

Návrh stavebnicového systému řešení sendvičových konstrukcí

Bc. Marek Horsák

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek HORSÁK**
Osobní číslo: **T11876**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Návrh stavebnicového systému řešení sendvičových konstrukcí**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice kompozitních sendvičových struktur:

Základní definice, způsoby zatěžování

Používané materiály

Konvenční způsoby výroby

Spojování sendvičových struktur

Způsoby testování sendvičových struktur

2. Experimentální část:

Popis použitých materiálů

Návrh stavebnicového systému pro konkrétní případ

Testování kvality spoje

Zhodnocení návrhu a závěry

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

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

[2] Zenkert, D., Nordic Industrial Fund: The Handbook of Sandwich Construction. Worcestershire; EMAS Publishing, 1997.

[3] Davies, J.M.: Lightweight Sandwich Construction. London; Blackwell Science Publishing, 2001.

[4] Campbell, F.C.: Structural Composite Materials. Ohio; ASM International, 2010.

[5] Elektronické zdroje dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ladislav Fojtl

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

10. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: Horský Marek

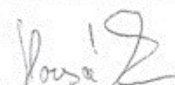
Obor: Výrobní inženýrství

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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, považují 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 Zlíně 2.5.2013


.....

¹¹ 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 nevydávajíc 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.

¹² 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, ušije-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 vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

¹³ 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 vádného 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 užit 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 vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihledne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem stavebnicového systému řešení sendvičových konstrukcí používaných v dopravním průmyslu. Teoretická část je zaměřena na kompozitní materiály, sendvičové kompozitní konstrukce, technologie jejich výroby a zkoušení sendvičových konstrukcí. Praktická část je pak zaměřena na volbu vhodných materiálů pro danou aplikaci, konstrukční návrh samotného spoje stavebnicového systému sendvičových konstrukcí, návrh technologického postupu výroby konstrukcí a zkoušení vyrobených vzorků.

Klíčová slova: kompozitní materiál, sendvičové konstrukce, stavebnicový systém, ohybová tuhost, ohybová pevnost, rázová houževnatost

ABSTRACT

This Master thesis deals with the design of the modular system solutions for sandwich structures used in transportation. The theoretical part is describes composite materials, sandwich composite construction, manufacturing technologies and testing of sandwich structures. The practical part is focused on the selection of the appropriate materials for a given application, design of joining parts for the modular system of sandwich structures, suggestion of technological process for sandwich production and testing of produced samples.

Keywords: composite materials, sandwich construction, modular system, flexural rigidity, flexural strength, impact toughness

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Ladislavu Fojtlovi za ochotu, připomínky, cenné informace a odborné rady a Ing. Vladimíru Rusnákovvi za pomoc při výrobě vzorků a informace předané na konzultacích. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během celého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	12
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	12
1.2.1 Matrice	13
1.2.2 Výztuž	14
2 SENDVIČOVÉ KOMPOZITNÍ STRUKTURY	19
2.1 VLASTNOSTI SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE.....	20
2.2 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ SENDVIČOVÉ STRUKTURY	21
2.2.1 Vnější vrstvy sendvičové struktury	21
2.2.2 Jádra	23
2.2.3 Adhezní materiály	31
2.3 PŘÍKLADY SPOJOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	33
3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH STRUKTUR	36
3.1 ZÁKLADNÍ METODY VÝROBY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	36
3.1.1 Vyhřívané lisování	36
3.1.2 Vytvrzování v peci	38
3.1.3 Vytvrzování v autoklávu	38
4 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ	40
4.1 ZKOUŠKA OHYBEM.....	40
4.1.1 Tříbodová zkouška ohybem	41
4.1.2 Čtyřbodová zkouška ohybem	42
4.2 ZKOUŠKA TLAKEM	44
4.3 ZKOUŠKA PRŮRAZEM NA PADOSTROJI	46
4.3.1 Popis zkoušky.....	46
4.4 TESTOVÁNÍ ODLUPU (PEEL TEST)	47
4.4.1 Zkouška odlupu pomocí navíjecího bubnu	48
4.4.2 SCB-Type peel test	49
4.4.3 Peel test – pomocí tlaku vzduchu.....	49
II PRAKTICKÁ ČÁST	51
5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI	52
6 NÁVRH VHODNÉHO MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ STRUKTUR PODLAHY V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU	53
6.1 SKLADBA PODLAHOVÉHO PANELU	53
6.2 VNĚJŠÍ VRSTVY	54
6.3 JÁDRO	55
6.4 ZÁMKOVÝ PROFIL	55
6.5 POHLEDOVÁ VRSTVA.....	56
7 NÁVRH TVARU A ŘEŠENÍ SPOJOVÁNÍ DÍLCŮ PODLAH	57

7.1	NÁVRH ZÁMKOVÝCH SYSTÉMŮ	57
8	NÁVRH FORMY PRO VÝROBU PODLAHOVÝCH PANELŮ	58
8.1	VIZUALIZACE VYRÁBĚNÝCH PANELŮ	58
8.2	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ FORMY	59
8.3	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY PODLAHOVÉHO PANELU.....	61
8.3.1	Polohování prepregu	61
8.3.2	Nanesení adhezivní vrstvy	62
8.3.3	Polohování rámu se zámkovým profilem	62
8.3.4	Vložení jádra	63
8.3.5	Nanesení další adhezivní vrstvy.....	63
8.3.6	Polohování horní vrstvy prepregu.....	63
8.3.7	Finální technologické operace.....	64
9	VÝROBA SENDVIČOVÝCH PODLAHOVÝCH PANELŮ	65
9.1	VÝROBA PROTOTYPOVÉHO VZORKU SENDVIČOVÉHO PODLAHOVÉHO PANELU	65
9.2	VÝROBA VZORKŮ PRO TESTOVÁNÍ	68
10	MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ VZORKŮ SENDVIČOVÝCH PANELŮ	71
10.1	TESTOVÁNÍ ZÁMKOVÉHO PROFILU NA PEVNOST V OHYBU	72
10.1.1	Testování vzorku o profilu pero – drážka	73
10.1.2	Testování vzorku o profilu drážka – pero – drážka.....	75
10.1.3	Testování vzorku o profilu L pero – L pero	77
10.2	TESTOVÁNÍ VZORKŮ NA CHARPYHO KLADIVU	79
10.3	TESTOVÁNÍ VZORKŮ TŘÍBODOVÝM OHYBEM.....	81
10.4	TESTOVÁNÍ VZORKŮ ČTYŘBODOVÝM OHYBEM	85
11	DISKUZE VÝSLEDKŮ	89
	ZÁVĚR	91
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	92
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	96
	SEZNAM OBRÁZKŮ	97
	SEZNAM TABULEK.....	102
	SEZNAM PŘÍLOH.....	103

ÚVOD

Za svou poměrně krátkou historii výroby prošly kompozitní materiály dynamickým vývojem. Své uplatnění našly tyto materiály v dopravním, leteckém, chemickém a stavebním průmyslu. Celosvětově se kompozitních materiálů v současné době vyrobí na 13 mil. tun. Jeho výroba se v průměru zvyšuje o 10% ročně. Prudký vývoj využití kompozitních materiálů zaznamenala také dopravní technika. V dnešní době je trendem především snižování provozních nákladů, s čímž úzce souvisí snižování hmotnosti použitím moderních materiálů. Použitím kompozitních materiálů se snižuje jak ekologická zátěž, tak provozní náklady a náklady na údržbu, kdy materiály mají dobrou odolnost vůči korozi a dlouhou životnost. Při konstrukci železničních vagónů, tramvají, autobusů a dalších dopravních prostředků najdeme velké množství dílů z kompozitních materiálů. Jedná se především o různé krycí panely, které nahradily dříve používané dřevěné, či plechové obklady. Sendvičové materiály nalézají uplatnění v dílech střech, nosných částech, podlah a stěn. Využívá se vysoké tuhosti společně s nízkou hmotností. Mezi další výhody lze zařadit odolnost proti šíření trhlin, dobré tepelně a zvukově izolační vlastnosti a odolnost proti rázu. Sendvičové konstrukce mohou být tvarově složité prvky s různými prolisy a výstupky, použitím vhodných materiálů mohou být nehořlavé nebo samozhášivé. Jejich konečné vlastnosti lze přizpůsobit téměř všem požadavkům vhodnou kombinací materiálu jádra a vnější vrstvy.

Diplomová práce se zabývá návrhem kompozitního sendvičového panelu pro aplikace v dopravním průmyslu, konkrétně pro použití jako podlaha do železničního vagonu. Předností těchto panelů je především nízká hmotnost v porovnání se starými typy, vyrobenými především z překližky a dobré izolační vlastnosti. Nedostatkem doposud vyráběných panelů je, že se vyrábějí ve větších rozměrech a velikostně se upravují již hotové panely, což je poněkud nákladné. Jednodušší je vyrábět panely přímo na přání zákazníka, což ale vyžaduje výrobu univerzální formy, ve které by bylo možné vyrábět různé rozměry těchto panelů. Tato diplomová práce se taktéž zabývá návrhem univerzální formy, testováním vhodného spojení panelů a selekcí nejvhodnějších materiálů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

1.1 Definice kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se skládají ze dvou nebo více fyzikálně a chemicky rozdílných složek. Složky se dělí na výztuž a matrici. [3]

Vznik kompozitu je uskutečňován vložením jedné nebo více nespojitých fází (výztuží) do fáze spojitě (matrice). Hlavním úkolem výztuže je zpevnění, a proto bývá zpravidla pevnějšího a tužšího charakteru. Naproti tomu matrice slouží jako pojivo výztuže, měla by být tedy především poddajná a plastická. [2,3]

Vzniklý materiál tak cíleně získá vlastnosti mnohem výhodnější a hodnotnější, než mají jednotlivé složky samy. [2,3]

Tyto materiály mají řadu výhodných vlastností, především nízkou hustotu (obvykle 1600-2000 kg/m³), velký rozsah pevností (200-4000 MPa) a tuhostí (10-400 GPa), jsou odolné proti velkému množství chemikálií, mají nízkou tepelnou vodivost (zhruba 300x nižší než u uhlíku) a elektroizolační vlastnosti. [6]

1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze rozdělit dle mnoha kritérií. V praxi jsou nejobvyklejší rozdělení dle geometrického charakteru výztuže a typu matrice. [8]

Podle velikosti vyztužující fáze se kompozitní materiály dělí na makrokompozity, mikrokompozity a nanokompozity.

Makrokompozity:

Makrokompozity mají velikost příčného rozměru výztuže 10^0 až 10^2 mm a jejich největší využití je ve stavebnictví (železobeton, tj. beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty, polymerbetony, které obsahují drcené kamenivo a pryskyřici). Za makrokompozity lze považovat i vícevrstvé materiály a konstrukce (např. chodníky a vozovky). [3]

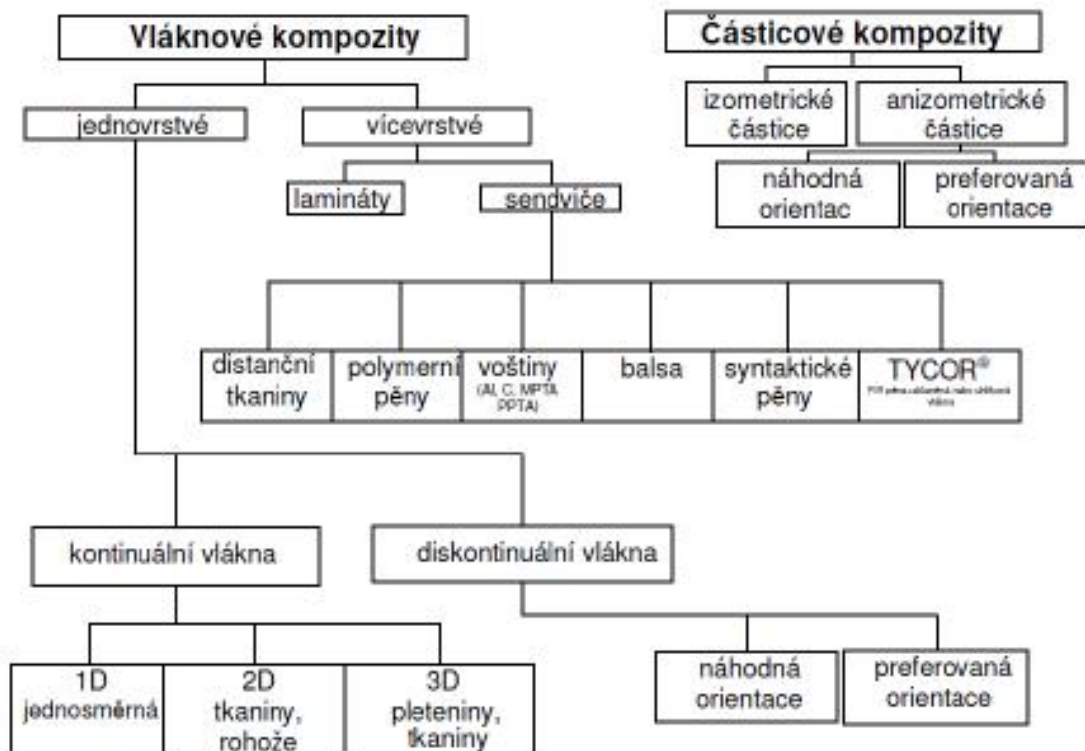
Mikrokompozity:

Mikrokompozitní materiály mají největší příčné rozměry výztuže (vláken nebo částic) v rozmezí 10^0 až 10^2 μm. Vzhledem ke kovům a jejich slitinám mají menší hustotu a tedy lepší poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě. Jsou nejvíce využívány v průmyslu. [3]

Nanokompozity:

Nanokompozity mají rozměr výztuže (délka částice nebo průměr vlákna) v jednotkách nanometrů. [3]

Rozdělení mikrokompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže je patrné z následujícího schématu. (Obr.1)



Obr. 1: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže [8]

1.2.1 Matrice

Matrice představuje spojitou složku, jejíž funkcí je spojení jednotlivých částic výztuže. Matrice se podílí na tvaru a rozměrech kompozitu, chrání výztuž před vnějšími vlivy a působí proti vzniku trhlin. Jelikož pomáhá při přenosu vnějšího zatížení na výztužnou část, důležitým požadavkem je také schopnost snadné deformace pod působícím zatížením. Další podmínkou je nízká hmotnost, obzvlášť velký důraz je kladen na dobrou soudržnost matrice s výztuží. [4]

Existuje několik typů matic. Při volbě konkrétní matrice je přihlíženo na cílené výsledné vlastnosti kompozitu. Nejčastěji uplatňované matrice bývají zhotovovány z kovových

(houževnatost, pevnost), polymerních (odolnost vůči korozi, houževnatost) či keramických materiálů (pevnost, odolnost proti vysokým teplotám). [4]

1.2.2 Výztuž

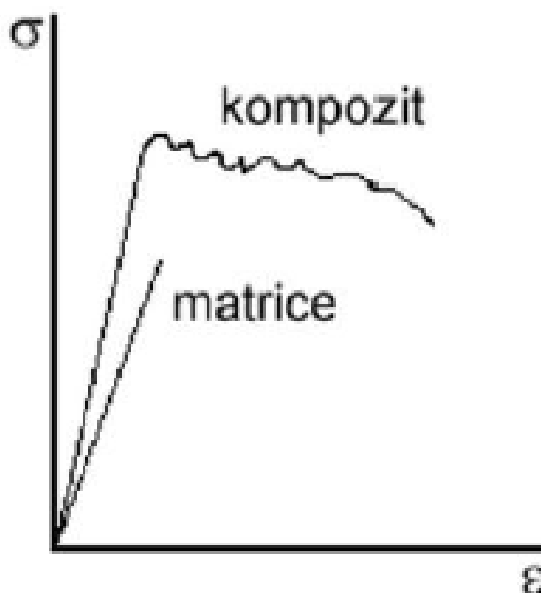
Výztuž neboli diskontinuální nebo také nespojitá fáze je pevnější, tužší a tvrdší než fáze pojítá. Zpravidla bývá v matrici rozptýlena a její funkce spočívá vevyztužení, tzn. v mechanických vlastnostech materiálu. Především pak pevnosti, pružnosti a tvrdosti. [2]

Pro splnění těchto požadavků, musí být splněny určité podmínky:

- Vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice
- Vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice
- Matrice se nesmí porušit dříve než vlákno

Typ a způsob uložení výztuže má klíčový vliv na vlastnosti kompozitního materiálu. [4]

Na Obr. 2 je znázorněn tahový diagram pro porovnání vlastností matrice a kompozitu.



Obr. 2: Tahový diagram křehké matrice a kompozitu [7]

Výztuž může být např. ve formě:

- Vlákna (krátká, dlouhá)

Jednotlivé vlákna se samostatně používají jen výjimečně. Ze zpracovatelských důvodů se většinou aplikují upravené produkty. Skleněná vlákna se používají pro textilní zpracování, pro vyztužování termosetů, termoplastů, lehčených plastů, pro výrobu povrchových rohoží a papíru. Vlákna jsou: skleněná, uhlíková, polymerní, aramidová, čedičová, proteinová, přírodní vlákna z rostlin, přírodní minerální vlákna, atd. [4]



Obr. 3: Skleněné vlákno [4]

- Rohoží

Tvoří je nahodile uspořádané kontinuální nebo na větší délky (cca 25 - 50 mm) sekané prameny. Sekaná vlákna jsou v rohoži spojena polymerními pojivy, rozpustnými v rozpouštědlových pryskyřicích. Použije-li se k výrobě rohoží kontinuálních vláken, není zapotřebí udržet jejich vzájemnou polohu pojivem (jsou vzájemně propletena). [4]



Obr. 4: Skelná rohož ze sekaných pramenů [24]

- Rovingu

Rovingy jsou sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů (méně než 40 zákrutů / m) pro výrobu profilů tažením (pultruzí), pro navíjení a pro výrobu prepregů. Jsou dodávány na válcových cívkách o větší hmotnosti (u skleněných vláken do 15 kg). Pro výrobu tkanin jsou rovingy dodávány na menších cívkách s kónickým zakončením (rovingy kolem 3k, číslo před k znamená kolik tisícovek elementárních vláken je v pramenci). Jemnost rovingu je udávána v „tex“ (hmotnost vláknového produktu v gramech při délce 1000 m). [4]



Obr. 5: Roving [25]

- Tkanin

Tkaniny jsou plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí výstužně ve dvou směrech. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby. Základní vazba je plátňová, keprová a atlasová vazba. Hmotnost vláken je možné měnit v obou směrech až v poměru 1:20, čímž vznikají jednosměrné tkaniny. Tkaniny jsou v porovnání s jednosměrně orientovanou výztuží lehce zpracovatelné. Tkaní zvlněně uložených vláken má za následek ztrátu mechanických vlastností. [4]



Obr. 6: Skelná tkanina [24]



Obr. 7: Hybridní tkanina (kombinace uhlíkových a kevlarových vláken) [4]

- Úpletu

Úplety jsou textilní plošné výrobky, které se vyrábí z jednoho anebo více druhů vláken pletením, umožňující volbu nejrůznějších geometrických tvarů. [4]

- Trojrozměrné tkaniny (3D Tkaniny)

Při vysokých požadavcích na přesnost uložení výztuže v trojrozměrně složitěm výrobku existují jen dvě možnosti: řásnitě úplety nebo vytvarované málo řásnitě pleteniny a úplety, které se pro zachování tvaru ještě sešívají. Úplety nebo trojrozměrné tkaniny jsou textilní plošné výrobky, které jsou vyrobené z jednoho nebo více vláknových systémů technologií pletení. [4]

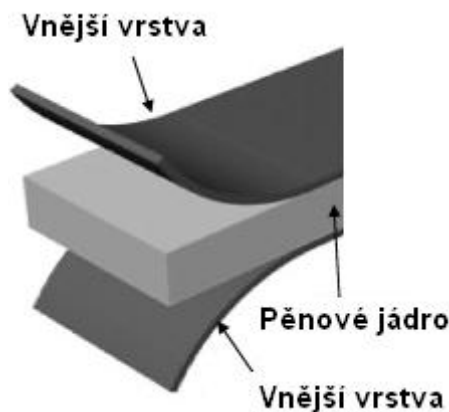


Obr. 8: Trojrozměrná výztuž příruby [4]

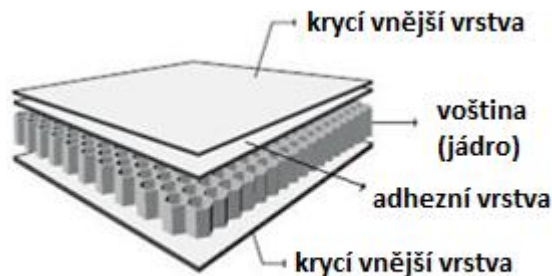
2 SENDVIČOVÉ KOMPOZITNÍ STRUKTURY

Sendvičové struktury tzv. sendviče (Obr. 9) jsou zvláštní druh kompozitu, který sestává ze dvou vnějších vrstev překrývajících mezivrstvu (jádro) z lehkého materiálu. Vnější vrstvy jsou tenké, ale tuhé, vnitřní vrstva (jádro), tzv. distanční, je tlustší, zpravidla méně pevný materiál. Jádro se vyznačuje nízkou hmotností, tato vlastnost představuje hlavní výhodu sendvičového materiálu oproti konvenčně používaným materiálům. [9]

Hlavní funkcí jádra je přenos smykového zatížení z jedné vnější vrstvy na druhou. Hlavní funkcí vnější vrstvy je zajistit lepší mechanické vlastnosti, zejména tuhost a pevnost. Sendviče mají na rozdíl od běžných laminátů mnohem vyšší pevnost, tuhost a izolační vlastnosti a přitom nižší hmotnost, dále jsou také rázuvzdorné. [10]



Obr. 9: Sendvičová struktura s pěnovým jádrem [37]



Obr. 10: Voštinová sendvičová struktura [10]

Sendvičové struktury se liší od jednoduchých laminátů:

- složením (u laminátu jsou v principu dvě ploché vrstvy slepeny vrstvou pryskyřice)
- tuhostí – až trojnásobně vyšší
- hmotností - cca. polovina váhy laminátu
- izolačními schopnostmi – až dvojnásobné [9]

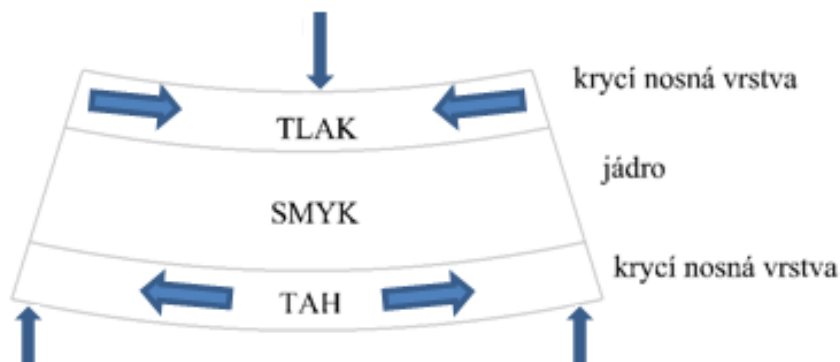
2.1 Vlastnosti sendvičové konstrukce

Efektivní struktura sendviče je taková, která je tvořena dvěma tuhými a pevnými vnějšími vrstvami zatěžovanými tahovými a tlakovými silami a jádrem o relativně nízké hustotě přenášejícím smykové síly mezi potahy.

Sendvičové konstrukce se uplatňují převážně v letecké a dopravní technice, kde se využívá jejich hlavních předností, a to vysoké ohybové pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti. Sendviče však lze nalézt i v ostatních průmyslových odvětvích, zejména ve stavebnictví. Ohybová tuhost a pevnost nejsou jejich jedinými přínosy. Mezi další výhody patří:

- únavová odolnost
- odolnost proti šíření trhlin
- odolnost proti rázům
- tepelná odolnost a odolnost proti ohni
- tepelná a akustická izolace [11]

Tyto vlastnosti jsou určeny převážně materiálem jádra. [12]



Obr. 11: Zatížení sendvičové konstrukce [10]

2.2 Materiálové složení sendvičové struktury

2.2.1 Vnější vrstvy sendvičové struktury

Relativně tenké a pevné materiály se používají jako krycí vnější vrstvy sendvičových konstrukcí. Tyto materiály musí zároveň splňovat požadavky na výrobu s ohledem na profilování a ohýbání, funkční požadavky týkající se odolnosti proti povětrnosti, vodě a těsnosti vůči páře, jakož i jejich schopnost odolávat zatížení, korozi a ohni. Krycí vnější vrstvy bývají nejčastěji z hliníku, oceli, laminátu, dřeva. [1]

- Ocelové a hliníkové plechy

Tyto materiály se nejčastěji používají ve formě tenkých plechů, vyráběných válcováním za studena s ochranou proti korozi. Jako ochrana proti korozi se používá žárové zinkování nebo přímo zinkové hliníkové plechy. [1]

Sendvičové panely s vnějšími vrstvami z hliníku se používají v aplikacích, kde jsou speciální požadavky na odolnost proti korozi nebo hygienu, např. ve výrobě nebo skladování potravin. Tloušťka plechů je obvykle v intervalu 0,7-1,2 mm. [1]

- Předimpregnované materiály (prepregy)

Prepregy jsou polotovary k výrobě vláknových kompozitů, jejichž hlavní složkou je výztuž impregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi, např. epoxidová pryskyřice a fenolová pryskyřice. Prepregy obsahují tkaniny, rovingy popř. rohože impregnované reaktoplastickou (polovytvrzenou) nebo termoplastickou matricí. Prepregové listy se případně vrství do požadované tloušťky, dotvarují ve formách a dotvrdí se působením tepla a tlaku. K výhodám prepregů patří velmi nízká hmotnost, vysoká tuhost, trvanlivost, volnost při návrhu, snížení nákladů výroby a hlavně přesně definovaný podíl matrice, respektive tkaniny. [13]

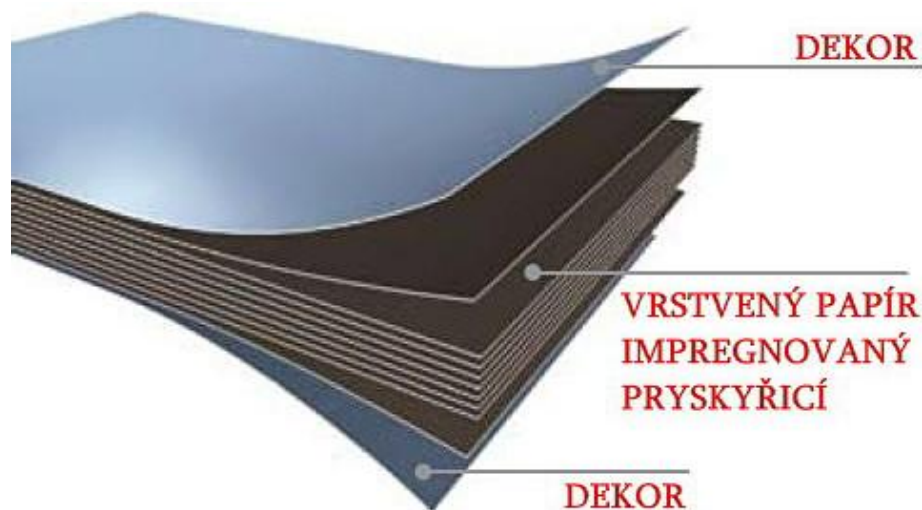


Obr. 12: Prepreg [38]

- Lamináty

Pro vnější vrstvy se používají zejména lamináty vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Na vnější vrstvu kompozitu (např. laminát ze skelných vláken) se nanáší pryskyřice, na kterou se pokládá a přitlačí jádro sendviče. Po několika sekundách se pryskyřice rozpustí a následuje napojení horní vnější vrstvy. Aby se dosáhlo optimálního spojení jednotlivých vrstev, prochází kompozit zařízením s vakuovým vakem, hydraulickým lisem nebo autoklávem. Sériově se vyrábí kompozity s tloušťkou mezi 1 a cca. 100 mm, hmotnost může být až pod 40 g/m². [9]

Dále se používají kompaktní desky z vysokotlakých laminátů (z angl. High Pressure Laminate – HPL). Jde o vysokotlaký laminát pro různé vnitřní i vnější aplikace. Desky mají vynikající mechanickou pevnost a odolnost vůči povětrnostním vlivům. Pro jejich výrobu se používá vrstvený papír impregnovaný pryskyřicemi, který je za žáru a vysokého tlaku slisován v homogenní pevnou desku. K tomuto lisování dochází nejčastěji v etážových lisech. [26]



Obr. 13: Struktura HPL desky [26]

2.2.2 Jádra

Jádra jako výplňový materiál pro sendvičové materiály musí mít vhodné vlastnosti s ohledem na mechanickou pevnost, tuhost a hlavně co nejnižší hmotnost. S přihlédnutím na způsobu použití se také posuzuje hořlavost a teplotní vodivost. Použitý materiál jádra může taktéž ovlivňovat zvukovou izolaci. [4]

- Balza

Balzové dřevo je materiál pocházející z rychle rostoucího balzového stromu „Ochroma pyramidale“, je velký (až 30 m), rychle rostoucí strom. Plody jsou malvice. Roste v Jižní Americe, 95 % komerční produkce pochází z Ekvádoru. Struktura dřeva se vyznačuje velkými buňkami, které jsou vyplněny vodou. Po vysušení buňky obsahují vlákna celulózy v ligninové matici. Tento přírodní kompozit má hustotu 40 až 340 kg/m³ (obvykle 160 kg/m³). Balzové dřevo nehoří, spíše pomalu doutná. Oproti polymerním pěněm teplem neměkne a vyznačuje se i menší tepelnou vodivostí. Dále v porovnání s voštinami jsou buňky uzavřené. [3]



Obr. 14: Balza [14]

- Korek

Korek (felém) je vnější část odumřelé povrchové vrstvy stonku (borcky) rostlin. Je nepropustná pro vodu i pro plyny a chrání rostlinu. Korek je vytvářen vrstvou buněk zvanou felogén (korkové kambium). Korek je také materiál získaný odřezáním kůry (borcky) dubu korkového. Kůra dubů se odřezává pomocí speciálních nožů. Původní kůra stromu je nekvalitní a odstraňuje se ze stromů, když jejich kmeny mají obvod asi 30 centimetrů. Kůra poté znovu dorůstá a sklízí se po 9 až 15 letech (nejkvalitnější až 30let) když dosáhne požadované tloušťky. [28]

Korek má rozmanité použití díky tomu, že má výborné izolační schopnosti jak zvukové, tak tepelné, je pružný a lehký. Odolává mechanickému tlaku, plísním i chemikáliím a poměrně vysokým teplotám (asi do 120 °C). Působí protialergicky a je antistatický. [28]



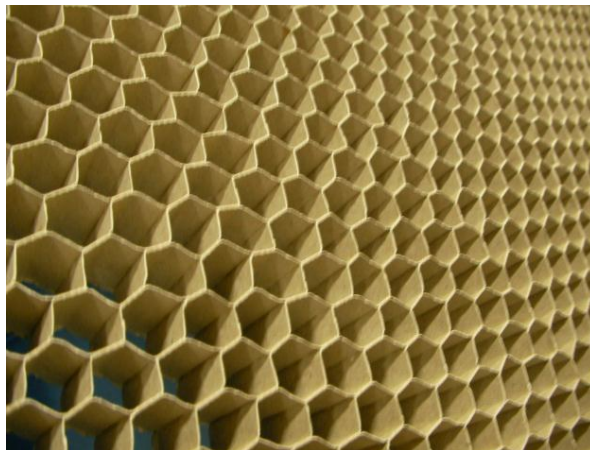
Obr. 15: Dub korkový [28]

- Voštiny

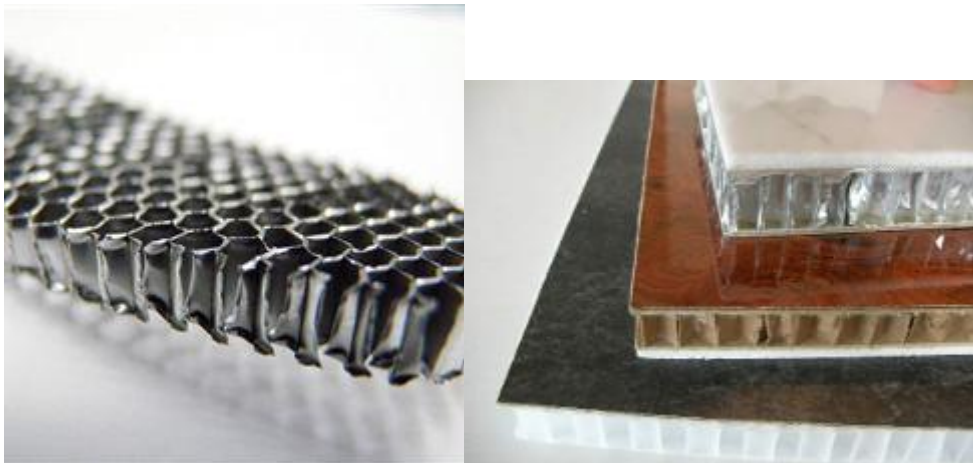
Voština je speciální typ materiálu, který se používá jako jádro s různou výškou, velikostí a tvarem buněk v sendvičových kompozitech. Voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnová jádra při stejné hustotě. [15]

Koncept vynalezl Norman de Buynne ve Velké Británii a nechal jej patentovat v roce 1938 jako hliníkovou voštinu pro sendvičové kompozity. Průmyslově se vyrábí od roku 1945. Označení voština je odvozeno z podobnosti se šestihrannou strukturou plástů včelího medu. [15]

Voštiny mohou být připraveny z různých materiálů (Obr. 16-18). Jako výchozí materiál se používají papírová, skleněná, aramidová, nebo uhlíková fólie, dále textilie či hliníkový plech. [15]



Obr. 16: Papírová voština [16]



Obr. 17: Hliníková voština [16]

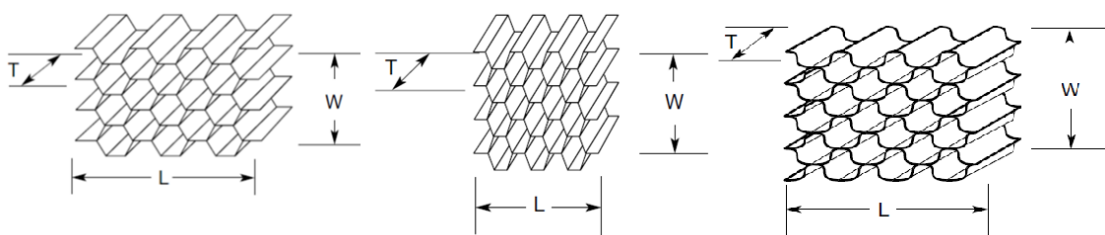


Obr. 18: Polypropylenová voština [16]

V následujícím obrázku (Obr. 19) jsou zobrazeny některé typy voštinových buněk. Standardní šestihhranná voština (Obr. 19a) je základní a nejčastěji používaná. Je běžně k dispozici z kovových i nekovových materiálů. [27]

Voština OX-Core (Obr. 19b) je šestihhranná voština, která je ve směru W prodloužena a v tomto směru poskytuje obdélníkovou konfiguraci, která umožňuje zakřivení nebo formování ve směru L. Tento typ voštiny zvyšuje smykové vlastnosti ve směru W a snižuje ve směru L v porovnání s šestihhranným typem voštiny. [27]

Flex-Core (Obr. 19c) je voština, která má vyjimečné vlastnosti v oblasti tvárnosti, ve složitých zakřiveních. Flex jádro poskytuje vyšší pevnost ve smyku než srovnatelné hexagonální jádro stejné hustoty. [27]

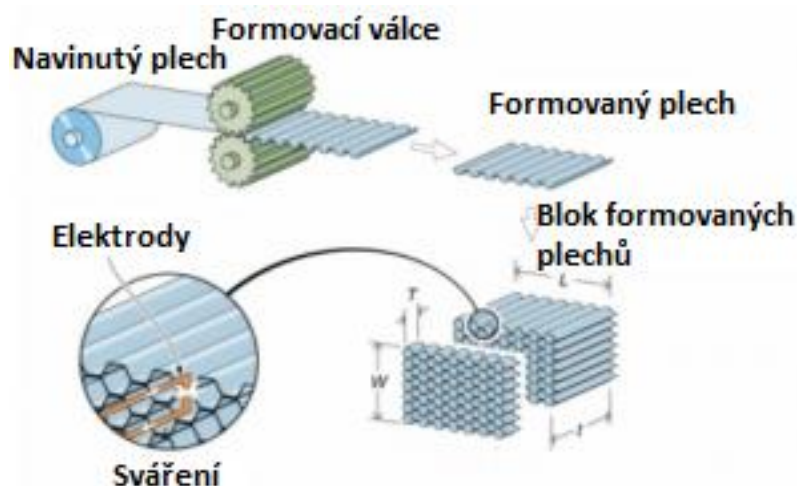


Obr. 19: a) Šestihhranná voština, b) OX-Core, c) Flex-Core [27]

Voštiny se formují z plošného materiálu několika různými technologiemi. [15]

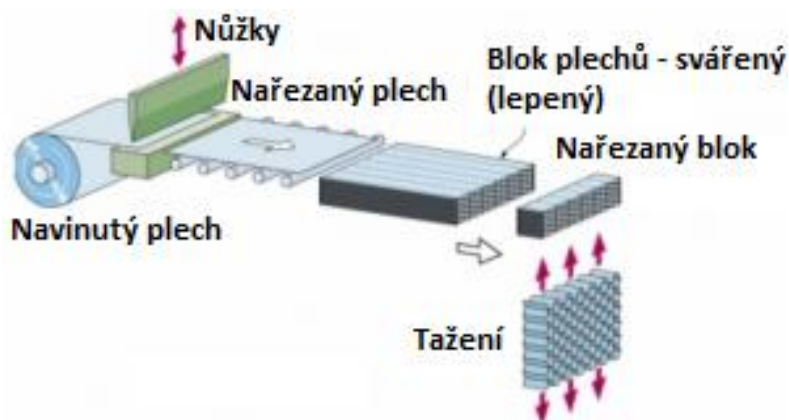
První z nich je výroba voštin formováním, kdy je kovový tenký plech formovaný válci a naskládán na sebe. Spojení plechů se vykoná nejčastěji svářením a výsledný blok se

nařeže na požadovanou hloubku (obr. 20). Tvar buněk je nejčastěji šestiúhelníkový, ale touto metodou se vyrábí čtvercové a trojúhelníkové buňky. [18]



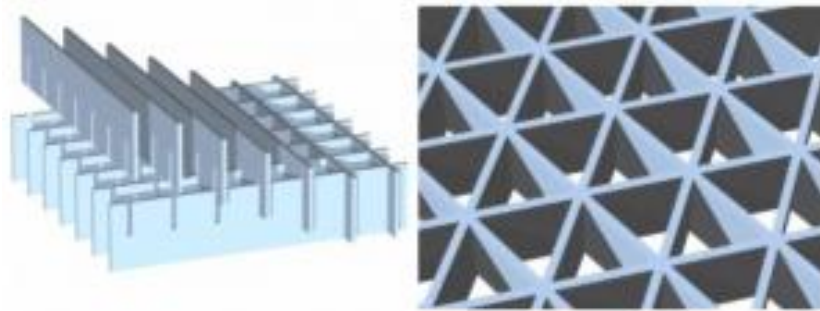
Obr. 20: Výroba plechové voštiny formováním [18]

Druhou metodou je tzv. metoda HOBE (z angl. Honeycombe fore expansion). Při této technologii jsou tenké kovové plechy nejdříve stříhané a skládané na sebe. Potom se po délce pájí v určitých rozestupech. Takto spojené plochy se řezou na požadovanou hloubku, kolmo na rovinu, v které leží spoje. V tomto směru jsou následně tažené, čímž vznikne hexagonální struktura buněk (Obr. 21). Plechy se spojují lepením, laserovým svářením nebo difuzním procesem. [18]



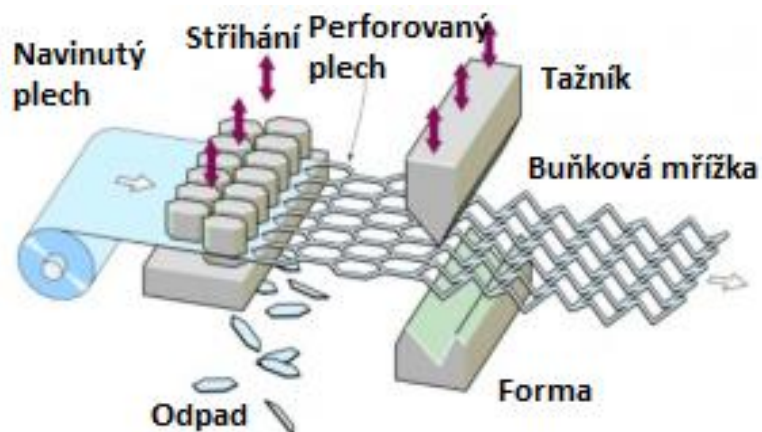
Obr. 21: Výroba plechové voštiny metodou HOBE [18]

Třetí metodou je výroba voštin skládáním pásů, kdy jsou pásy plechů, v kterých jsou vytvořeny štěrby, vkládány do sebe (Obr. 22). Není potřeba žádné ohýbání plechů, ale buňky mají pouze čtvercový nebo trojúhelníkový tvar. Taková struktura se potom svařuje nebo pájí. Tato metoda se používá i pro křehké keramické materiály a kompozity. [18]



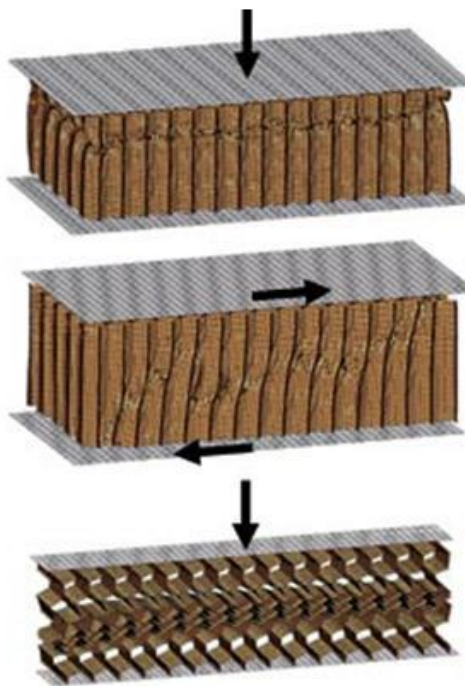
Obr. 22: Výroba plechové voštiny skládáním pásů [18]

Další metodou je výroba voštin stříháním a ohýbáním (Obr. 23) kdy je vzor buňkové mřížky vystřihovaný anebo vyřezávaný (laserem nebo vodním paprskem) z plechu. Plech se potom ohýbá do požadovaného tvaru. Nevýhodou této metody je velký odpad materiálu. [18]



Obr. 23: Výroba plechové voštiny stříháním a ohýbáním [18]

Při zatížení výrobků z voštin je zásadní způsob přilepení vnější vrstvy k voštině. Jestliže dojde při zatížení k odlepení pláště od voštiny, dochází zároveň k destrukci části nebo celého sendvičového dílu. Na Obr. 24 jsou znázorněny způsoby namáhání tlakem a smykové namáhání, u kterých si lze všimnout začínající destrukce voštinového jádra. [4]



Obr. 24: Způsoby zatěžování voštin [4]

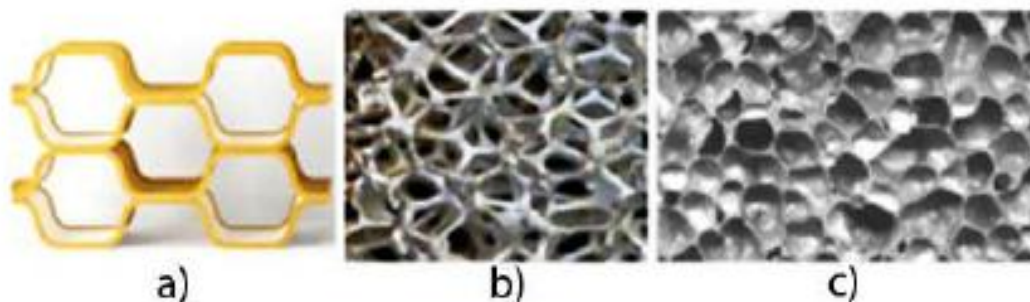
- Buňková tělesa (pěnové materiály, pěny)

Pevné buňkové těleso obecně představuje těleso, u kterého je měrná hmotnost (hustota) výrazně snížena oproti plnému tělesu přítomností dutin ve struktuře hmoty, které vytváří tzv. buňky. Dutiny buněk jsou vyplněné plynem nebo kapalinou. Charakter tekutiny v buňkách je podmíněn způsobem výroby a materiálem, z kterého je takové těleso vyráběné. V dnešní době je možné zpracovat do buňkové struktury téměř každý materiál - kovy, keramické materiály, sklo a většinu polymerů. [17]



Obr. 25: Pěny [4]

Polymerní pěny jsou vyráběny zpěnováním po přidání plynových bublin do tekutého monomeru nebo horkého polymeru. Tyto bubliny se nechají expandovat, stabilizovat a potom se těleso ochladí, aby ztuhlo. Bubliny se přidávají mechanickým mícháním anebo přimícháváním zpěňovacího materiálu (zpěňovadla) do polymeru. Zpěňovadlo může být na bázi fyzikální anebo chemické. Fyzikální zpěňovadla jsou inertní plyny nebo uhlík, vodík či dusík. Tyto plyny se vhánějí do horkého polymeru pod vysokým tlakem a jejich růst v materiálu je řízený redukcí tlaku. Chemické zpěňovadla jsou přísady, které se teplem rozkládají, anebo které vzájemnou chemickou reakcí uvolňují plyny. Struktura polymerních pěn je tvořena buď uzavřenými, nebo otevřenými buňkami. [18]



Obr. 26: a) voština b) pěna s otevř. buňkami c) pěna s uzavř. buňkami [17]

2.2.3 Adhezní materiály

V případě, že jsou vnější vrstvy tvořeny například ocelovými plechy či HPL deskami, je zapotřebí použít adhezivních materiálů (lepidel) k jejich spojení s jádrem. Jako adhezivní materiály se používají ve většině případů epoxidové filmové lepidla, buď z výztuží, nebo bez výztuže, dále se používají epoxidové prepregy. V následujícím textu jsou popsány některé konkrétní typy lepidel používaných v průmyslu.

SA 70

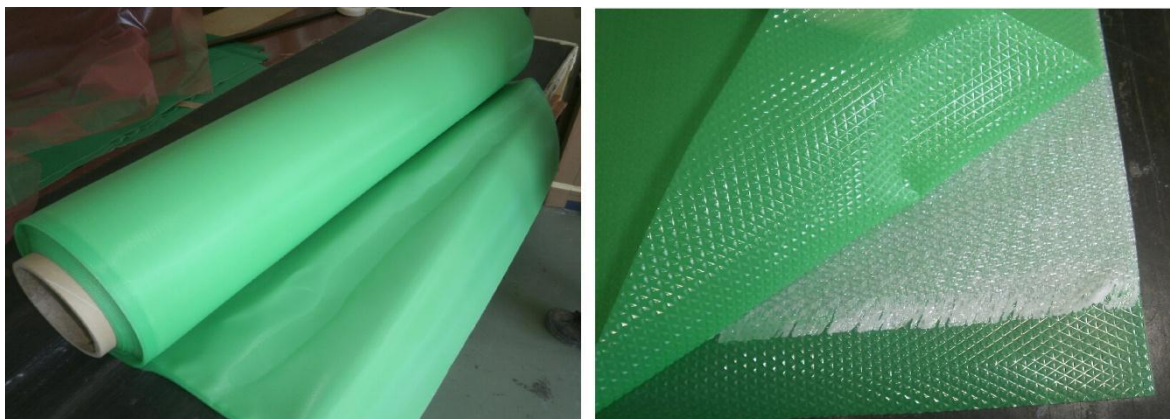
SA 70 od firmy Gurit je epoxidové filmové lepidlo vyztužené skelnými vlákny. Hmotnost filmu je 175 g/m^2 , hmotnost skelných vláken 25 g/m^2 , teplota skelného přechodu $95 \text{ }^\circ\text{C}$ a smyková pevnost 36 MPa . [33]



Obr. 27: Filmové lepidlo Gurit [31]

HexPly M34

Epoxidový prepreg HexPly® M34 je speciálně vyvinutý pro nízké teploty vytvrzování i velkých součástí. Má výborné ohnivzdorné vlastnosti a je samozhášivý. Je ideální pro sendvičové konstrukce. Má vynikající přilnavost na pěnová jádra a voštiny. Je vyztužený skelnými vlákny. Doba vytvrzování je 40 minut při $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Smyková pevnost je 120 MPa , hustota 1260 kg/m^3 . [34]



Obr. 28: Epoxidový prepreg [31]

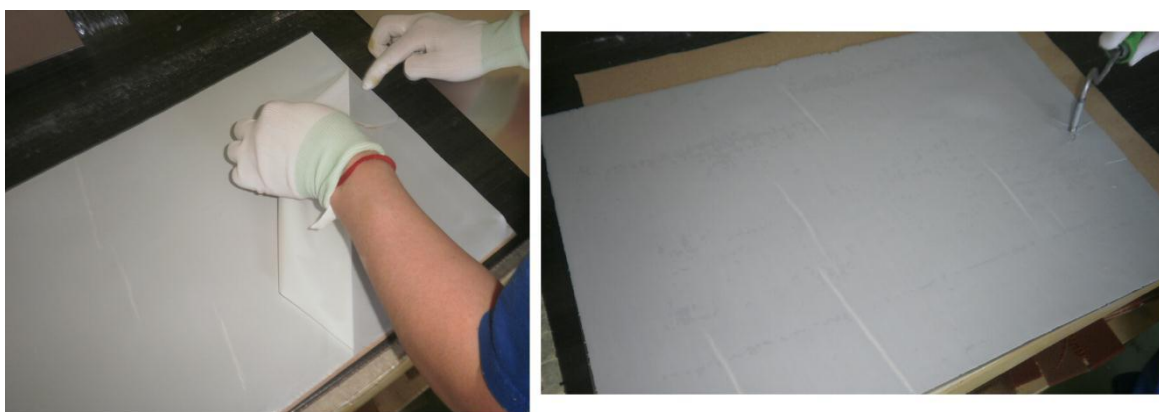
3M Scotch-WeldAF 3002

Je modifikované epoxidové foliové lepidlo bez výztuže. Při vytvrzování zvětší svůj objem. Je určeno pro voštinové sendviče. Hmotnost filmu je 200 g/m^2 . Velikost odpařování těkavých látek při vytvrzování je menší než 1%. Smyková pevnost je 12 MPa. [35]

Letoxit KFL 130

Je jednosložkové epoxidové foliové lepidlo. Lepidlo má formu tmavě šedé folie o tloušťce 0,25 – 0,3 mm, pružné a tvárné při pokojové či zvýšené teplotě. Z jedné strany je foliové lepidlo chráněno PE folií, z druhé je potaženo silikonovým papírem. Lepidlo je určeno hlavně pro lepení hliníkových slitin. Nedochozí k odpařování těkavých složek při zpracování ani při vytvrzování.

Pevnost ve smyku je 29 – 33MPa, pevnost v odlupu 4 - 7 N/mm. [36]

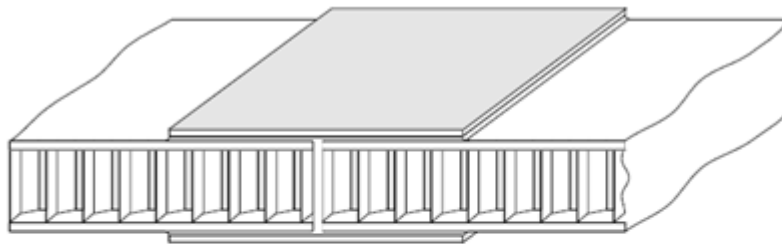


Obr. 29: Filmové lepidlo Letoxit [31]

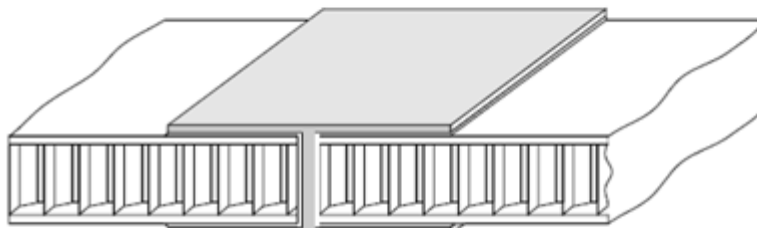
2.3 Příklady spojování sendvičových konstrukcí

Sendvičové panely lze spojovat různými způsoby, některé jsou znázorněny na následujících ilustracích. Spoje musí být pevné a pružné, musí odolávat jak statickému, tak i dynamickému zatěžování, dále musí mít dostatečnou pevnost při zvýšených či snížených teplotách a také musí odolávat vlivům prostředí (sucho, vlhko). [5]

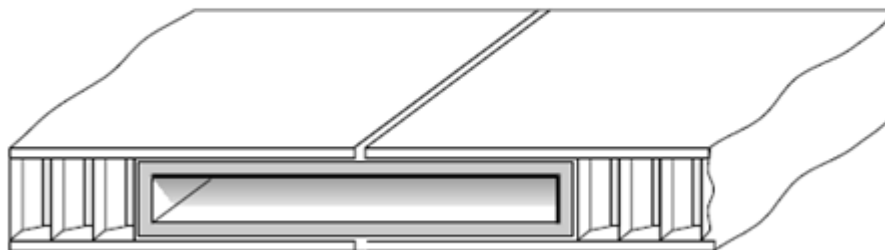
- Spojování natupo



a) Čelní lepení s podporou



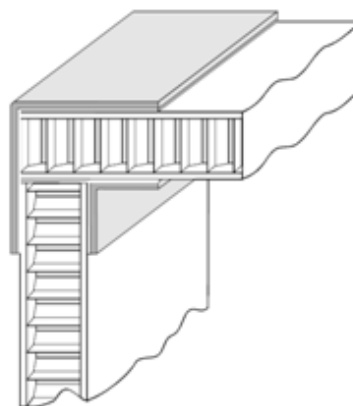
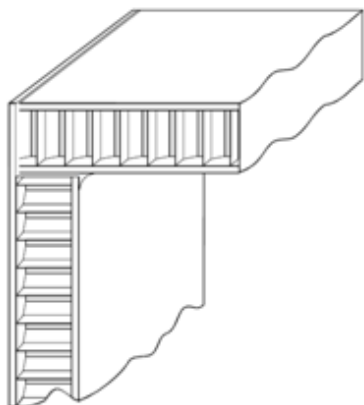
b) Lepený tupý spoj H



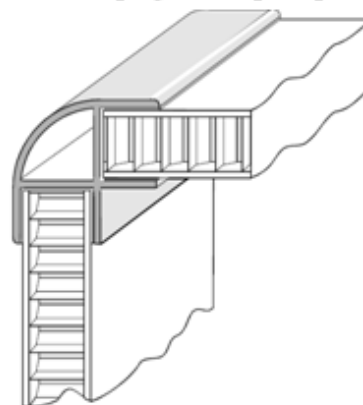
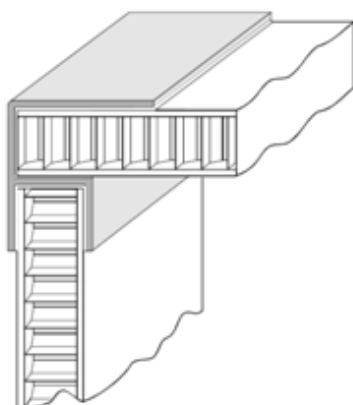
c) Čelní lepený spoj s interní podporou

Obr. 30: Příklady spojení sendvičových struktur natupo [5]

- Rohová spojení



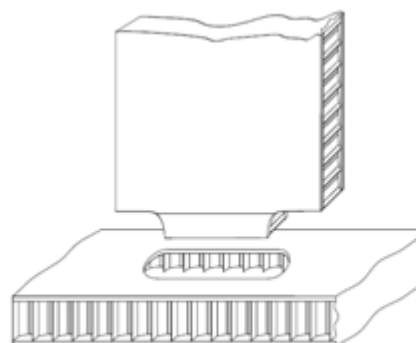
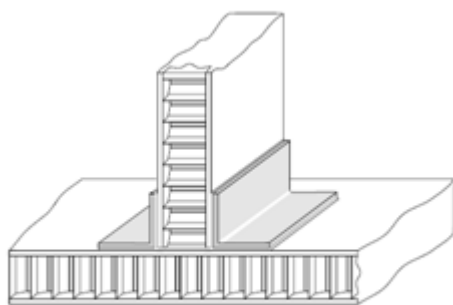
a) Rohové spojení polodrážkou b) Rohové spojení s podporou L lišt



c) Rohové spojení – ostrý roh d) Rohové spojení – zaoblený roh

Obr. 31: Příklady spojení sendvičových struktur rohovým spojením [5]

T – spojení



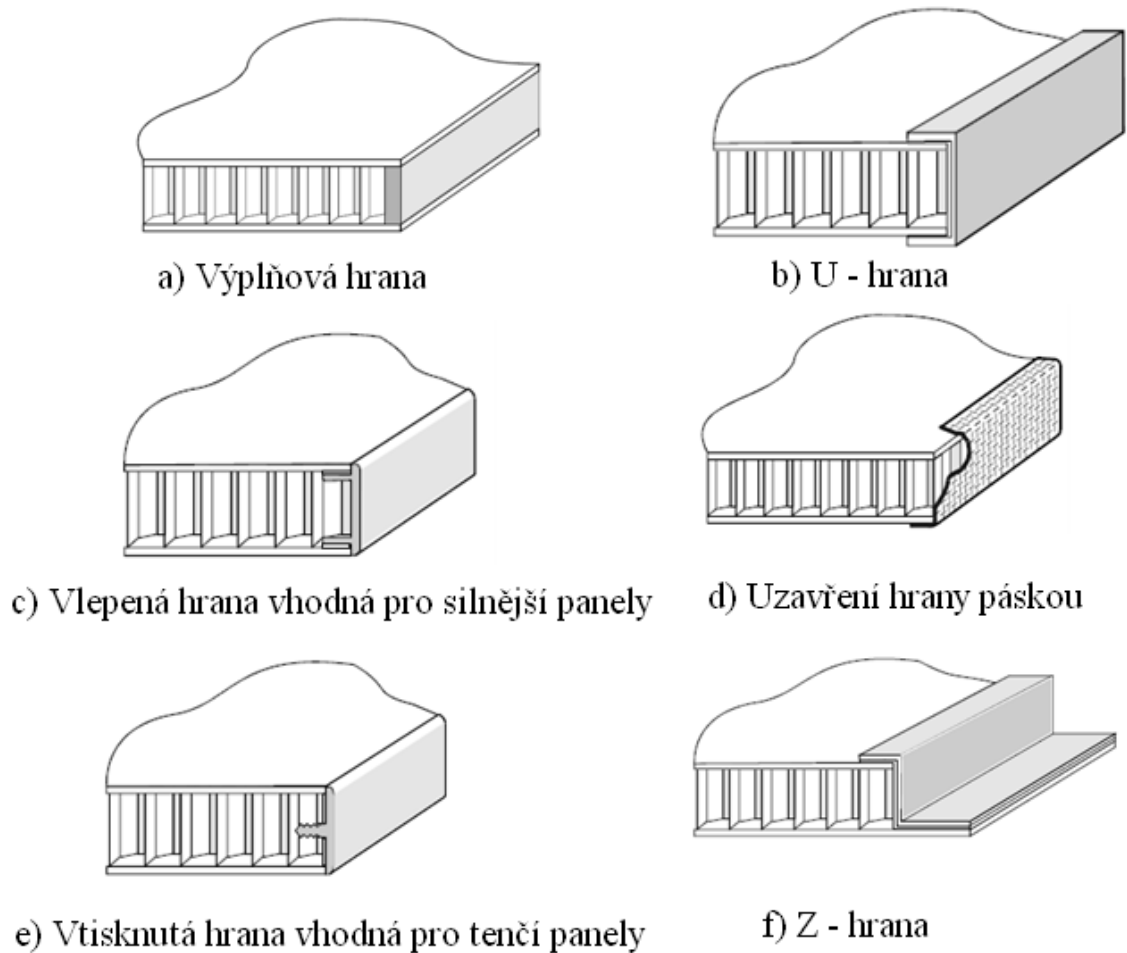
a) T – spojení L lištami

b) T – spojení pero – drážka

Obr. 32: Příklady spojení sendvičových struktur T - spojením [5]

- Metody uzavírání sendvičů

Otevřené hrany u sendvičových materiálů mohou být uzavřeny z důvodu zabránění vniknutí vlhkosti, zlepšení vzhledu nebo umožnění následného upevnění. [5]



Obr. 33: Příklady uzavírání sendvičových struktur [5]

3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH STRUKTUR

Pro laminátové a kompozitní sendvičové struktury existuje mnoho možností, jak ovlivnit výsledné vlastnosti výrobku, jako například tuhost, pevnost, houževnatost, tepelnou odolnost, ale také náklady na výrobu a cenu. Můžeme využít jak specifických vlastností různých materiálů, tak způsob výroby k dosažení požadovaných vlastností.

Vzhledem k tomu je třeba posuzovat technologický postup při výrobě vyztužených plastů za velmi podstatný faktor, který určuje jak jeho konečné vlastnosti, tak i ekonomiku výroby. Proto je třeba věnovat volbě technologie značnou pozornost. V této kapitole bude popsáno několik používaných výrobních technologií pro výrobu laminátových a kompozitních sendvičových struktur. [19]

Výrobní technologie je dána především charakterem výrobku a její volba se řídí několika zásadními faktory:

- sériovost dílce
- velikost a členitost výrobku
- kvalita povrchu,
- požadované vlastnosti, zejména pevnost a hmotnost, limit nákladu[19]

3.1 Základní metody výroby sendvičových struktur

Sendvičové komponenty mohou být vyrobeny pomocí osvědčených metod:

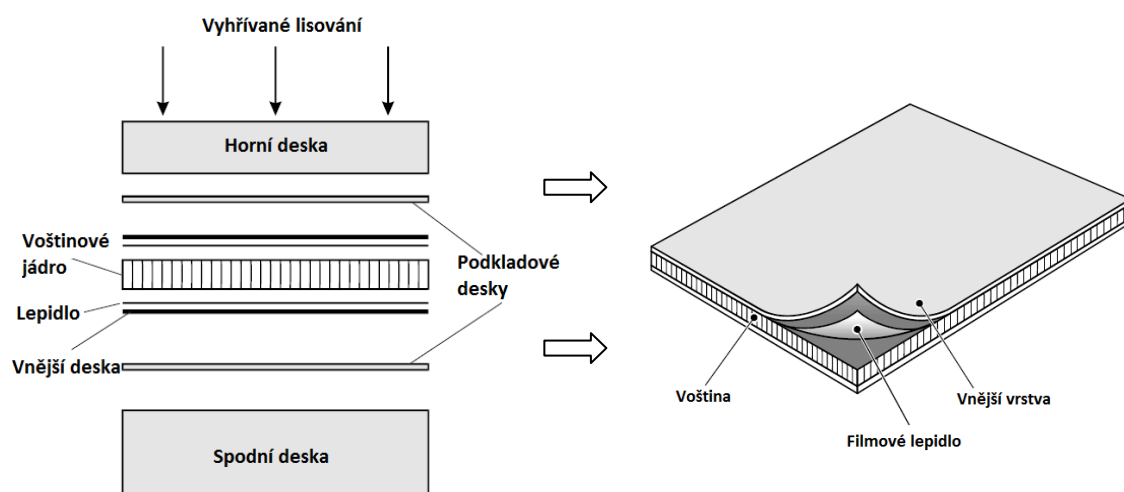
Vyhřívané lisování – používá se pro výrobu desek a jednoduchých panelů

Vytvrzování v peci – používá se pro zakřivené a komplexní formy panelů

Formování v uzavřené formě – používá se pro formování hotových tvarových panelů [32]

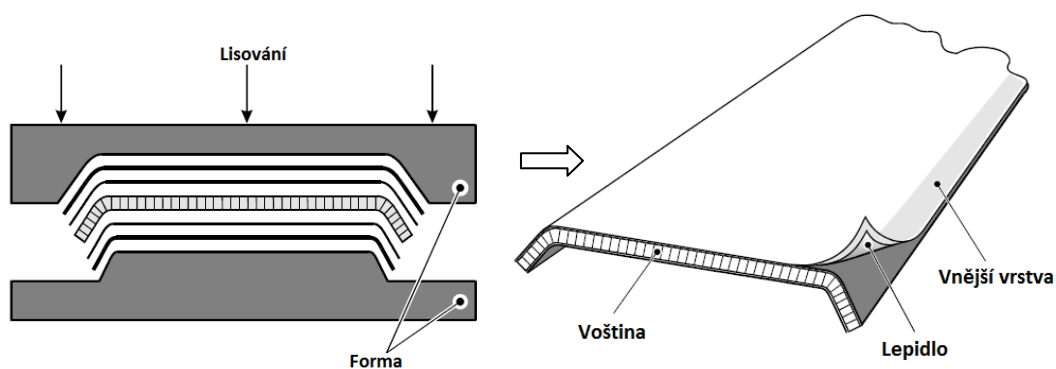
3.1.1 Vyhřívané lisování

Výroba sendvičových struktur pomocí vyhřívaného lisování spočívá ve vložení sendvičové „sestavy“ mezi podkladové desky a následném zalisování. Sendvičová sestava se skládá z těchto složek: dvou vnějších desek, dvou vrstev foliového lepidla a voštinového jádra. Jako vnější desky mohou být použity např. předimpregnované desky (prepregy) nebo kovové desky. Samotné zalisování pak probíhá na vyhřívaném lisu. Schéma vyhřívaného lisování je zobrazeno na Obr. 34. [32]



Obr. 34: Technologie vyhřívání lisování a výsledný výrobek [32]

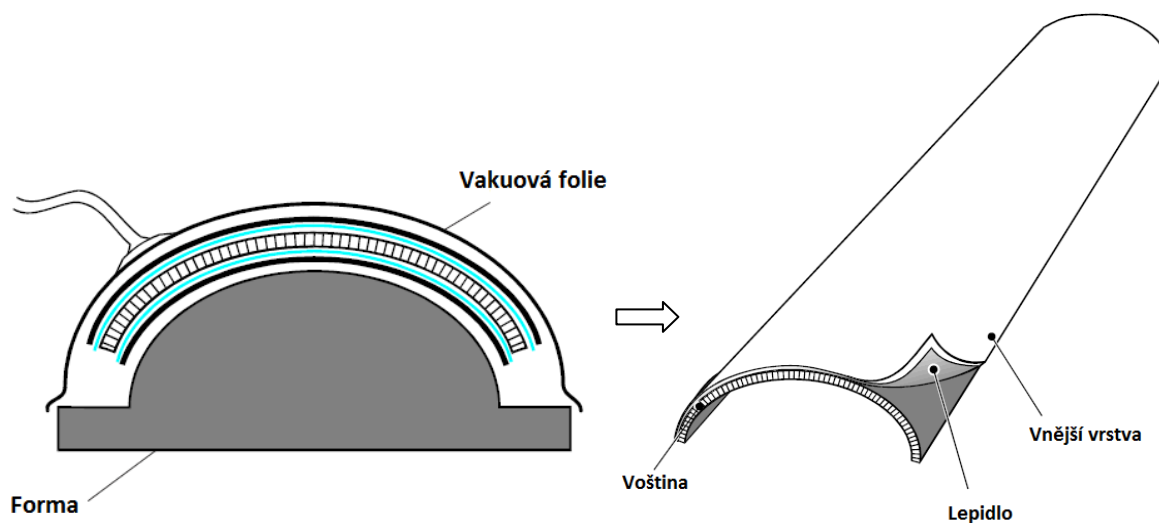
Mezi vyhřívání lisování patří i formování v uzavřené formě (Obr. 35). Tato metoda výroby sendvičových struktur je nejvhodnější pro výrobky, kde je hlavním cílem dosáhnout vysoké přesnosti a dobré povrchové úpravy. Tepla a tlaku lze v tomto případě dosáhnout několika způsoby. Typickým způsobem je použití vyhřívání nástrojů (forem) s vnějším mechanickým tlakem nebo nevyhřívání nástrojů. Formování za pokojové teploty se používá, je-li sendvičová konstrukce příliš velká, nebo není-li topné zařízení k dispozici. [32]



Obr. 35: Formování v uzavřené formě a výsledný výrobek [32]

3.1.2 Vytvrzování v peci

Skladba jednotlivých materiálů tvořících sendvičovou strukturu je stejně jako u lisování připravena ještě před vložením do vakuové pece. Tato materiálová skladba se vkládá na formu, která má výsledný tvar budoucí sendvičové konstrukce, poté je překryta vakuovou folií. Forma pokrytá pružnou folií se umístí do vyhřívané pece (Obr. 36). Tato technologie výroby je vhodná zejména pro vnější vrstvy z prepregu nebo kovových desek a vnitřní vrstvy z pěny nebo voštinového jádra. [32]

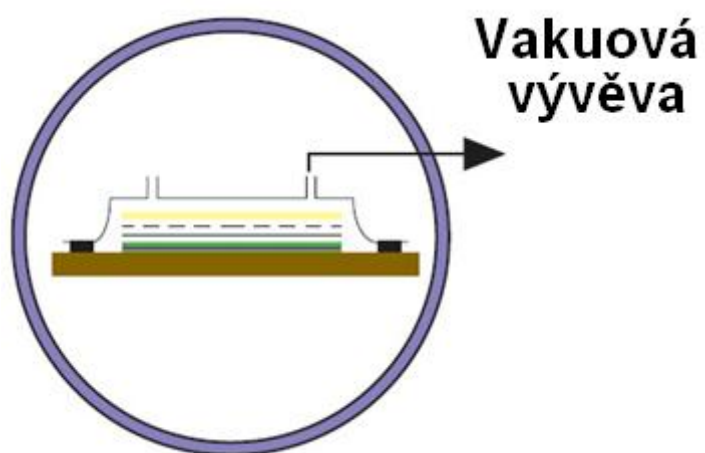


Obr. 36: Schéma vytvrzování v peci a výsledný výrobek [32]

3.1.3 Vytvrzování v autoklávu

Jedná se o nejnákladnější a nejsložitější technologii pro sériovou výrobu velkorozměrných konstrukcí. Výchozím materiálem jsou vždy prepregy, vyžadující vytvrzování za zvýšených teplot. Skladba vrstev je prakticky stejná, jako při vytvrzování v peci, forma pokrytá pružnou folií se umístí do vyhřívaného autoklávu, provede se nejprve evakuace podtlakem cca 0,08 MPa a pak se autokláv natlakuje na cca 0,6 MPa. [20]

Po ohřátí autoklávu na požadovanou teplotu nastane vytvrzování pryskyřice (120° až 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) [19]



Obr. 37: Autokláv [19]

4 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ

Mechanické vlastnosti jsou finální vlastností daného materiálu, které podmiňují jeho vhodnost pro určenou funkci a použití v praxi. Poznání a zlepšování mechanických vlastností konstrukčních materiálů je motivované jejich optimálním využitím při výrobě strojů a zařízení. [21]

Z hlediska působení síly na zkušební těleso je možné rozdělit mechanické zkoušky do několika skupin:

- Zkoušky statické
 - za normálních teplot
 - za zvýšených nebo snížených teplot
- Zkoušky dynamické
 - rázové
 - cyklické

Měření mechanických vlastností může sledovat různé cíle. Prvním a nejstarším je získávání dat pro konstruktéry. Za druhé se mechanické vlastnosti používají jako důkaz kvality materiálu. Mohou být kritériem pro výstupní kontrolu nebo pro přejímku materiálů. Za třetí v materiálovém výzkumu, který usiluje o pochopení a strukturální vysvětlení mechanického chování a konkrétních mechanických vlastností. [22]

4.1 Zkouška ohybem

Patří do statických zkoušek a může být prováděna jak za normální (pokojové) teploty, tak za zvýšené teploty.

Ohybový moment vyvozený od příčnicku způsobí v horních vláknech průřezu tlak, ve spodních tah. Je-li průřez symetrický, je neutrální vrstva v ose zkušební tělesa. To však platí pouze v případě, že materiál má stejné vlastnosti v tahu i v tlaku. V případě, že materiál nemá stejné vlastnosti v tahu a tlaku, posouvá se neutrální osa směrem k tužší straně, kde je při daném namáhání vyšší pevnost.

Pro houževnaté materiály má zkouška ohybem menší význam než ostatní mechanické zkoušky, protože tělesa se deformují, aniž by bylo možno stanovit výslednou pevnost, jelikož nedojde k lomu. Z tohoto důvodu má zkouška ohybem význam pro křehké materiály, kde lze z průhybu určit deformační schopnost, což při zkoušce tahem není možné, neboť se napětím vyvolá pouze nepatrné a těžko měřitelné prodloužení. [22]

4.1.1 Třibodová zkouška ohybem

Při třibodové zkoušce je zkušební těleso podepřeno jako nosník dvěma podporami a konstantní rychlostí prohýbáno trnem (příčnickem) působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. [22]

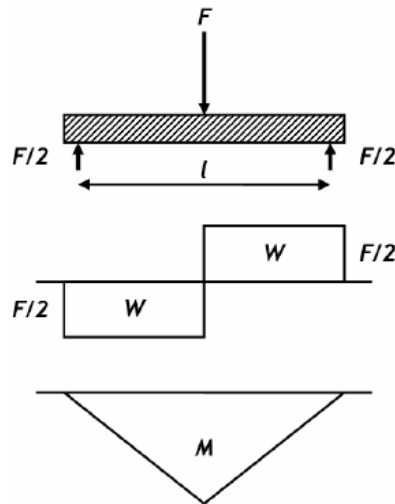
Působí-li síla F uprostřed zkušebního tělesa, pak při vzdálenosti podpěr l je maximální ohybový moment dán vztahem:

$$M_{o \max} = \frac{F \cdot l}{4} \quad (1)$$

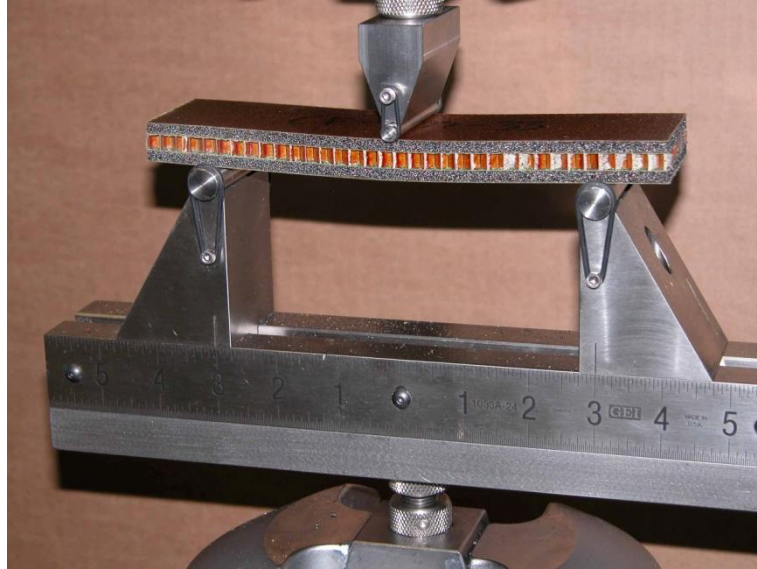
Největší napětí se stanoví ze vztahu:

$$\sigma_{o \max} = \frac{M_{o \max}}{W_o} \quad (2)$$

[22]



Obr. 38: Průběh ohybového momentu u nosníku na dvou podporách [22]



Obr. 39: Přípravek pro tříbodovou ohybovou zkoušku [39]

4.1.2 Čtyřbodová zkouška ohybem

Při čtyřbodové zkoušce je zkušební těleso prohýbáno dvěma trny v jedné třetině od jednoho, respektive druhého konce zkušební tělesa. Hodnoty pevností v ohybu jsou nižší než u tříbodového systému a jak ukazuje Obr. 40, je i jiné rozložení ohybového momentu. Jeho rovnoměrnější působení v celé délce zkušební tělesa vedlo k tomu, že se modul pružnosti stanovuje tímto způsobem. [22]

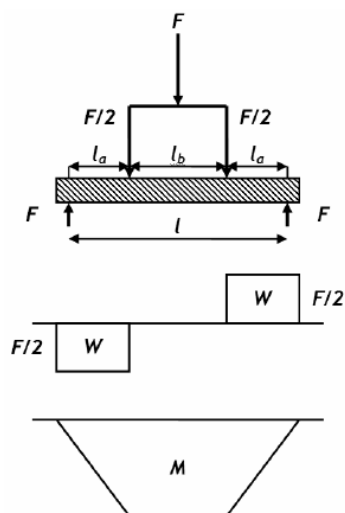
Ohybový moment je dán vztahem:

$$M_{o \max} = \frac{F}{2} \cdot l_a \quad (3)$$

Největší napětí se stanoví ze vztahu:

$$\sigma_{o \max} = \frac{M_{o \max}}{W_o} \quad (4)$$

[41]



Obr. 40: Průběh ohybového momentu u čtyřbodové zkoušky ohybem [22]

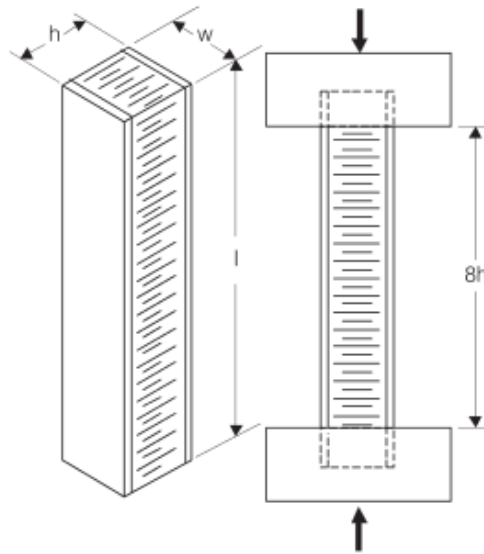


Obr. 41: Přípravek pro čtyřbodovou ohybovou zkoušku [40]

4.2 Zkouška tlakem

Zkouška pevnosti v tlaku je obdobou tahové zkoušky. Zkušební vzorky jsou zatíženy dvěma stejně velkými silami (F), působícími tlakem v podélné ose vzorku. [23]

Tento test poskytuje základní informace pro posuzování nosnosti vnějších vrstev sendvičové struktury (Obr. 42). [42]



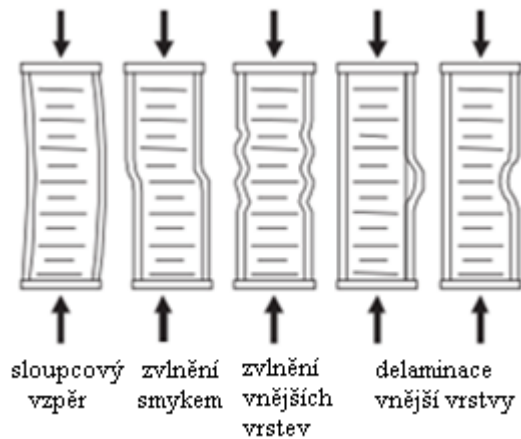
Obr. 42: Zatížení tělesa při zkoušce tlakem [42]

kde: l = délka vzorku

w = šířka vzorku

h = hloubka vzorku

Existuje několik možných způsobů vyhodnocení tohoto testu, a to sloupcový vzpěr (angl. Column Buckling), zvlnění smykem (angl. Shear Crimping), zvlnění vnějších vrstev (angl. face dimpling) a delaminace či případná ztráta stability vnější vrstvy při případném stlačení jádra (angl. face wrinkling) (Obr. 43). [42]



Obr. 43: Poruchy vzniklé při tlakové zkoušce [42]

Zkušební vzorek by měl být minimálně 2cm široký a nepodporovaná délka by měla být alespoň osminásobkem sendvičové tloušťky. Dále by měl mít zkušební vzorek dobré ploché konce, aby se zabránilo předčasnému porušení na koncích vzorku. [42]

Během zkoušky je důležité, aby byl vzorek upnut rovně, paralelně se směrem zatížení. To zabrání předčasnému porušení vzorku. [42]

Průměrná pevnost v tlaku je možno určit podle následující rovnice:

$$\sigma = \frac{P}{2tw} \quad (5)$$

Kde: P = mezní zatížení

t = tloušťka vnějších vrstev

w = šířka vzorku [42]

4.3 Zkouška průrazem na padostroji

Zkouška pracuje na principu volně padajícího tělesa s libovolně volenou kinetickou energií. Velikost kinetické energie E [J] závisí na hmotě tělesa a na výchozí výšce, podle vztahu:

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (6)$$

m hmotnost tělesa [kg],

h výška dopadu [m],

v okamžitá rychlost pádu tělesa [m/s]. [29]

4.3.1 Popis zkoušky

Zkouška se provádí při kontrole hotových výrobků, například z laminátů, kdy necháme na vhodně upevněnou část spadnout ocelovou kuličku nebo padací čidlo, u kterého lze zvyšovat hmotnost nasazením dalšího závaží. [30]

Nárazník má tvar ocelové polokoule, do níž je vetknuta tyč pro uchycení v elektromagnetu. Tyč slouží současně k uchycení přídatného závaží. Těleso je zavěšeno ve vzdálenosti 66 cm od upnuté fólie. Fólie se upíná pneumaticky do kruhového rámu o průměru asi 13cm. Dopadne-li nárazník a zkušební těleso nepraskne, zvýší se jeho hmotnost. Praskají-li všechny vzorky, přídatné závaží se ubere. Při každé hmotě tělesa se zkouší 10 vzorků, až se najde hmotnost nárazníku, při které praskne 50 % vzorků. Výsledky se vyhodnocují tak, že se počet prasklých vzorků při jednotlivých hmotnostech tělesa, vyjádří v procentech. Hmotnost pro výpočet zahrnuje hmotnost nárazníku a součet hmotností příkládaných závaží. [29]

Hmota, při které praskne 50 % vzorků, se vypočte podle vzorce:

$$G_{50} = G_{100} - \Delta G \cdot \left(\frac{S}{100} - \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

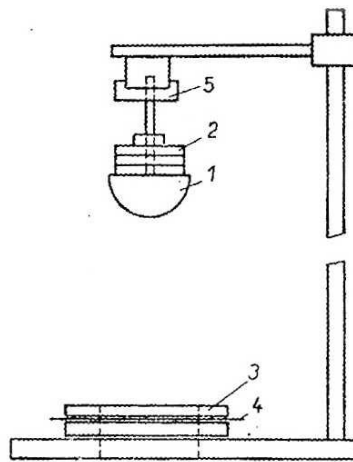
G_{50} ... hmotnost 50 % porušení [kg],

G_{100} .. nejmenší hmotnost, při které prasknou všechny vzorky [kg],

ΔG ... hmotnost přídavných závaží [kg],

S součet procentních hodnot všech jednotlivých zkoušek.

Pomocí padostroje se měří tvrdost u desek, například Umakartu tak, že se na vzorek umístí kopírovací papír směrem k další vložce čistého papíru. Tvrdost se pak hodnotí podle průměru otisku, kde tvrdší povrch zkoušeného vzorku zanechá menší otisk než měkký materiál. [29]



Obr. 44: Schéma padostroje [29]

1 – nárazník, 2 – závaží, 3 – upínací čelisti, 4 – zkušební těleso, 5 – elektrický magnet

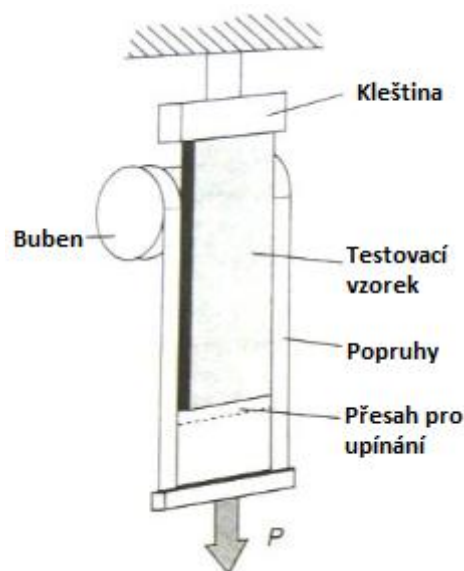
4.4 Testování odlupu (Peel test)

Zkoušky odlupem srovnávají odolnost lepených spojů mezi vnější vrstvou a jádrem sendvičové struktury, za stanovených zkušebních podmínek. Jednou z testovacích metod je tzv. zkouška odlupu pomocí navíjecího bubnu (angl. Climbing drum). Tato metoda je použitelná zejména pro relativně tenké vnější vrstvy. Krouticí moment odlupování se vypočítává jak ze síly potřebné k oddělení jádra a vnější vrstvy, tak z ohybu vnější vrstvy.

Další metody testování jsou vhodné i pro vnější vrstvy větších tloušťek. Jednou z nich je zkouška odlupem konzolou v tahu (z angl. Single Cantilever Beam - SCB), test využívající tlakového vzduchu k delaminaci vnější vrstvy od jádra. [21]

4.4.1 Zkouška odlupu pomocí navíjecího bubnu

Tento test musí odpovídat obecné podobě, jak je ukázáno na Obr. 45. Doporučené rozměry vzorku je šířka 76 mm a délka nejméně 305 mm, včetně 25 mm přesahu vnější plochy na každém konci. Tloušťka jádra není důležitá, s tou výjimkou, že testovaný vzorek se nesmí ohýbat, zatímco se vnější vrstva odlupuje. [21]



Obr. 45: Climbing drum test [21]

Průběh testu je takový, že vnější plocha je na spodním konci bezpečně upnuta k bubnu, horní konec je upnut v kleštině. Aplikuje se zatížení tahem při konstantní rychlosti a ze zkušební sestavy se stanoví odolnost proti odlupování po délce alespoň 150 mm.

Výpočet průměrného odlupovacího momentu dle vzorce:

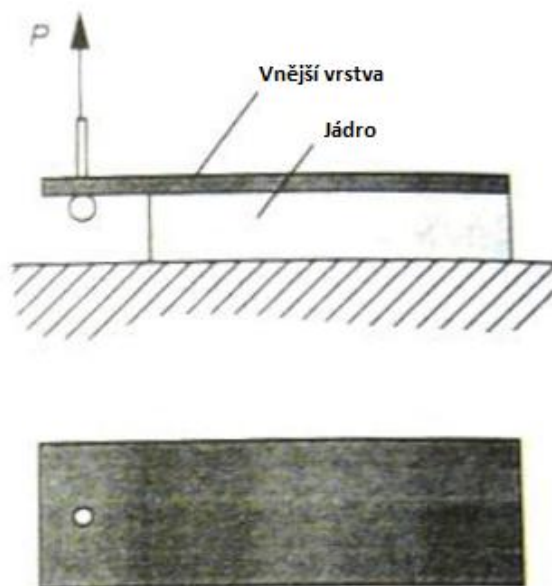
$$T = \frac{(r_0 - r_i) \cdot (F_p - F_0)}{W} \quad (8)$$

kde r_0 je rádius obruby pásků (vč. jedné poloviny tloušťky zatížených pásků), r_i je poloměr bubnu (vč. jedné poloviny vnější odloupené vrstvy), $F_p - F_0$ je průměrné zatížení potřebné k

odloupnutí a ohnutí vnější vrstvy, F_0 je zatížení vyžadující překonání kroutící moment, W je šířka vzorku. [21]

4.4.2 SCB-Type peel test

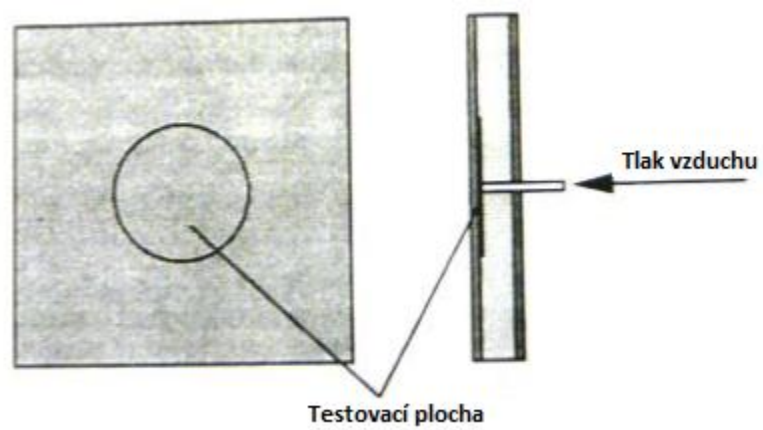
Jádro testovacího vzorku je vyfrézováno a upnuto směrem dolů. Tzn. vnější vrstva vytváří převis, na kterém působí zatížení. Také u této metody nerozhoduje tloušťka jádra, i když testovací vzorek je vázán k tuhé ocelové desce, aby se zabránilo ohybu sendvičového vzorku, zatímco dochází k odlupu vnější vrstvy. [21]



Obr. 46: SCB peel test [21]

4.4.3 Peel test – pomocí tlaku vzduchu

Test je prováděn na vzorku s kruhovou počáteční delaminací ve středu. Na jádru je vytvořena tenká teflonová vrstva, která vytvoří počáteční delaminaci. K tenké vrstvě je přivedena trubička, pomocí níž je dovnitř sendviče přiváděn tlakový vzduch. Tlak je řízen redukčním ventilem. V okamžiku, kdy se začne vnější plocha odlupovat od jádra, hodnota tlaku je zaznamenána. [21]



Obr. 47: Peel test – pomocí tlaku vzduchu [21]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

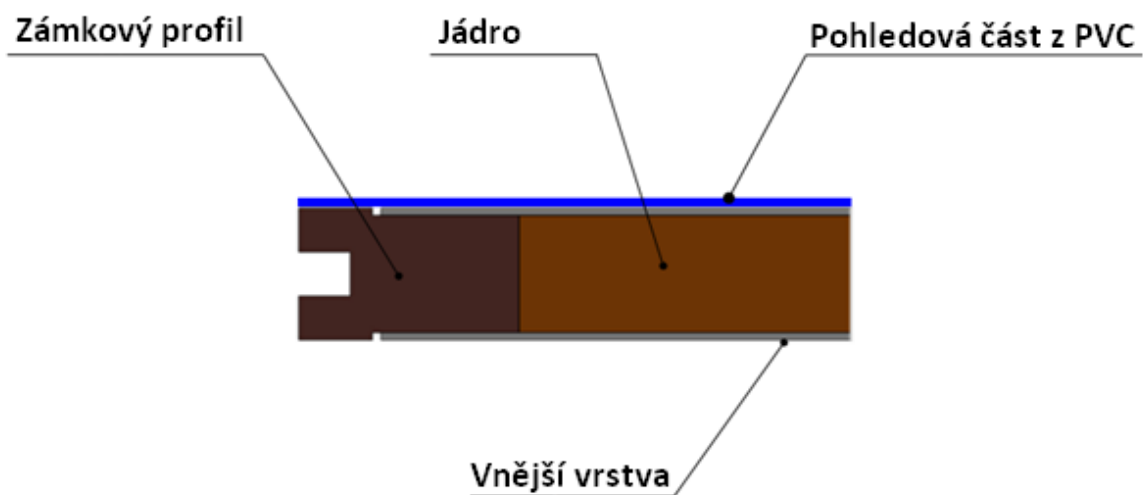
Cílem praktické části je konstrukční návrh sendvičových panelů, které budou složité jako podlaha do dopravních prostředků. Aby bylo možné začít se samotnou konstrukcí podlahových panelů, je potřeba navrhnout materiálové složení panelů (tzn. všech jeho částí) a optimální tvar zámkového systému. Další částí bude samotná výroba sendvičových panelů a testování konkrétního tvarového zámku. Praktická část diplomové práce byla tvořena ve spolupráci s firmou Form s.r.o.

- Návrh vhodného materiálového složení struktur podlahy v dopravním průmyslu
- Návrh tvaru a řešení spojování dílců podlah
- Návrh formy pro výrobu podlahových panelů
- Výroba sendvičových podlahových panelů
- Testování konkrétního tvarového zámku sendvičových panelů
- Testování podlahové sendvičové struktury na ohyb

6 NÁVRH VHODNÉHO MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ STRUKTUR PODLAHY V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU

6.1 Skladba podlahového panelu

Jednotlivé části tvořící podlahový panel jsou zobrazeny na Obr. 48. Základem budou jako u každé jiné sendvičové struktury vnější vrstvy a jádro. Vnější vrstvy bude tvořit vrstva prepregu a jako jádro bude použita hliníková voština. Tato struktura bude doplněna o zámkový profil, který bude vyroben z kartitu a pohledovou odolnou vrstvu z PVC. Zmíněná PVC vrstva vyniká zejména velkou odolností proti otěru a opotřebení při běžném každodenním užívání. Jako vnější vrstvy lze také použít např. ocelový či hliníkový plech. Namísto hliníkové voštiny by bylo možné jako jádro použít korek, jiné typy voštiny nebo různé pěny. Hlavní výhodou použití korkového materiálu by bylo tlumení vibrací a hluku od podvozku kolejového vozidla. Do dalšího vývoje zámkových profilů se uvažuje o použití jiných materiálů, jako např. hliníkového profilu, pultruzního profilu a profilů vyrobených z jiných laminátů či HPL desek. Zámkový profil slouží k jednoduché rozebíratelnosti a spojení podlahových panelů. Musí splňovat dostatečnou pevnost, tuhost a odolávat namáhání ve spoji, aby nedošlo k deformaci zámku nebo delaminaci sendvičového panelu.



Obr. 48: Skladba sendvičového podlahového panelu

6.2 Vnější vrstvy

Jako materiál pro vnější vrstvy byla zvolena dvojitá vrstva prepregů od firmy Gurit. Prepreg, který byl položen na voštinu (Obr. 49) byl jemnější struktury ve formě rohože a zajišťoval dobré přilepení k voštině. Vnější prepreg (Obr. 50) byl hrubší struktury ve formě tkaniny a po vytvrzení zajišťoval tvrdost sendvičového panelu.

Prepreg PHG840N-F300-47 (jemnější z použitých prepregů) byl vyvinut pro použití v průmyslu a železniční aplikace s vysokými specifickými mechanickými vlastnostmi. Pryskařice PHG840N má vytvrzovací teploty v rozmezí od 120 ° C do 160 ° C. Vytvrzování může být pomocí lisování, vakua a autoklávu s tlakem nejméně 0,07 N/mm². Výsledné kompozitní struktury mohou být vystaveny teplotám v rozmezí od -55 ° C do +80 ° C. [45]



Obr. 49: Prepreg jemný (PHG840N-F300-47)

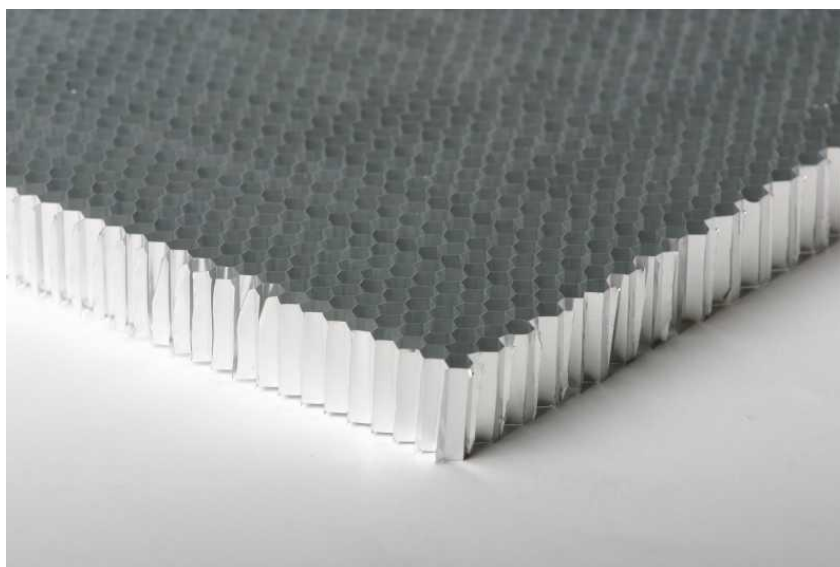


Obr. 50: Prepreg hrubý (PHG840N-G213-40)

6.3 Jádno

Jako jádro sendvičových struktur pro podlahové dílce byla použita hliníková voština s hexagonálním tvarem buněk (Obr. 51). Použitá tloušťka voštiny byla tloušťky 16 mm.

Tloušťka hliníkové folie tvořící stěny voštiny je 0,08 mm, velikost buňky 6,4 mm, hustota tohoto materiálu je 82 kg/m^3 . Pevnost v tahu garantovaná výrobcem je 4,5 MPa a provozní teplota $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ až $+177 \text{ }^\circ\text{C}$. [43]



Obr. 51: Voštinové jádro (ECM 6.4-82 tl. 16 mm)

6.4 Zámkový profil

Na výrobu zámkového profilu byl jako výchozí materiál zvolen kartit. Kartitové desky (Obr. 52) jsou vyrobeny z celulóзовého vrstveného papíru jako výztuže a modifikované fenolické pryskyřice jako pojiva. Mají vysokou elektrickou a mechanickou pevnost. Desky se mohou opracovávat řezáním, soustružením, frézováním a vrtáním. Dají se také slepovat klasickým dvousložkovým epoxidovým lepidlem, lepené spoje však nesmí být neúměrně namáhány.

Pevnost tohoto materiálu v ohybu při porušení kolmo na vrstvy (při $20 \text{ }^\circ\text{C}$) je 135 MPa, modul pružnosti v ohybu $7 \times 10^3 \text{ MPa}$, pevnost v tahu 120 MPa, pevnost v tlaku kolmo na vrstvy 300 MPa, pevnost ve smyku rovnoběžně s vrstvami 10 MPa, hustota je 1400 kg/m^3

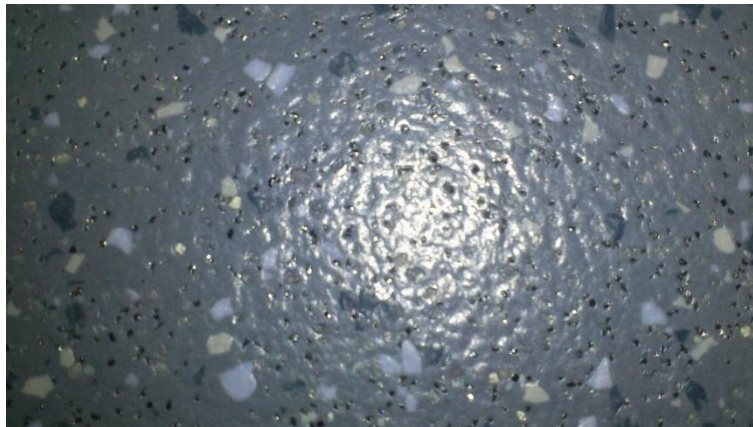
a tepelná odolnost až 130 °C. Veškeré výše uvedené parametry jsou garantovány výrobcem. [44]



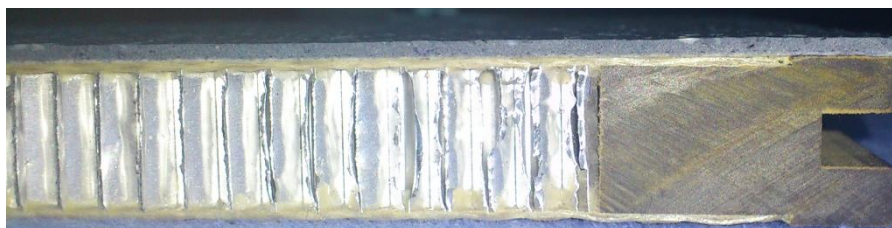
Obr. 52: Kartitové desky – vrstvený papír

6.5 Pohledová vrstva

Pohledovou vrstvu tvoří desky z měkkčeného PVC (Obr. 53), kdy tyto desky mají dobrou odolnost proti otěru a provoznímu opotřebení.



Obr. 53: Pohledová vrstva z PVC



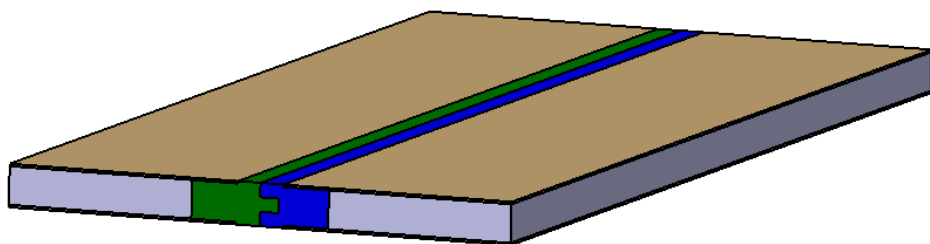
Obr. 54: Ukázka vyrobeného panelu - průřez

7 NÁVRH TVARU A ŘEŠENÍ SPOJOVÁNÍ DÍLCŮ PODLAH

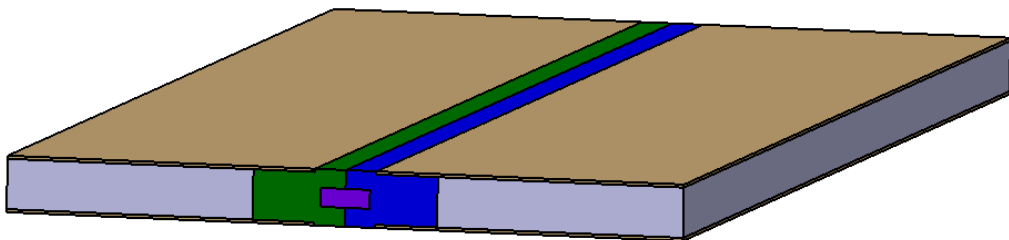
Před samotným konstrukčním návrhem podlahy dopravního prostředku bylo potřeba navrhnout několik variant zámkového systému. Všechny varianty bylo také třeba vyrobit a podrobit rozsáhlejšímu testování. Výrobní výkresy zámkových profilů jsou uvedeny v příloze této práce (PŘÍLOHA PIV)

Pro návrh tvarového řešení zámkového systému bylo použito 3D softwaru Catia V5R19.

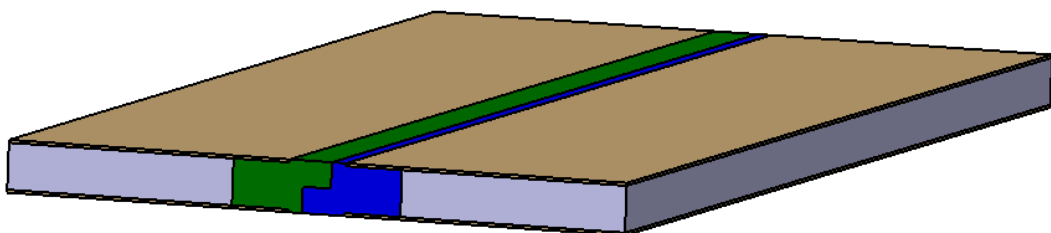
7.1 Návrh zámkových systémů



Obr. 55: Tvar zámku pero – drážka



Obr. 56: Tvar zámku drážka – pero – drážka

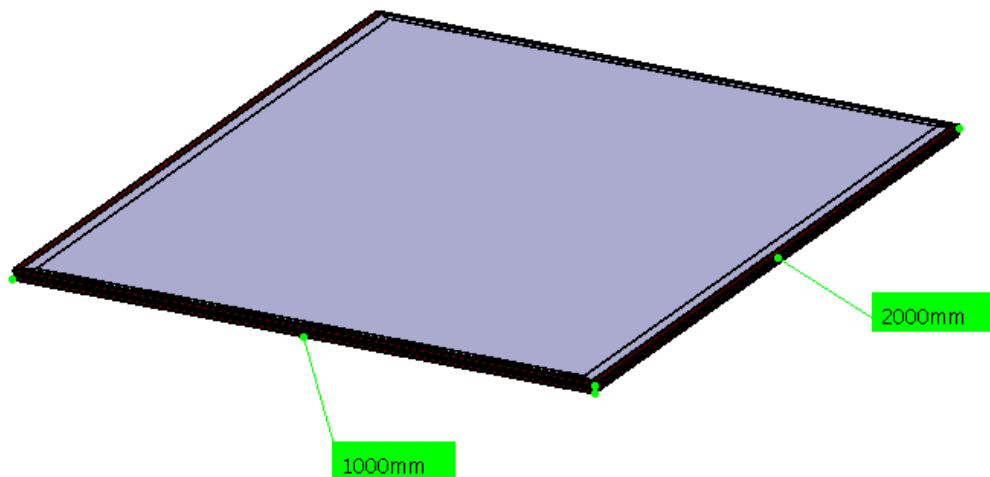


Obr. 57: Tvar zámku L pero – L pero

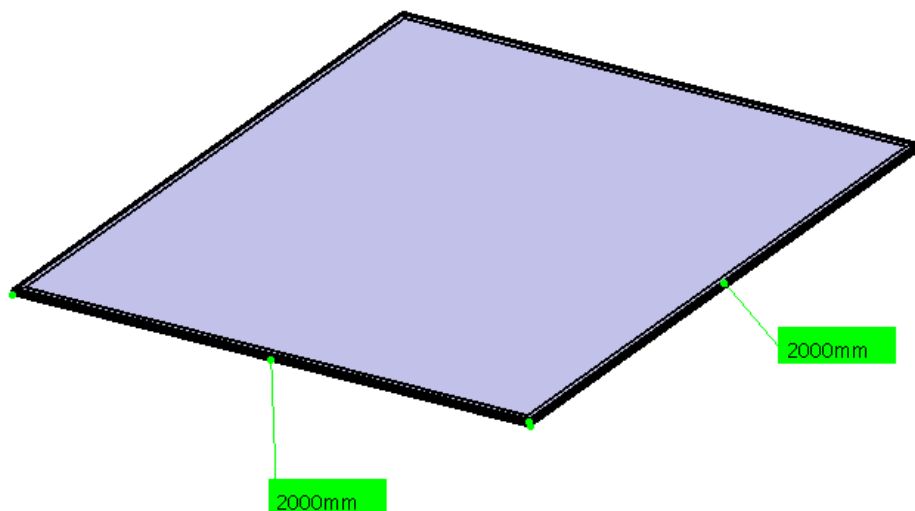
8 NÁVRH FORMY PRO VÝROBU PODLAHOVÝCH PANELŮ

Požadavkem firmy Form s.r.o. bylo navrhnout formu pro výrobu podlahových panelů. Forma splňuje univerzálnost pro tři typy podlahových panelů, které jsou blíže specifikovány na Obr. 58 až 60.

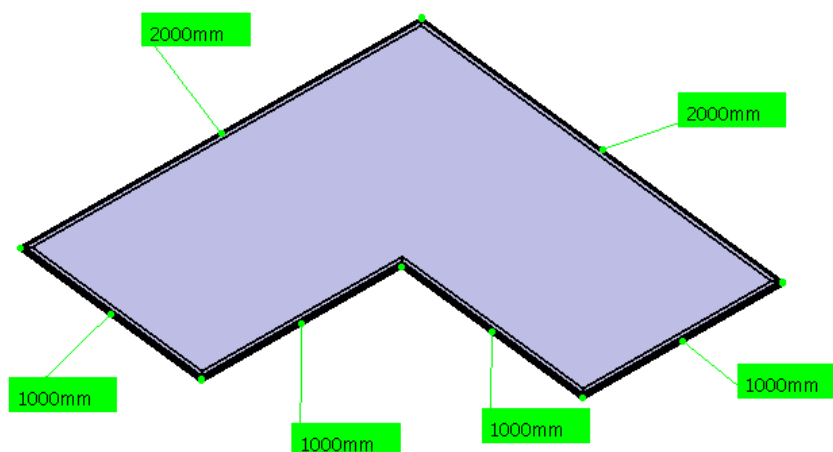
8.1 Vizualizace vyráběných panelů



Obr. 58: Podlahový panel o rozměrech 1000 x 2000 mm



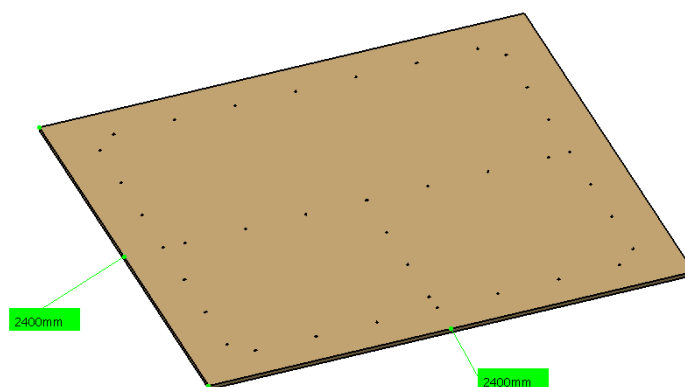
Obr. 59: Podlahový panel o rozměrech 2000 x 2000 mm



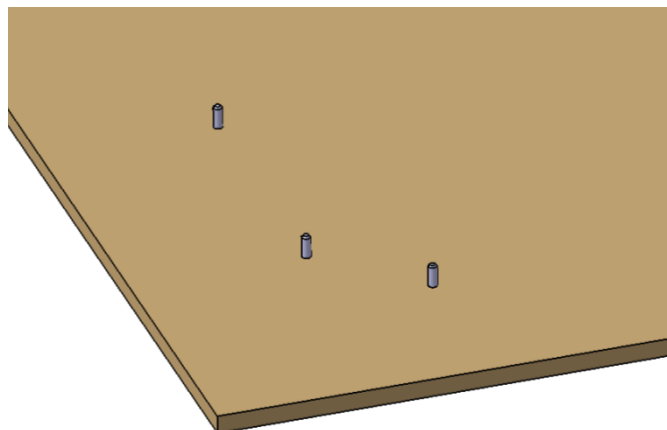
Obr. 60: Podlahový panel o rozměrech dle rozměrů specifikace

8.2 Konstrukční řešení formy

Základová deska formy (Obr. 61) bude stejně jako zámkový profil vyrobena z kartitu. Výhodou kartitu je, že je to materiál relativně lehký, v porovnání např. s ocelovou deskou a odolává teplotám až 130 °C. Další výhodou je dobrá obrobiteľnosť a ekonomičnosť. Rozměry desky jsou 2400 x 2400 x 20 mm. Dle přiložené výkresové dokumentace (PŘÍLOHA PVIII) budou v desce vyvrtány otvory pro kolíky, které budou zajišťovat fixaci komponentů podlahového panelu. Podle rozmístění kolíků v základní desce lze ovlivnit výsledný tvar podlahového panelu. Pro konkrétní případ jsou zvoleny kolíky o průměru $D=10$ mm a délce $L=40$ mm, kdy 15 mm délky bude zapašeno v základové desce formy (Obr. 62).

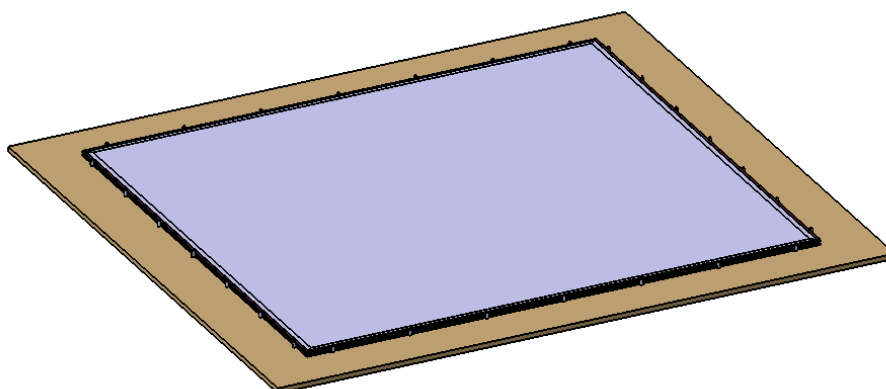


Obr. 61: Základová deska formy

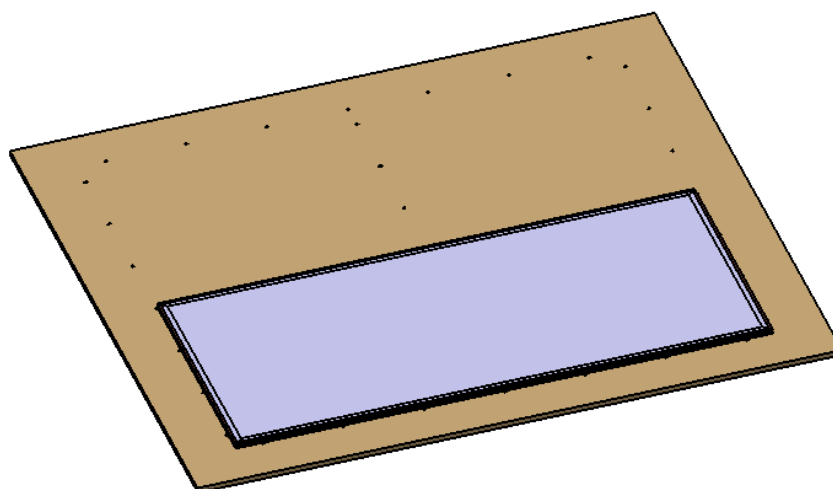


Obr. 62: Detail vložených kolíků

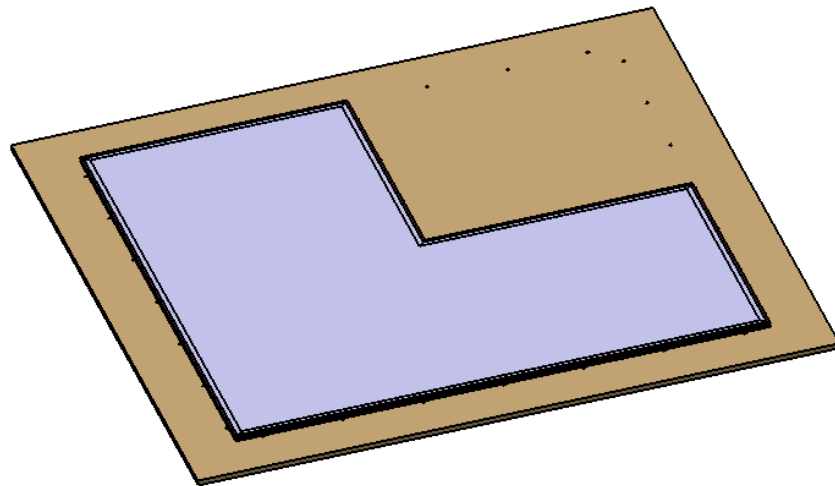
Následující série obrázků (Obr. 63 – 65) slouží k vizualizaci umístění panelů ve formě.



Obr. 63: Vizualizace panelu 2000 x 2000 mm ve formě



Obr. 64: Vizualizace panelu 2000 x 1000 mm ve formě

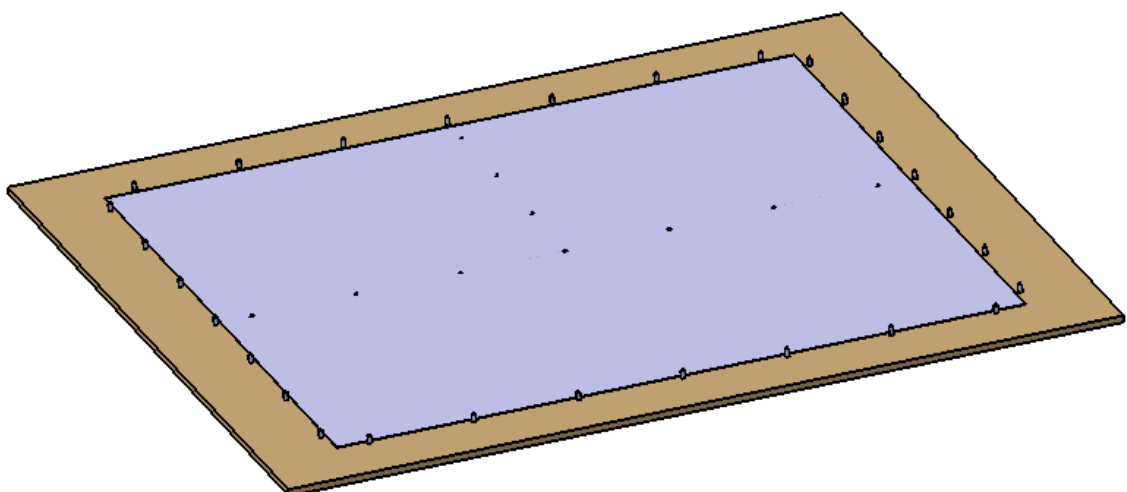


Obr. 65: Vizualizace specifického panelu ve formě

8.3 Technologický postup výroby podlahového panelu

8.3.1 Polohování prepregu

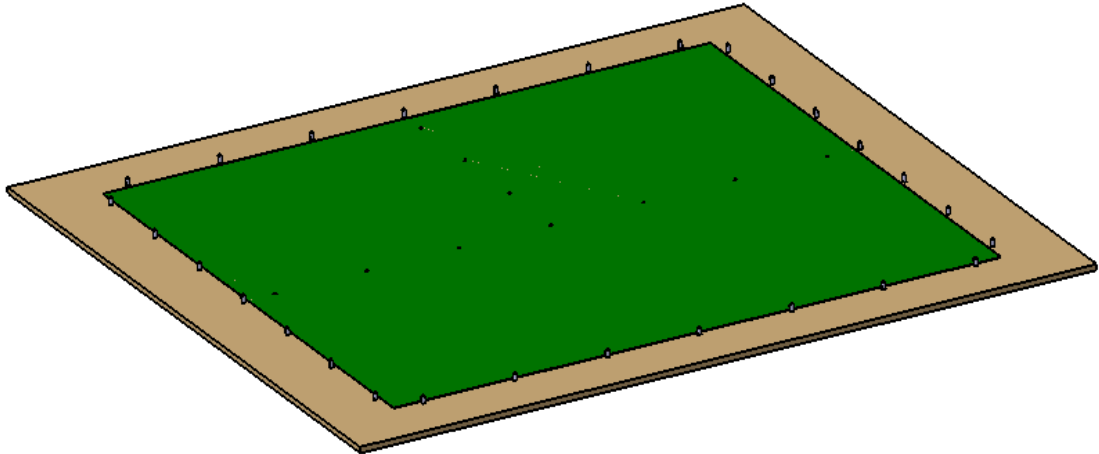
Na základovou desku bude položena vrstva prepregu (Obr. 66). Přesné umístění je vymezeno pomocí kolíků, eventuálně lze v sériové výrobě využít laserového polohovacího zařízení. Laserové polohovací zařízení vysvítí okrajovou konturu, která vymezuje plochu pro vložení prepregu.



Obr. 66: Umístění prepregu na základovou desku

8.3.2 Nanesení adhezivní vrstvy

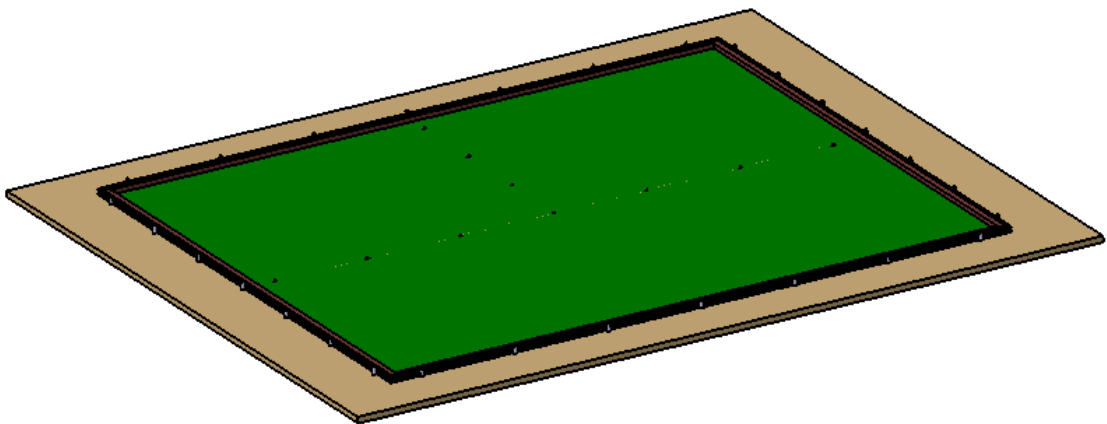
V případě, že nebude jako vnější vrstva použit prepreg, ale například ocelový nebo hliníkový plech, bude na něj nanášena adhezivní vrstva (Obr. 67). V prototypové výrobě bude lepidlo nanášeno pomocí válečku ručně, je taktéž možné použít filmového lepidla. Do sériové výroby lze nanášení lepidla automatizovat.



Obr. 67: Nanesení adhezivní vrstvy

8.3.3 Polohování rámu se zámkovým profilem

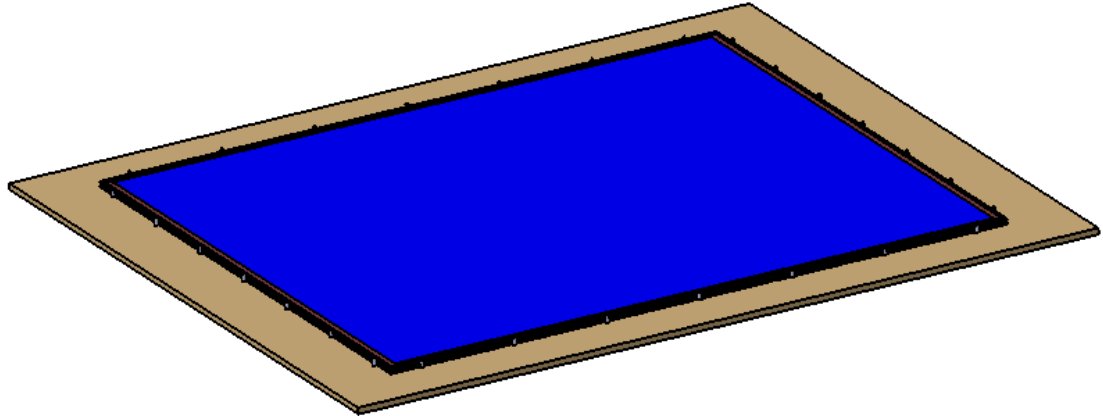
Rám bude složen z nařezaných tvarových profilů (Obr. 68). Profily budou za pomoci lepidla spojeny. Splený rám bude vložen do vykolíkové oblasti. Kolíky budou zajišťovat stabilitu rámu během výroby podlahového panelu.



Obr. 68: Polohování rámu

8.3.4 Vložení jádra

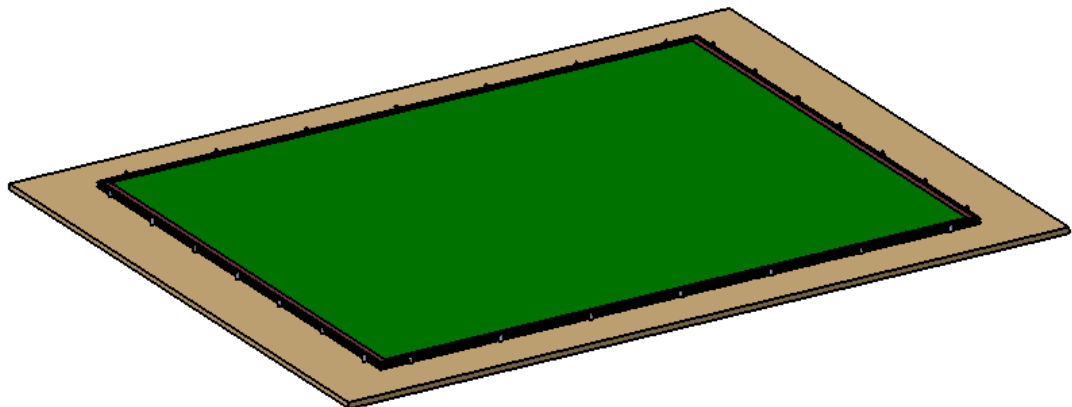
Do rámu na prepreg se vloží příslušné jádro (Obr. 69).



Obr. 69: Vložení jádra

8.3.5 Nanesení další adhezivní vrstvy

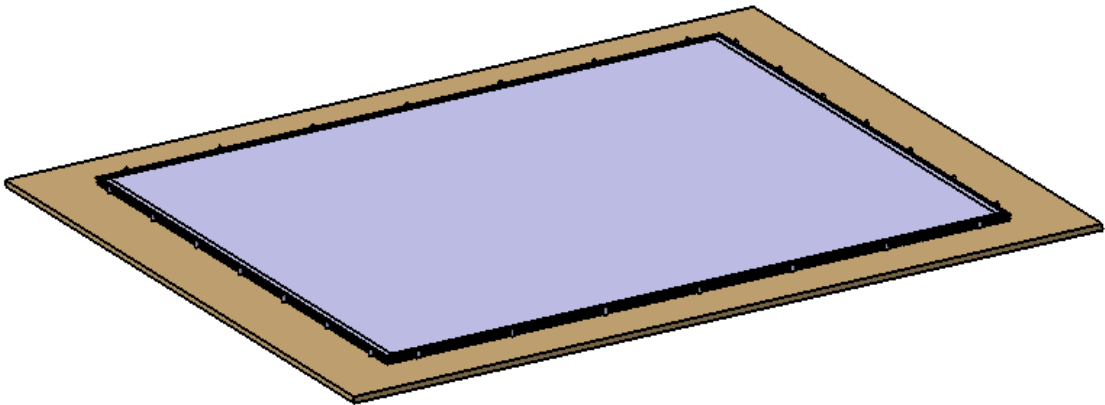
Bude-li i druhá vnější vrstva např. ocelový plech, bude na jádro nanесena další adhezivní vrstva (Obr. 70).



Obr. 70: Nanesení další adhezivní vrstvy

8.3.6 Polohování horní vrstvy prepregu

Poslední operací dojde k polohování horní vrstvy prepregu, která tvoří poslední část sendvičového podlahového panelu (Obr. 71).



Obr. 71: Vložení horní vrstvy prepregu

8.3.7 Finální technologické operace

Vytvořenou sendvičovou strukturu je potřeba vytvrdit, aby došlo k úplnému spojení jednotlivých složek. Vytvrzení lze provést pomocí několika způsobů:

- *Vytvrzení v autoklávu*

Celá forma se zabalí do vakuové folie, kdy následně dochází k odsávání vzduchu a vytvoření podtlaku. Podtlak a teplota formy v autoklávu zajistí vytvrzení sendvičového podlahového panelu.

- *Vytvrzování v peci*

Probíhá stejně jako vakuové vytvrzení, tzn., že se forma opět zabalí do vakuové folie a vloží se do vyhřívané pece.

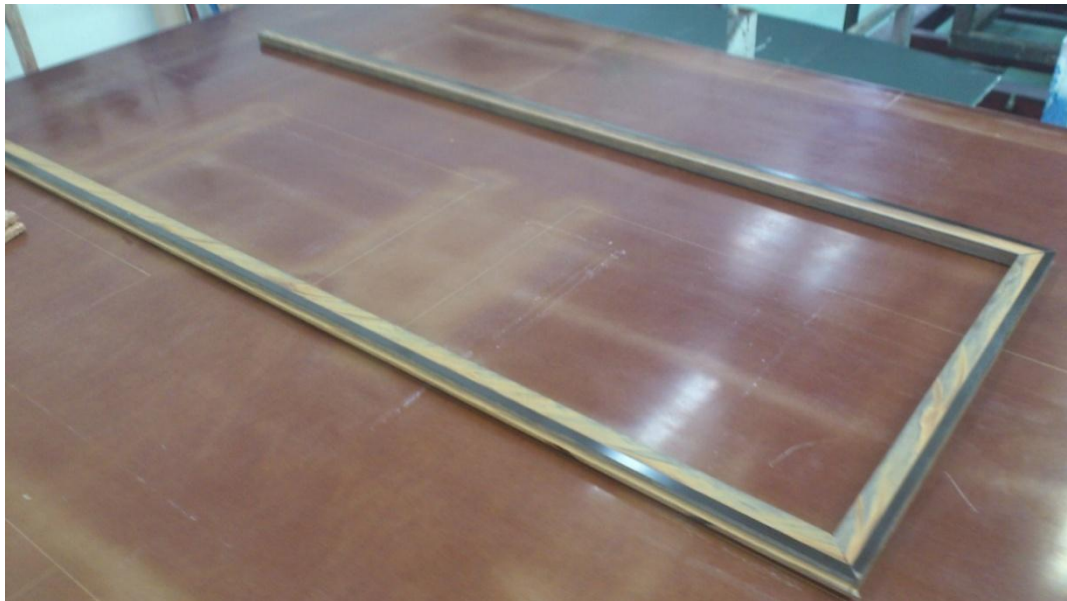
- *Lisování v etážovém lise*

K lisování dochází v etážovém lise pomocí lisovací desky. Deska je ocelová a je vyhřívaná. Etážový lis zajišťuje postupné zalisování všech komponentů. Jako první dochází k lisování spodní vrstvy prepregu, postupně je k prepregu přilísováno jádro a horní vrstva prepregu.

9 VÝROBA SENDVIČOVÝCH PODLAHOVÝCH PANELŮ

9.1 Výroba prototypového vzorku sendvičového podlahového panelu

Ve firmě Form s.r.o. byl vyroben první prototypový vzorek podlahové panelu. Výroba probíhala dle navrženého technologického postupu. Následující fotografie dokládají samotný proces (Obr. 72-78).



Obr. 72: Slepění kartitových profilů



Obr. 73: Řezání hrubého prepregu



Obr. 74: Řezání jemného prepregu



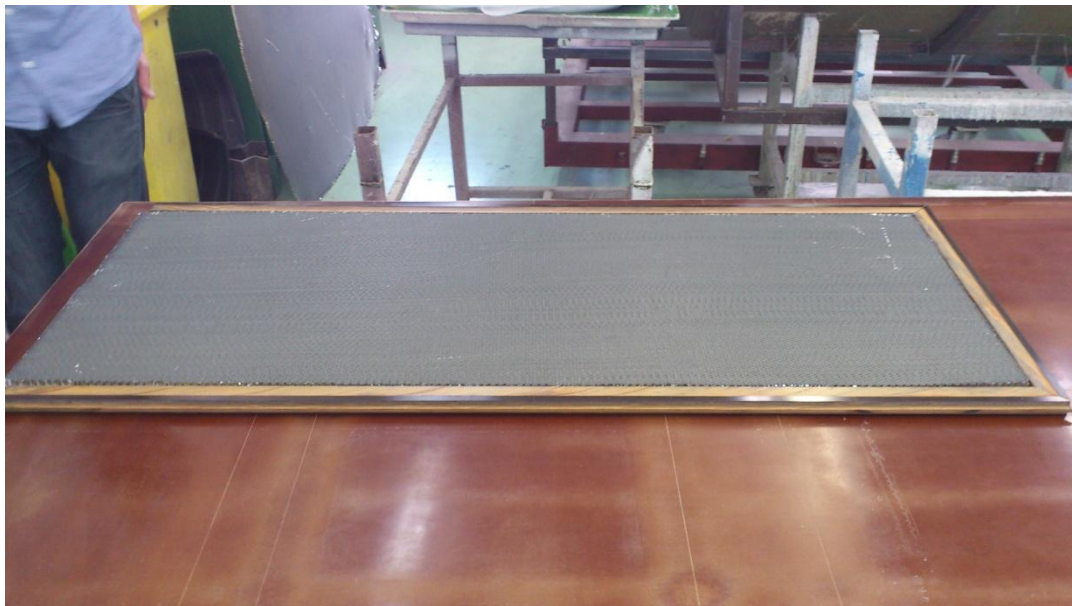
Obr. 75: Polohování hrubé vrstvy prepregu a optická zkouška rozměrů v porovnání s profilovým rámem



Obr. 76: Polohování jemné vrstvy prepregu a ustavení profilového rámu



Obr. 77: Řezání voštiny na požadovaný rozměr



Obr. 78: Vložení voštinového jádra do profilového rámu

Takto připravený sendvičový podlahový panel byl zakryt vakuovací folií, která byla dokonale přilepena k formovacímu stolu pomocí oboustranné lepicí pásky. Poté byly připevněny dva odsávací ventily. Na jeden z nich byl připojen tlakoměr (manometr). Druhý ventil byl pomocí hadice připojen k podtlakovému čerpadlu. Tím se vytvořil podtlak o požadované hodnotě 0,08 MPa. Za stálého podtlaku byly vzorky umístěny do vytvrzovací pece, kde došlo k jejich vytvrzení. K vytvrzování docházelo za stálé teploty 120 °C po dobu 90 minut.

9.2 Výroba vzorků pro testování

Součástí diplomové práce je i testování vzorků sendvičového podlahového panelu. Pro testování bylo vyrobeno pět vzorků o stejné materiálové skladbě, lišily se pouze tvarem použitého zámkového profilu. Dva vzorky byly vyrobeny s drážkovým profilem, jeden vzorek měl profil ve tvaru pera a dva vzorky měly tvar L pera. Tyto vzorky byly dále nařezány na požadované rozměry pro testování na pevnost spoje v ohybu. Na základě výsledků testování by se měl vybrat nejvhodnější typ zámkového profilu, který bude využíván pro sériovou výrobu. Postup výroby vzorků byl totožný jako výroba prototypového vzorku podlahového panelu (Obr. 79 - 84).



Obr. 79: Položení vnější hrubé vrstvy prepregu



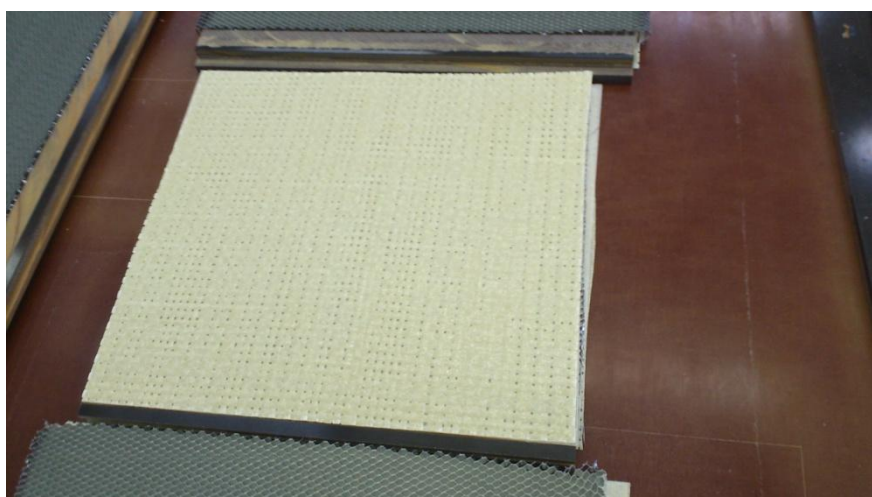
Obr. 80: Položení jemné vrstvy prepregu



Obr. 81: Polohování voštinového jádra a tvarového profilu



Obr. 82: Položení další vrstvy jemného prepregu



Obr. 83: Položení vnější vrstvy hrubého prepregu



Obr. 84: Formovací stůl se vzorky a podlahovým panelem

10 MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ VZORKŮ SENDVIČOVÝCH PANELŮ

Vyrobené vzorky byly mechanicky testovány a to konkrétně na následující testy: pevnost zámkového profilu v ohybu, tříbodový ohyb sendvičové struktury tvořící podlahový panel, čtyř-bodový ohyb struktury a zkouška rázové houževnatosti na Charpyho kladivu. Na základě vyhodnocených parametrů z ohybových testů bude vybrán optimální profil zámkového profilu, který bude používán v sériové výrobě. Testování vzorků na ohyb probíhalo v laboratoři UTB ve Zlíně na testovacím stroji Zwick 1456 (Obr. 85). Testování na průraz probíhalo na Charpyho kladivu RESIL IMPACTOR junior (Obr. 86).



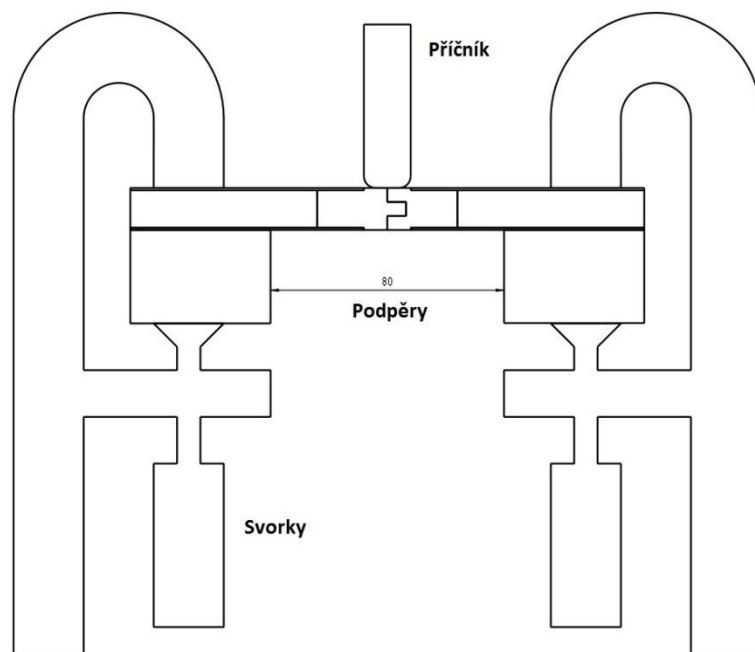
Obr. 85: Testovací stroj Zwick 1456



Obr. 86: Charpyho kladivo RESIL IMPACTOR junior

10.1 Testování zámkového profilu na pevnost v ohybu

Pro tento test byly vyrobeny vzorky o stejné materiálové skladbě s použitím rozličných tvarových profilů. Vzorky byly nařezány na rozměr 50 mm x 70 mm, kdy tloušťka vzorků byla jednotná rovna 17 mm. Testováno bylo pět vzorků od každého typu zámkového profilu. Vzorky byly upnuty na pevnou část stroje přes ocelové kostky, které byly od sebe vzdáleny 80 mm (Obr. 87 – 88). Příčnickem se působilo kolmo na spoj.



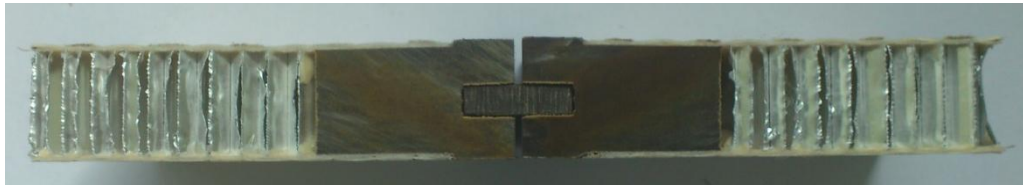
Obr. 87: Schéma upnutí vzorku



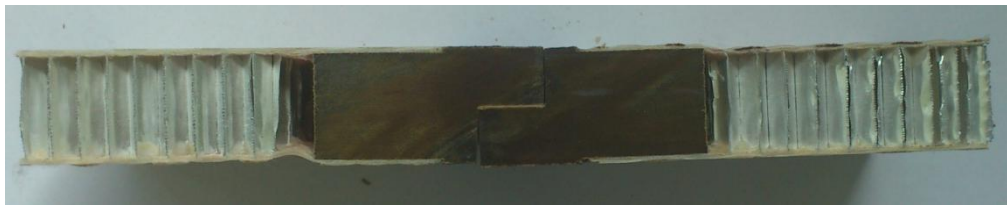
Obr. 88: Upnutí vzorku



Obr. 89: Vzorek s tvarovým zámkem o profilech pero – drážka



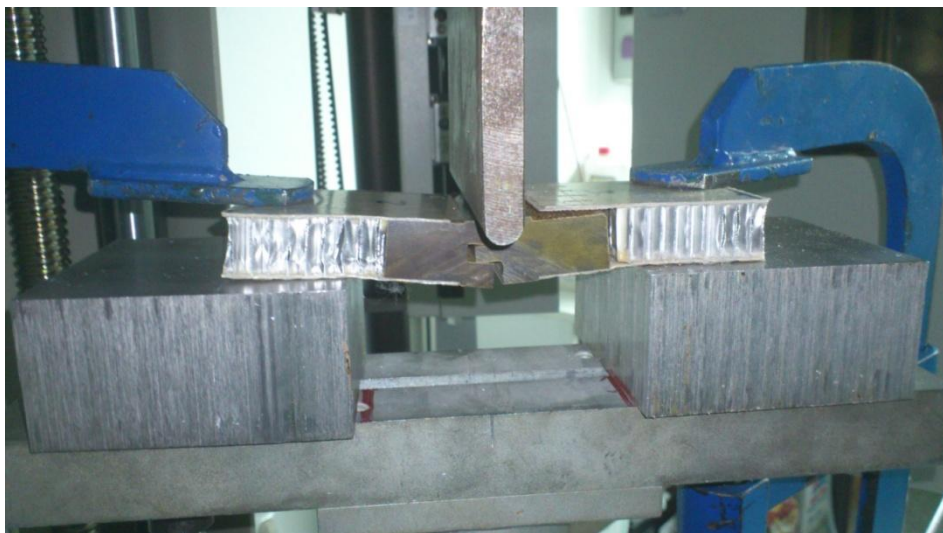
Obr. 90: Vzorek s tvarovým zámkem o profilech drážka – pero – drážka



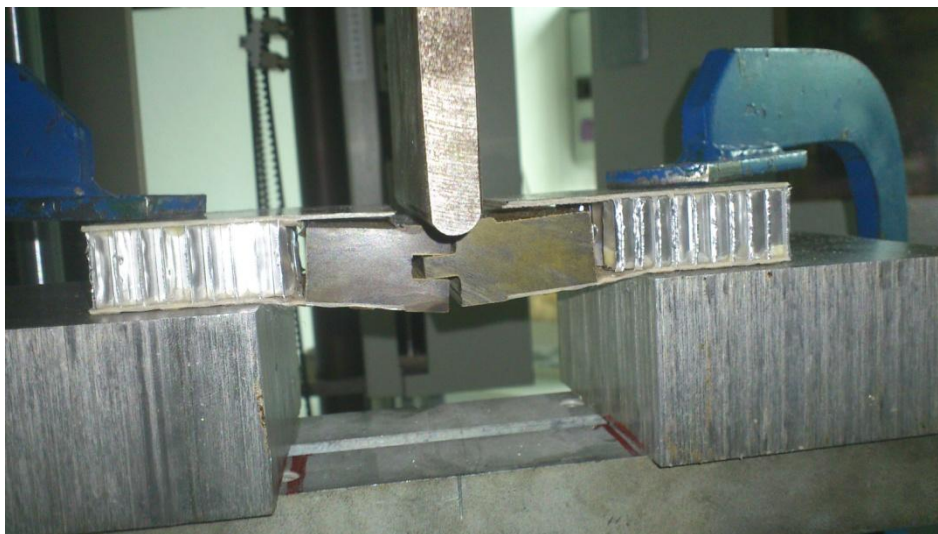
Obr. 91: Vzorek s tvarovým zámkem o profilech L pero – L pero

10.1.1 Testování vzorku o profilu pero – drážka

Ve všech případech testovaných vzorků tohoto typu došlo k separaci prepregové vrstvy, buď na jedné části vzorku (Obr. 92) nebo na obou stranách vzorků (Obr. 93). Naměřené hodnoty maximální síly, kterou daný profil vydržel bez porušení, jsou zobrazeny v Tab. 1.



Obr. 92: Separace prepregu na jedné části vzorku



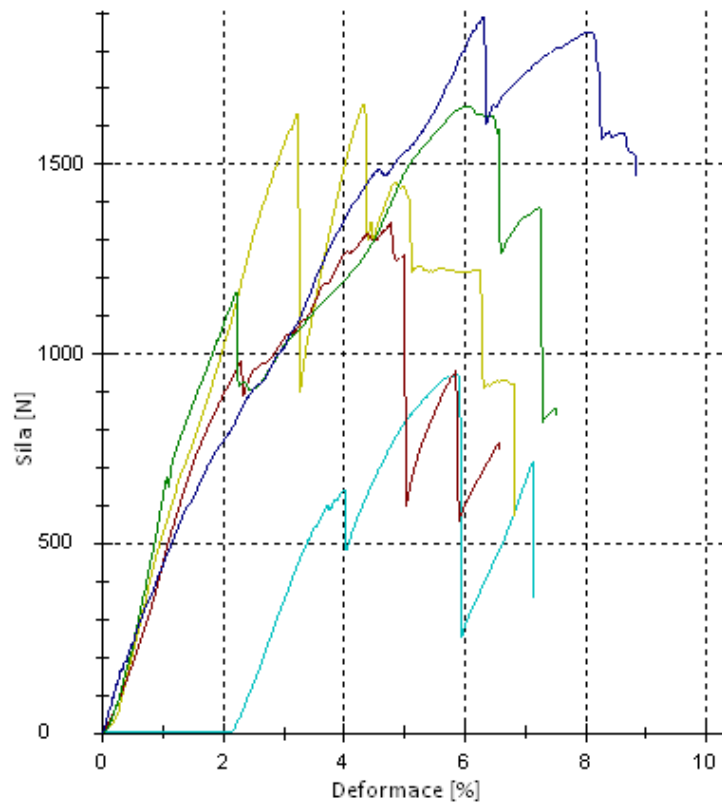
Obr. 93: Separace prepregu na obou částech vzorku



Obr. 94: Detail separovaného prepregu na části s perem

Tab. 1: Vyhodnocení pevnosti zámkového profilu v ohybu typ pero – drážka

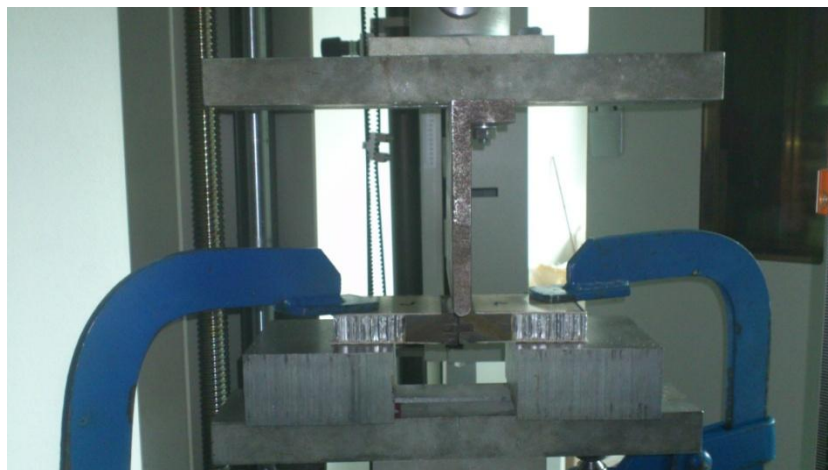
Č. vzorku	F max [N]
1	2550
2	1960
3	2350
4	2680
5	2360
\bar{x}	2380
s	244



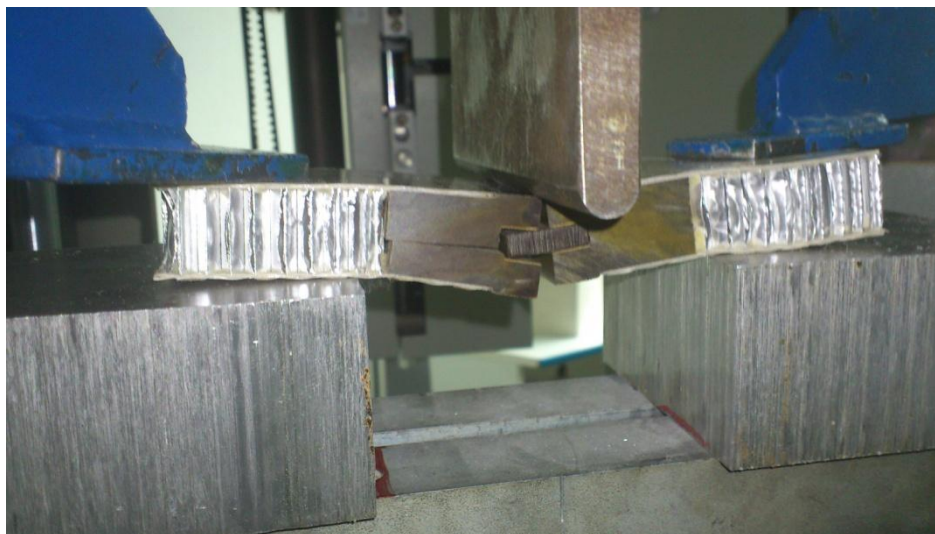
Obr. 95: Průběh závislosti síly na deformaci u profilu
pero – drážka

10.1.2 Testování vzorku o profilu drážka – pero – drážka

Ve většině testovaných vzorků došlo k prasknutí jednoho z drážkových profilů (Obr. 97). V některých případech došlo i k separaci prepregové vrstvy (Obr. 98). Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v následující tabulce (Tab. 2)



Obr. 96: Upnutí zkušební vzorku o profilu drážka – pero – drážka



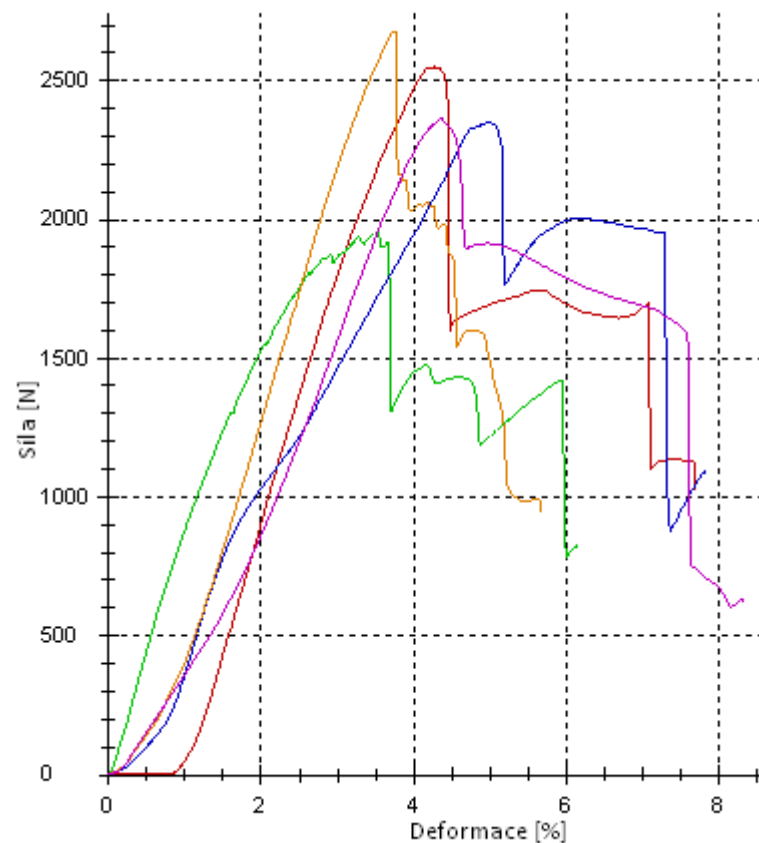
Obr. 97: Prasknutí jednoho z drážkových profilů



Obr. 98: Detail separovaného prepregu a prasknutého drážkového profilu

Tab. 2: Vyhodnocení pevnosti zámkového profilu v ohybu typ drážka – pero – drážka

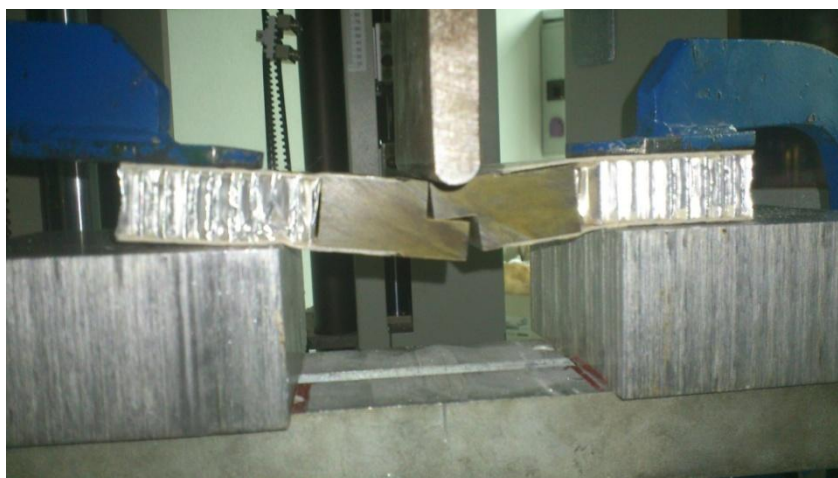
Č. vzorku	F max [N]
1	945
2	1660
3	1350
4	1650
5	1890
\bar{x}	1401
s	339



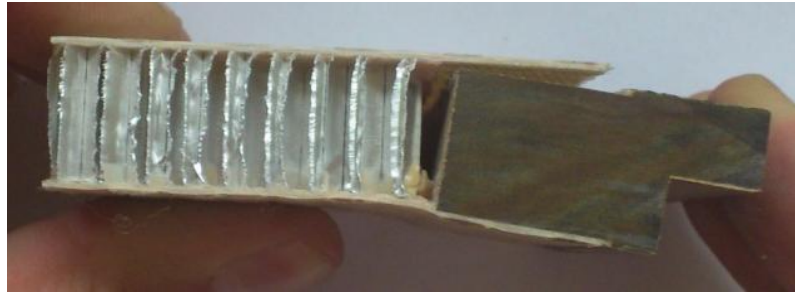
Obr. 99: Průběh závislosti síly na deformaci u profilu
drážka – pero – drážka

10.1.3 Testování vzorku o profilu L pero – L pero

Pro tento typ zámkového profilu došlo ve všech případech testovaných vzorků k separaci prepregové vrstvy (Obr. 101). Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 3.



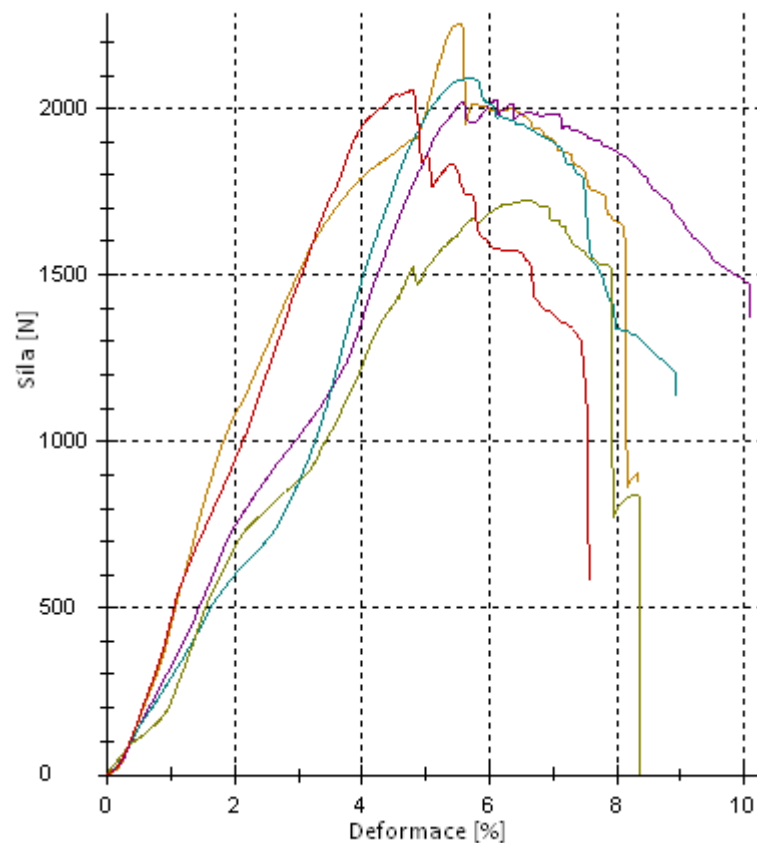
Obr. 100: Průběh zkoušky vzorků s profilem L pero – L pero



Obr. 101: Detail separovaného prepregu na jedné části vzorku s profilem L pera

Tab. 3: Vyhodnocení pevnosti zámkového profilu v ohybu typ L pero – L pero

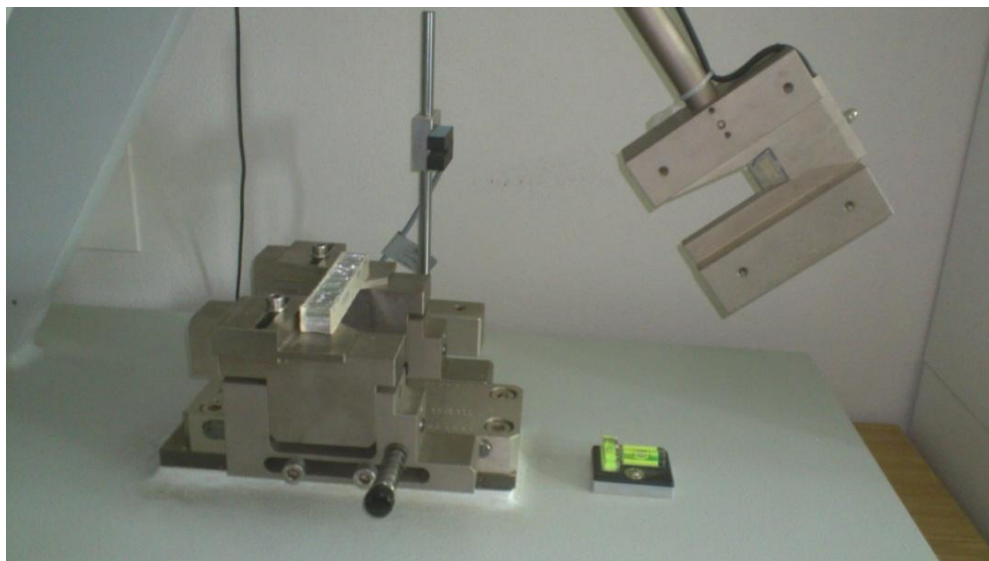
Č. vzorku	F max [N]
1	2260
2	2030
3	2090
4	1720
5	2060
\bar{x}	1975
s	175



Obr. 102: Průběh závislosti síly na deformaci u profilu
L pero – L pero

10.2 Testování vzorků na Charpyho kladivu

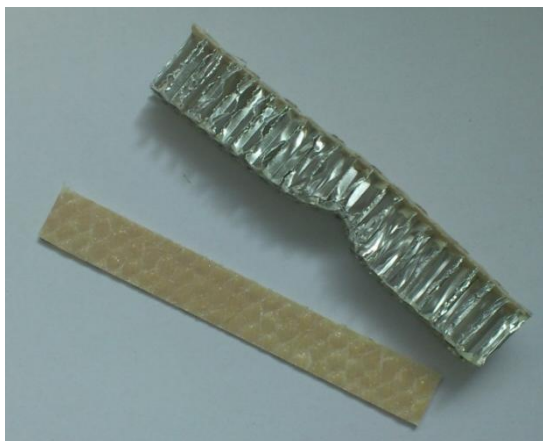
Vzorky na testování průrazem byly vyrobeny na rozměry: 15 mm šířka a 70 mm délka vzorku. Tloušťka vzorků byla opět 17 mm. Testováno bylo celkem 10 vzorků, které byly uloženy na ustavovací přípravek (Obr. 103) pohledovou částí proti kladivu. Všechny vzorky testované na průraz vykazovaly po rázu kladiva separaci bližší vnější vrstvy. V žádném případě nedošlo k přeražení vzorku, ale u většiny případů pouze k delaminaci pohledové části prepregu a deformaci voštiny (viz. Obr. 104). V jediném případě došlo k separaci nepohledové části prepregu. Hodnoty rázové houževnatosti a maximální síly vyvinuté během rázu jsou zobrazeny v tabulce Tab. 4. Vzorový grafický záznam průběhu testu je zobrazen v Obr. 105.



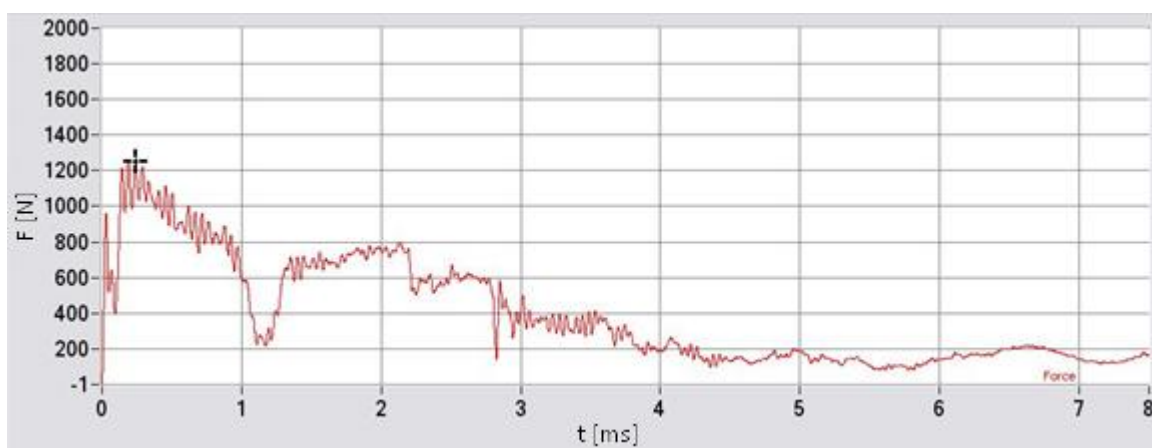
Obr. 103: Vzorek na ustavovacím stole Charpyho kladiva

Tab. 4: Vyhodnocení testu rázem

Vzorek č.:	Maximální síla [N]	Rázová houževnatost [KJ/m ²]
1	1239	9.86
2	1252	9.72
3	1601	9.64
4	1173	9.62
5	1229	8.76
6	1365	6.99
7	1373	9.75
8	1264	9.81
9	1195	8.76
10	1414	9.86
\bar{x}	1311	9.28
s	123	0.86



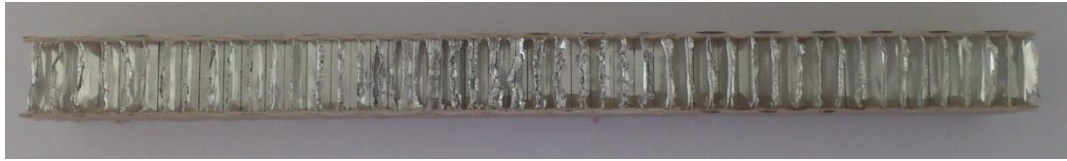
Obr. 104: Ukázka vzorku po nárazu Charpyho kladiva



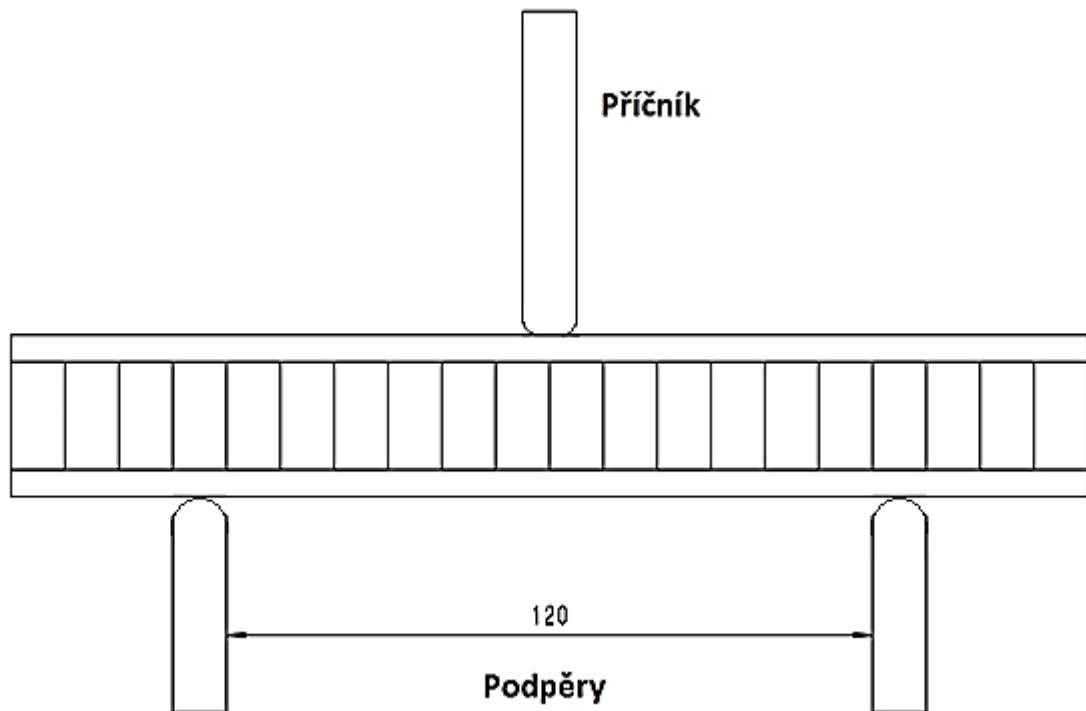
Obr. 105: Průběh rázového testu pro vzorek č. 2

10.3 Testování vzorků tříbodovým ohybem

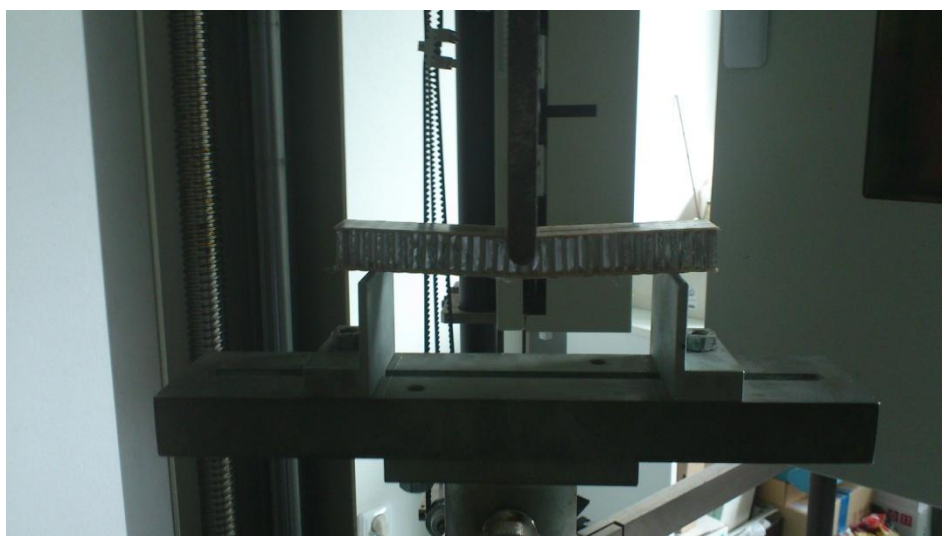
Vzorky pro testování tříbodovým ohybem byly vyrobeny v rozměrech 20 mm šířka a 150 mm délka (Obr. 106). Testováno bylo 30 vzorků, které byly při testování uloženy na podpěry, které od sebe byly vzdáleny 120 mm, příčnickem se působilo uprostřed vzorku (Obr. 107). Ve většině případů došlo k deformaci pohledové části prepregu a k lokálnímu stlačení voštinového jádra (Obr. 109). V některých případech došlo k deformaci voštinového jádra ve formě zvlnění a separaci obou prepregových vrstev (Obr. 110).



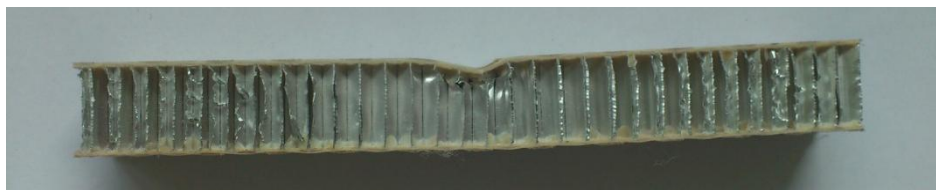
Obr. 106: Vzorek pro testování třibodovým ohybem



Obr. 107: Schéma umístění vzorku při zkoušce třibodovým ohybem



Obr. 108: Průběh testování třibodovým ohybem



Obr. 109: Ukázka vzorku – deformace pohledového prepregu a lokální stlačení voštinového jádra

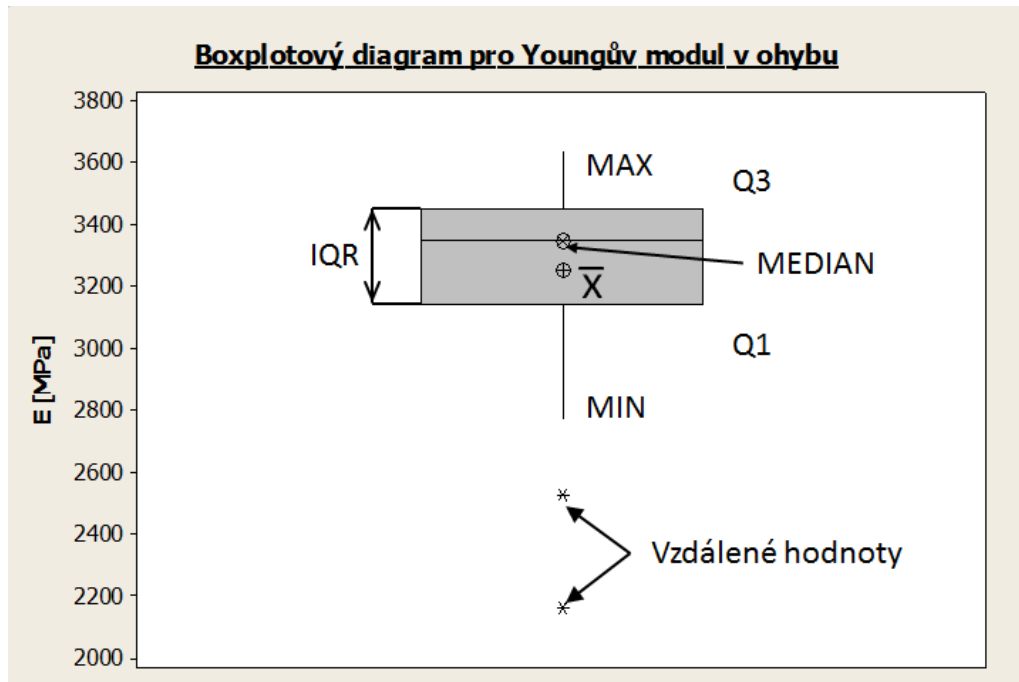


Obr. 110: Ukázka vzorku – separace obou vrstev prepregu a deformace ve formě zvlnění voštinového jádra

Počet 30 testovaných vzorků tvoří dostatečný výběrový soubor, a proto byl pro vyhodnocení naměřených dat použit statistický program Minitab 14. Výsledky vyhodnocení jsou zobrazeny v následujících tabulkách (Tab. 5 -6). MIN a MAX popisují minimální respektive maximální naměřenou hodnotu v daném výběrovém souboru. IQR popisuje interkvartilové rozpětí (to popisuje vzdálenost mezi 1. a 3. kvartilem), kdy Q1 zachycuje první kvartil, Medián nebo taktéž Q2 zachycuje druhý kvartil a Q3 pak třetí kvartil. Medián je pak oproti průměru méně náchylný na odlehlé hodnoty. Pro grafickou interpretaci kvality naměřených hodnot slouží boxplotový diagram (Obr. 111 - 112).

Tab. 5: Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu při testování vzorků tříbodovým ohybem

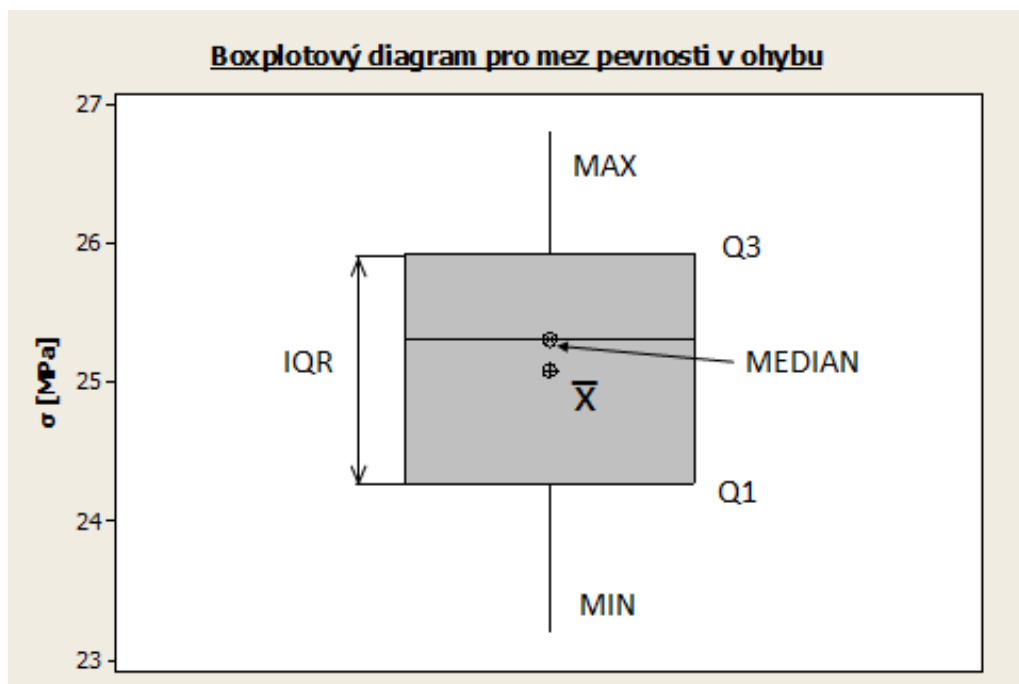
	Průměr	Směr.odchylka	MIN	Q1	Medián	Q3	MAX	IQR
E [MPa]	3252	324	2160	3143	3350	3453	3640	310



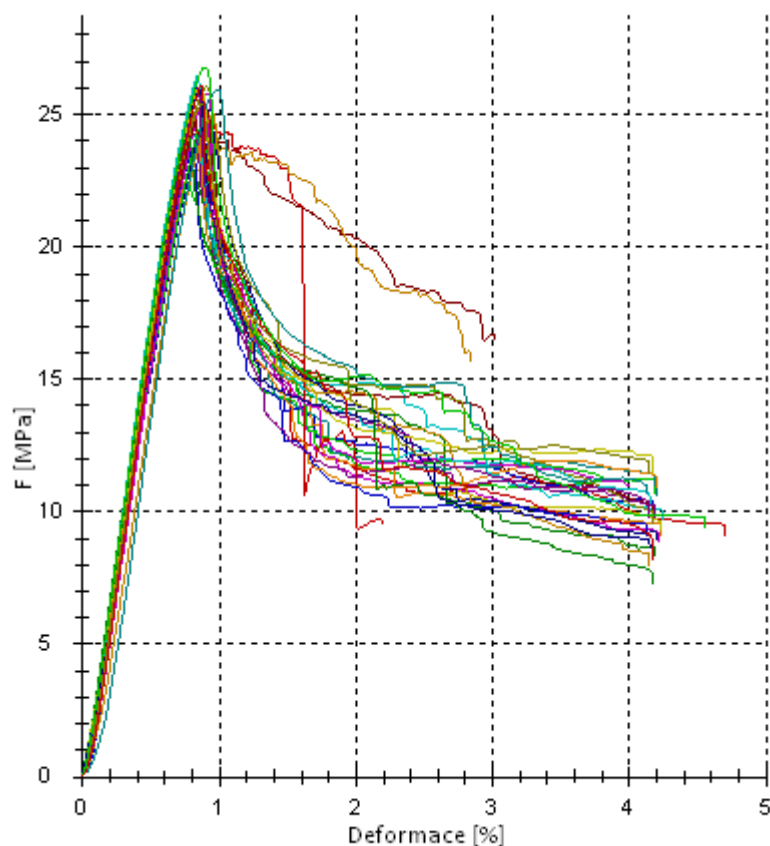
Obr. 111: Boxplotový diagram pro Youngův modul v ohybu

Tab. 6: Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu při testování vzorků tříbodovým ohybem

	Průměr	Směr.odchylka	MIN	Q1	Medián	Q3	MAX	IQR
σ [MPa]	25.1	1.0	23.2	24.3	25.3	26.0	26.8	1.7



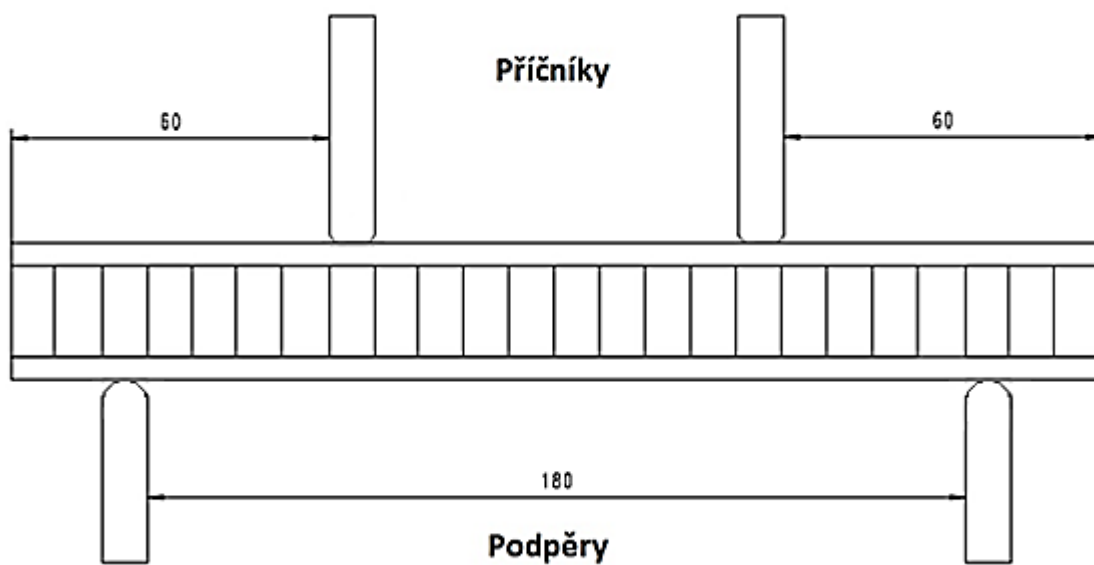
Obr. 112: Boxplotový diagram pro mez pevnosti v ohybu



Obr. 113: Průběh zkoušky třibodovým ohybem

10.4 Testování vzorků čtyřbodovým ohybem

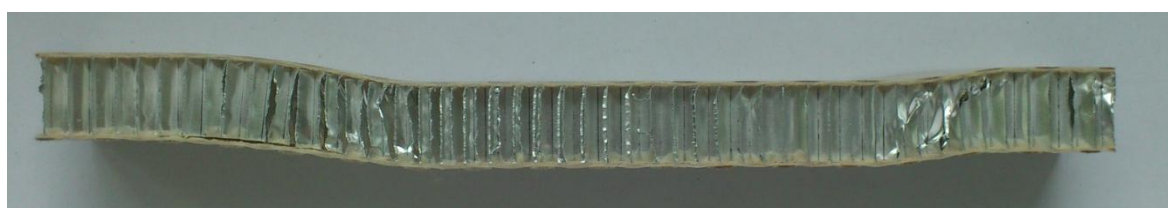
Vzorky pro testování čtyřbodovým ohybem byly vyrobeny v rozměrech 17 mm výška, 20 mm šířka a 220 mm délka. Testováno bylo 30 vzorků, které byly při testování uloženy na podpěry, které od sebe byly vzdáleny 180 mm, oba příčnící byly umístěny 60 mm od krajních podpěr (Obr. 114). Ve většině případů došlo k separaci obou částí prepregu a deformaci voštinového jádra ve formě jeho zvlnění v místě působení příčnících (Obr. 116). Naměřené hodnoty byly opět vyhodnoceny v programu Minitab 14. Uvedené parametry jsou shodné jako v popisu pro třibodový ohyb. Vyhodnocená data jsou zobrazena v tabulkách Tab. 7 – 8.



Obr. 114: Schéma umístění vzorku při zkoušce čtyřbodovým ohybem



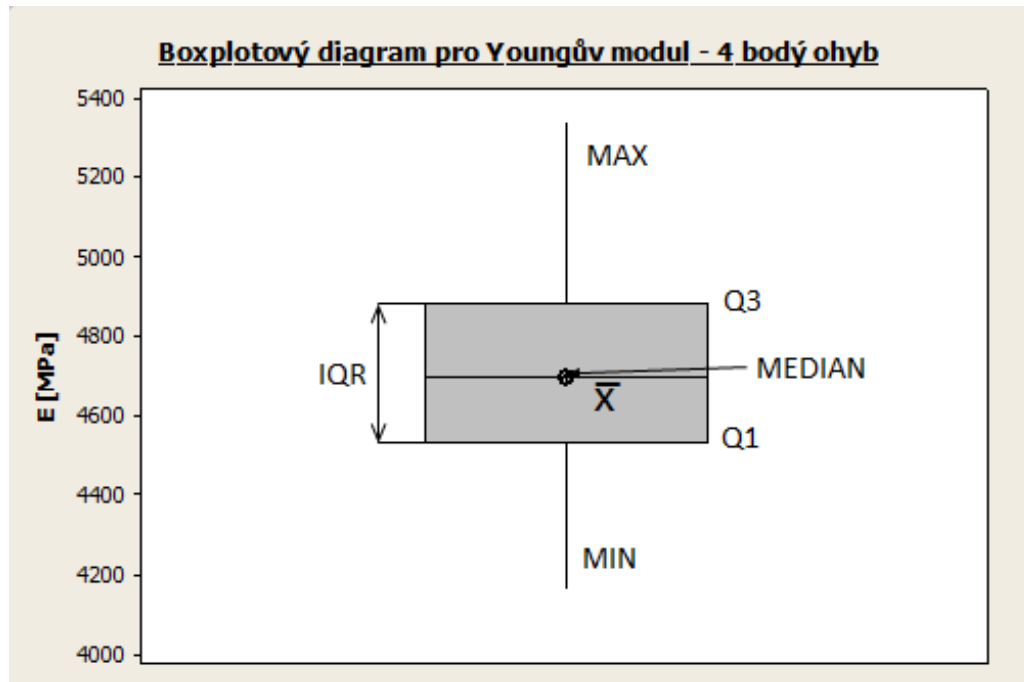
Obr. 115: Průběh testování čtyřbodovým ohybem



Obr. 116: Ukázka vzorku – separace prepregu a deformace voštinového jádra

Tab. 7: Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu při testování vzorků čtyřbodovým ohybem

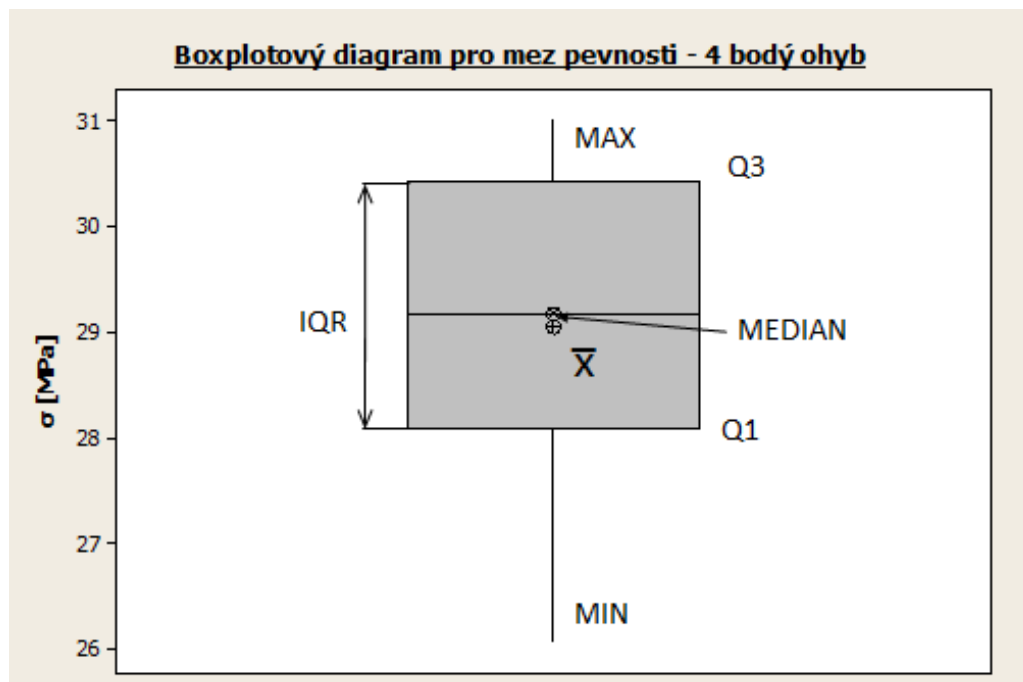
	Průměr	Směr. odchylka	MIN	Q1	Medián	Q3	MAX	IQR
E [MPa]	4697	269	4163	4533	4700	4884	5340	351



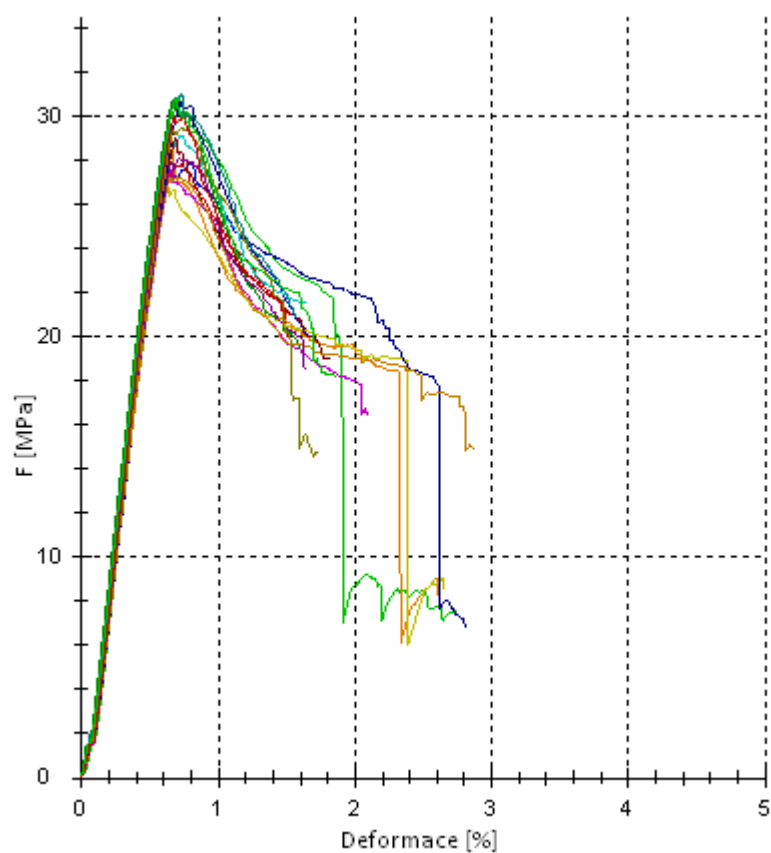
Obr. 117: Boxplotový diagram pro Youngův modul - čtyřbodový ohyb

Tab. 8: Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu při testování vzorků čtyřbodovým ohybem

	Průměr	Směr. odchylka	MIN	Q1	Medián	Q3	MAX	IQR
σ [MPa]	29.1	1.4	26.1	28.1	29.2	30.4	31.0	2.3



Obr. 118: Boxplotový diagram pro mez pevnosti – čtyřbodový ohyb

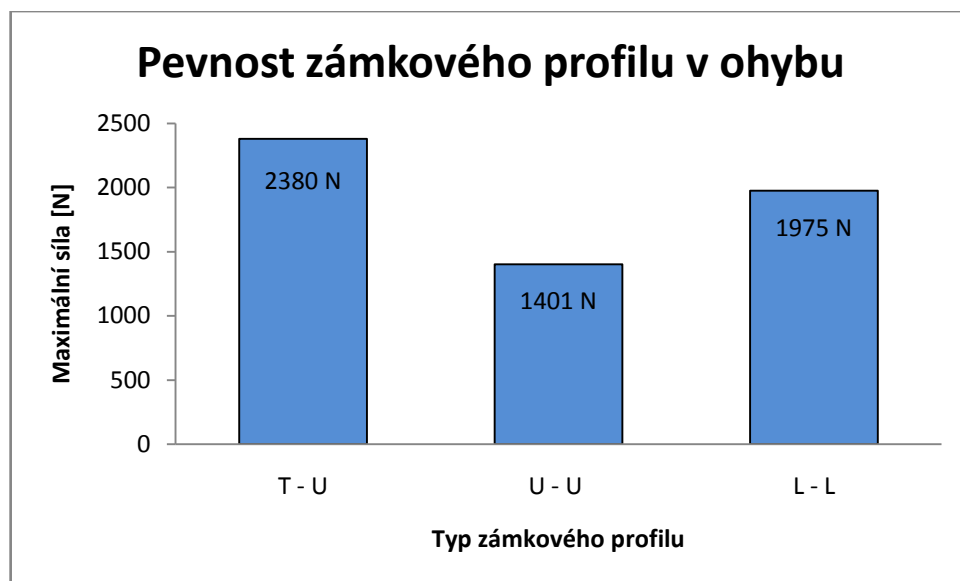


Obr. 119: Průběh zkoušky čtyřbodovým ohybem

11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Při testování pevnosti zámkového profilu v ohybu byly použity vzorky o stejné materiálové skladbě, pouze s odlišným typem tvarového zámku, zajišťujícího spojení panelů. Testování všech vzorků probíhalo na testovacím stroji Zwick 1456 v laboratoři UTB za stejných podmínek, kdy teplota v laboratoři byla 24 °C. Ve všech případech bylo vždy měřeno a vyhodnoceno pět vzorků.

Jako první byl testován vzorek o profilu pero – drážka. Zkouška u většiny vzorků probíhala do chvíle, kdy došlo k separaci vnější vrstvy, působením zatěžující síly, buď na jedné části vzorku, nebo na obou stranách vzorků. Průměr naměřených hodnot maximální síly, kterou daný profil vydržel bez porušení, byl $F_{max} = 2380$ N. Druhým testovaným vzorkem byl vzorek o profilu drážka – pero – drážka. Téměř ve všech případech testovaných vzorků došlo k prasknutí jednoho z drážkových profilů, ojediněle došlo i k separaci prepregové vrstvy. Průměr naměřených hodnot maximální síly, kterou daný profil vydržel bez porušení, byl $F_{max} = 1401$ N. Třetí testovaný vzorek byl o profilu L pero – L pero. U všech testovaných vzorků došlo k separaci prepregové vrstvy. Průměr naměřených hodnot maximální síly, kterou daný profil vydržel bez porušení, byl $F_{max} = 1975$ N. Porovnání pevnosti zámkových profilů v ohybu můžeme vidět na Obr. 120. Na první pohled je zřejmé, že nejlépe dopadl vzorek s profilem pero – drážka, v obrázku uvedeno jako T – U.



Obr. 120: Porovnání pevnosti zámkových profilů v ohybu

Budeme-li tento zámkový profil uvažovat za nejlepší (nejúnosnější = 100 %), pak vzorek s profily drážka – pero – drážka má v porovnání s ním 59 %tní pevnost a vzorek s profily L pero – L pero 83 %tní pevnost.

Dále bylo testováno 30 vzorků na třibodový ohyb. Většinou docházelo k deformaci pohledové části prepregu a k lokálnímu stlačení voštinového jádra. V některých případech došlo k deformaci voštinového jádra ve formě zvlnění a separaci obou prepregových vrstev. Průměr modulu pružnosti v ohybu při testování vzorků třibodovým ohybem byl $E = 3252$ MPa a průměr meze pevnosti v ohybu $\sigma = 25.1$ MPa. Následovalo testování třiceti vzorků na čtyřbodový ohyb. Ve většině případů došlo při testování k separaci obou částí prepregu a deformaci voštinového jádra ve formě jeho zvlnění v místě působení příčniců. Průměr modulu pružnosti v ohybu při testování vzorků čtyřbodovým ohybem byl $E = 4697$ MPa a průměr meze pevnosti v ohybu $\sigma = 29.1$ MPa.

Jako poslední bylo testováno deset vzorků na rázovou houževnatost. Měření probíhalo na Charpyho kladivě Resil Impactor Junior. Všechny vzorky testované na průřez vykazovaly po rázu kladiva separaci bližší vnější vrstvy, která byla vystavena rázu kladiva. V žádném případě nedošlo k přeražení vzorku, ale u většiny případů pouze k delaminaci pohledové části prepregu a deformaci voštiny. V jediném případě došlo k separaci nepohledové části prepregu. Průměr maximální síly vyvinuté během rázu byl $F_{max} = 1311$ N a průměr vyhodnocení rázové houževnatosti $R = 9.28$ kJ/m².

ZÁVĚR

Teoretická část diplomové práce je rozdělena na čtyři samostatné kapitoly. První kapitola je věnována kompozitním materiálům a jejich rozdělení. Další kapitola se věnuje sendvičovým kompozitním konstrukcím, jejich vlastnostem a jednotlivým složkám tvořícím sendvičové struktury. Dále jsou zde také uvedeny příklady spojování sendvičových konstrukcí, o které se pak opírá praktická část diplomové práce. Nedílnou součástí teoretické práce je také kapitola popisující základní metody výroby sendvičových struktur. V poslední kapitole teoretické části jsou zmíněny zkoušky sendvičových materiálů a konkrétně je popsána zkouška ohybem, tlakem, průrazem a testování odlupu.

Praktická část byla řešena ve spolupráci s firmou Form s.r.o. V první části byla navržena optimální materiálová skladba sendvičového panelu. Dále byly navrženy a posléze vyrobeny tři typy kartitových profilů, které zajišťují spojení jednotlivých podlahových panelů. Během návrhu byl také vyroben prototypový vzorek sendvičového podlahového panelu a zkušební vzorky, které byly posléze otestovány na pevnost zámkových profilů v ohybu. Dále bylo provedeno testování vzorků na tříbodový ohyb, čtyřbodový ohyb a testování rázem. Součástí praktické části je také návrh formy pro sériovou výrobu podlahových panelů. Při návrhu formy byl brán zřetel na požadavek na univerzálnost formy pro tři typy panelů. Další částí je vypracování technologického postupu výroby podlahových panelů.

Ze získaných výsledků lze konstatovat, že kartitový profil je vhodný materiál pro zámkové profily a to zejména v provedení Pero – Drážka. Dále lze konstatovat, že zvolené materiály tvoří vhodnou sendvičovou strukturu pro podlahové panely pro uplatnění v dopravním průmyslu.

Součástí diplomové práce je přiložené CD, na kterém je diplomová práce v elektronické podobě, materiálové listy, konstrukční návrh zámkových profilů včetně výrobních výkresů a konstrukční návrh formy s výrobním výkresem. Konstrukční práce probíhaly v 3D softwaru Catia V5R19.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DAVIES, J. *Lightweightsandwichconstruction*. Malden, MA: BlackwellScience, 2001, xiv, 370 p. ISBN 06-320-4027-0.
- [2] AGARWAL, Bhagwan D - BROUTMAN, Lawrence J. *Vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987. 294 s.
- [3] Kořínek, Zdeněk. *Kompozity* [online]. [cit.2012-11-25] Dostupné z <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [4] RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Kompozitní materiály: Přednášky a cvičení*. In: [online]. [cit. 2012-11-25].
- [5] Hexcel: *Technology manuals*. Hexcel [online]. 2012 [cit. 2012-12-27]. Dostupné z:http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Sandwich_Panel_Fabrication_Technology.pdf
- [6] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [7] Stefanmichna.com[online]. c2007 [cit. 2012-12-26].Kompozitní materiály. Dostupné z WWW:<http://www.stefanmichna.com/download/technickematerialy_II/kompozitni_materialy.pdf>
- [8] Csm-kompozity.wz.cz [online]. c2010 [cit. 2012-12-26]. Infuzní technologie výrobykompozitu a jejich simulace v MKP. Dostupné zWWW:http://www.csmkompozity.wz.cz/Infuze_VZLU.pdf
- [9] PETERS, Edited by S.T.*Handbookofcomposites*. 2nd ed. London: Chapman, 1998.ISBN 04-125-4020-7.
- [10] HAVEL COMPOSITES. *Technologie* [online]. [cit. 2012-12-26]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie.html>
- [11] *Ime.fme.vutbr.cz* [online]. c2011 [cit. 2012-12-26].Kompozitní materiály. Dostupnéz: WWW:<http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM/11-BUM.ppt>.
- [12] Mmspektrum.com [online]. c2011 [cit. 2012-12-26].Sendvicové konstrukce. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce>

- [13] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften*. München [u.a.]: Hanser, 2006. ISBN 34-462-2716-4.
- [14] Korek. *Wikipedie*[online]. [cit. 2012-12-26]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Balsa>
- [15] NEITZEL, Manfred a Peter MITSCHANG. *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. München: Hanser, 2004, xv, 440 p. ISBN 34-462-2041-0.
- [16] CANADIANHONEYCOMB. [online]. [cit. 2012-12-26]. Dostupné z: <http://www.canadianhoneycomb.com/>
- [17] Posterus. *Bunkovételesá* [online]. 2008 [cit. 2013-01-09]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7861>
- [18] Posterus. *Bunkovételesá* [online]. 2008 [cit. 2013-01-09]. [Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7871>
- [19] Gurit. *Gurit* [online]. 2012 [cit. 2012-12-27]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>
- [20] FABRIGER, Daniel. *Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur vákuovou infuzí pod pružnou folií*. Zlín, 2011. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [21] ZENKER, D. *SandwichConstructions*. Londýn: Emas, 2000, 439 s.
- [22] Mechanické vlastnosti [online]. [cit.2012-12-28]. Dostupný z WWW: http://www.ateam.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf.
- [23] Jhamernik. Jhamernik [online]. 2012 [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [24] CALVERA. *Stavba a prodej motorových lodí, hausbótů, pramic, kánoí a kajaků. Prodej lodních motorů, laminačních materiálů. Opravy laminátových výrobků*. [online]. 2010 [cit. 2013-02-03]. Dostupné z: <http://uvody.com/>
- [25] Composite International Co. [online]. 2012 [cit. 2013-02-03]. Dostupné z: <http://www.surefrp.com/html-en/products.html>

- [26] Kaplan. *Dřevovýrobky pro stavebnictví, interiéry, otvorové prvky a drobné truhlářské materiály* [online]. 2007 [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://www.kaplanpraha.cz/nabidka/kompaktne-desky.htm>
- [27] Hexcel. Data Sheets/Brochures [online]. 2012 [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf
- [28] Korek. *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Korek>
- [29] RYBNÍKÁŘ, F. *akol.: Analýza a zkoušení plastických hmot*. Praha, SNTL 1965.
- [30] SCHATY, M., VONDRÁČEK, P.: *Zkoušení polymerů*., VŠCHT Praha 1979.
- [31] PAŠTĚKA, Milan. *Obkladové panely v průmyslu*. Zlín, 2012. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně.
- [32] Hexcel. *Hexcel: Technology manuals* [online]. 2013 [cit. 2013-02-06]. Dostupné z: http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf
- [33] Gurit: Datasheets&Downloads. *Gurit* [online]. 2013 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/files/documents/sa-70v5pdf.pdf>
- [34] Matweb: Materialproperty data. *Hexcel® HexPly® M34 75°C (167°F) CuringEpoxy Matrix* [online]. 1996-2013 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d124de4599a94157a74b392820d0000b&ckck=1>
- [35] 3M. *3M™ Adhesives* [online]. 2013 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=66666UF6EVsSyXTt4xTt4XMcvEvtQEVs6EVs6EVs6E666666--&fn=TDS_AF3002.pdf
- [36] Lepidla. *5M: SMART Technologies IN THE WORLD OF COMPOSITES* [online]. 2012 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.5m.cz/userfiles/file/Lepidla%20CZ/TL%20KFL%20130%20-%20cz.pdf>

- [37] Material characteristics of 3-D FRP sandwich panels. *SciVerse: ScienceDirect* [online]. 2013 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061807000864>
- [38] Advanced Prepreg Materials. *Aero Consultants AG* [online]. 2013 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: http://www.aeroconsultants.ch/page.php?id=341&language=en&titel=Advanced_Pregreg_Materials
- [39] Astm C 393 Submitted Images Pic 2 Fly Picture. *Picstopin* [online]. 2013 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: http://www.picstopin.com/2560/astm-c-393-submitted-images-pic-2-fly/http://www.cfoam.com/images/astm_c393_three_point_bend_test_carbon_foam_composite_CFOAM_big*.jpg/
- [40] LONG BEAM FLEXURE TEST FIXTURE (ASTM C 393). *Wyoming* [online]. 2013 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.wyomingtestfixtures.com/Products/d2.html>
- [41] Hexcel: Technology manuals. Hexcel [online]. 2012 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf
- [42] Panel Data Sheets: Mechanical Testing of Sandwich Panels. *Hexcel* [online]. 2012 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Panel-Data-Sheets/SandwichPanels_global.pdf
- [43] Data sheets. Euro Composites [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.euro-composites.com/SiteCollectionDocuments/EC537-60e.pdf>
- [44] Izolační desky: KARTIT Hp 2061. *Labara* [online]. 2009 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.labara.cz/cs/vrstvene-izolanty/izolacni-desky/151-kartit-hp-2061>
- [45] Datasheets a Downloads [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: www.gurit.com

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$M_{o\ max}$	ohybový moment
F	síla [N]
l	délka [m]
$\sigma_{o\ max}$	mez pevnosti v ohybu [MPa]
w_o	modul průřezu v ohybu
σ	průměrná pevnost v tlaku
p	mezní zatížení
t	tloušťka vnějších vrstev
w	šířka vzorku
m	hmotnost tělesa [kg]
h	výška dopadu [m]
v	okamžitá rychlost pádu tělesa [m/s]
G ₅₀	hmotnost 50 % porušení [kg]
G ₁₀₀	nejmenší hmotnost, při které prasknou všechny vzorky [kg]
ΔG	hmotnost přídavných závaží [kg]
S	součet procentních hodnot všech jednotlivých zkoušek
T	odlupovací moment
r_o	rádius obruby pásků
r_i	poloměr bubnu
F _p	průměrné zatížení potřebné k odloupení a ohnutí vnější vrstvy
F _o	zatížení vyžadující překonání kroutící moment
W	šířka vzorku

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže [8].....	13
Obr. 2: Tahový diagram křehké matrice a kompozitu [7].....	14
Obr. 3: Skleněné vlákno [4].....	15
Obr. 4: Skelná rohož ze sekaných pramenů [24].....	15
Obr. 5: Roving [25].....	16
Obr. 6: Skelná tkanina [24].....	17
Obr. 7: Hybridní tkanina (kombinace uhlíkových a kevlarových vláken) [4].....	17
Obr. 8: Trojrozměrná výztuž příruby [4].....	18
Obr. 9: Sendvičová struktura s pěnovým jádrem [37].....	19
Obr. 10: Voštinová sendvičová struktura [10].....	19
Obr. 11: Zatížení sendvičové konstrukce [10].....	20
Obr. 12: Prepreg [38].....	22
Obr. 13: Struktura HPL desky [26].....	23
Obr. 14: Balza [14].....	24
Obr. 15: Dub korkový [28].....	25
Obr. 16: Papírová voština [16].....	26
Obr. 17: Hliníková voština [16].....	26
Obr. 18: Polypropylenová voština [16].....	26
Obr. 19: a) Šestihránná voština, b) OX-Core, c) Flex-Core [27].....	27
Obr. 20: Výroba plechové voštiny formováním [18].....	28
Obr. 21: Výroba plechové voštiny metodou HOBE [18].....	28
Obr. 22: Výroba plechové voštiny skládáním pásů [18].....	29
Obr. 23: Výroba plechové voštiny stříháním a ohýbáním [18].....	29
Obr. 24: Způsoby zatěžování voštin [4].....	30
Obr. 25: Pěny [4].....	31

Obr. 26: a) voština b) pěna s otevř. buňkami c) pěna s uzavř. buňkami [17].....	31
Obr. 27: Filmové lepidlo Gurit [31].....	32
Obr. 28: Epoxidový prepreg [31].....	33
Obr. 29: Filmové lepidlo Letoxit [31].....	33
Obr. 30: Příklady spojení sendvičových struktur natupo [5].....	34
Obr. 31: Příklady spojení sendvičových struktur rohovým spojením [5].....	35
Obr. 32: Příklady spojení sendvičových struktur T - spojením [5].....	35
Obr. 33: Příklady uzavírání sendvičových struktur [5].....	36
Obr. 34: Technologie vyhřívaného lisování a výsledný výrobek [32].....	38
Obr. 35: Formování v uzavřené formě a výsledný výrobek [32].....	38
Obr. 36: Schéma vytvrzování v peci a výsledný výrobek [32].....	39
Obr. 37: Autokláv [19].....	40
Obr. 38: Průběh ohybového momentu u nosníku na dvou podporách [22].....	42
Obr. 39: Přípravek pro třibodovou ohybovou zkoušku [39].....	43
Obr. 40: Průběh ohybového momentu u čtyřbodové zkoušky ohybem [22].....	44
Obr. 41: Přípravek pro čtyřbodovou ohybovou zkoušku [40].....	44
Obr. 42: Zatížení tělesa při zkoušce tlakem [42].....	45
Obr. 43: Poruchy vzniklé při tlakové zkoušce [42].....	46
Obr. 44: Schéma padostroje [29].....	48
Obr. 45: Climbing drum test [21].....	49
Obr. 46: SCB peel test [21].....	50
Obr. 47: Peel test – Air pressure [21].....	51
Obr. 48: Skladba sendvičového podlahového panelu.....	53
Obr. 49: Prepreg jemný (PHG840N-G213-40).....	54
Obr. 50: Prepreg hrubý (PHG840N-F300-47).....	54
Obr. 51: Voštinové jádro (ECM 6.4-82 tl. 16 mm).....	55

Obr. 52: Kartitové desky – vrstvený papír.....	56
Obr. 53: Pohledová vrstva z PVC.....	56
Obr. 54: Ukázka vyrobeného panelu - průřez.....	56
Obr. 55: Tvar zámku pero – drážka.....	57
Obr. 56: Tvar zámku drážka – pero – drážka.....	57
Obr. 57: Tvar zámku L pero – L pero.....	57
Obr. 58: Podlahový panel o rozměrech 1000 x 2000 mm.....	58
Obr. 59: Podlahový panel o rozměrech 2000 x 2000 mm.....	58
Obr. 60: Podlahový panel o rozměrech dle rozměrů specifikace.....	59
Obr. 61: Základová deska formy.....	59
Obr. 62: Detail vložených kolíků.....	60
Obr. 63: Vizualizace panelu 2000 x 2000 mm ve formě.....	60
Obr. 64: Vizualizace panelu 2000 x 1000 mm ve formě.....	60
Obr. 65: Vizualizace specifického panelu ve formě.....	61
Obr. 66: Umístění prepregu na základovou desku.....	61
Obr. 67: Nanesení adhezivní vrstvy.....	62
Obr. 68: Polohování rámu.....	62
Obr. 69: Vložení jádra.....	63
Obr. 70: Nanesení další adhezivní vrstvy.....	63
Obr. 71: Vložení horní vrstvy prepregu.....	64
Obr. 72: Slepění kartitových profilů.....	65
Obr. 73: Řezání hrubého prepregu.....	65
Obr. 74: Řezání jemného prepregu.....	66
Obr. 75: Polohování hrubé vrstvy prepregu a optická zkouška rozměrů v porovnání s profilovým rámem.....	66
Obr. 76: Polohování jemné vrstvy prepregu a ustavení profilového rámu.....	67

Obr. 77: Řezání voštiny na požadovaný rozměr.....	67
Obr. 78: Vložení voštinového jádra do profilového rámu.....	68
Obr. 79: Položení vnější hrubé vrstvy prepregu.....	69
Obr. 80: Položení jemné vrstvy prepregu.....	69
Obr. 81: Polohování voštinového jádra a tvarového profilu.....	69
Obr. 82: Položení další vrstvy jemného prepregu.....	70
Obr. 83: Položení vnější vrstvy hrubého prepregu.....	70
Obr. 84: Formovací stůl se vzorky a podlahovým panelem.....	70
Obr. 85: Testovací stroj Zwick 1456.....	71
Obr. 86: Charpyho kladivo RESIL IMPACTOR junior.....	71
Obr. 87: Schéma upnutí vzorku.....	72
Obr. 88: Upnutí vzorku.....	72
Obr. 89: Vzorek s tvarovým zámkem o profilech pero – drážka.....	73
Obr. 90: Vzorek s tvarovým zámkem o profilech drážka – pero – drážka.....	73
Obr. 91: Vzorek s tvarovým zámkem o profilech L pero – L pero.....	73
Obr. 92: Separace prepregu na jedné části vzorku.....	73
Obr. 93: Separace prepregu na obou částech vzorku.....	74
Obr. 94: Detail separovaného prepregu na části s perem.....	74
Obr. 95: Průběh závislosti síly na deformaci u profilu pero – drážka.....	75
Obr. 96: Upnutí zkušební vzorku o profilu drážka – pero – drážka.....	75
Obr. 97: Prasknutí jednoho z drážkových profilů.....	76
Obr. 98: Detail separovaného prepregu a prasknutého drážkového profilu.....	76
Obr. 99: Průběh závislosti síly na deformaci u profilu drážka – pero – drážka.....	77
Obr. 100: Průběh zkoušky vzorků s profilem L pero – L pero.....	77
Obr. 101: Detail separovaného prepregu na jedné části vzorku s profilem L pera.....	78
Obr. 102: Průběh závislosti síly na deformaci u profilu L pero – L pero.....	79

Obr. 103: Vzorek na ustavovacím stole Charpyho kladiva.....	80
Obr. 104: Ukázka vzorku po nárazu Charpyho kladiva.....	81
Obr. 105: Průběh rázového testu pro vzorek č. 2.....	81
Obr. 106: Vzorek pro testování třibodovým ohybem.....	82
Obr. 107: Schéma umístění vzorku při zkoušce třibodovým ohybem.....	82
Obr. 108: Průběh testování třibodovým ohybem.....	82
Obr. 109: Ukázka vzorku – deformace pohledového prepregu a lokální stlačení voštinového jádra.....	83
Obr. 110: Ukázka vzorku – separace obou vrstev prepregu a deformace ve formě zvlnění voštinového jádra.....	83
Obr. 111: Boxplotový diagram pro Youngův modul v ohybu.....	84
Obr. 112: Boxplotový diagram pro mez pevnosti v ohybu.....	84
Obr. 113: Průběh zkoušky třibodovým ohybem.....	85
Obr. 114: Schéma umístění vzorku při zkoušce čtyřbodovým ohybem.....	86
Obr. 115: Průběh testování čtyřbodovým ohybem.....	86
Obr. 116: Ukázka vzorku – separace prepregu a deformace voštinového jádra.....	87
Obr. 117: Boxplotový diagram pro Youngův modul - čtyřbodový ohyb.....	87
Obr. 118: Boxplotový diagram pro mez pevnosti – čtyřbodový ohyb.....	88
Obr. 119: Průběh zkoušky čtyřbodovým ohybem.....	88
Obr. 120: Porovnání pevnosti zámkových profilů v ohybu.....	89

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vyhodnocení pevnosti zámkového profilu v ohybu typ pero – drážka.....	74
Tab. 2: Vyhodnocení pevnosti zámkového profilu v ohybu typ drážka – pero – drážka....	76
Tab. 3: Vyhodnocení pevnosti zámkového profilu v ohybu typ L pero – L pero.....	78
Tab. 4: Vyhodnocení testu rázem.....	80
Tab. 5: Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu při testování vzorků třibodovým ohybem.....	83
Tab. 6: Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu při testování vzorků třibodovým ohybem.....	84
Tab. 7: Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu při testování vzorků čtyřbodovým ohybem.....	87
Tab. 8: Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu při testování vzorků čtyřbodovým ohybem.....	88

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: HLINÍKOVÁ VOŠTINA, TECHNICKÝ LIST

PŘÍLOHA P II: KARTIT – VRSTVENÝ PAPÍR, TECHNICKÝ LIST

PŘÍLOHA P III: PREPREG – TECHNICKÝ LIST

PŘÍLOHA P IV: VÝROBNÍ VÝKRESY KARTITOVÝCH PROFILŮ

PŘÍLOHA P V: VÝROBNÍ VÝKRES ZÁKLADOVÉ DESKY

PŘÍLOHA P I: HLINÍKOVÁ VOŠTINA, TECHNICKÝ LIST



EURO-COMPOSITES[®]

Aluminium honeycomb

Technical Data Sheet for ECM 6.4-82

Material: Alu-Alloy 3003 (AlMnCu)

Coating: Zirconium oxide

Mechanical Properties	Unit	Test	Typical values
Foil Thickness	µm	ECP 231-04	80
Cell Size, Nominal	mm	DIN 29970	6,4
Density, Nominal	kg/m ³	DIN 29970	82
Compression Strength Unstab.	N/mm ²	DIN 53291	4,25
Compression Strength Stab.	N/mm ²	DIN 53291	4,50
Crush strength	N/mm ²	NHTSATP-24-214D-02*	1,665
Plate Shear Strength/ L-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	2,40
Plate Shear Modul/ L-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	430
Plate Shear Strength/ W-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	1,40
Plate Shear Modul/ W-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	220
Service Temperature	°C	-	-55 °C bis +177 °C

All Honeycomb Core approved according to: DNV-Certificate MED-B-4912 as Non-combustible materials according to SOLAS 74, 2000 HSC Code, IMO FTP Code

All Honeycomb ECM core types can be delivered, if required, as microperforated. These Aluminum core types are called ECM-P.

*- Thickness of test sheet: 25,40 mm

PŘÍLOHA P II: KARTIT – VRSTVENÝ PAPÍR, TECHNICKÝ LIST

Typ dle DIN – EN: 60893		
ČSN – EN: 60893		PFCP 201
Typ dle DIN 7735		Hp 2061
Typ dle NEMA		X
		XP
Výztuha - materiál		papír
Pryskyřice		fenolová
Aplikace		elektroizolační, konstrukční
Mechanické vlastnosti		
Pevnost v ohybu při porušení kolmo na vrstvy (při 20 °C)	MPa	135
Modul pružnosti v ohybu	MPa	7×10^3
Pevnost v tahu	MPa	120
Pevnost v tlaku kolmo na vrstvy	MPa	300
Rázová houževnatost (Charpy) rovnoběžně s vrstvami	KJ/m ²	-
Pevnost ve smyku rovnoběžně s vrstvami	MPa	10
Pevnost v tlaku rovnoběžně s vrstvami dle PN-83/C-89031	MPa	100
Dielektrické vlastnosti		
Průrazné napětí v oleji při 90 °C		
- kolmo na vrstvy	kV/3 mm	-
- rovnoběžně s vrstvami	kV/25 mm	-
Ztrátový činitel tan d		
- při 50 Hz		-
- při 1 MHz		-
Permitivita při 1 MHz		-
Odolnost proti plazivým proudům (CTI)		100
Izolační odpor po ponoření do vody	MΩ	-
1 min. zkušební napětí v oleji 90 °C podle PN-86/E-04404		
- kolmo na vrstvy (pro 3 mm)	kV	10
- rovnoběžně s vrstvami	kV	10
Fyzikální vlastnosti		
Měrná hmotnost	g/cm ³	1,4
Teplotní index (TI)		120
Nasákavost (pro tloušťku 3 mm)	mg	550

PŘÍLOHA P III: PREPREG – TECHNICKÝ LIST



PHG840N-F300-47

- Fiber reinforced thermosetting prepregated material 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 47% phenolic resin PH840N.
- 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
- Special adhesive side for Alu bonding

Description

PHG840N-F300-47 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 PHG840N can be cured at a temperature range between 120°C and 180°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 476-8 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	900 ±30 g/m ²
Volatiles	EN 2330 (160°C/10min)	± 5.0 %
Resin Flow	EN 2332 (3 plies, 135°C, 5min, 4 bar)	± 10 %
Tackiness		T0, T1, T2
Fibre Material		E-glass
Fabric Weight	EN 2331	290 g/m ² ±5 %
Wear Style		DH satin
Service Temperature (Cured State)		-55°C to +80°C
Resin Content	EN 2331	47.0 ±3%

Delivery Form and Storage

Prepreg size	Roll length / Roll width	50 / 1.0 ± 1.27m
Storage Life (from delivery date)	Days at RT / Month at -10°C	30 / 24

Curing Conditions

	Crush Cone	Standard Cycle
Temperature	120°C/140°C/160°C	120/130/140/160°C
Cure Time	50 min/20 min/10 min	90/60/30/10 min
Spec. Pressure	1.25 Mpa	0.07- 0.4 MPa
Heat-up	None (hot-in)	2 to 5 K/min
Cool-down	None (hot-out)	2 to 5 K/min
Remove material at	120°C/140°C/160°C	> 80°C
Recommended curing process	Press, Autoclave, Vacuum-bag	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)		ISO 527-4		MPa
Tensile Modulus (warp)		ISO 527-4		GPa
Compressive Strength (warp)		EN 2850	-	MPa
Compressive Modulus (warp)		EN 2850		GPa
Interlaminar Tensile Shear Strength (warp)	RT	ATM 1.0019/10	18	MPa
	80		16	
Interlaminar Shear Strength				
Deering strength				
Climbing Drum Peel *	RT	EN 2243-3	110	N/75 mm
Bending Load (4-P.) *	RT	ATM 1.0018 Fig.2	1500	N
	80		-	
Tg		TMA	> 80	°C

1) Sandwich structure (5,4mm Alu honeycomb 126.5 kg/m³ ML-C-7438)

Burning Behaviour

		Test method	Max. mean values	
Flammability vertical, 60s flaming	burn length after flame time after flame time of drips	ATM 2.0002A	80 5 –	mm s s
Flammability vertical, 12s flaming				
Max. specific optical smoke density within 4 min	flaming mode	ATM 2.0007A	5	Da
Heat release		ATM 2.0006	25	kW m ²
Heat release rate		ATM 2.0006	25	kW/m ²

Disclaimer

The materials, products and services of the Gurit Group sold by the respective legal entity (the "Company") of the Gurit Group are subject to the Standard Conditions of Sale of the Company which are available on request or may be viewed at the website: www.gurit.com. Nothing in this document or any data sheet, brochure, prospectus, etc. (hereinafter referred to as "Documents"), nor any instruction or advice given as referred to in the Documents shall be deemed to alter, vary, supersede or waive any provision of Company's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless any such modification is specially agreed to in writing and signed by Company.

Although any information, instruction or advice contained or referred to in the Documents is given in good faith, no warranty or guarantee, express or implied, is made(i) that the results described herein will be obtained, or (ii) that the information, instruction or advice (whether written or oral) is complete, accurate and useful. Nothing contained in the Documents constitutes a representation or warranty, whether expressed or implied, as to any matter whatsoever.

The user should make test panels and conduct appropriate testing of any goods or materials supplied by the Company to ensure that they are suitable for the user's planned application. Such testing should include testing under conditions as close as possible to those which the final component may be subjected. Each user bears full responsibility from making its own determination as to the suitability of the recommendations and advice obtained by the Company for its own particular use.

To the extent of mandatory law, the Company and the Gurit Group expressly disclaim any liability, whether in contract, warranty, tort, negligence, strict liability or otherwise, for any and all damages, losses, injuries, costs or expenses resulting directly or indirectly from the reliance on any information contained in the Documents or from any advice (whether written or oral) given as referred to in the Documents.

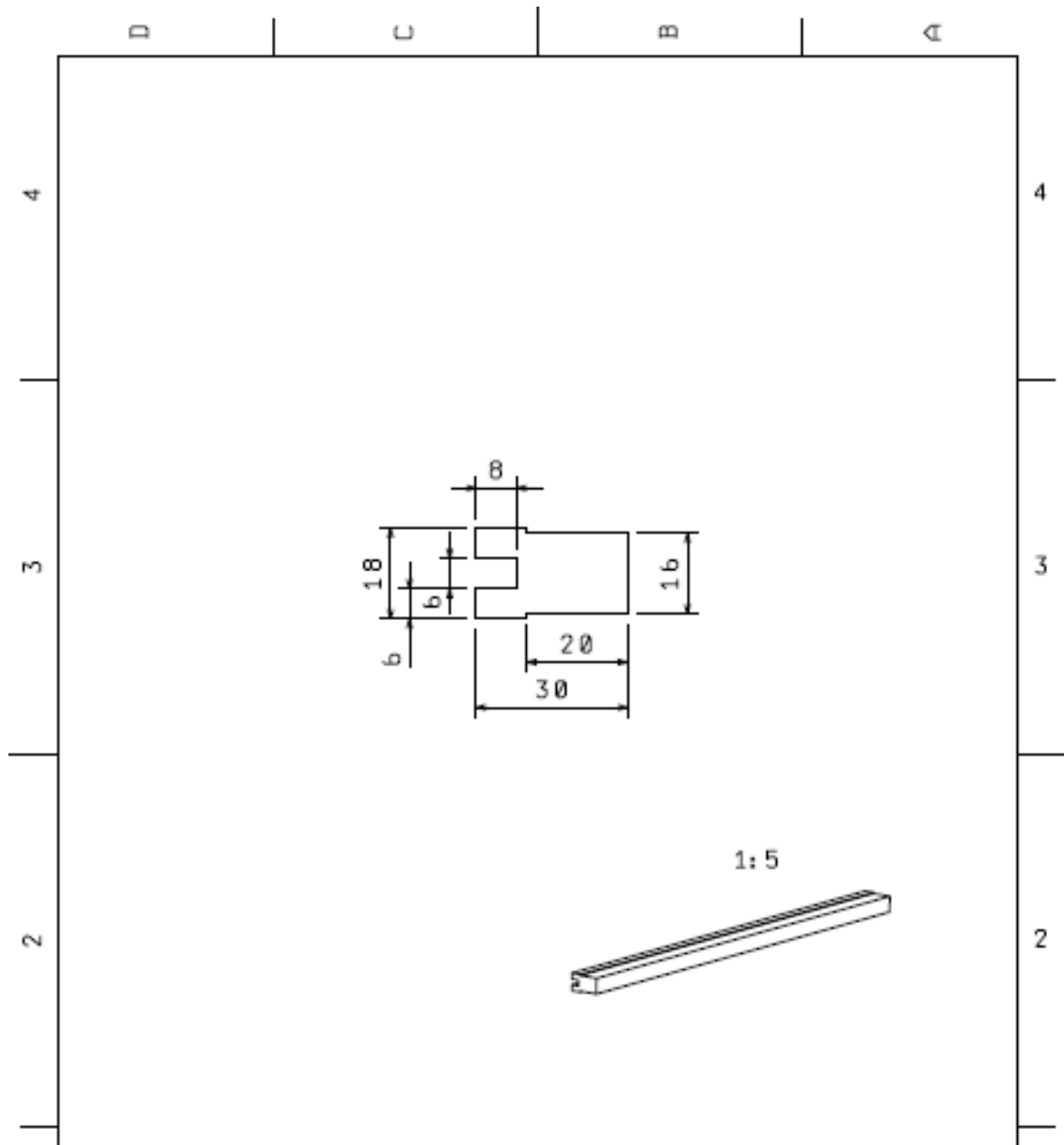
The Company reserves the right to change specifications and prices without notice and users should satisfy themselves that the information used is that which is currently published by the Company or the Gurit Group on the website. Any queries may be addressed to the Technical Services Department.

The Gurit Group is continuously reviewing and updating the Documents. Please ensure that you have the current version, by contacting Gurit Marketing Communications or your sales contact and quoting the revision number in the bottom middle of this page.

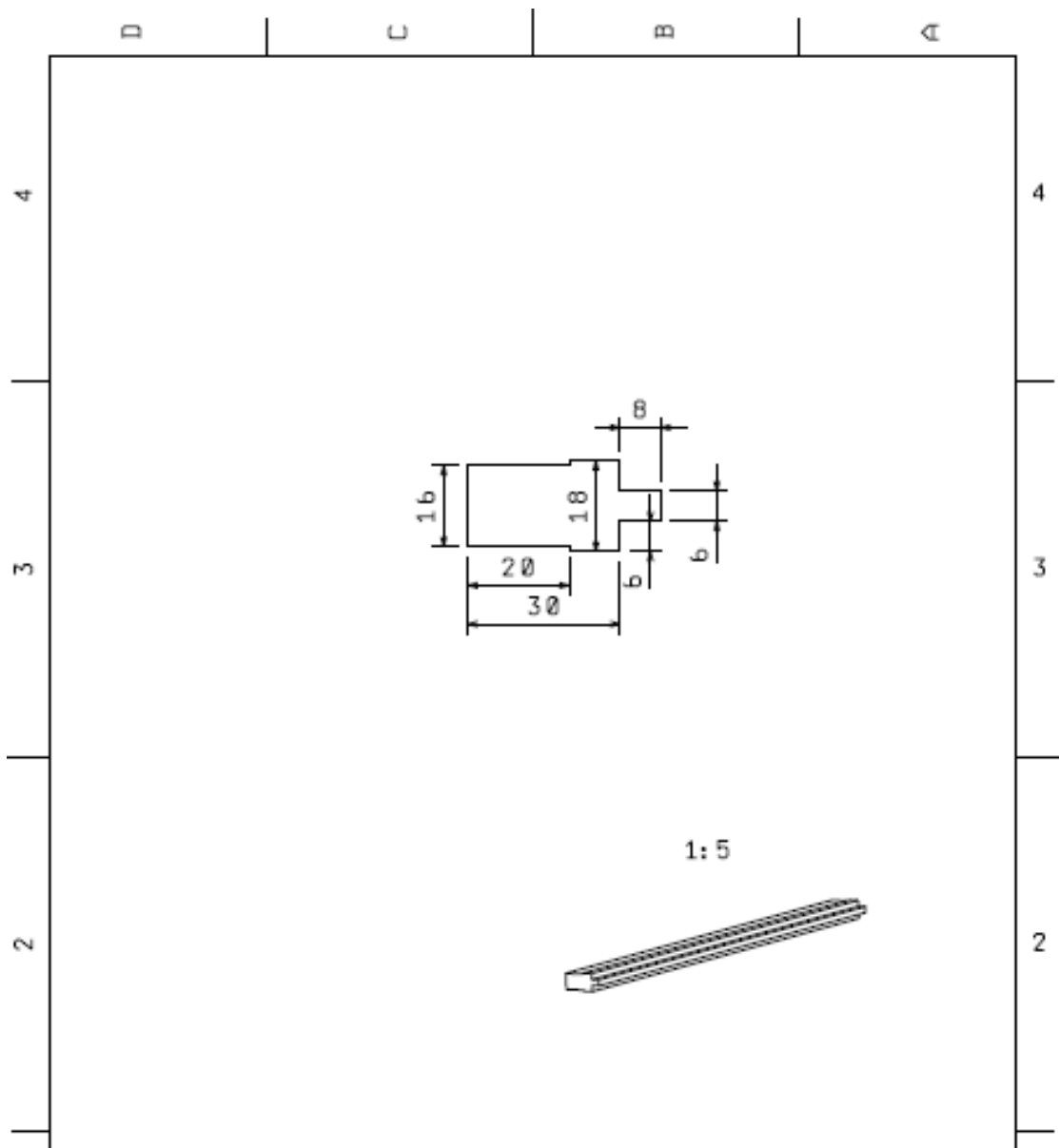
Gurit (Zürich) AG
 Fabrikweg 54
 CH-4234 Zülwil
 Switzerland
 T +41 (0) 61 705 06 01
 F +41 (0) 61 705 06 04

Gurit (Kassel) GmbH
 Otto-Hahn-Str. 5
 D-34123 Kassel
 Germany
 T +49 (0) 561 99 85 83 0
 F +49 (0) 561 99 85 83 22
 E info@gurit.com
 W www.gurit.com

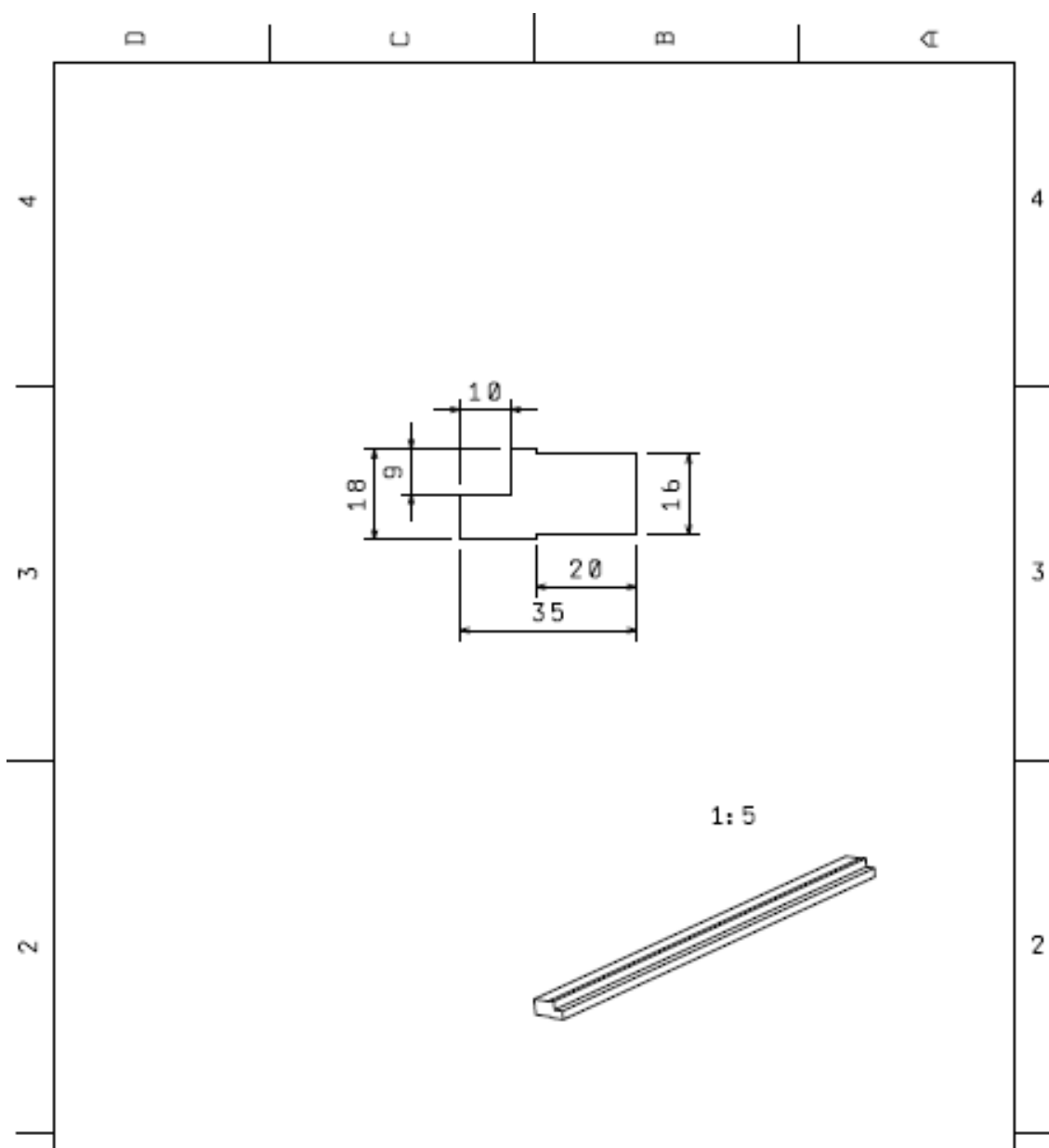
PŘÍLOHA P IV: VÝROBNÍ VÝKRESY KARTITOVÝCH PROFILŮ



		DASSAULT SYSTEMES	
		DRAWING TITLE	
DRAWN BY	DATE	Kartitovy profil - drazka	
Horsak	15.4.2013	SIZE	DRAWING NUMBER
CHECKED BY	DATE	A4	Varinata A
DESIGNED BY	DATE	SCALE	WEIGHT (kg)
		1:1	SHEET 1/1



		DASSAULT SYSTEMES			
		DRAWING TITLE			
DRAWN BY	DATE	Kartitovy profil - pero			
Horsak	15.4.2013	SIZE	DRAWING NUMBER		REV
CHECKED BY	DATE	A4	Varianta A		1
DESIGNED BY	DATE	SCALE	1:1	WEIGHT (kg)	SHEET 1/1
D					A



		DASSAULT SYSTEMES	
		DRAWING TITLE	
DRAWN BY	DATE	Kartitovy profil	
Horsak	15.4.2013		
CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER
		A4	Varianta C
DESIGNED BY	DATE	SCALE	WEIGHT (kg)
		1:1	
		SHEET	1/1

PŘÍLOHA P V: VÝROBNÍ VÝKRES ZÁKLADOVÉ DESKY

