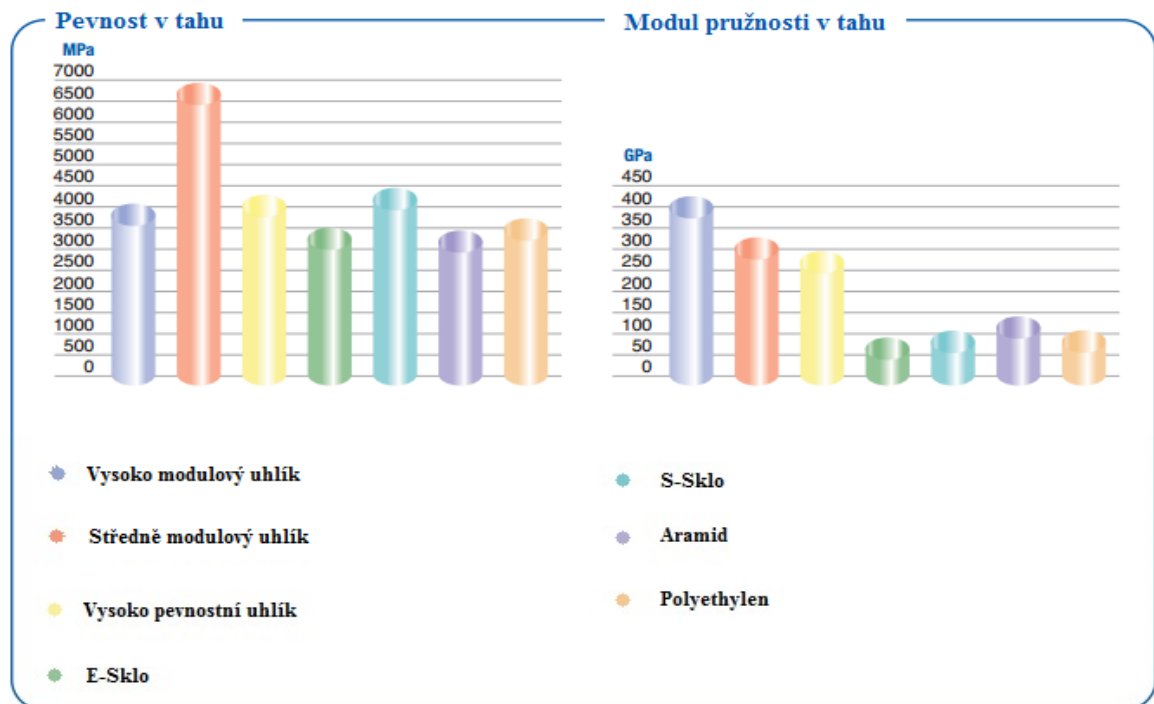
2.1.2 Vlastnosti vláken a tkaniny

Zpevňující materiály poskytují kompozitům mechanické vlastnosti: vynikající tuhost a pevnost, dobré tepelné, elektrické a chemické vlastnosti, a zároveň nabízí výrazné úspory hmotnosti oproti kovům.

Níže uvedené grafy zdůrazňují hlavní kritéria pro výběr vláken. [11]



Obr. 13 Závislost hustoty a ceny na druhu materiálu [11]



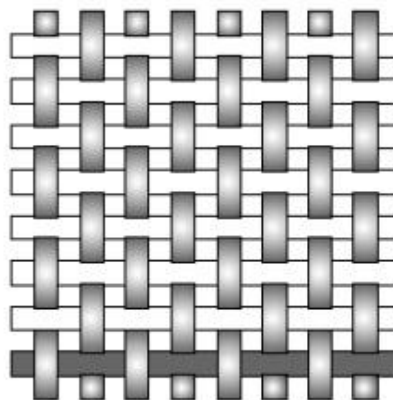
Obr. 14 Závislost pevnosti a pružnosti v tahu na druhu materiálu [11]

2.1.3 Tkaniny

Výztuže do kompozitních materiálů lze najít v mnoha různých variantách zpracování. Běžně jsou k dostání v metráži nebo v podobě pásek různé šířky. Tkaniny jsou děleny podle hmotnosti na 1 m^2 . Vlákna v tkaninách mohou být uspořádány buď jednosměrně, nebo různými směry dle typu tkaní. [12]

Plátňová vazba

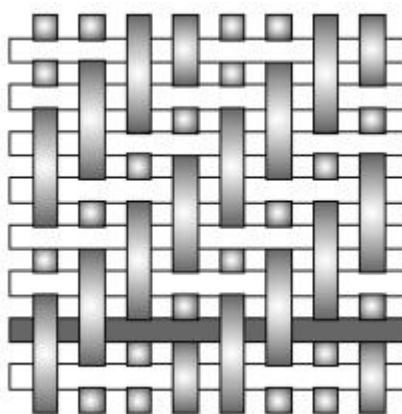
Plátňová vazba (viz. Obr. 15) je nejpevnější, ale také nejméně poddajná při tvarování, když prameny (nebo rovingy) v osnově i útku jsou stejně silné a stejnoměrně vzdálené. Pramenec útku prochází vždy pod a nad každým pramenem osnovy (tzv. vyvážená plátňová vazba). Volnější a tím i více poddajnou plátňovou vazbu vytvářejí dva nebo i více prameny útku procházejícího pod dvěma nebo i více nitěmi osnovy (košíková vazba). Pro plátňovou vazbu se nepoužívají široká vlákna, neboť může dojít k jejich zvlnění. [13]



Obr. 15 Plátňová vazba [13]

Keprová vazba

Keprová vazba (viz. Obr. 16) je vytvořena, když útek překříží minimálně dva prameny osnovy, než opět projde pod jedním nebo více prameny osnovy. V další radě se útek posouvá doprava nebo doleva vždy k nejbližšímu prameni osnovy. Na tkanině je tak vytvářen diagonální vzor. Pokud je použita vazba označena např. 3/1, znamená to, že jeden pramen osnovy je překryt třemi prameny útku a jedním pramenem na spodní straně (vzniká lomený vzor). Tkanina s keprovou vazbou je ohebnější, avšak pouze při měkké povrchové úpravě vláken. [13]

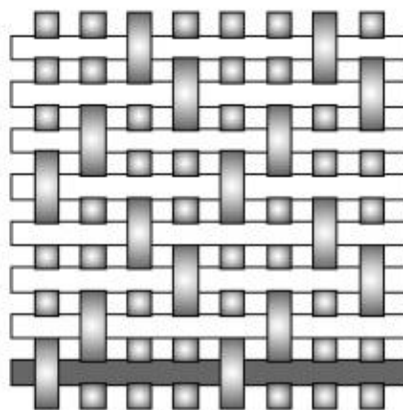


Obr. 16 Keprová vazba [13]

Atlasová vazba

Atlasová vazba (viz. Obr. 17) je nejméně pevnou textilní vazbou. Jeden pramen osnovy je překryt čtyřmi a více prameny útku seshora a jedním pramenem ze spodní strany. Počet pramenů osnovy překrytých útkem udává tzv. vaznost atlasu (5 až 12). Povrch tkaniny je hladký a lesklý, s dlouhými plochami, v nichž vlákna leží rovnoběžně s povrchem. Vazba umožňuje dosáhnout vysoký objemový podíl vláken ve vrstvě kompozitu a zaručuje

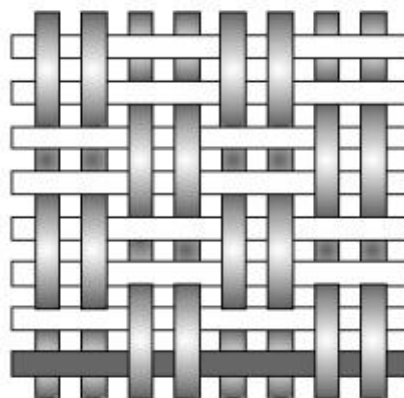
minimální zvlnění vláken. S atlasovou tkaninou je tedy možno získat kompozit s vyšší pevností a tuhostí než při použití běžných tkanin. [13]



Obr. 17 Atlasová vazba [13]

Košíková vazba

Košíková vazba (viz. Obr. 18) je podobná plátnové vazbě, s výjimkou zdvojených vláken, které jsou střídavě prokládány. Košíková vazba je plošší, silnější, ale méně stabilní než plátnová vazba. Musí být použita pro tlustá vlákna s velkou gramáží, aby nedocházelo ke zvlnění. [13]



Obr. 18 Košíková vazba [13]

Hybridní tkaniny

Pod pojmem hybridní tkaniny (viz. Obr. 19) rozumíme takové tkaniny, které mají více než jeden typ strukturních vláken. Pokud je ve vícevrstevném laminátu třeba použít více typů materiálu, je možné použít více typů tkanin, a to každou, která by obsahovala vlákno, které je třeba. Nicméně pokud vyžadujeme extrémně nízkou váhu a tloušťku můžeme využít hybridních tkanin, ve kterých každá vrstva obsahuje dva typy vláken. [13]



Obr. 19 Hybridní tkanina [14]

Nejvíce používanými hybridními tkaninami jsou:

Uhlíkové vlákno / Aramidové vlákno

Vysoká odolnost vůči nárazu a vysoká pevnost v tahu aramidového vlákna se kombinuje s vysokou pevností v tahu a tlaku uhlíkového vlákna. Obě tato vlákna mají nízkou hustotu, ale relativně vysokou cenu.

Aramidové vlákno / Skelné vlákno

Nízká hustota, vysoká odolnost vůči nárazu a vysoká pevnost v tahu se kombinuje s dobrou pevností v tahu a tlaku a nízkou cenou skelného vlákna.

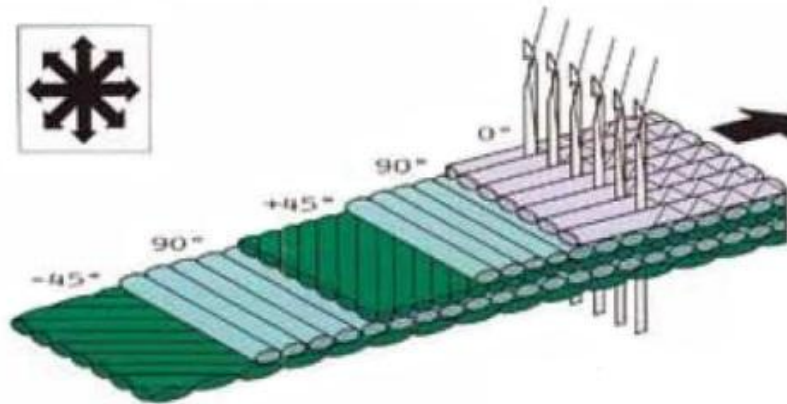
Uhlíkové vlákno / Skelné vlákno

Uhlíkové vlákno dodává této tkanině vysokou pevnost, tuhost a díky své nízké hustotě snižuje hmotnost, zatímco skelné vlákno snižuje její cenu.

Multiaxiální tkaniny

Tyto tkaniny se skládají z jedné nebo více vrstev dlouhých vláken držených pohromadě sešitím nestrukturní nití. Výztužné tkaniny mohou být uspořádány různě a v různé kombinaci, lze využít i hybridních tkanin. Niť je většinou polyesterová kvůli její nízké ceně a dobrým vlastnostem. Sešívání dovoluje rozmanité orientace vláken. Hlavními výhodami jsou lepší mechanické vlastnosti vyplývající z toho, že vlákna jsou vždy naskládána rovně a nejsou pomačkány a dále vyšší rychlost výroby z těchto tkanin, protože je možno vyrobit tlustší tkaniny s rozdílným uspořádáním vláken a tím snížit celkový počet vrstev nutných k výrobě kompozitu. Jako nevýhodu lze považovat to, že polyesterová vlákna se špatně spojují s některými druhy matric, což může mít za následek zhoršené mechanické vlastnosti. Výroba těchto tkanin (Obr. 20) je pomalá a náklady na pořízení strojů na výrobu jsou vysoké, což vede k vysoké výsledné ceně těchto tkanin. Tkaniny s

vysokou gramáží na 1 m² mají sice velký počet vláken, ale je problémové je dostatečně prosytit. [13]



Obr. 20 Výroba multiaxiální tkaniny [11]

2.1.4 Využití prepregů

Letectví a kosmonautika:

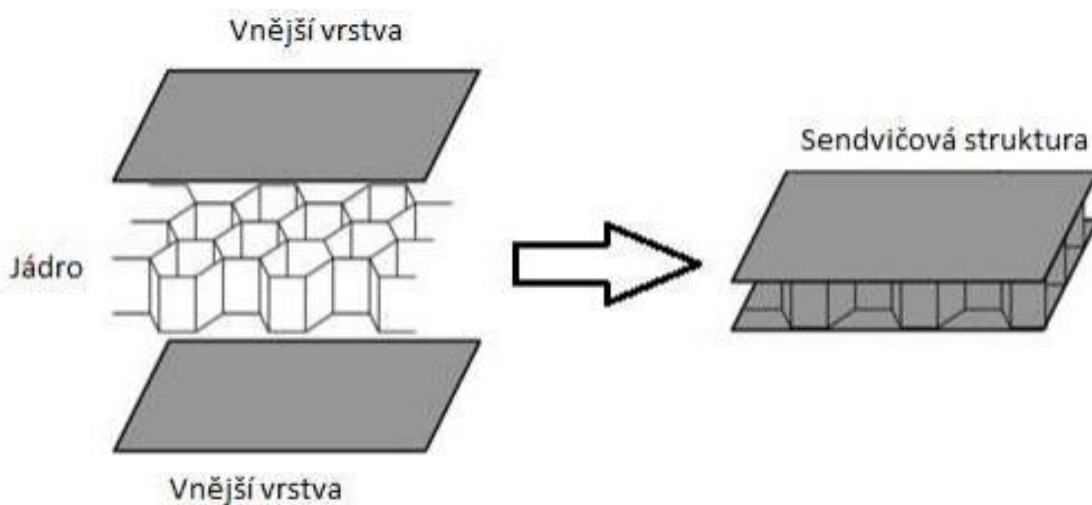
- Civilní letadla
- Primární struktury
- Interiéry
- Letecké motory
- Obranné letadla
- Vrtulníky
- Vesmírné zařízení

Průmysl:

- Větrné elektrárny
- Sportovní potřeby
- Strojní zařízení
- Lodní doprava
- Nástroje

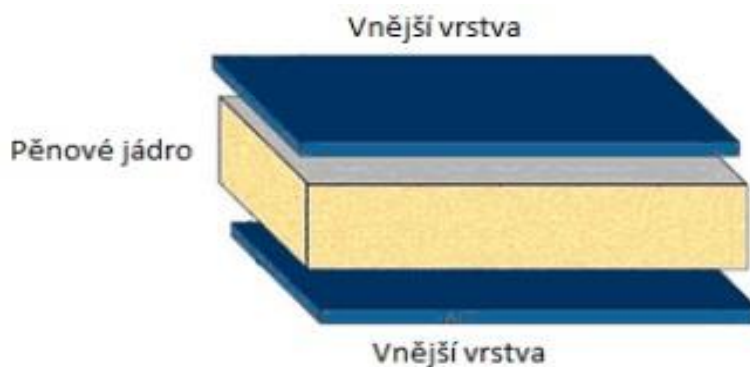
2.2 Sendvičové struktury

Sendvičové struktury jsou moderními konstrukcemi s vysokou ohybovou tuhostí a pevností při nízké hmotnosti, ale mají i řadu dalších výhod. Uplatnění nacházejí nejen v letecké a dopravní technice, ale i v ostatních odvětvích průmyslu například ve stavebnictví. Sendvičové struktury řadíme k vrstevnatým konstrukcím. Tyto konstrukce jsou tvořeny rozdílnými typy jednoduchých či složených materiálů různého charakteru, jejich spojení je vzájemně nerozebíratelné.



Obr. 21 Sendvičová struktura s voštinovým jádrem [11]

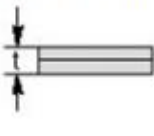
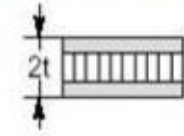
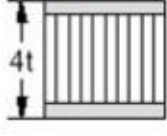
Struktura sendviče je taková, která je tvořena dvěma vnějšími vrstvami s vysokou pevností a tuhostí. Jsou zatěžovány tahovými a tlakovými silami a jádrem o relativně malé hustotě a nízké hmotnosti přenášejícím smykové síly mezi vnějšími materiály. Vzorová sendvičová struktura vytvořená vnějšími vrstvami a voštinovým jádrem je zobrazena na Obr. 21., sendvičová struktura s pěnovým jádrem je zobrazena na Obr. 22.



Obr. 22 Sendvičová struktura s pěnovým jádrem [15]

Mezi výhody sendvičových struktur patří únavová odolnost, odolnost proti ohni, odolnost proti rázům, odolnost proti šíření trhlin, vysoká schopnost tlumení vibrací a také tepelná a akustická izolace. Tyto vlastnosti jsou většinou určeny materiálem jádra. Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná druhé mocnině její tloušťky (viz. Tab. 4.).

Tab. 4 Vlastnosti sendvičové konstrukce [11]

Vlastnost	Celistvý materiál 	Tloušťka jádra t 	Tloušťka jádra 3t 
Tuhost	1.00	7.00	37.00
Pevnost v ohybu	1.00	3.50	9.20
Hmotnost	1.00	1.03	1.06

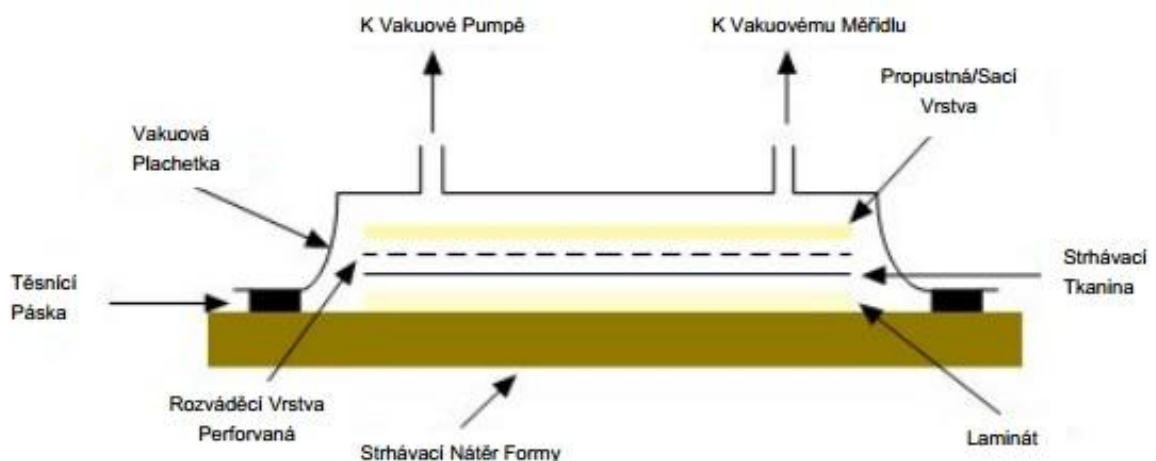
Výhodou sendvičů je, že se zvětšováním tloušťky struktury dochází k velmi nízkému nárůstu jeho hmotnosti - zvětšuje se pouze tloušťka jádra, jež má obvykle velmi nízkou hustotu a hmotnost. Pevnost v ohybu také roste se vzdáleností vnějších vrstev, avšak při dimenzování sendviče je nutné také posuzovat smykovou pevnost jádra, kdy se pevnost jádra ve smyku zvyšuje s jeho hustotou. O pevnosti sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky rozhoduje hlavně pevnost jádra v tlaku, ale i tuhost a tloušťka vnějších vrstev. Pevnost jádra v tlaku roste s jeho hustotou. Z porovnání pevností pěnových a voštinových jader vyplývá, že voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnová jádra se stejnou hustotou. Pochopitelně při volbě vhodného jádra sendviče je nezbytné zohlednit všechny faktory a požadavky konkrétní aplikace. [16]

3 ZPRACOVATELSKÉ TECNOLOGIE

V dnešní době jsou kompozitní materiály používány v širokém spektru odvětví průmyslu. S jejich postupným rozmachem se začalo objevovat stále více technologií, popisujících jejich zpracování do požadovaných tvarů. Použití technologie pro určitý typ průmyslu je do značné míry ovlivněno rozměry výrobků, jejich požadovanou přesností, zatížením konstrukce a také množstvím vyráběných kusů. [17]

3.1 Vakuové lisování

Jde v podstatě o rozšíření metody ručního nanášení, která je popsána výše. Zde navíc na horní stranu laminátu působí tlak pro zlepšení vzájemného sjednocení všech částí. Tlaku je dosaženo překrytím vrstev povlakem z plastické hmoty, přes horní část laminátu a těsnicí pásku. Přes odsávací hubice je vzduch z tohoto navrstveného systému vysát vakuovou pumpou a vzniklý podtlak nám vyvine sílu, která je použita pro zpevnění laminátu.



Obr. 23 Schéma technologie vakuového lisování [17]

Použití materiálů:

- Pryskyřice: Hlavně epoxidové a fenolické. U polyesterových a vinylesterových pryskyřic mohou být problémy s vakuovou pumpou, způsobené nadměrným nasátím styrenu z laminátu.
- Vlákna: Vzniklý spojovací tlak umožňuje použití velkého rozsahu tkanin.
- Jádra: Všechna.

Výhody:

- U vícevrstevných laminátů je možnost dosáhnout vyššího obsahu tkanin, proti klasickému nanášení pryskyřice.
- Schopnost takto dosáhnout většího vyplnění obsahu laminátu.
- Díky vyššímu tlaku dosažení lepšího prosycení vláken pryskyřicí a přebytečná pryskyřice je tím vytlačena do absorpční vrstvy.
- Jde o bezpečnou technologii bez vlivu na zdraví obsluhy. Vakuová fólie zredukuje množství prchavých látek vznikajících při vytvrzování.

Nevýhody:

- Vyšší cena, díky náročnosti na pracovní sílu a také vyšší množství spotřebovaného materiálu.
- Požadovaná vyšší úroveň schopností operátorů.
- Mísení a kontrola obsahu pryskyřice v laminátu je ve velké míře závislá na schopnostech operátorů.

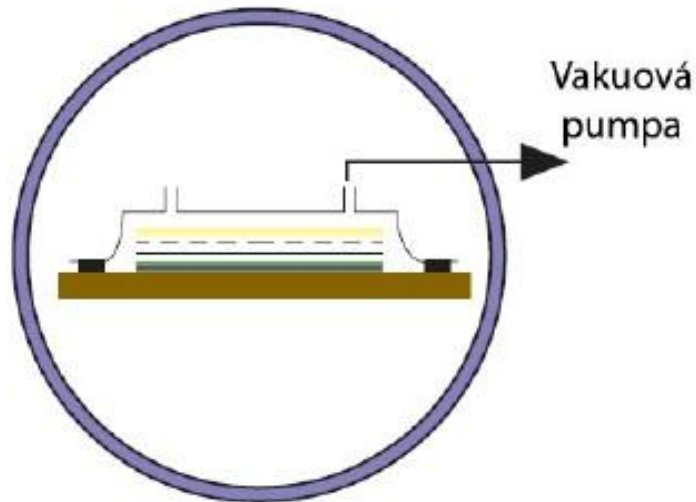
Použití:

Pro výrobu rozsáhlejších ploch, hlavně u lodí a pro závodní automobilový průmysl. [17]

3.2 Vytvrzování v autoklávu

Jedná se o nejnákladnější a nejsložitější technologii pro sériovou výrobu velkorozměrných konstrukcí. Výchozím materiálem jsou vždy prepregy, vyžadující vytvrzování při zvýšených teplot. Skladba vrstev je prakticky stejná, jako při lisování vakuem, forma pokrytá pružnou folií nebo plachetkou se umístí do vyhřívaného autoklávu, provede se nejprve vakuace podtlakem cca 0.8 bar a pak se autokláv natlakuje na cca 6 bar. Obsah výztuže se pak pohybuje přes 60 %.

Po ohřátí autoklávu na požadovanou teplotu nastane vytvrzování pryskyřice (120-200 °C). Vyvozením přetlaku v autoklávu se ještě lépe přitlačí vrstvy prepregu k sobě a je tak zaručen minimální obsah pryskyřice (přetlak je v desetinách MPa).



Obr. 24 Autokláv [18]

Výhody:

- Lze dosáhnout vysokého obsahu výztuže
- Obsah pryskyřice lze přesně stanovit – jsou stanoveny výrobcem materiálu
- Náklady na tkaniny minimalizovány použitím jednosměrných tkanin
- Technologie je šetrná ke zdraví
- Chemickým složením pryskyřice lze ovlivnit mechanické a tepelné vlastnosti
- Potenciál pro automatizaci

Nevýhody:

- Vyšší náklady na materiály
- Drahá údržba a opravu autoklávu
- Pomalý provoz
- Omezená velikost výrobku
- Sendvičové materiály musí být schopny odolávat teplotám a tlakům v procesu

Použití:

- Konstrukční prvky Letadel
- Závodní a sportovní komponenty u automobilu (F1)
- Sportovní potřeby: Lyže, Tenisové rakety, atd. [19], [7]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

- Navrhnout a vyrobit experimentální zkušební vzorky s různým počtem vrstev prepregu za použití technologie tlakového lisování. Následně experimentálně vyhodnotit, jak se ovlivňují mechanické vlastnosti kompozitní laminátové struktury. Stanovení tahových vlastností dle normy ČSN EN ISO 527-4
- Navrhnout a vyrobit experimentální sendvičové struktury s hustotně rozdílnými druhy pěn a různým počtem vrstev prepregu za použití technologie tlakového lisování. Následně vyhodnotit, jak ovlivňují různé kombinace materiálů mechanické vlastnosti struktury. Struktury budou testovány v 3-bodovém ohybu dle normy ČSN EN ISO 178 a Rázovou zkouškou ohybem Charpyho kladivo – Stanovení rázových vlastností dle ČSN EN ISO 179-1

Postup praktické části byl následovný:

- Návrh materiálů
 - Jádru – polymerní pěny s různou hustotou
 - Prepreg – před-impregnované materiály vhodné pro technologii tlakového lisování s minimální lepivostí PH 840-300-42
- Výroba kompozitních materiálů
 - Výroba prepregových struktur technologií tlakového lisování dle technologických podmínek uvedených v materiálovém listu
 - Výroba sendvičových struktur s pěnovým jádrem technologií tlakového lisování dle technologických podmínek uvedených v materiálovém listu
- Testování vyrobených materiálů
 - Tahová zkouška-Stanovení tahových vlastností dle normy ČSN EN ISO 527-4
 - 3-bodový ohyb – Stanovení tahových vlastností dle normy ČSN EN ISO 178
 - Rázová zkouška ohybem Charpyho kladivo – Stanovení rázových vlastností dle ČSN EN ISO 179-1

Samotná experimentální výroba a zkoušky vzorků byly provedeny v laboratořích UVI.

5 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

5.1 Laboratorní lis

Laboratorní lis (Obr. 25) byl použit pro výrobu vzorku prepregových a sendvičových struktur pro další testování. Lis se skládá z izolačních a temperovaných desek a hydraulického zvedáku, který slouží k vytvoření lisovacího tlaku. Tímto lisovacím tlakem bylo docíleno stlačení jádra. Technické údaje přístroje jsou zobrazeny v Tab. 5.



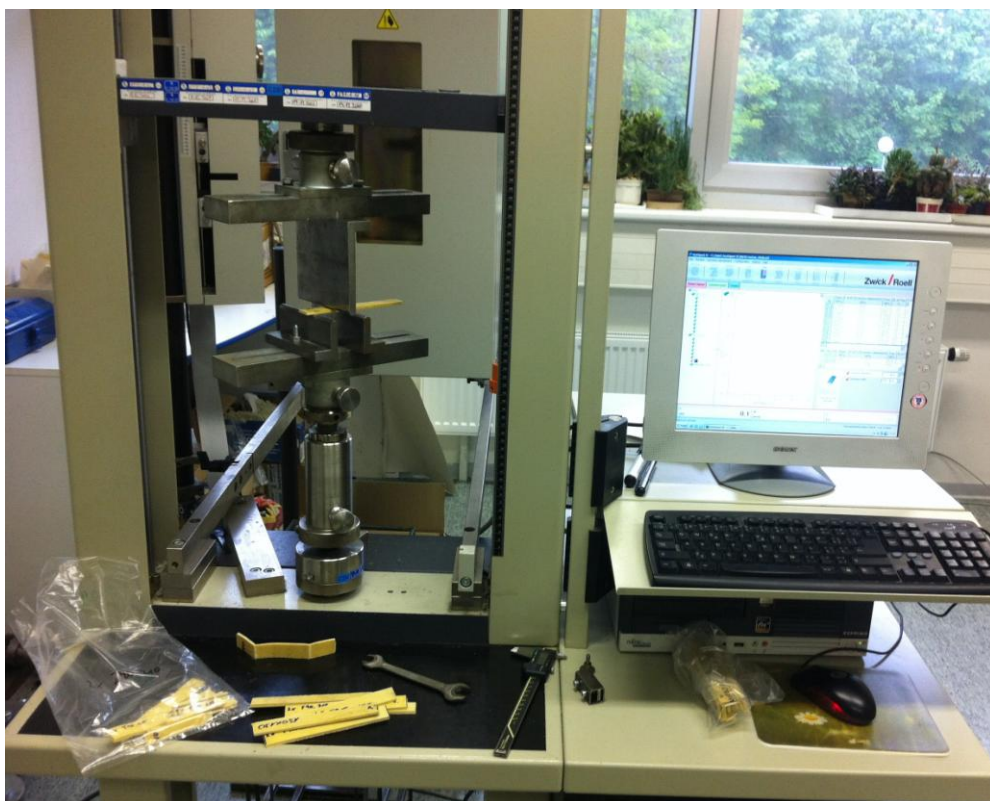
Obr. 25 Laboratorní lis

Tab. 5 Technické údaje laboratorního lisu

Technické údaje	
Rozměry desek	250 x 250 mm
Příkon	2 400 W
Max. teplota	200 °C
Uzavírací síla	5 t

5.2 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456

Ohybové a tahové zkoušky byly provedeny na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456 (Obr. 26). Tento stroj je propojen s počítačem, který zaznamenává data v programu TestExpert II. Zmíněný program je schopen vypočítat základní statistické parametry a také zaznamenat průběhy zkoušky v křivkách. Stroj se skládá z pevného a tuhého rámu. Horní příčník je pohyblivý a spodní s podpěrami je pevný. Tab. 6 zobrazuje technické parametry stroje.



Obr. 26 Univerzální zkušební stroj ZWICK

Tab. 6 Technické údaje univerzálního stroje ZWICK 1456

Technické údaje	
Max. zkušební síla	20 kN
Celková výška	2 012 mm
Celková šířka	630 mm
Strojová výška	1 284 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 kg

5.3 Charpyho kladivo CEAST RESIL IMPACTOR junior

Jedná se o kyvadlové kladivo s velmi tuhou konstrukcí, jehož parametry jsou zobrazeny v Tab. 7. Zařízení (Obr. 27) je schopné měřit rázovou energii potřebnou k přeražení zkušebního tělesa, maximální sílu naměřenou během testu. Hodnota spotřebované rázové energie je definována jako rozdíl mezi počáteční a potenciální energií kyvadla po přeražení zkušebního tělesa. Zařízení je ovládáno mechanicky a vyhodnocení provádí program v počítači.



Obr. 27 Charpyho kladivo CEAST Resil Impactor junior

Tab. 7 Technické údaje Charpyho kladiva

Technické údaje	
Hmotnost kladiva	2,192 Kg
Délka ramene	500 mm
Max. počáteční úhel	140 °

6 POUŽITÉ MATERIÁLY

Při volbě materiálu byl kladen důraz na to, aby se jednalo o materiály, které se reálně používají v praxi. Dalším důležitým faktorem byly jejich vlastnosti a dostupnost.

6.1 Prepreg GURIT PH840-300-42

Tento typ před impregnované tkaniny je určen pro interiérové části železničních prostředků, konkrétně střešní a podlahové panely. Tkanina je impregnovaná fenolickou pryskyřicí. Konkrétní hodnoty specifických vlastností jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 8, 9, 10). Prepreg je nutno skladovat s mrazáku aby nedošlo k aktivaci pryskyřice. Bližší technické specifikace jsou uvedeny v PŘÍLOHA P I.

Tab. 8 Vlastnosti prepregu PH840-300-42

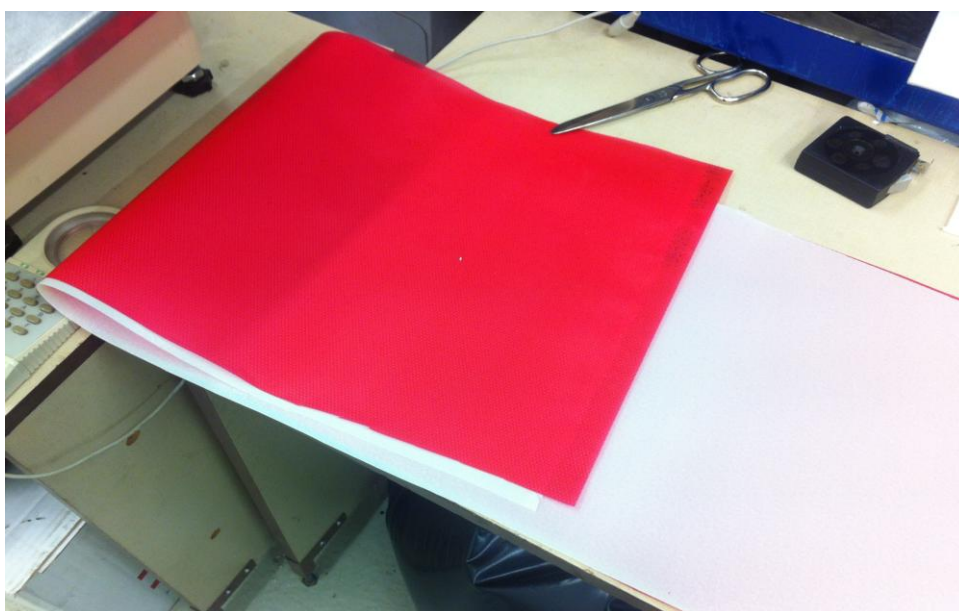
	Norma	Hodnota
Pryskyřice		Fenolická
Hmotnost prepregu	EN 2329	525 ± 30 g/m ²
Těkavost	EN 2330 (160 °C/10 min)	< 6,0 %
Tok pryskyřice	EN 2332 (3 vrstvy, 135 °C, 8 min, 4 bar)	> 10 %
Lepivost		T0, T1, T2
Materiál vláken		E-glass
Hustota tkaniny	EN 2331	296 g/m ± 5%
Vazba		8H saténová
Provozní teplota		-55 °C až + 80 °C
Obsah pryskyřice	EN 2331	42.0 ± 3%

Tab. 9 Vytvrzování prepregu PH840-300-42

	Cyklus
Teplota	120/130/140/160 °C
Čas vytvrzení	90/60/30/10 min
Tlak	0.7 - 0.4 MPa

Tab. 10 Mechanické vlastnosti prepregu PH840-300-42

	Teplota	Norma	Hodnota
Ohybová pevnost	80 °C	ISO 178	300 - 450 MPa
Ohybový modul	80 °C	ISO 178	19 - 22 GPa
Climbing drim odlup	80 °C	EN 2243-3	110 N/75 mm
Tg (TMA)		TMA	> 80 °C



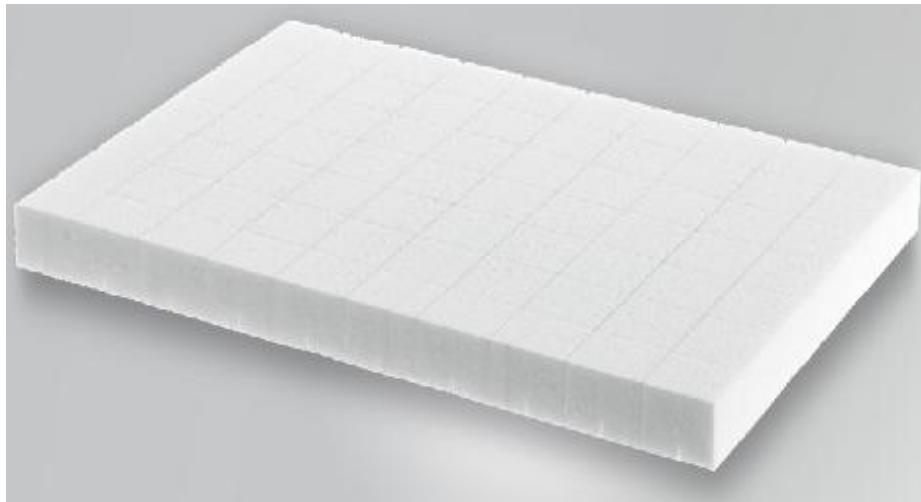
Obr. 28 Prepreg PH840-300-42

6.2 Pěny Airex T90.210 / T90.100 / T90.60

Jedná se o PET pěnu firmy Airex AG. Je to recyklovatelná polymerní pěna s dobrou odolností proti ohni a kouři. Je vhodná pro zpracování všemi typy pryskyřic. Snadno se tepelně tvaruje a zpracovává. Nabízí velkou chemickou odolnost, je odolná proti UV záření a neabsorbují vodu. Jejich mechanické vlastnosti jsou zobrazeny v Tab. 11. Pěna má čistě bílou barvu. Bližší technické specifikace jsou uvedeny v PŘÍLOHA P II.

Tab. 11 Vlastnosti Pěn Airex T90.210 /T90.100/T90.60

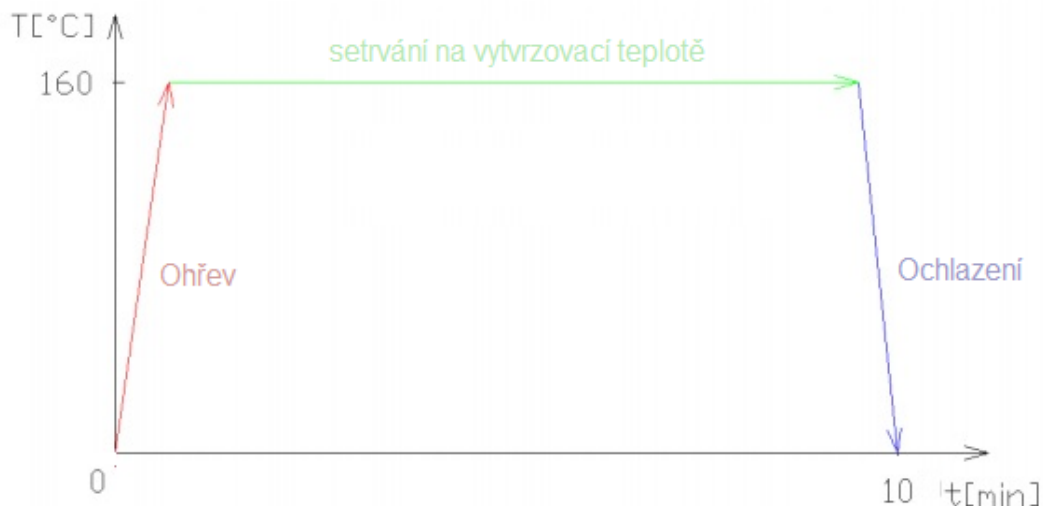
	Norma	Jednotky	Airex T90.210	Airex T90.100	Airex T90.60
Hustota	ISO 845	kg/m ³	210	100	60
Pevnost v tlaku	ISO 844	N/mm ²	3,5	1,4	0,8
Modul pružnosti v tlaku	DIN 53421	N/mm ²	170	85	50
Pevnost v tahu	ASTM C297	N/mm ²	3	2,2	1,5
Modul pružnosti v tahu	ASTM C297	N/mm ²	225	120	85
Pevnost ve smyku	ISO 1922	N/mm ²	1,85	0,8	0,46
Tepelná vodivost	ISO 8301	W/m.K	0,041	0,033	0,033



Obr. 29 Pěna Airex T90

7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH STRUKTUR

Všechny materiály byly vyráběny na vulkanizačním lisu při teplotě 160°C a času 10 min v otevřené formě ve tvaru rovné desky, které byly následně rozřezány na specifické rozměry, na kterých mohla být provedena zkouška.



Obr. 30 Schéma vytvrzovacího cyklu výroby vzorků

Pomůcky

Nůžky, nůž, pravítko s riskou, fix, šablona, pila s diamantovým kotoučem

7.1 Struktury č. 1, č. 2, č. 3

Struktury č. 1, č. 2, č. 3 byly vyrobeny pouze z prepregu PH840-300-42, lišily se pouze v počtu vrstev na sobě. Rozměry vyrobených desek byly 160 x 160 mm a následně nařezány na zkušební vzorky o rozměru 20 x 150 mm. Tyto vzorky byly vyrobeny pro tahovou zkoušku.

Tab. 12 Složení jednotlivých struktur č. 1, č. 2, č. 3

	struktury č. 1	struktury č. 2	struktury č. 3
Skladba	1	1	1
Počet výztužných vrstev	2	3	4
Materiál výztužných vrstev	Prepreg PH840-300-42	Prepreg PH840-300-42	Prepreg PH840-300-42



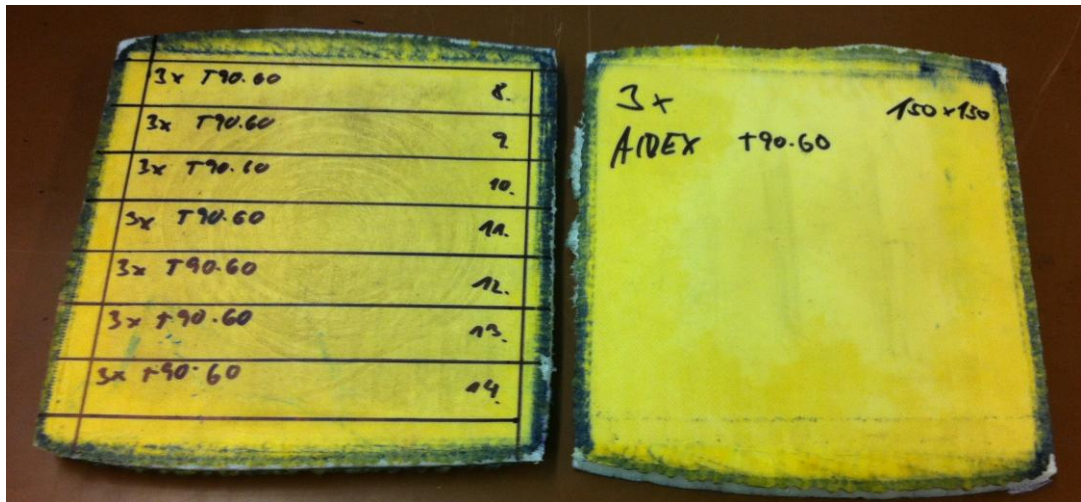
Obr. 31 Stříhání vzorků pro tahovou zkoušku

7.2 Struktury č. 4, č. 5, č. 6

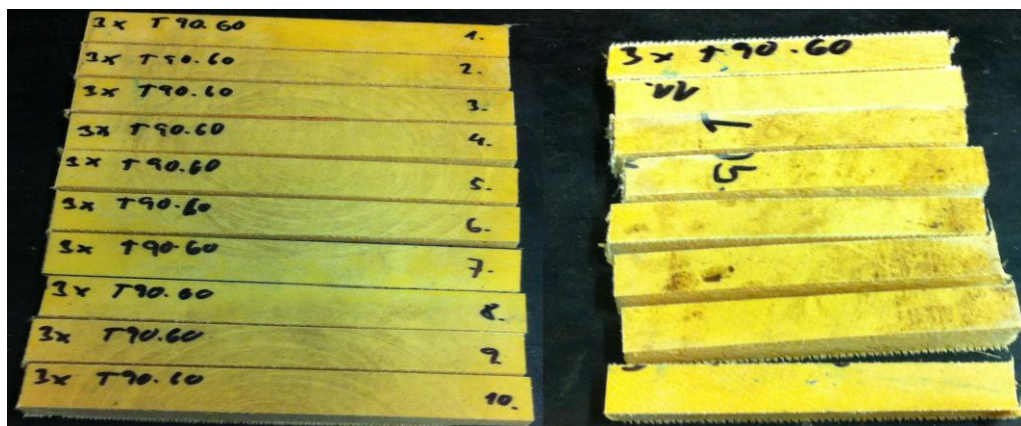
Struktury č. 4, č. 5, č. 6 byly vyrobeny z prepregu PH840-300-42 s pěnovým jádrem Airex T90.60. Sendviče lišily pouze v počtu vrstev prepregu na sobě. Rozměry vyrobených desek byly 150 x 150 mm a následně nařezány na zkušební vzorky o rozměrech 20 x 140 mm, které jsou určeny pro 3-bodový ohyb. Dále byly nařezány zkušební vzorky o rozměrech 12 x 70 mm ty jsou určeny pro rázovou zkoušku.

Tab. 13 Složení jednotlivých struktur č. 4, č. 5, č. 6

	struktury č. 4	struktury č. 5	struktury č. 6
Skladba	1-1-1	2-1-2	3-1-3
Počet výztužných vrstev	2	4	6
Materiál výztužných vrstev	Prepreg PH840-300-42	Prepreg PH840-300-42	Prepreg PH840-300-42
Jádro	PET, Airex T90.60, tl. 10 mm	PET, Airex T90.60, tl. 10 mm	PET, Airex T90.60, tl. 10 mm



Obr. 32 Vylisované sendvičové struktury



Obr. 33 Nařezané zkušební vzorky vlevo 20 x 140mm, vpravo 12 x 70 mm

7.3 Struktury č. 7, č. 8, č. 9

Struktury č. 7, č. 8, č. 9 byly vyrobeny z prepregu PH840-300-42 s pěnovým jádrem Airex T90.100. Sendviče se lišily pouze v počtu vrstev prepregu na sobě. Rozměry vyrobených desek byly 150 x 150 mm a následně nařezány na zkušební vzorky o rozměrech 20 x 140 mm, které jsou určeny pro 3-bodový ohyb. Dále byly nařezány zkušební vzorky o rozměrech 12 x 70 mm ty jsou určeny pro rázovou zkoušku.

Tab. 14 Složení jednotlivých struktur č. 7, č. 8, č. 9

	struktury č. 7	struktury č. 8	struktury č. 9
Skladba	1-1-1	2-1-2	3-1-3
Počet výztužných vrstev	2	4	6
Materiál výztužných vrstev	Prepreg PH840-300-42	Prepreg PH840-300-42	Prepreg PH840-300-42
Jádro	PET, Airex T90.100, tl. 10 mm	PET, Airex T90.100, tl. 10 mm	PET, Airex T90.100, tl. 10 mm

7.4 Struktury č. 10, č. 11, č. 12

Struktury č. 10, č. 11, č. 12 byly vyrobeny z prepregu PH840-300-42 s pěnovým jádrem Airex T90.210. Sendviče se lišily pouze v počtu vrstev prepregu na sobě. Rozměry vyrobených desek byly 150 x 150 mm a následně nařezány na zkušební vzorky o rozměrech 20 x 140 mm, které jsou určeny pro 3-bodový ohyb. Dále byly nařezány zkušební vzorky o rozměrech 12 x 70 mm ty jsou určeny pro rázovou zkoušku.

Tab. 15 Složení jednotlivých struktur č. 10, č. 11, č. 12

	struktury č. 10	struktury č. 11	struktury č. 12
Skladba	1-1-1	2-1-2	3-1-3
Počet výztužných vrstev	2	4	6
Materiál výztužných vrstev	Prepreg PH840-300-42	Prepreg PH840-300-42	Prepreg PH840-300-42
Jádro	PET, Airex T90.210, tl. 3 mm	PET, Airex T90.210, tl. 3 mm	PET, Airex T90.210, tl. 3 mm



Obr. 34 Uspořádání jednotlivých materiálů pro výrobu sendviče

8 TESTOVÁNÍ VYROBENÝCH STRUKTUR

- Tahová zkouška dle normy ČSN EN ISO 527-4– struktury č. 1, 2, 3
- 3 - bodový ohyb ČSN EN ISO 178 – struktury č. 4 - 12
- Rázová zkouška ohybem Charpyho kladivo ČSN EN ISO 179-1– struktury č. 4 - 12

8.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456. U této zkoušky (Obr. 35) byly sledovány tyto parametry: tloušťka a šířka vzorku, mez pevnosti v tahu, poměrná deformace na mezi pevnosti, modul pružnosti v tahu a práce při mezi úměrnosti v tahu. K dispozici vždy bylo 8 zkušebních vzorků s rozměry 20 x 150 mm z každé struktury. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v PŘÍLOHA P III.

Nastavené hodnoty pro zkoušku tahem

- rychlost zatížení	10 mm·min ⁻¹
- před zatížení	5 N
- rychlost před zatížení	5 mm·min ⁻¹
- rychlost při měření modulu pružnosti	1 mm·min ⁻¹
- vzdálenost čelistí	100 mm

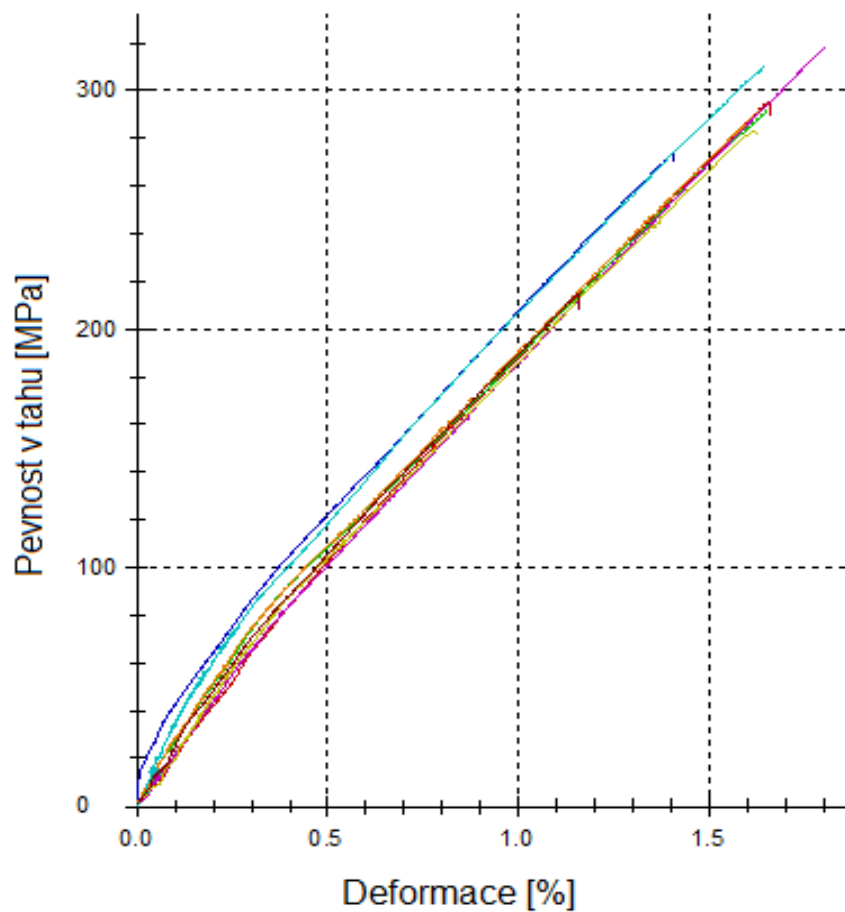


Obr. 35 Tahová zkouška

8.1.1 Naměřené tahové vlastnosti materiálu struktura č. 1

Tab. 16 Tahové vlastnosti materiálu struktura č. 1

n = 8	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	$\epsilon_{\sigma mf}$ [%]	$W_{\sigma mf}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	23800	285,0	1,6	773,65	0,52	20,23
s	2220	31,6	0,2	161,57	0,02	0,05

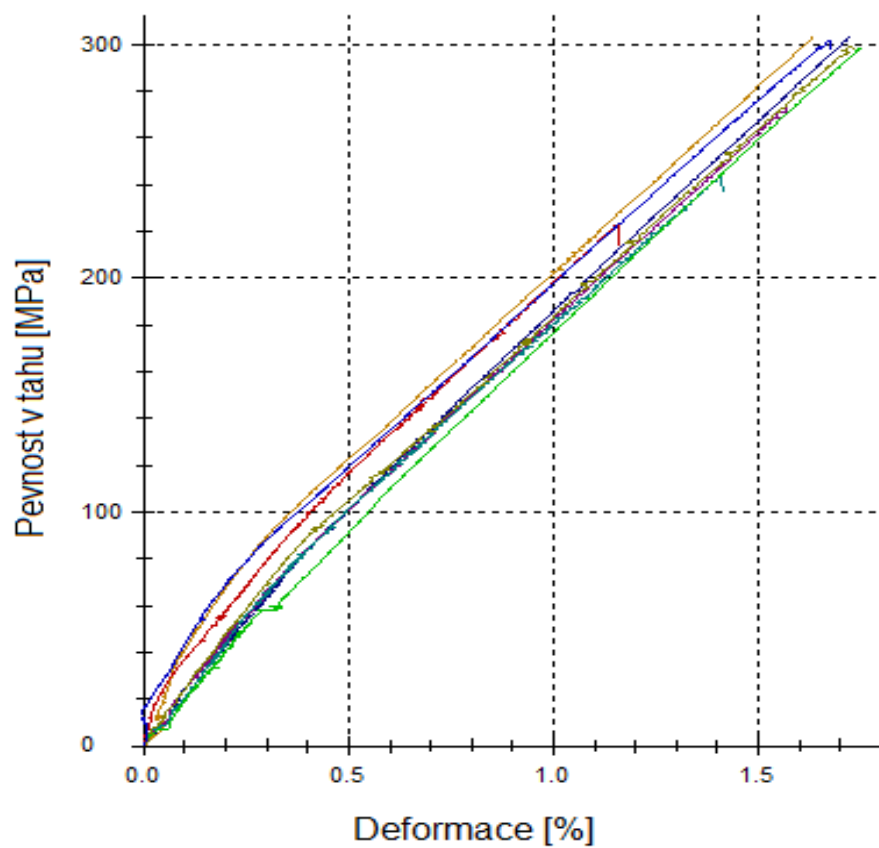


Obr. 36 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci struktura č. 1

8.1.2 Naměřené tahové vlastnosti materiálu struktura č. 2

Tab. 17 Tahové vlastnosti materiálu struktura č. 2

n = 8	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	$\epsilon_{\sigma mf}$ [%]	$W_{\sigma mf}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	23800	281,0	1,6	1157,21	0,79	20,09
s	2870	31,4	0,2	249,86	0,02	0,05

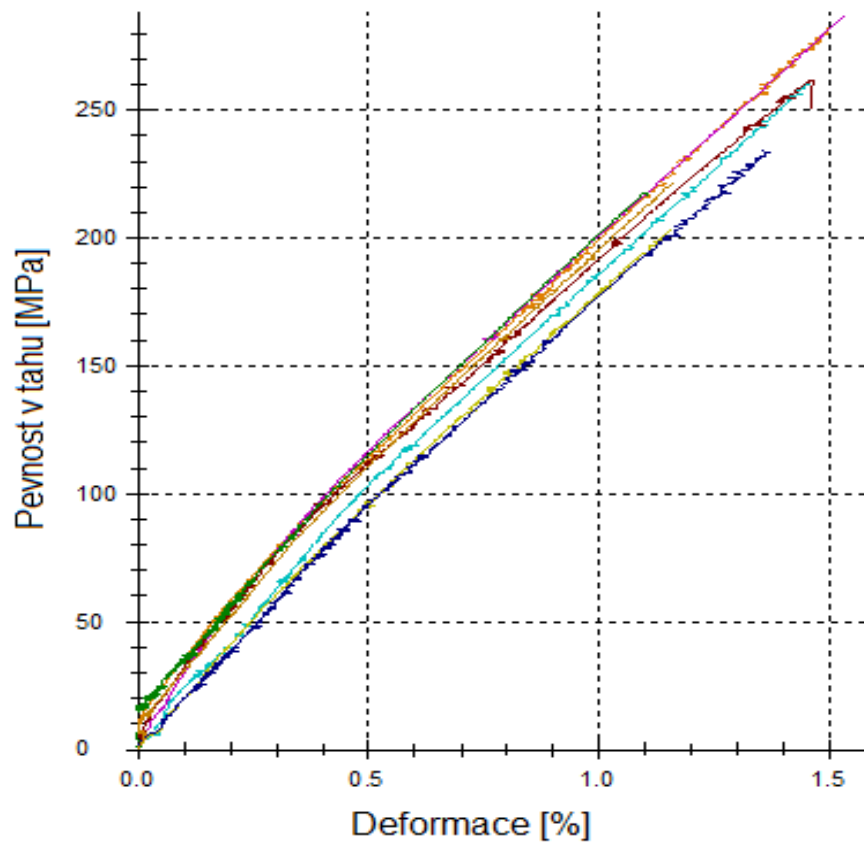


Obr. 37 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci struktura č. 2

8.1.3 Naměřené tahové vlastnosti materiálu struktura č. 2

Tab. 18 Tahové vlastnosti materiálu struktura č. 3

n = 8	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	$\epsilon_{\sigma mf}$ [%]	$W_{\sigma mf}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	21400	246,0	1,3	1159,37	1,05	20,20
s	1870	31,1	0,2	295,55	0,02	0,05



Obr. 38 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci struktura č. 3

8.1.4 Shrnutí výsledků tahových zkoušek

Tab. 19 Porovnání jednotlivých zjištěných hodnot

počet vrstev prepregu	2	3	4
E [MPa]	23800	23800	21400
σ_{mf} [MPa]	285	281	246
$\epsilon_{\sigma mf}$ [%]	1,6	1,6	1,3
$W_{\sigma mf}$ [N.mm]	773,65	1157,21	1159,37
a [mm]	0,52	0,79	1,05
b [mm]	20,23	20,09	20,20

Při zkoušce došlo vždy k úplnému přetržení vzorku a delaminaci mezi vrstvami prepregu v místě lomu (Obr. 39).



Obr. 39 Vzorek po tahové zkoušce

8.2 Zkouška 3-bodovým ohybem

Zkouška 3-bodovým ohybem (Obr. 40) byla provedena na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456. U této zkoušky byla sledována maximální pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu a poměrná deformace na mezi pevnosti v ohybu. K dispozici vždy bylo 10 zkušebních vzorků o rozměrech 20 x 140 mm z každé struktury. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v PŘÍLOHA P IV.

Nastavené hodnoty pro zkoušku ohybem

- rychlost zatížení $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- před zatížení 2 N
- rychlost před zatížení $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 40 Zkouška 3-bodovým ohybem

8.2.1 Ohybové vlastnosti pro pěny Airex T90.60 s různým počtem vrstev prepregu

Tab. 20 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.60 1-1-1

n = 10	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	761	4,00	0,6	42,44	10,00	19,80
s	171	0,53	0,1	8,22	0,02	0,05

Tab. 21 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.60 2-1-2

n = 10	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	905	7,36	1,2	177,27	10,50	19,80
s	244	1,95	0,1	41,30	0,02	0,05

Tab. 22 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.60 3-1-3

n = 10	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	823	7,84	2,1	370,6	10,50	19,80
s	180	0,85	0,3	70,4	0,02	0,05

8.2.2 Ohybové vlastnosti pro pěny Airex T90.100 s různým počtem vrstev prepregu

Tab. 23 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.100 1-1-1

n = 10	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	1570	8,97	0,6	83,50	10,00	19,80
s	101	0,97	0,0	12,79	0,02	0,05

Tab. 24 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.100 2-1-2

n = 10	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	2220	21,90	1,4	555,96	10,00	19,80
s	111	2,99	0,2	197,61	0,02	0,05

Tab. 25 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.100 3-1-3

n = 10	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	2300	23,30	1,5	653,58	10,50	19,80
s	527	3,66	0,1	121,16	0,02	0,05

8.2.3 Ohybové vlastnosti pro pěny Airex T90.210 s různým počtem vrstev prepregu

Tab. 26 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.210 1-1-1

n = 10	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	6590	79,80	1,4	209,93	3,00	19,80
s	223	12,70	0,3	88,49	0,02	0,05

Tab. 27 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.210 2-1-2

n = 10	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	9940	91,70	3,2	728,88	3,00	19,80
s	582	10,60	1,6	409,11	0,02	0,05

Tab. 28 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.210 3-1-3

n = 10	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
\bar{x}	13600	115,00	4,9	1477,16	3,00	19,80
s	868	5,90	1,0	300,01	0,02	0,05

8.2.4 Shrnutí výsledků ohybových zkoušek

Tab. 29 Porovnání jednotlivých zjištěných hodnot

typ struktury	T90.60			T90.100			T90.210		
	1-1-1	2-1-2	3-1-3	1-1-1	2-1-2	3-1-3	1-1-1	2-1-2	3-1-3
E [MPa]	761	905	823	1570	2220	2300	6590	9940	13600
σ_m [MPa]	4,00	7,36	7,84	8,97	21,90	23,30	79,80	91,70	115,00
ϵ_{σ_m} [%]	0,6	1,2	2,1	0,6	1,4	1,5	1,4	3,2	4,9
W_{σ_m} [N.mm]	42,44	177,27	370,60	83,50	555,96	653,58	209,93	728,88	1477,16

Při zkoušce nedošlo k úplnému zničení vzorku, ale pouze k lokálnímu porušení vnějších vrstev a místnímu stlačení pěnového jádra, kdy po přerušení působení síly a zvednutí příčnicku došlo u pěn T90.60 a T90.100 k částečnému zvednutí deformovaného jádra (Obr. 41).



Obr. 41 Vzorky po ohybové zkoušce

8.3 Rázová zkouška ohybem

Rázová zkouška (Obr. 42) byla provedena na zařízení CEAST RESIL IMPACTOR junior. Rozměry zkušebních vzorků byly voleny s ohledem na velikost padacího kladiva. K dispozici bylo 8 zkušebních vzorků s rozměry 12 x 70 mm z každé struktury. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v PŘÍLOHA P V.

Nastavené hodnoty pro zkoušku ohybem

- uhel nastavení kladiva 140 °
- energie kladiva 15 J – 3,7 m/s

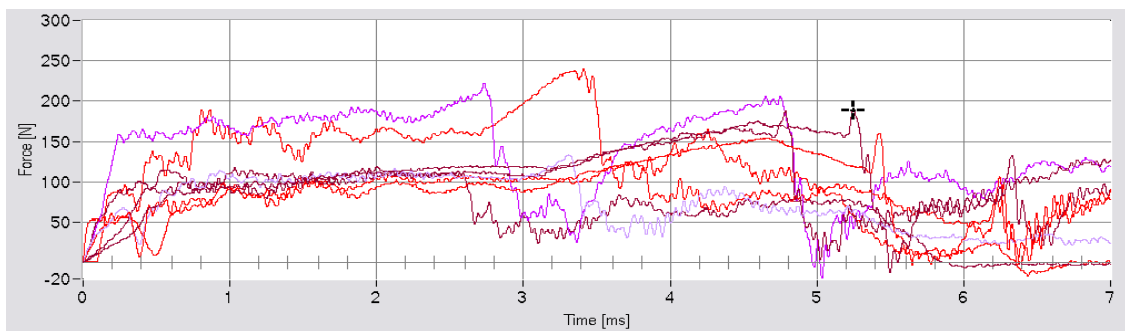


Obr. 42 Rázová zkouška v ohybu

8.3.1 Rázové vlastnosti pro pěny Airex T90.60 s různým počtem vrstev prepregu

Tab. 30 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.60 1-1-1

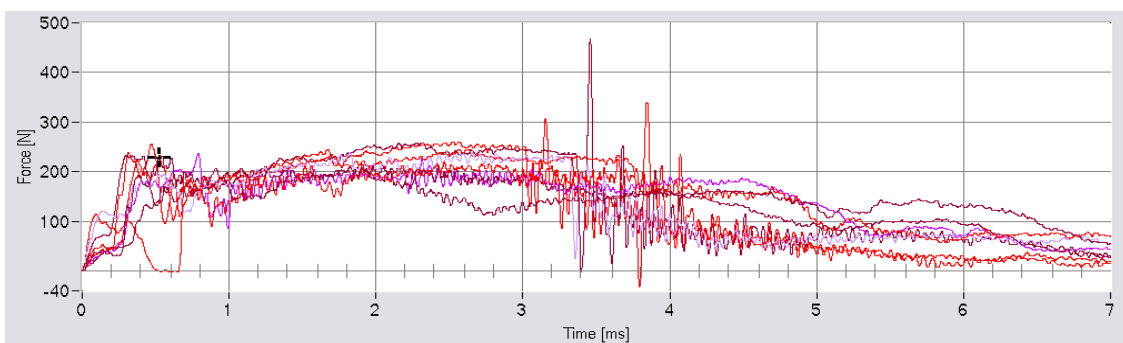
n=8	Fm [N]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
\bar{x}	172,03	11,16	18,13
s	42,23	2,66	3,11



Obr. 43 Grafické vyhodnocení Airex T90.60 1-1-1

Tab. 31 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.60 2-1-2

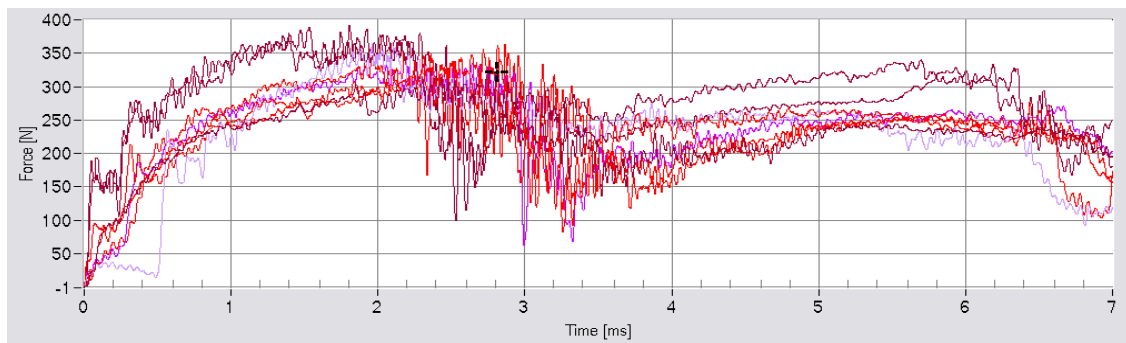
n=8	Fm [N]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
\bar{x}	282,48	12,58	26,12
s	81,45	7,19	0,94



Obr. 44 Grafické vyhodnocení Airex T90.60 2-1-2

Tab. 32 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.60 3-1-3

n=8	Fm [N]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
\bar{x}	358,43	13,70	32,56
s	22,29	2,52	2,49

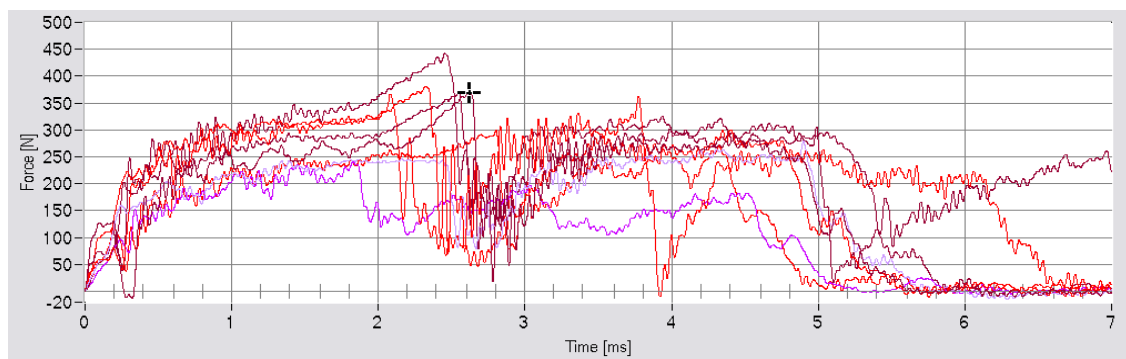


Obr. 45 Grafické vyhodnocení Airex T90.60 3-1-3

8.3.2 Rázové vlastnosti pro pěny Airex T90.100 s různým počtem vrstev prepregu

Tab. 33 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.100 1-1-1

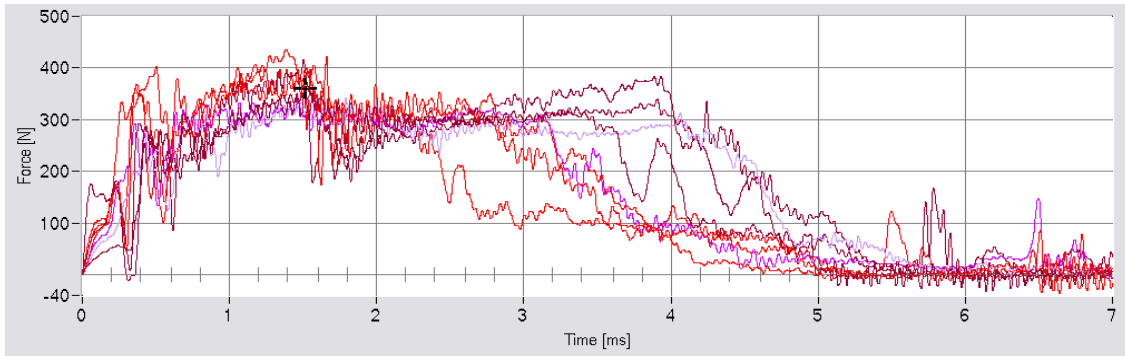
n=8	Fm [N]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
\bar{x}	343,38	19,19	30,36
s	60,98	5,40	4,72



Obr. 46 Grafické vyhodnocení Airex T90.100 1-1-1

Tab. 34 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.100 2-1-2

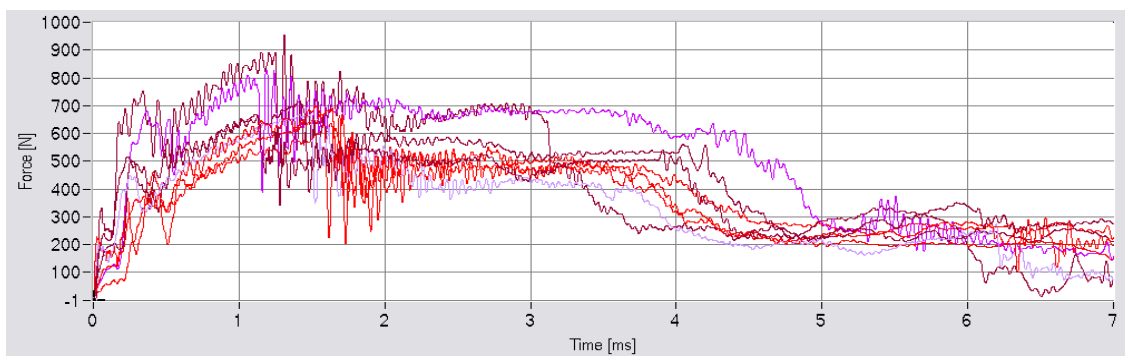
n=8	Fm [N]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
\bar{x}	381,10	20,52	34,40
s	35,12	3,17	3,42



Obr. 47 Grafické vyhodnocení Airex T90.100 2-1-2

Tab. 35 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.100 3-1-3

n=8	Fm [N]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
\bar{x}	725,80	22,02	67,75
s	102,37	4,05	6,54

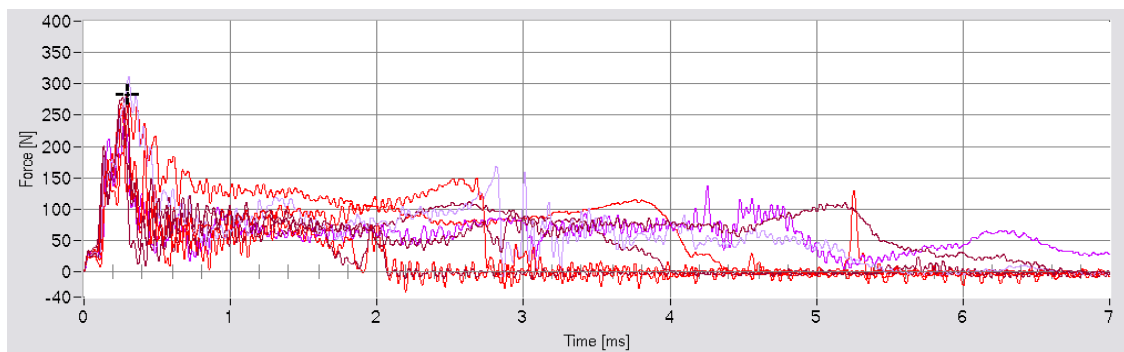


Obr. 48 Grafické vyhodnocení Airex T90.100 3-1-3

8.3.3 Rázové vlastnosti pro pěny Airex T90.210 s různým počtem vrstev prepregu

Tab. 36 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.210 1-1-1

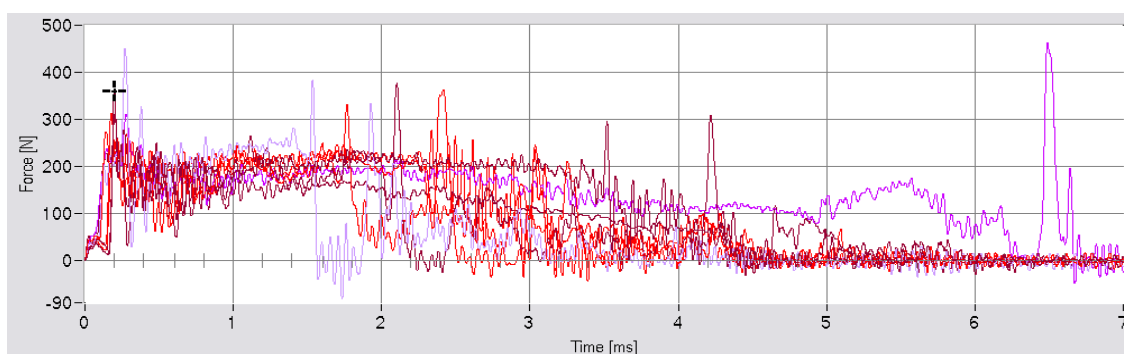
n=8	Fm [N]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
\bar{x}	270,14	23,38	31,73
s	20,67	0,48	12,04



Obr. 49 Grafické vyhodnocení Airex T90.210 1-1-1

Tab. 37 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.210 2-1-2

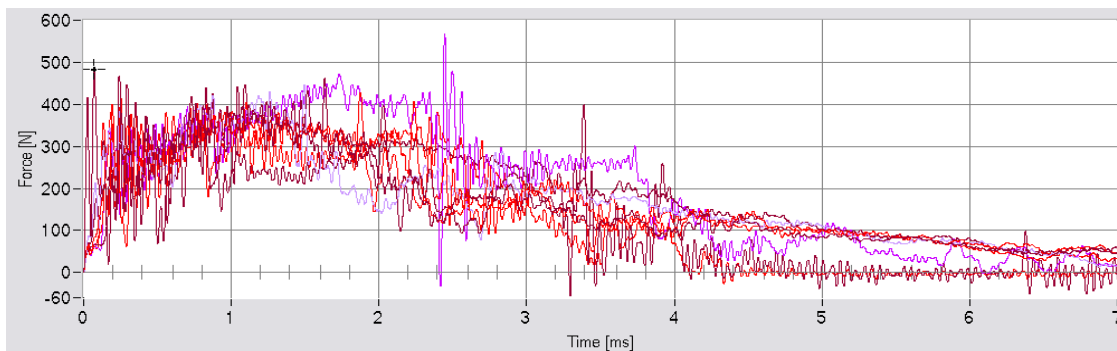
n=8	Fm [N]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
\bar{x}	358,77	28,61	47,87
s	69,32	24,37	15,86



Obr. 50 Grafické vyhodnocení Airex T90.210 2-1-2

Tab. 38 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.210 3-1-3

n=8	Fm [N]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
\bar{x}	452,88	37,05	83,46
s	50,98	22,45	10,00



Obr. 51 Grafické vyhodnocení Airex T90.210 3-1-3

8.3.4 Shrnutí výsledků rázových zkoušek

Tab. 39 Porovnání jednotlivých zjištěných hodnot

typ struktury	tloušťka 10 mm			tloušťka 10 mm			tloušťka 3 mm		
	T90.60			T90.100			T90.210		
	1-1-1	2-1-2	3-1-3	1-1-1	2-1-2	3-1-3	1-1-1	2-1-2	3-1-3
Fm[N]	172,03	282,48	358,43	343,38	381,10	725,80	270,14	358,77	452,88
Am[KJ/m ²]	11,16	12,58	13,70	19,19	20,52	22,02	23,38	28,61	37,05
Ab[KJ/m ²]	18,13	26,12	32,56	30,36	34,40	67,75	31,73	47,87	83,46

Při zkoušce docházelo k velkému porušení struktur. V některých případech došlo k úplnému rozlomení, ale většinou došlo k oddělení prepregu od pěny (Obr. 52).

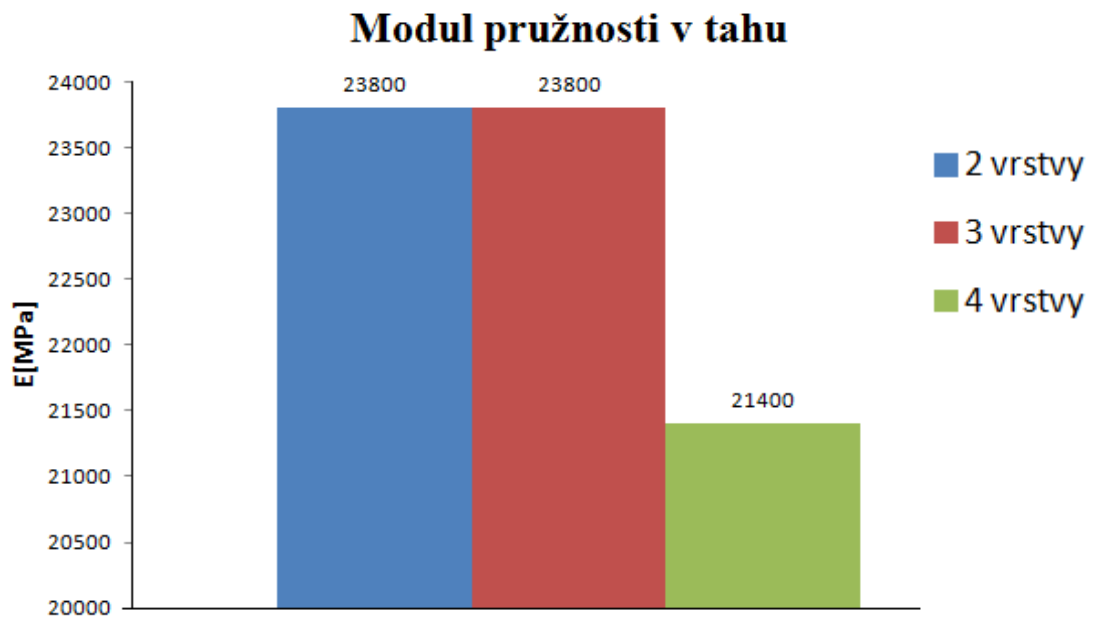


Obr. 52 Zkušební vzorky po rázové zkoušce

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

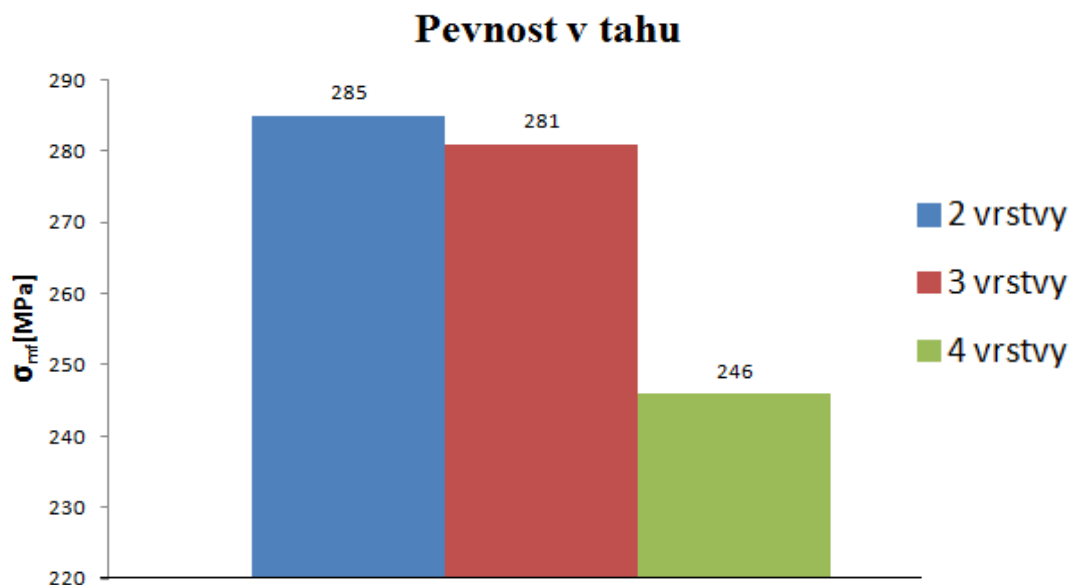
Zhodnocení a srovnání naměřených výsledků.

9.1 Vyhodnocení výsledků tahové zkoušky



Obr. 53 Graf modulu pružnosti v tahu v závislosti na počtu vrstev prepregu

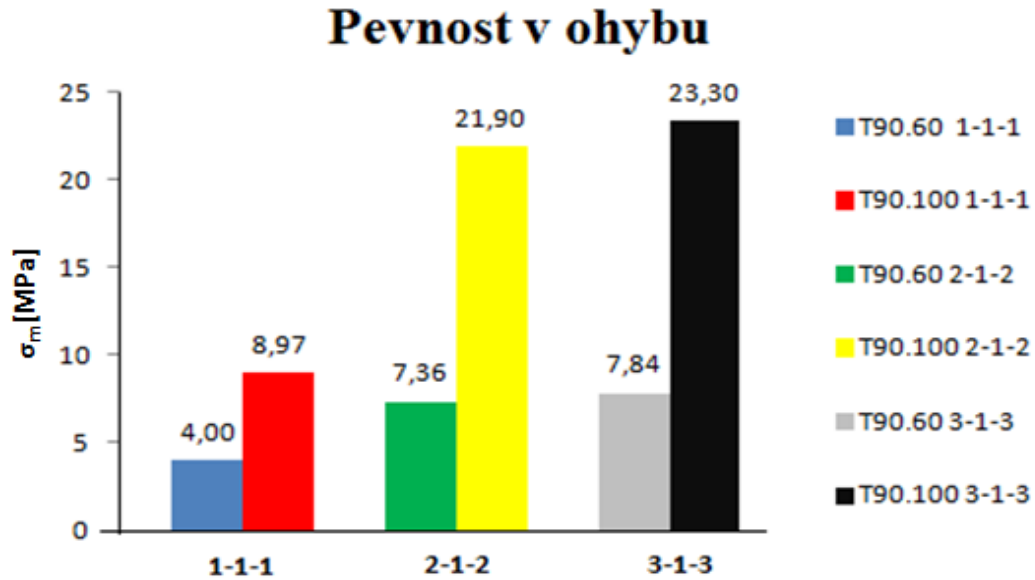
V grafu (Obr. 53) jsem porovnával modul pružnosti v tahu s rozdílným počtem vrstev prepregu. Z výsledků můžeme vyčíst, že modul pružnosti zůstává stejný u 2 a 3 vrstev, ale při 4 vrstvách se modul pružnosti snížil o 10 %. Což je způsobeno nadbytkem pryskyřice ve vzorku, která je slabým místem kompozitních materiálů, způsobuje delaminaci, resp., obsahuje dutiny, které se projevují poklesem modulu pružnosti a v našem případě se projevila i problémy při upínání do čelistí stroje.



Obr. 54 Graf pevnosti v tahu v závislosti na počtu vrstev prepregu

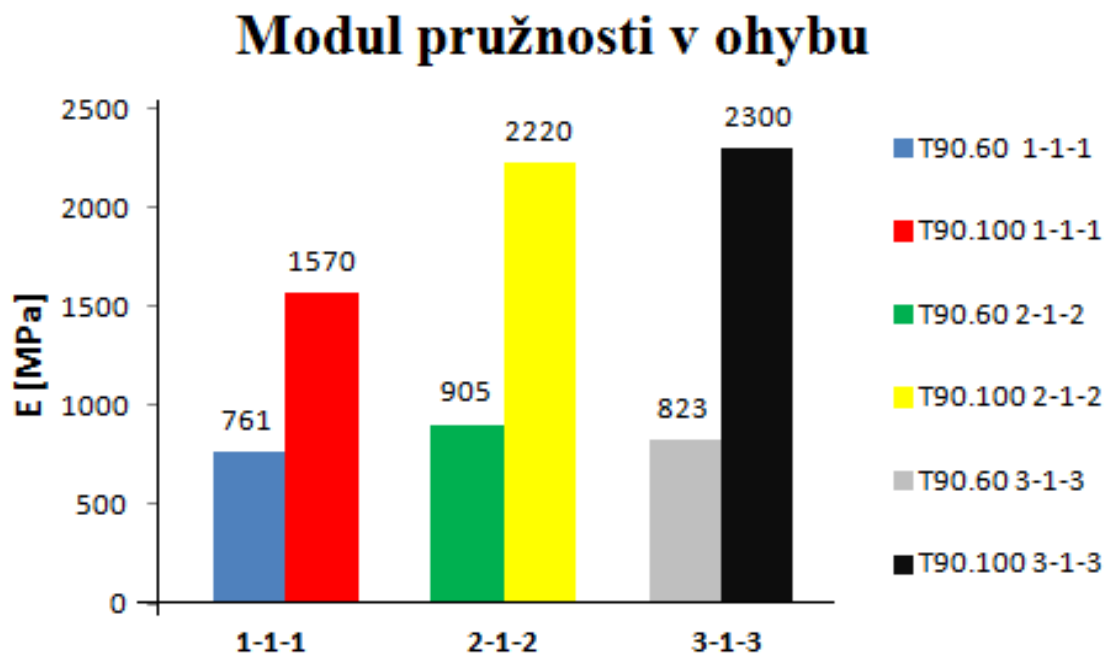
V grafu (Obr. 54) jsem porovnával struktury s rozdílným počtem vrstev prepregu. Z výsledků můžeme vyčíst, že pevnost v tahu je nejvyšší u 2 vrstev, u 3 a 4 vrstev se snižuje. Rozdíl pevnosti v tahu mezi 2 a 4 vrstvami je přibližně 14 %. I zde jsou výsledky ovlivněny nadbytkem pryskyřice ve vzorku, která je slabým místem kompozitních materiálů, způsobuje delaminaci, resp., obsahuje dutiny, které se projevují poklesem pevnosti a v našem případě se projevila i problémy při upínání do čelistí stroje.

9.2 Vyhodnocení výsledků ohybových zkoušek



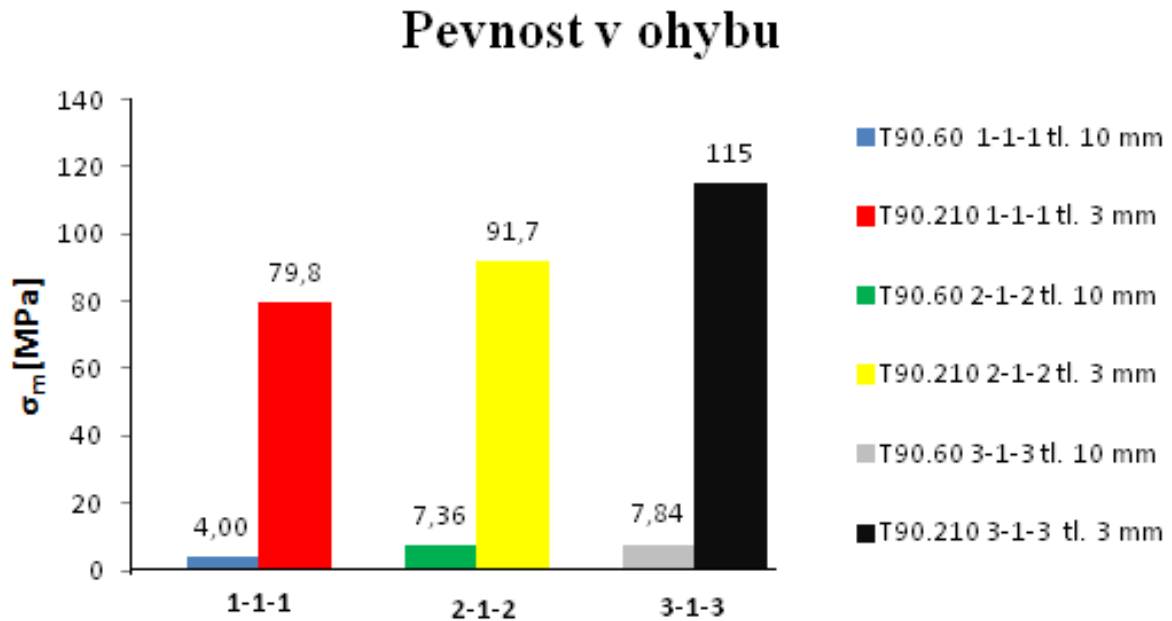
Obr. 55 Graf pevnosti v ohybu v závislosti na hustotě při rozdílném počtu vrstev prepregu

V grafu (Obr. 55) jsem porovnával struktury s rozdílnou hustotou a počtem vrstev prepregu. Vyplývá, že s rostoucí hustotou jádra roste pevnost v ohybu. Další faktory, které nám ovlivňují výslednou pevnost, je počet vrstev prepregu. Největší nárůst pevnosti byl zaznamenán u pěn T90.100 struktury 3-1-3, kde výsledná pevnost byla o 61 % větší než pevnost struktury 1-1-1 při stejné hustotě. U struktur s pěnou T90.100 došlo k 55-83 % zvýšení pevnosti oproti pění T90.60 v závislosti na počtu vrstev prepregu.



Obr. 56 Graf modulu pružnosti v ohybu v závislosti na hustotě při rozdílném počtu vrstev prepregu

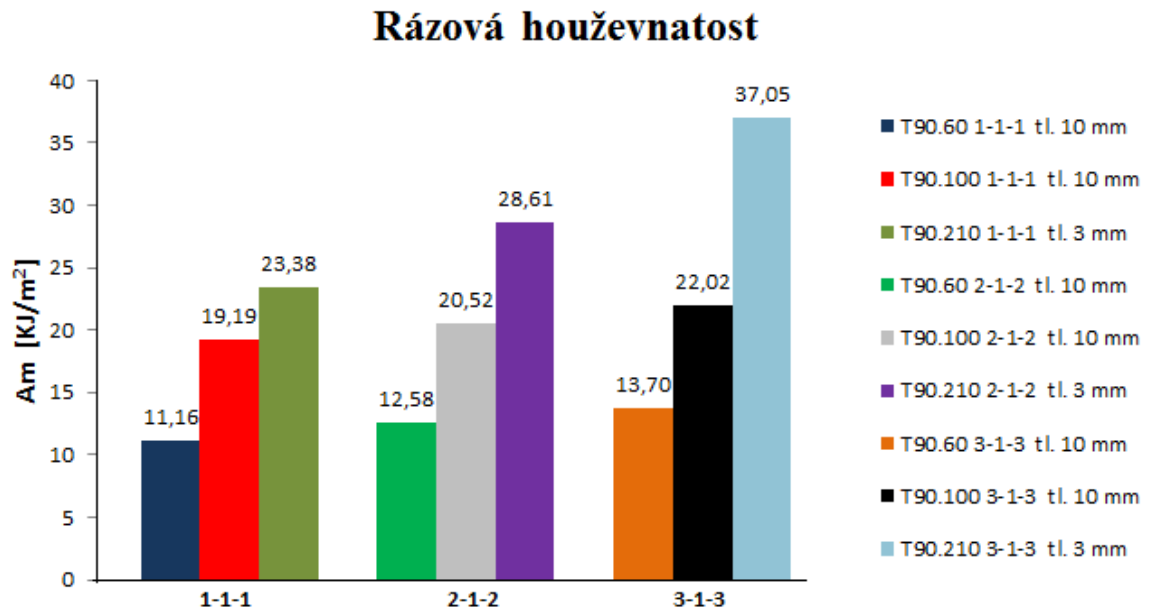
V grafu (Obr. 56) jsem porovnával struktury s rozdílnou hustotou a počtem vrstev prepregu. Vyplývá, že s rostoucí hustotou jádra roste modul pružnosti v ohybu. Další faktory, které nám ovlivňují výslednou pevnost, je počet vrstev prepregu. Největší nárůst modulu pružnosti byl zaznamenán u pěn T90.100 struktury 3-1-3, kde výsledná pevnost byla o 32 % větší než pevnost struktury 1-1-1 při stejné hustotě. U struktur s pěnou T90.100 došlo k 52-64 % zvýšení pevnosti oproti pěně T90.60 v závislosti na počtu vrstev prepregu.



Obr. 57 Závislost pevnosti v ohybu v závislosti na rozdílné hustotě a tloušťce při rozdílném počtu vrstev prepregu

V grafu (Obr. 57) jsem porovnával struktury s rozdílnou hustotou a tloušťkou při rozdílném počtu vrstev prepregu. Vyplývá, že struktura s tloušťkou 3 mm pěny T90.210 dosahovala nárůstu pevnosti v ohybu v rozmezí 92-95 % v závislosti na počtu vrstev prepregu oproti struktuře s tloušťkou 10 mm pěny T90.60.

9.3 Vyhodnocení výsledků rázových zkoušek



Obr. 58 Grafické porovnání energie při přerušení

Rázovou zkouškou houževnatosti zjišťujeme kolik práce (Obr. 58) spotřebujeme na porušení zkušebního tělesa. Zde se chovala nejlépe pěna T90.210 tl. 3 mm s typem struktury 3-1-3, kde hustota pěny ovlivnila výsledek a maximální energie potřebná k přeražení vzorku obsahující tuto pěnu dosahovala $A_m = 37,05 \text{ KJ/m}^2$

ZÁVĚR

Teoretické části této bakalářské práce je rozdělena na tři samostatné kapitoly. První kapitola je věnována kompozitním materiálům a jejich rozdělení. Další kapitola se věnuje prepreg materiálům a jeho výroby. Dále se zabývá sendvičovými kompozitními konstrukcemi, jejich vlastnostmi a jednotlivými složkami tvořící sendvičové konstrukce. V poslední kapitole teoretické části jsem se zabýval zpracovatelskými technologiemi, kde jsem se zaměřil na jejich využití, výhody a nevýhody.

V praktické části jsem se zaměřil na experimentální návrh výrobu prepregových struktur a sendvičů s pěnovými PVC jádry s rozdílnou hustotou. Poté jsem prováděl mechanické zkoušky pro zjištění mechanických vlastností vyrobených kompozitních materiálů. Následné vyhodnocení a diskuze k naměřeným výsledkům, včetně odůvodnění.

V praktické části byly vyrobeny 3 typy struktur po 2, 3, 4 vrstvách prepregu. Na nichž byla provedena tahová zkouška, ze které jsme zjistily, že modul pružnosti v tahu u struktur s 2 a 3 vrstvy prepregu je stejný, ale 4 vrstev nastává snížení modulu pružnosti o 10 %. U meze pevnosti vyšly výsledky podobně a došlo k 14 % snížení pevnosti v tahu mezi strukturami po 2 a 3 vrstvách prepregu. Důvodem byl nadbytek pryskyřice ve vzorku, která je slabým místem kompozitních materiálů, způsobuje delaminaci.

Další výroba v praktické části byla zaměřena na výrobu kompozitních sendvičových struktur s rozdílnou hustotou a rozdílným počtem vrstev prepregu. Na nichž byla provedena zkouška 3-bodovým ohybem. V prvním grafu jsme porovnávali pevnost v ohybu v závislosti na rozdílné hustotě a rozdílném počtu vrstev prepregu při stejné tloušťce. Zjistili jsme, že největší nárůst pevnosti byl zaznamenán u pěn T90.100 struktury 3-1-3, kde výsledná pevnost byla o 61% větší než pevnost struktury 1-1-1 při stejné hustotě. U struktur s pěnou T90.100 došlo k 55-83 % zvýšení pevnosti oproti pění T90.60 v závislosti na počtu vrstev prepregu. V druhém grafu jsme porovnávali modul pružnosti v ohybu v závislosti na rozdílné hustotě a rozdílném počtu vrstev prepregu při stejné tloušťce. Největší nárůst modulu pružnosti byl zaznamenán u pěn T90.100 struktury 3-1-3, kde výsledná pevnost byla o 32 % větší než pevnost struktury 1-1-1 při stejné hustotě. U struktur s pěnou T90.100 došlo k 52-64 % zvýšení pevnosti oproti pění T90.60 v závislosti na počtu vrstev prepregu. V třetím grafu jsem porovnával, jak moc ovlivňuje hustota a tloušťka struktury pevnost v ohybu. Z grafu jsem zjistil, že nárůst pevnosti u struktur s pěnou T90.210 tloušťky 3 mm byla o 92-95 % vyšší, než u struktury s pěnou T90.210

tloušťky 10mm. Dále byla provedena rázová zkouška Charpyho kládíkem. V grafu jsme porovnávali energii potřebnou k přeražení tělesa v závislosti na rozdílné hustotě, rozdílném počtu vrstev prepregu a rozdílné tloušťce. Zjistili jsme, že největší energii je potřeba vyvinout u pěn T90.210 tl. 3 mm s typem struktury 3-1-3, kde potřebná energie k přeražení vzorku dosahovala $A_m = 37,05 \text{ KJ/m}^2$.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Advanced Composite Use* [online]. 2014 [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://www.airlinereporter.com/tag/anaboe/>
- [2] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vydání 1. Brno: VUT v Brně, Fakulta chemická, 2003, 193 s. ISBN 8021424435.
- [3] MICHNA, Štefan. *Kompozitní materiály* [online]. 2007 [cit. 2013-12-26]. Dostupné z: http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf
- [4] EHRENSTEIN, W. G. *Polymerní kompozitní materiály*. Vydání 1. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] Kratochvíl, B.; Švorčík, V.; Vojtěch, D. *Úvod do studia materiálů*. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
- [6] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. [cit. 2013-12-26]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek>
- [7] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [8] *Glass fiber* [online]. [cit. 2013-12-26] San Francisco (CA):Wikimedia Foundation, 2001 Dostupné z http://en.wikipedia.org/wiki/Glass_fiber
- [9] *Carbon fabric* [online]. 2014 [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://eshop.datok.cz/carbon/index.htm>
- [10] *Kevlar* [online]. 2014 [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/Czech_Republic_Country_Site/cs_CZ/Products_and_Services/Products/kevlar.html
- [11] *Prepreg technology* [online]. 2013 [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Prepreg_Technology.pdf
- [12] KOS PETR. *Vlastnosti polymerních dlouho vláknových kompozitů s různými výztužemi*. 2011 [cit. 2013-01-29]
- [13] *GURIT. Guide to composites* [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://gurit.com/>

- [14] *Direct industry* [online]. 2014 [cit. 2014-01-23]. Dostupné z:
<http://www.directindustry.com/cat/semi-finished-products-J.html>
- [15] *Lightweight structures*. In: DNV: Managing risk [online]. [cit. 2013-01-28].
Dostupné z: <http://www.dnv.com/industry/maritime/publicationsanddownloads/publications/dnvcontainershipupdate/2010/1-2010/lightweightstructures.asp>
- [16] MAREK, Pavel. *Sendvičové konstrukce*. [online]. 2001 [cit. 2014-01-27].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [17] MAZUMDAR, SANJAY K.: *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*, 2002, ISBN 0-8493-0585-3
- [18] *Technologie. LA COMPOSITE* [online]. 2008 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z:
<http://www.lacomposite.com/technologie-kompozitni-autoklav.html>
- [19] *Technologie jejich popis a schémata* [online]. 2005 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z:
<http://www.havel-composites.com/clanky/4-%20Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EP	Epoxidová pryskyřice	
VE	Vinylesterová pryskyřice	
PF	Fenolická pryskyřice	
PET	Polyethylentereftalát	
PAN	Polyakrylonitril	
E	Modul pružnosti v tahu nebo ohybu	[MPa]
σ_{mf}	Pevnost v tahu	[MPa]
$\epsilon_{\sigma mf}$	Poměrná deformace na mezi pevnosti v tahu	[%]
$W_{\sigma mf}$	Práce při mezi úměrnosti v tahu	[N.mm]
σ_m	Pevnost v ohybu	[MPa]
$\epsilon_{\sigma m}$	Poměrná deformace na mezi pevnosti v ohybu	[%]
$W_{\sigma m}$	Práce při mezi úměrnosti v ohybu	[N.mm]
a	Tloušťka	[mm]
b	Šířka	[mm]
\bar{x}	Aritmetický průměr	
n	Počet měření	
T _g	Teplota skelného přechodu	[°C]
UV	Ultrafialové záření	
T	Teplota	[°C]
t	Čas	[min]
F _m	Síla maximální	[N]
A _m	Energie potřebná k přeražení tělesa	[KJ/m ²]
A _b	Celková energie	[KJ/m ²]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Využití kompozitů v letectví [1]	12
<i>Obr. 2</i> Rozdělení kompozitních materiálů dle výztuže [4]	15
<i>Obr. 3</i> Dělení vláknové výztuže [5]	16
<i>Obr. 4</i> a) rohož, b) tkanina z rovingů, c) tkanina z vláken [4]	17
<i>Obr. 5</i> Trojrozměrná tkanina výztuže příruby [4]	17
<i>Obr. 6</i> Typy tkaní [4]	18
<i>Obr. 7</i> Skleněná vlákna [8]	19
<i>Obr. 8</i> Uhlíkové vlákno [9]	20
<i>Obr. 9</i> Aramidové vlákno [10]	20
<i>Obr. 10</i> Oboustranně impregnovaná tkanina [11]	22
<i>Obr. 11</i> Dvou kroková výroba prepregu [11]	23
<i>Obr. 12</i> Jednokrokové vertikální a horizontální uspořádání výroby prepregů [11]	23
<i>Obr. 13</i> Závislost hustoty a ceny na druhu materiálu [11]	24
<i>Obr. 14</i> Závislost pevnosti a pružnosti v tahu na druhu materiálu [11]	25
<i>Obr. 15</i> Plátnová vazba [13]	26
<i>Obr. 16</i> Keprová vazba [13]	26
<i>Obr. 17</i> Atlasová vazba [13]	27
<i>Obr. 18</i> Košíková vazba [13]	27
<i>Obr. 19</i> Hybridní tkanina [14]	28
<i>Obr. 20</i> Výroba multiaxiální tkaniny [11]	29
<i>Obr. 21</i> Sendvičová struktura s voštinovým jádrem [11]	30
<i>Obr. 22</i> Sendvičová struktura s pěnovým jádrem [15]	30
<i>Obr. 23</i> Schéma technologie vakuového lisování [17]	32
<i>Obr. 24</i> Autokláv [18]	34
<i>Obr. 25</i> Laboratorní lis	37
<i>Obr. 26</i> Univerzální zkušební stroj ZWICK	38
<i>Obr. 27</i> Charpyho kladivo CEAST Resil Impactor junior	39
<i>Obr. 28</i> Prepreg PH840-300-42	41
<i>Obr. 29</i> Pěna Airex T90	42
<i>Obr. 30</i> Schéma vytvrzovacího cyklus výroby vzorků	43
<i>Obr. 31</i> Stříhání vzorků pro tahovou zkoušku	44
<i>Obr. 32</i> Vylisované sendvičové struktury	45

<i>Obr. 33</i> Nařezané zkušební vzorky vlevo 20 x 140mm, vpravo 12 x 70 mm.....	45
<i>Obr. 34</i> Uspořádání jednotlivých materiálů pro výrobu sendviče	46
<i>Obr. 35</i> Tahová zkouška	47
<i>Obr. 36</i> Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci struktura č. 1	48
<i>Obr. 37</i> Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci struktura č. 2	49
<i>Obr. 38</i> Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci struktura č. 3	50
<i>Obr. 39</i> Vzorek po tahové zkoušce	51
<i>Obr. 40</i> Zkouška 3-bodovým ohybem	52
<i>Obr. 41</i> Vzorky po ohybové zkoušce	56
<i>Obr. 42</i> Rázová zkouška v ohybu	57
<i>Obr. 43</i> Grafické vyhodnocení Airex T90.60 1-1-1	58
<i>Obr. 44</i> Grafické vyhodnocení Airex T90.60 2-1-2	58
<i>Obr. 45</i> Grafické vyhodnocení Airex T90.60 3-1-3	59
<i>Obr. 46</i> Grafické vyhodnocení Airex T90.100 1-1-1	59
<i>Obr. 47</i> Grafické vyhodnocení Airex T90.100 2-1-2	60
<i>Obr. 48</i> Grafické vyhodnocení Airex T90.100 3-1-3	60
<i>Obr. 49</i> Grafické vyhodnocení Airex T90.210 1-1-1	61
<i>Obr. 50</i> Grafické vyhodnocení Airex T90.210 2-1-2	61
<i>Obr. 51</i> Grafické vyhodnocení Airex T90.210 3-1-3	62
<i>Obr. 52</i> Zkušební vzorky po rázové zkoušce	62
<i>Obr. 53</i> Graf modulu pružnosti v tahu v závislosti na počtu vrstev prepregu.....	63
<i>Obr. 54</i> Graf pevnosti v tahu v závislosti na počtu vrstev prepregu	64
<i>Obr. 55</i> Graf pevnosti v ohybu v závislosti na hustotě při rozdílném počtu vrstev prepregu	65
<i>Obr. 56</i> Graf modulu pružnosti v ohybu v závislosti na hustotě při rozdílném počtu vrstev prepregu.....	66
<i>Obr. 57</i> Závislost pevnosti v ohybu v závislosti na rozdílné hustotě a tloušťce při rozdílném počtu vrstev prepregu	67
<i>Obr. 58</i> Grafické porovnání energie při přerušení.....	68

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Přehled mechanických vlastností některých typů matric [2]</i>	15
<i>Tab. 2 Pevnosti skleněných vláken [4]</i>	19
<i>Tab. 3 Srovnání vlastností vybraných kompozitů [4]</i>	21
<i>Tab. 4 Vlastnosti sendvičové konstrukce [11]</i>	31
<i>Tab. 5 Technické údaje laboratorního lisu</i>	37
<i>Tab. 6 Technické údaje univerzálního stroje ZWICK 1456</i>	38
<i>Tab. 7 Technické údaje Charpyho kladiva</i>	39
<i>Tab. 8 Vlastnosti prepregu PH840-300-42</i>	40
<i>Tab. 9 Vytvrzování prepregu PH840-300-42</i>	40
<i>Tab. 10 Mechanické vlastnosti prepregu PH840-300-42</i>	41
<i>Tab. 11 Vlastnosti Pěn Airex T90.210 /T90.100/T90.60</i>	42
<i>Tab. 12 Složení jednotlivých struktur č. 1, č. 2, č. 3</i>	43
<i>Tab. 13 Složení jednotlivých struktur č. 4, č. 5, č. 6</i>	44
<i>Tab. 14 Složení jednotlivých struktur č. 7, č. 8, č. 9</i>	46
<i>Tab. 15 Složení jednotlivých struktur č. 10, č. 11, č. 12</i>	46
<i>Tab. 16 Tahové vlastnosti materiálu struktura č. 1</i>	48
<i>Tab. 17 Tahové vlastnosti materiálu struktura č. 2</i>	49
<i>Tab. 18 Tahové vlastnosti materiálu struktura č. 3</i>	50
<i>Tab. 19 Porovnání jednotlivých zjištěných hodnot</i>	51
<i>Tab. 20 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.60 1-1-1</i>	53
<i>Tab. 21 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.60 2-1-2</i>	53
<i>Tab. 22 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.60 3-1-3</i>	53
<i>Tab. 23 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.100 1-1-1</i>	54
<i>Tab. 24 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.100 2-1-2</i>	54
<i>Tab. 25 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.100 3-1-3</i>	54
<i>Tab. 26 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.210 1-1-1</i>	55
<i>Tab. 27 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.210 2-1-2</i>	55
<i>Tab. 28 Ohybové vlastnosti sendviče pro pěnu Airex T90.210 3-1-3</i>	55
<i>Tab. 29 Porovnání jednotlivých zjištěných hodnot</i>	56
<i>Tab. 30 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.60 1-1-1</i>	58
<i>Tab. 31 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.60 2-1-2</i>	58
<i>Tab. 32 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.60 3-1-3</i>	59

<i>Tab. 33 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.100 1-1-1</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 34 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.100 2-1-2</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 35 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.100 3-1-3</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 36 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.210 1-1-1</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 37 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.210 2-1-2</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 38 Naměřené hodnoty pro pěnu Airex T90.210 3-1-3</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 39 Porovnání jednotlivých zjištěných hodnot</i>	<i>62</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÁ LIST PREPREGU PH840-300-42

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÁ LIST PĚNY AIREX T90

PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI TAHOVÉ ZKOUŠCE

PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÍ HODNOTY PŘI 3-BODOVÉM OHYBU

PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI RÁZOVÉ ZKOUŠCE CHARPYHO
KLADIVEM



PH840-300-42

- Fiber reinforced thermosetting prepregated materials for railway parts (e.g. fairings, window, ceiling and floor panels).
- Woven fabric of E-glass filament yarn, 300 g/m², 8H satin, prepregated with 42% phenolic resin PH840.
- Long shelf and shop life
- Excellent FST behaviour
- Excellent mechanical behaviour
- Good surface finish
- Autoclave-free processes possible
- Short curing time 10 min at 160°C

Description

PH840-300-42 is a halogenfree modified phenolic system, designed for laminate with bright colour and good surface quality. This prepreg material has been developed for industrial and rail applications, with high specific mechanical properties and excellent FST (low heat-release and smoke-density) behaviour.

The resin matrix PH840 can be cured at a temperature range between 120 C and 160 C. Monolithic and sandwich structures can be easily manufactured with this prepreg. The curing can be performed by press, vacuum and autoclave moulding with a pressure of at least 0.07 N/mm².

Such composite structures can be exposed easily to temperatures in the range of -55°C up to +80°C.

Cured laminates fulfil the flame-retardant Rail specifications:

- BS 476-6 and 7 Class 1, BS 6853 R. 025, NF-F 16-101/102 (M1, F1)
- UNE 23-721 (M1), DIN 5510 S4, SR2, ST2, DIN EN 45545 under testing

The prepreg material is suitable for:

- Rail industries
- Machine industries
- Marine and automotive applications

Prepreg Properties

	Test method	Value
Resin		Phenolic
Prepreg Weight	EN 2329	525 ±30 g/m ²
Volatile	EN 2330 (160°C/10min)	< 6.0 %
Resin Flow	EN 2332 (3 plies, 135°C, 8min, 4 bar)	> 10 %
Tackiness		T0, T1, T2
Fibre Material		E-glass
Fabric Weight	EN 2331	296 g/m ² ±5 %
Weave Style		8H satin
Service Temperature (Cured State)		-55°C to +80°C
Resin Content	EN 2331	42.0 ±3%

Delivery Form and Storage

Prepreg sizes	Roll length / Roll width	50 / 1.0 m
Storage Life (from delivery date)	Days at RT / Month at -18°C	

Curing Conditions

		Cycle
Temperature		120/130/140/160°C
Cure Time		90/60/30/10 min
Spec. Pressure		0.07- 0.4 MPa
Heat-up		2 to 5 K/min
Cool-down		2 to 5 K/min
Remove material at		< 80°C
Recommended curing process		Vacuum bag / Oven, Press, Autoclave

Mechanical Properties (Typical Values)

	Temp. [°C]	Standard	Results	
Flexural Strength (warp)	RT	ISO 178	450	MPa
	80		300	
Flexural Modulus (warp)	RT	ISO 178	22	GPa
	80		19	
Tensile Strength (warp)	RT	ISO 527-4		MPa
	80			
Tensile Modulus (warp)	RT	ISO 527-4		GPa
	80			
Compressive Strength (warp)	RT	EN 2850	--	MPa
	80		--	
Compressive Modulus (warp)	RT	EN 2850	--	GPa
	80		--	
Interlaminar Tensile Shear Strength (warp)	RT	AITM 1.0019/1B	18	MPa
	80		16	
Climbing Drum Peel *	RT	EN 2243-3	110	N/75 mm
	80		--	
Bending Load (4-P.) *	RT	AITM 1.0018 Fig.2	850	N
	80		--	
Tg (TMA)		TMA	> 80	°C

*See test structure

Burning Behavior

		Test method	Max. mean values	
Flammability vertical, 60s flaming	burn length after flame time after flame time of drips	AITM 2.0002A	60	mm
			5	
Max. specific optical smoke density within 4 min	flaming mode	AITM 2.0007A	5	Ds
			--	
Heat release		AITM 2.0006	25	kW/m²
Heat release rate		AITM 2.0006	25	kW*min/m²

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÁ LIST PĚNY AIREX T90

AIREXBALTEK**BANOVA**

DATA SHEET

02.2012 (replaces 09.2011)

AIREX[®] T90

Easy Processing Structural FST Foam

CHARACTERISTIC

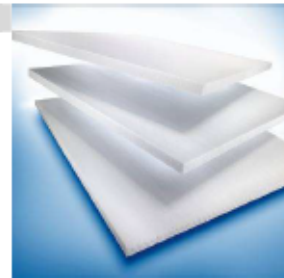
- Superior fire resistance (FAR 25.853; NF 16-101; DIN 5510)
- Outstanding fatigue strength
- Excellent long term thermal stability up to 100 °C (212 °F)
- Best thermal stability in process up to 150 °C (302 °F)
- Good thermal insulation
- Highly consistent material properties
- Easy to process with all types of resin and lamination processes
- Good adhesion (skin-to-core bond)
- Very high chemical stability
- No water absorption, no after-expansion, no outgassing

APPLICATIONS

- **Road and Rail**
Floors, sidewalls, front ends, interiors, roofs, engine covers
- **Marine**
Decks, interiors, superstructures
- **Industrial**
Covers, containers, x-ray tables, sporting goods
- **Architecture and Construction**
Roofs, claddings, domes, portable building

PROCESSING

- Contact molding (hand/spray)
- Vacuum infusion
- Resin infusion / injection (VARTM / RTM)
- Adhesive bonding
- Pre-preg processing
- Compression molding (GMT, SMC)
- Very easy to thermoform



AIREX[®] T90 is a closed-cell, thermoplastic and recyclable polymer foam with excellent fire, smoke & toxicity (FST) properties.

It has very good mechanical properties and an extraordinary resistance to fatigue, is chemically stable, UV-resistant and has negligible water absorption.

It is thermally stable during high temperature processing and post curing. T90 is designed for easy use with all resin systems and processing technologies.

AIREX[®] T90 is the ideal core material for structural sandwich applications requiring high fire resistance.

www.3ACorematerials.com



Europe | Middle East | India | Africa

Airex AG
5643 Sira, Switzerland
T +41 41 789 66 00 | F +41 41 789 66 00
corematerials@3AComposites.com

North America | South America

Baltek Inc.
High Point, NC 27261, USA
T +1 336 398 1900 | F +1 336 398 1901
corematerials.americas@3AComposites.com

Asia | Australia | New Zealand

3A Composites (China) Ltd.
201201 Shanghai, China
T +86 21 565 66 006 | F +86 21 338 27 298
corematerials.asia@3AComposites.com

AIREX BALTEK BANOVA

Typical properties for AIREX® T90		Unit (metrical)	Value ¹⁾	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	kg/m ³	Average Typ. range	65 60 - 70	110 105 - 115	145 140 - 150	210 200 - 220
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm ²	Average Minimum	0.80 0.7	1.4 1.2	2.2 2.0	3.5 3.2
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	N/mm ²	Average Minimum	50 35	85 75	115 100	170 145
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm ²	Average Minimum	1.5 1.2	2.2 1.6	2.7 2.2	3.0 2.4
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm ²	Average Minimum	85 70	120 90	170 140	225 180
Shear strength	ISO 1922	N/mm ²	Average Minimum	0.46 0.4	0.8 0.7	1.2 1.1	1.85 1.5
Shear modulus	ISO 1922	N/mm ²	Average Minimum	12 10.5	20 18	30 26	50 44
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average Minimum	12 8	10 5	8 4	5 3
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.033	0.033	0.038	0.041
Standard sheet	Width ²⁾	mm ± 5		610	610	610	610
	Length ²⁾	mm ± 5		1220	1220	1220	1220
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 100	5 to 100	5 to 100	5 to 100

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm except compressive modulus (40 mm)

²⁾ Alternative width 1220 mm, alternative length 2440 mm

Fire performance	Standard		T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Aircraft	FAR 25.853/ABD0031	Flammability	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Smoke density	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Toxicity	passed	passed	passed	passed
Rail	DIN 5510/2	Flammability	S4	S4	S4	S4
	DIN 5510/2	Smoke density	SR2	SR2	SR2	SR2
	DIN 5510/2	Dripping	ST2	ST2	ST2	ST2
	DIN 5510/2 / DIN 53438-2	Edge flaming	K1	K1	K1	K1
	DIN 5510/2	Toxicity (FED)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Rail	NF F16-101	Flammability	M2	M1	M1	M1
	NF F16-101	Smoke density	F1	F1	F1	F1
Rail	CEN TS 45545-2	(Nov. 2008)	Certification depending on sandwich design			

The data provided gives approximate values for the nominal density and DNV minimum values according to DNV type approval certificate. The information contained herein is believed to be correct and to correspond to the latest state of scientific and technical knowledge. However, no warranty is made, either expressed or implied, regarding its accuracy or the results to be obtained from the use of such information. No statement is intended or should be construed as a recommendation to infringe any existing patent.

AIREX BALTEK BANOVA

Typical properties for AIREX® T90		Unit (metrical)	Value ¹⁾	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	lb/ft ³	Average Typ. range	4.1 3.7 - 4.4	6.8 6.6 - 7.2	9.1 8.7 - 9.4	13 12.5 - 13.7
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	psi	Average Minimum	116 102	203 174	319 290	508 464
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	psi	Average Minimum	7'250 5'075	12'330 10'875	16'680 14'500	24'650 21'025
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	psi	Average Minimum	218 174	319 232	392 319	435 350
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C297	psi	Average Minimum	12'325 10'150	17'400 13'050	24'650 20'300	32'630 26'100
Shear strength	ISO 1922	psi	Average Minimum	67 58	116 102	174 160	288 215
Shear modulus	ISO 1922	psi	Average Minimum	1'740 1'520	2'900 2'610	4'350 3'770	7'250 6'380
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average Minimum	12 8	10 5	8 4	5 3
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.033	0.033	0.036	0.041
Standard sheet	Width ²⁾	mm ± 5		610	610	610	610
	Length ²⁾	mm ± 5		1220	1220	1220	1220
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 100	5 to 100	5 to 100	5 to 100

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

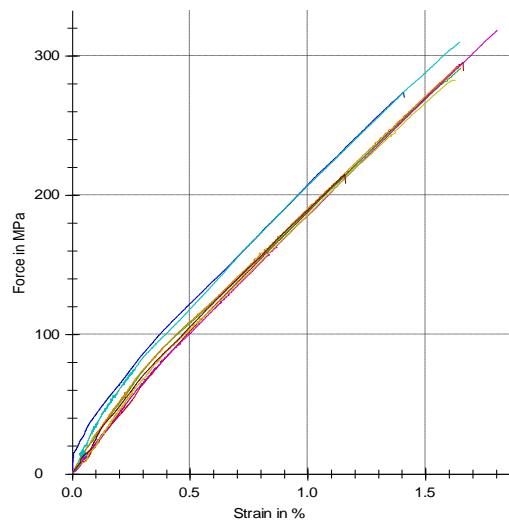
¹⁾ Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm (3/4") except compressive modulus 40 mm (1 1/2")
²⁾ Alternative width 1220 mm, alternative length 2440 mm

Fire performance	Standard		T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Aircraft	FAR 25.853/ABD0031	Flammability	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Smoke density	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Toxicity	passed	passed	passed	passed
Rail	DIN 5510/2	Flammability	S4	S4	S4	S4
	DIN 5510/2	Smoke density	SR2	SR2	SR2	SR2
	DIN 5510/2	Dripping	ST2	ST2	ST2	ST2
	DIN 5510/2 / DIN 53438-2	Edge flaming	K1	K1	K1	K1
	DIN 5510/2	Toxicity (FED)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Rail	NF F16-101	Flammability	M2	M1	M1	M1
	NF F16-101	Smoke density	F1	F1	F1	F1
Rail	CEN TS 45545-2	(Nov. 2006)	Certification depending on sandwich design			

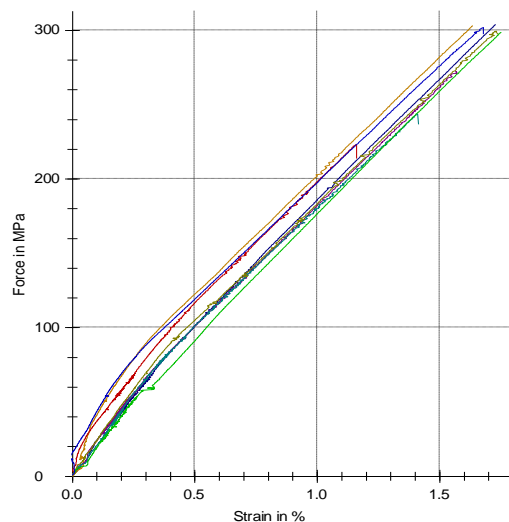
The data provided gives approximate values for the nominal density and DNV minimum values according to DNV type approval certificate. The information contained herein is believed to be correct and to correspond to the latest state of scientific and technical knowledge. However, no warranty is made, either expressed or implied, regarding its accuracy or the results to be obtained from the use of such information. No statement is intended or should be construed as a recommendation to infringe any existing patent.

PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI TAHOVÉ ZKOUŠCE

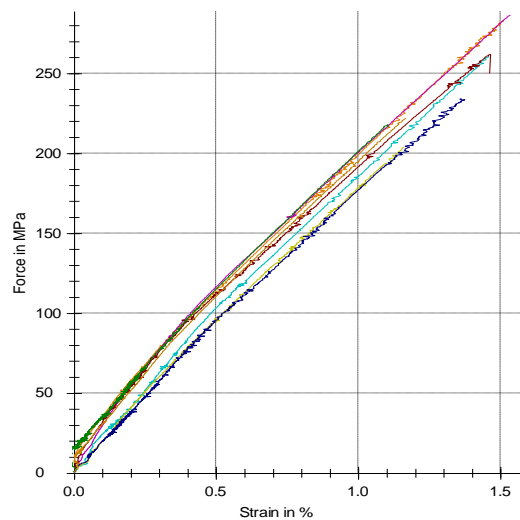
2 vrstvy prepregu	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ϵ_{mf} [%]	$W_{\sigma mf}$ [Nmm]	a [mm]	a [mm]
1.	21600	296	1,7	817,88	0,54	20,19
2.	23500	291	1,7	823,22	0,52	20,19
3.	23600	274	1,4	684,82	0,52	20,23
4.	23900	292	1,6	819,63	0,53	20,28
5.	22300	319	1,8	953,04	0,49	20,26
6.	28900	310	1,6	893,45	0,48	20,23
7.	24000	283	1,6	772,49	0,52	20,18
8.	23000	215	1,2	424,68	0,53	20,23
\bar{x}	23800	285	1,6	773,65	0,52	20,23
s	2220	31,6	0,2	161,57	0,02	0,05



3 vrstvy prepregu	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ϵ_{mf} [%]	$W_{\sigma mf}$ [Nmm]	a [mm]	a [mm]
1.	22100	304	1,7	1319,40	0,79	20,14
2.	30300	303	1,6	1325,76	0,77	20,14
3.	22600	272	1,6	1082,69	0,79	20,09
4.	23600	244	1,4	874,44	0,79	20,09
5.	23000	299	1,7	1311,60	0,83	20,04
6.	21400	223	1,2	694,68	0,79	20,09
7.	22100	299	1,8	1285,82	0,77	20,04
8.	25000	302	1,7	1363,26	0,81	20,09
\bar{x}	23800	281	1,6	1157,21	0,79	20,09
s	2870	31,4	0,2	249,86	0,02	0,05

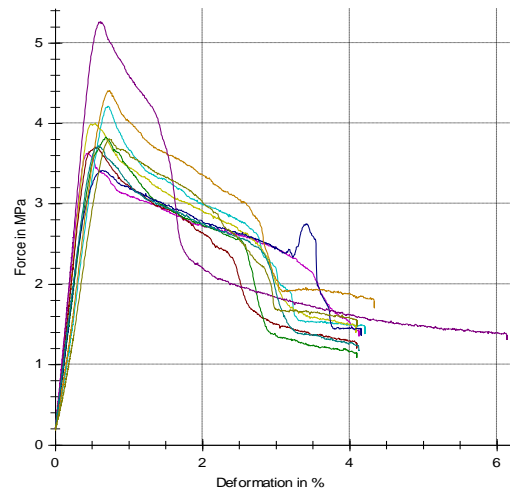


3 vrstvy prepregu	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ϵ_{mf} [%]	$W_{\sigma mf}$ [Nmm]	a [mm]	a [mm]
1.	21000	283	1,5	1496,15	1,03	20,25
2.	25600	287	1,5	1535,03	1,05	20,25
3.	20000	261	1,5	1275,91	1,03	20,20
4.	21500	204	1,2	789,43	1,05	20,20
5.	21800	262	1,5	1357,83	1,05	20,20
6.	20800	218	1,1	854,21	1,05	20,20
7.	19300	234	1,4	1060,36	1,07	20,15
8.	21300	222	1,2	906,04	1,07	20,15
\bar{x}	21400	246	1,3	1159,37	1,05	20,20
s	1870	31,1	0,2	295,55	0,02	0,05

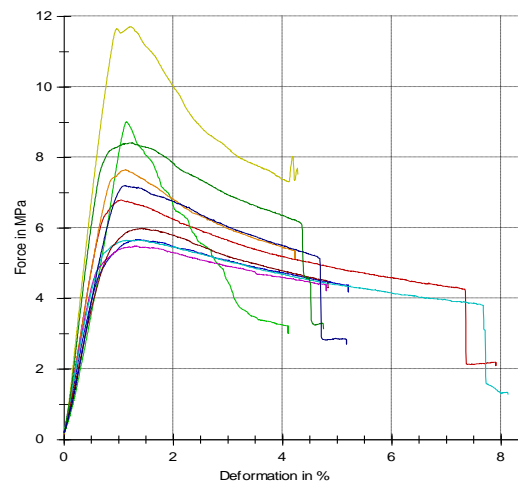


PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÍ HODNOTY PŘI 3-BODOVÉM OHYBU

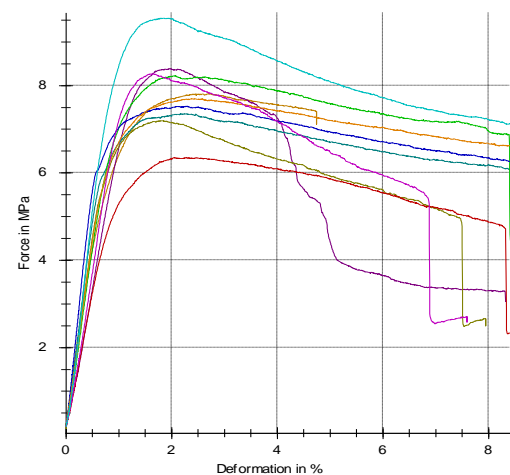
T90.60	E	σ_m	ϵ_{om}	W_{om}	a	b
1-1-1	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1.	917	3,63	0,4	26,89	9,95	19,78
2.	573	4,21	0,7	47,35	9,98	19,80
3.	930	4,00	0,5	37,83	9,96	19,75
4.	869	3,71	0,5	36,25	10,00	19,77
5.	712	3,83	0,7	46,96	10,00	19,75
6.	746	3,42	0,6	40,11	10,00	19,89
7.	611	4,41	0,7	52,92	10,00	19,80
8.	1020	5,27	0,6	53,88	10,00	19,85
9.	743	3,72	0,6	38,57	10,03	19,85
10.	493	3,81	0,7	43,68	10,03	19,85
\bar{x}	761	4,00	0,6	42,44	10,05	19,80
s	171	0,53	0,1	8,22	0,02	0,05



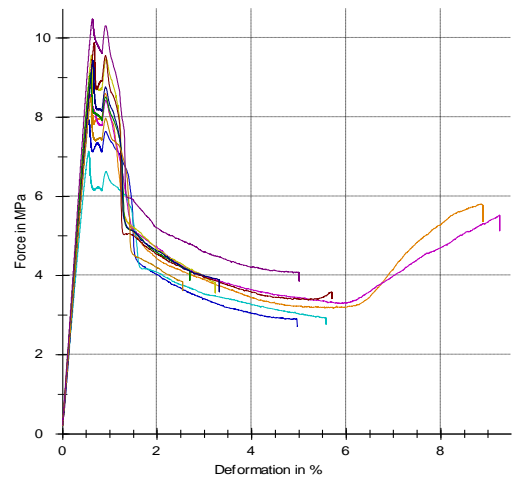
T90.60	E	σ_m	ϵ_{om}	W_{om}	a	b
2-1-2	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1.	946	6,8	1,1	140,08	10,48	19,70
2.	612	9,01	1,1	150,36	10,49	19,79
3.	796	5,68	1,4	164,70	10,50	19,82
4.	954	7,66	1,1	162,94	10,51	19,80
5.	904	5,49	1,3	161,62	10,50	19,78
6.	844	5,66	1,4	181,16	10,49	19,80
7.	1400	11,70	1,2	272,22	10,50	19,88
8.	714	5,99	1,4	176,02	10,55	19,82
9.	1220	8,42	1,3	224,03	10,53	19,84
10.	671	7,21	1,1	139,60	10,51	19,85
\bar{x}	905	7,36	1,2	177,27	10,50	19,80
s	244	1,95	0,1	41,30	0,02	0,05



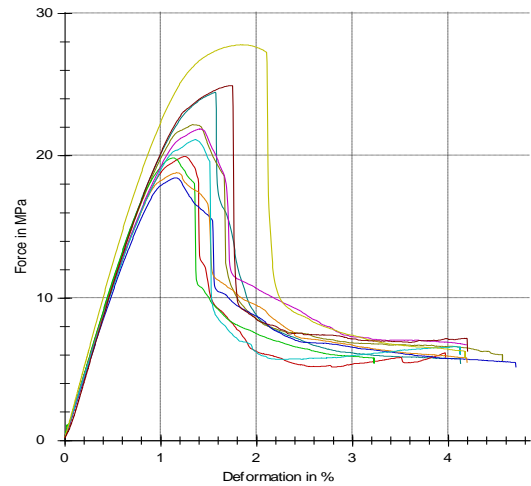
T90.60	E	σ_m	ϵ_{om}	W_{om}	a	b
3-1-3	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1.	899	7,81	2,7	497,17	10,50	19,85
2.	559	8,40	2	330,09	10,50	19,88
3.	970	7,36	2,2	378,35	10,48	19,86
4.	852	7,20	1,8	293,55	10,49	19,78
5.	611	6,35	2,3	323,40	10,48	19,76
6.	783	8,23	2,1	372,05	10,55	19,77
7.	1150	7,53	2,3	423,71	10,50	19,80
8.	817	7,70	2,4	443,36	10,52	19,80
9.	660	8,27	1,7	267,84	10,51	19,72
10.	922	9,54	1,8	376,53	10,52	19,78
\bar{x}	823	7,84	2,1	370,60	10,50	19,80
s	180	0,85	0,3	70,40	0,02	0,05



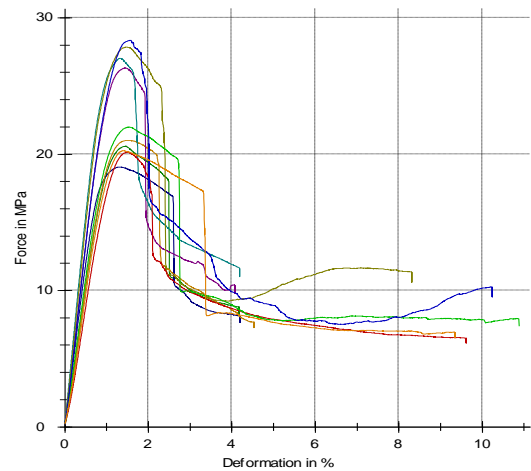
T90.100	E	σ_m	ϵ_{sm}	W_{sm}	a	b
1-1-1	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1.	1520	7,94	0,6	68,07	10,05	19,88
2.	1560	9,05	0,6	84,58	10,02	19,85
3.	1650	8,58	0,6	77,52	10,00	19,80
4.	1370	7,14	0,6	61,77	10,03	19,80
5.	1640	9,57	0,6	90,31	10,00	19,72
6.	1550	9,89	0,7	100,44	10,00	19,80
7.	1640	9,12	0,6	83,56	9,98	19,73
8.	1550	9,43	0,6	90,22	10,00	19,80
9.	1500	8,50	0,6	77,47	10,02	19,77
10.	1740	10,50	0,6	101,11	9,98	19,80
\bar{x}	1570	8,97	0,6	83,50	10,00	19,80
s	101	0,97	0	12,79	0,02	0,05



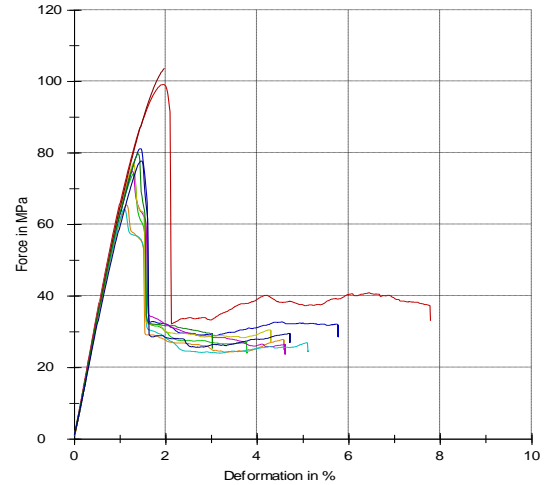
T90.100	E	σ_m	ϵ_{sm}	W_{sm}	a	b
2-1-2	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1.	2230	24,50	1,6	680,63	10,05	19,72
2.	2230	22,20	1,3	509,33	10,02	19,85
3.	2170	20,00	1,3	438,85	10,00	19,88
4.	2260	19,80	1,1	379,51	10,01	19,80
5.	2100	18,40	1,2	368,98	10,00	19,85
6.	2170	18,80	1,2	383,88	10,00	19,80
7.	2170	21,90	1,4	542,37	9,98	19,80
8.	2140	21,10	1,4	504,67	9,98	19,85
9.	2500	27,80	1,8	967,95	10,00	19,88
10.	2220	24,90	1,7	783,47	10,03	19,78
\bar{x}	2220	21,90	1,4	555,96	10,00	19,80
s	111	2,99	0,2	197,61	0,02	0,05



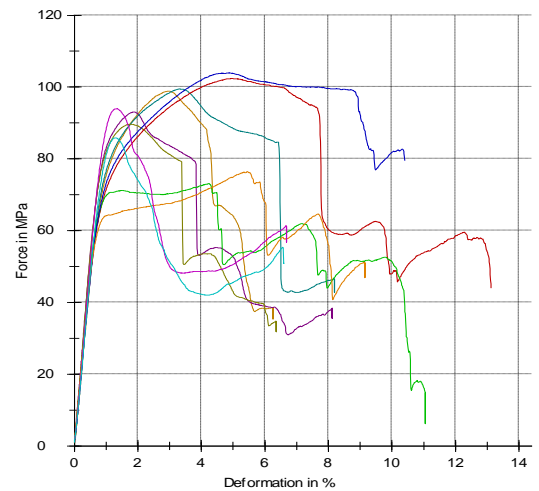
T90.100	E	σ_m	ϵ_{sm}	W_{sm}	a	b
3-1-3	[MPa]	[MPa]	[%]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1.	1930	20,60	1,4	564,08	10,52	19,80
2.	2450	19,10	1,3	504,93	10,47	19,88
3.	1900	21,00	1,6	650,03	10,48	19,78
4.	2630	26,30	1,4	722,18	10,53	19,80
5.	3110	27,00	1,3	710,98	10,50	19,72
6.	2940	27,90	1,5	822,86	10,52	19,80
7.	1580	20,10	1,5	556,12	10,50	19,88
8.	2130	22,00	1,5	644,66	10,52	19,78
9.	2610	28,30	1,6	844,89	10,52	19,80
10.	1690	20,30	1,4	515,11	10,50	19,72
\bar{x}	2300	23,30	1,5	653,58	10,50	19,80
s	527	3,66	0,1	121,16	0,02	0,05



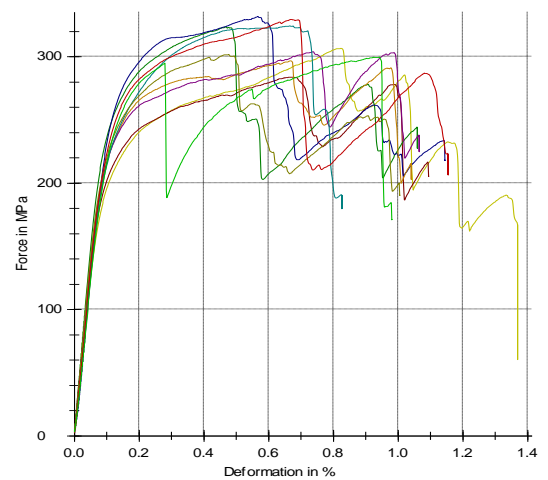
T90.210 1-1-1	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
1.	6950	99,2	1,9	365,62	3,00	19,75
2.	6510	74,2	1,3	170,55	3,00	19,77
3.	6500	81,2	1,4	204,19	3,02	19,77
4.	6440	65,5	1,1	128,23	3,00	19,82
5.	6770	75,0	1,3	167,58	3,00	19,80
6.	6500	64,3	1,1	122,82	2,97	19,85
7.	6790	77,2	1,3	171,82	3,00	19,86
8.	6710	104,0	2,0	373,68	3,03	19,72
9.	6540	79,8	1,4	194,59	2,96	19,86
10.	6160	77,8	1,5	200,19	3,00	19,80
\bar{x}	6590	79,8	1,4	209,93	3,00	19,80
s	223	12,7	0,3	88,49	0,02	0,05



T90.210 2-1-2	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
1.	9520	98,9	2,9	695,77	3,00	19,72
2.	10800	93,1	1,9	399,60	3,03	19,86
3.	9900	99,5	3,3	806,10	2,95	19,72
4.	11000	89,6	1,8	372,93	3,00	19,86
5.	9620	102,0	4,9	1285,21	3,00	19,80
6.	10200	73,1	4,2	864,08	3,00	19,80
7.	9520	104,0	4,9	1284,07	3,00	19,81
8.	9790	76,4	5,4	1107,43	3,04	19,80
9.	9800	94,0	1,3	254,32	3,00	19,82
10.	9160	85,9	1,3	219,33	3,00	19,80
\bar{x}	9940	91,7	3,2	728,88	3,00	19,80
s	582	10,6	1,6	409,11	0,02	0,05

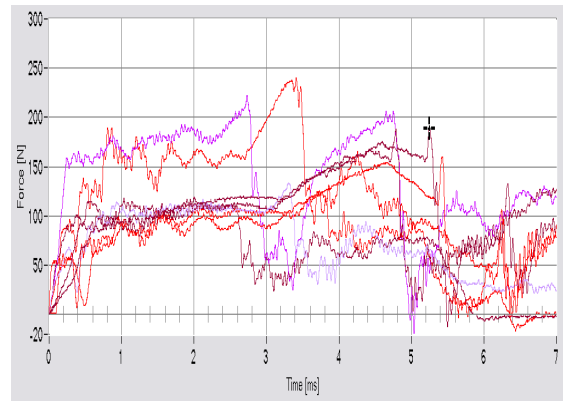


T90.210 3-1-3	E [MPa]	σ_m [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	$W_{\sigma m}$ [N.mm]	a [mm]	b [mm]
1.	12900	113,0	6,0	1761,2	3,03	19,72
2.	13400	105,0	4,9	1379,1	2,95	19,72
3.	15100	120,0	3,4	1059,9	3,00	19,86
4.	12800	123,0	4,2	1337,0	3,00	19,80
5.	14100	110,0	4,9	1453,1	3,00	19,80
6.	14100	112,0	5,4	1628,7	3,00	19,81
7.	13600	120,0	4,9	1563,1	3,04	19,80
8.	14400	111,0	3,5	1015,6	3,00	19,81
9.	13300	122,0	4,9	1574,7	3,00	19,86
10.	12100	111,0	6,8	1999,2	3,00	19,85
\bar{x}	13600	115,0	4,9	1477,2	3,00	19,80
s	868	5,9	1,0	300,0	0,02	0,05

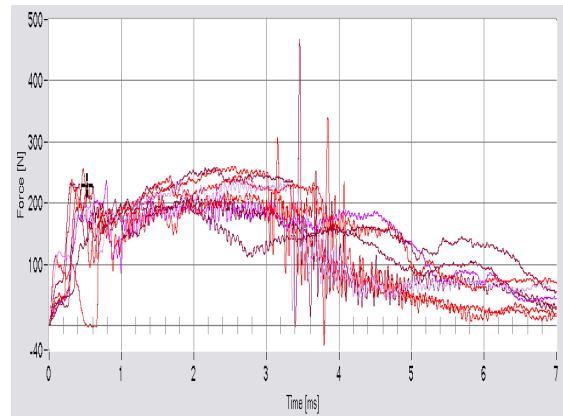


PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI RÁZOVÉ ZKOUŠCE CHARPYHO KLADIVEM

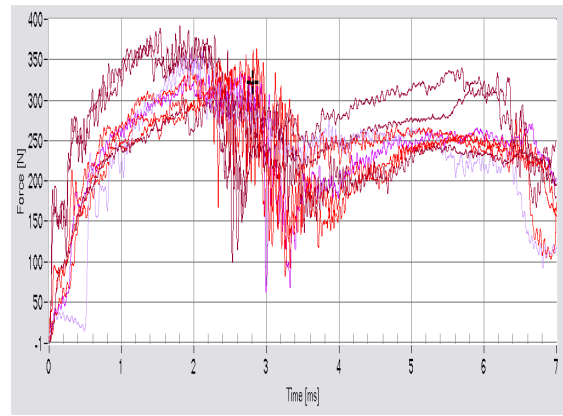
T90.60 1-1-1	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
1.	239,52	1,35	12,29	22,24	13,58	22,56
2.	119,08	1,35	7,33	21,00	6,00	13,61
3.	221,92	1,35	9,86	17,55	11,69	22,26
4.	124,49	1,35	13,50	22,87	9,77	15,74
5.	188,09	1,35	17,25	24,83	13,92	19,96
6.	133,97	1,35	12,03	24,99	9,63	15,14
7.	159,68	1,35	19,51	20,27	14,49	16,86
8.	189,45	1,35	18,83	19,65	10,23	18,91
\bar{x}	172,03	1,35	13,83	21,68	11,16	18,13
s	42,23	0,00	4,07	2,40	2,66	3,11



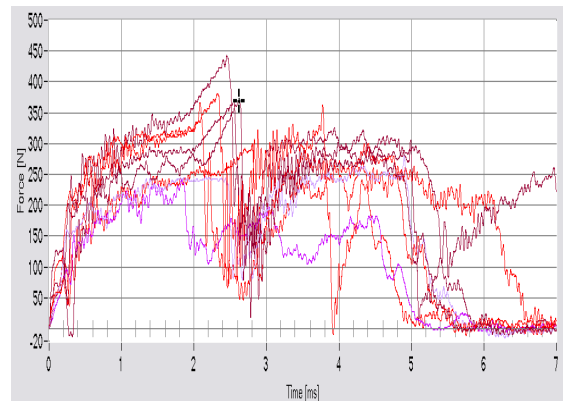
T90.60 2-1-2	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
1.	307,18	1,35	11,28	24,10	18,16	24,46
2.	468,21	1,35	12,29	24,00	20,24	27,01
3.	236,81	1,35	2,92	24,17	2,89	27,14
4.	339,65	1,35	13,63	24,05	21,47	25,43
5.	215,16	1,35	8,79	24,23	11,26	25,97
6.	239,52	1,35	6,63	24,14	8,97	25,54
7.	224,63	1,35	13,11	24,32	16,21	26,01
8.	228,69	1,35	1,94	24,24	1,47	27,37
\bar{x}	282,48	1,35	8,82	24,16	12,58	26,12
s	81,45	0,00	4,28	0,10	7,19	0,94



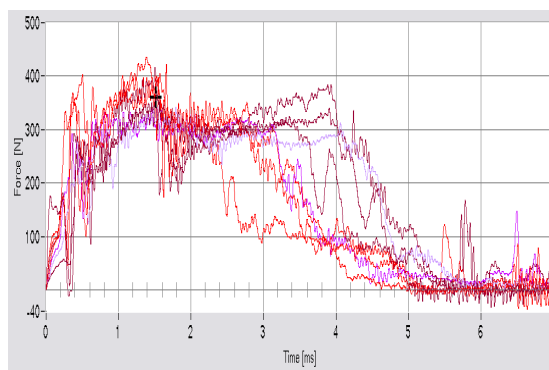
T90.60 3-1-3	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
1.	362,66	1,35	10,25	23,43	13,64	30,61
2.	388,37	1,35	5,54	22,81	19,06	36,01
3.	334,24	1,35	9,46	23,31	13,41	31,87
4.	350,48	1,35	7,84	23,32	10,23	30,52
5.	391,07	1,35	6,50	22,72	10,96	37,34
6.	362,66	1,35	7,14	23,35	15,21	31,03
7.	355,89	1,35	9,72	23,25	13,66	32,51
8.	322,06	1,35	10,04	23,41	13,41	30,57
\bar{x}	358,43	1,35	8,31	23,20	13,70	32,56
s	22,29	0,00	1,68	0,26	2,52	2,49



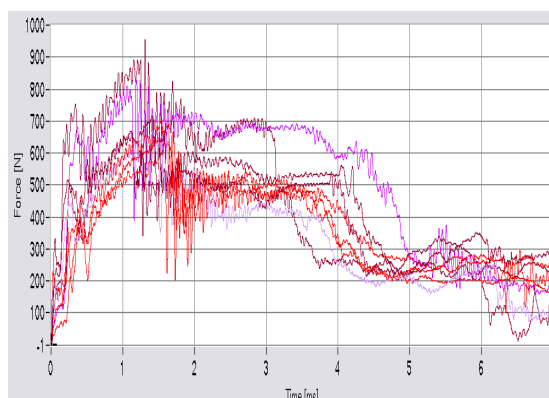
T90.100 1-1-1	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [KJ/m ²]	Ab [KJ/m ²]
1.	299,06	1,35	10,06	17,90	17,98	29,53
2.	442,50	1,35	8,75	19,59	21,68	38,77
3.	240,87	1,35	6,66	18,53	9,53	23,14
4.	365,36	1,35	7,49	13,67	17,04	27,00
5.	370,78	1,35	9,13	23,24	19,88	35,68
6.	278,76	1,35	17,09	19,59	30,42	32,51
7.	380,25	2,71	8,34	18,90	18,58	27,68
8.	369,42	1,35	9,39	19,16	18,41	28,59
\bar{x}	343,38	1,52	9,61	18,82	19,19	30,36
s	60,98	0,45	3,00	2,46	5,40	4,72



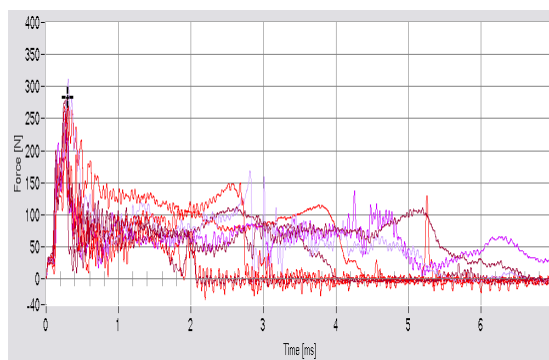
T90.100 2-1-2	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [KJ/m²]	Ab [KJ/m²]
1.	404,61	1,35	5,70	17,54	13,41	33,03
2.	350,48	2,71	5,46	18,75	20,04	36,64
3.	338,30	1,35	5,34	22,03	21,18	32,42
4.	401,90	1,35	1,85	17,49	20,54	29,52
5.	415,43	1,35	5,47	18,68	25,72	40,81
6.	342,36	1,35	5,60	19,88	20,80	37,41
7.	435,73	1,35	5,03	15,80	21,98	31,52
8.	359,95	1,35	5,52	17,06	20,51	33,82
\bar{x}	381,10	1,52	5,00	18,40	20,52	34,40
s	35,12	0,45	1,20	1,79	3,17	3,42



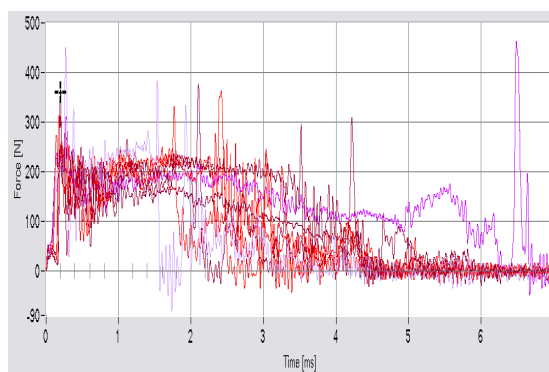
T90.100 3-1-3	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [KJ/m²]	Ab [KJ/m²]
1.	637,36	2,71	5,85	21,41	18,59	64,03
2.	954,01	1,35	4,63	19,77	24,09	72,44
3.	828,16	1,35	4,28	19,41	18,56	80,72
4.	667,13	1,35	6,09	21,35	21,32	61,41
5.	714,49	2,71	5,03	20,53	28,6	70,77
6.	668,48	1,35	5,05	21,37	23,8	58,89
7.	669,6	1,35	5,46	21,11	25,7	64,74
8.	667,13	1,35	4,02	20,79	15,47	68,98
\bar{x}	725,80	1,69	5,05	20,72	22,02	67,75
s	102,37	0,59	0,68	0,72	4,05	6,54



T90.210 1-1-1	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [KJ/m²]	Ab [KJ/m²]
1.	270,64	1,35	1,12	15,74	23,85	46,78
2.	261,17	1,35	0,94	14,62	22,76	30,54
3.	243,58	1,35	1,03	25,15	23,03	43,64
4.	269,29	1,35	0,95	6,95	23,14	13,46
5.	278,76	1,35	0,98	7,56	23,48	16,23
6.	311,24	1,35	1,13	10,36	24,17	29,73
7.	243,58	1,35	1,10	10,21	22,85	27,74
8.	282,82	1,35	1,08	23,58	23,72	45,73
\bar{x}	270,14	1,35	1,04	14,27	23,38	31,73
s	20,67	0,00	0,07	6,50	0,48	12,04



T90.210 2-1-2	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [KJ/m²]	Ab [KJ/m²]
1.	277,41	1,35	8,43	10,56	40,28	47,97
2.	250,34	2,71	1,78	15,41	6,32	48,12
3.	462,79	1,35	22,48	23,06	79,82	82,37
4.	331,53	1,35	6,43	15,93	27,94	43,45
5.	376,19	1,35	7,64	8,09	31,08	32,25
6.	449,26	1,35	1,00	5,69	3,64	28,91
7.	362,66	1,35	8,73	9,06	38,81	40,18
8.	359,95	1,35	0,74	13,01	1,02	59,69
\bar{x}	358,77	1,52	7,15	12,60	28,61	47,87
s	69,32	0,45	6,59	5,16	24,37	15,86



T90.210 3-1-3	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [KJ/m²]	Ab [KJ/m²]
1.	416,79	1,35	0,93	14,17	3,48	69,54
2.	400,55	1,35	11,88	12,12	65,11	65,90
3.	568,34	1,35	8,65	20,12	62,62	98,32
4.	437,61	1,35	6,72	23,53	42,96	84,36
5.	461,44	1,35	5,90	23,48	35,52	89,31
6.	446,56	1,35	5,40	23,43	35,91	88,29
7.	407,31	1,35	7,99	23,48	49,39	87,64
8.	484,45	4,06	0,26	23,53	1,38	84,32
\bar{x}	452,88	1,69	5,97	20,48	37,05	83,46
s	50,98	0,90	3,62	4,40	22,45	10,00

