

Návrh konstrukce upínacího přípravku pro testy lepivosti

Ondřej Gajdůšek

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Ondřej GAJDŮŠEK
Osobní číslo: T10243
Studijní program: B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Technologická zařízení
Forma studia: prezenční

Téma práce: Návrh konstrukce upínacího přípravku pro testy
lepivosti

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice kompozitních
sendvičových struktur:

- Základní definice, způsoby zatěžování
- Používané materiály
- Způsoby výroby
- Základní definice adheze
- Způsoby testování adheze sendvičových struktur

2. Experimentální část:

- Návrhy konstrukcí pro testování soudržnosti sendvičových struktur
- Tvorba modelu vybrané konstrukce
- Příprava výkresové dokumentace vybrané konstrukce

3. Zhodnocení návrhu a závěry

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

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

[2] Vinson, J. R., The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials, CRC Press, 1999

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

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

[5] Elektronické zdroje dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ladislav Fojtl

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

10. února 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



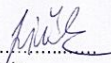

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské/diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že bakalářská/diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou/diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské/diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské/diplomové práce využít ke komerčním účelům.

Ve Zlíně 23.5.2014.....

ONDŘEK GAJDUŠEK 
Jméno, příjmení, podpis

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jim 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 přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tématem bakalářské práce je konstrukce čelistí pro testy lepivosti sendvičových struktur. Bakalářská práce je rozdělena do dvou hlavních částí, na část teoretickou a praktickou. Teoretická část práce je zaměřena na výrobu, materiály k výrobě a testování sendvičových struktur. Dále se práce zaměřuje na charakteristiku sendvičových struktur a konstrukci čelistí. Praktická část se zabývá návrhem čelistí pro tzv. peel test, tedy test lepivosti u sendvičových struktur. Čelisti jsou navrženy tak, aby byly možné upnout na stroj Zwick 1456

V příloze bakalářské práce jsou přidány výrobní výkresy upínacích čelistí.

Klíčová slova:

peel test, sendvičové struktury, upínací čelisti, trhací zkouška, SCB odlup, DCB odlup

ABSTRACT

The topic of this bachelor thesis is a construction of camping jaws for peel tests of sandwich structures. This thesis is dividend into two main parts, theoretical and practical. The theoretical part is focused on production, materials for the production and testing of sandwich structures. Moreover, it is focused on the characteristic of the sandwich structures and construction of the jaws. The practical part deals with design of the jaws and whole camping jies for peel testing. The jaws are designed, so they are designed to be clamped on machine Zwick 1456. Technical drawings of testing jigs are addend in Appendices.

Keywords:

peel test, sandwich structure, camping jaws, tensile test, SCB peel, DCB peel

Děkuji svému vedoucímu Ing. Ladislavu Fojtlovi, za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi věnoval při vypracovávání bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 SENDVIČOVÉ STRUKTURY	11
1.1 OBLASTI POUŽITÍ.....	11
1.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI A SLOŽENÍ STRUKTUR	11
2 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY	14
2.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY PRO KONSTRUKCI VNĚJŠÍCH VRSTEV	15
2.1.1 Vláknové kompozity	15
2.1.2 Prepregy	17
2.1.3 Ostatní nekovové materiály.....	20
2.2 KOVOVÉ MATERIÁLY	21
2.3 MATERIÁLY JÁDRA	24
2.3.1 Voštinové materiály:	24
2.3.2 Plastové pěny	27
2.3.3 Balzové dřevo.....	29
2.3.4 Korek.....	30
2.3.5 3D Tkaniny.....	31
3 ZPŮSOBY VÝROBY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	32
3.1 PULTRUZE	33
3.2 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	33
3.3 VAKUOVÁ INFŮZE	34
3.4 RTM – RESIN TRANSFER MOULDING	35
4 ZÁKLADNÍ DEFINICE ADHEZE	36
4.1 POŽADAVKY NA LEPENÝ SPOJ.....	37
4.2 LEPIDLA A JEJICH VLASTNOSTI	39
5 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ ADHEZE SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	41
5.1 ZKOUŠKA LEPENÉHO SPOJE PLOCHÝM TAHEM (Z ANG. FLATWISE TENSILE TEST).....	42
5.2 ZKOUŠKA ODLUPEM KONZOLOU V TAHU: TZV. PEEL TEST	42
5.3 ZKOUŠKA ODLUPU POMOCÍ NAVÍJECÍHO BUBNU	44
5.3.1 Peel test využívající tlak vzduchu	46
II PRAKTICKÁ ČÁST	47
6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	48
7 UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ STROJ	49
7.1 TECHNICKÉ PARAMETRY STROJE ZWICK 145 665.....	50
7.2 UPÍNACÍ ZAŘÍZENÍ STROJE	50
8 PŘÍPRAVEK PRO SCB PEEL TEST	51
9 PŘÍPRAVEK PRO CLIMBING DRUM PEEL TEST	58
10 FINANČNÍ KALKULACE	61
ZÁVĚR	63
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	64

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	65
SEZNAM OBRÁZKŮ	66
SEZNAM TABULEK.....	68
SEZNAM PŘÍLOH.....	69

ÚVOD

Stále častěji se setkáváme se sendvičovými strukturami, aniž bychom tomu věnovali jakoukoli pozornost. Sendvičové struktury ovšem můžou nabídnout řadu specifických vlastností, kterých konvenční průmyslové materiály nedosahují. Význam detailnějšího popsaní jejich vlastností nabírá na důležitosti. Jejich příznivé mechanické, akustické a termoisolační vlastnosti společně s nízkou hmotností jsou jejich přednostmi pro využití v mnoha odvětvích, jako například letecký, automobilový či stavební průmysl. Protože se tyto struktury skládají zpravidla ze tří a více vrstev, je základem aby tyto vrstvy držely bezproblémově pohromadě a zároveň, aby jejich spojení nebylo ekonomicky náročné. Kvalita spoje, v tomto případě lepeného, závisí na mnoha faktorech, zvláště pak na použitých materiálech a technologii výroby.

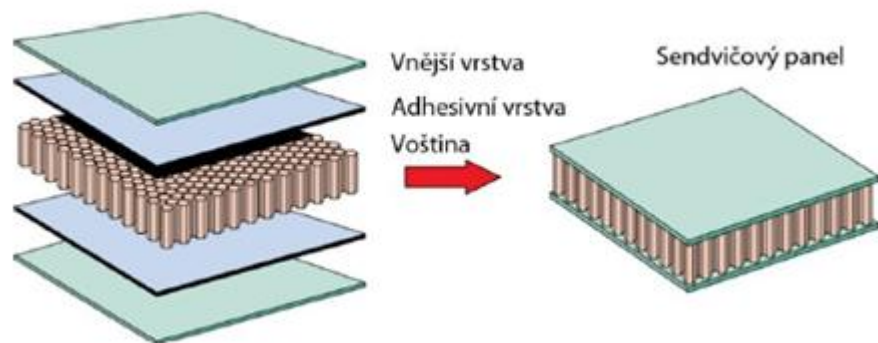
Vývoj různých sendvičových struktur jde ruku v ruce s testováním jejich mechanických vlastností. Dá se předpokládat, že budou zatěžovány různými druhy namáhání, proto je potřeba před produkcí vystavit tyto materiály řadě zkoušek k ověření jejich jak mechanických, tak třeba tepelně izolačních vlastností. Dalo by se říct, že nejčastější mechanickou zkouškou průmyslových materiálů je zkouška tahová. Díky možnost využít na trhacím stroji různých čelistí můžeme tahovou zkouškou jednoduše zjistit i kvalitu soudržnosti lepených sendvičových struktur. Dostáváme se tedy k různým variacím tzv. peel testu neboli testu lepivosti.

Hlavním úkolem bakalářské práce je navržení upínacích čelistí, které budou používány na univerzálním trhacím stroji Zwick v laboratořích UTB ve Zlíně. Upínací čelisti tak rozšíří portfolio mechanických testů materiálů na UVI.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SENDVIČOVÉ STRUKTURY

Sendvičový panel má takovou strukturu, kterou tvoří vždy jádro, adhezivní vrstvy a krycí vnější vrstvy. Jejich působení vyvolává synergicky žádané vlastnosti. Důraz je kladen na vytvoření velmi lehké, tepelně nevodivé struktury, která bude splňovat požadované mechanické a fyzikální vlastnosti. Na Obr. 1 můžeme vidět schéma sendvičového panelu s voštinovým jádrem.



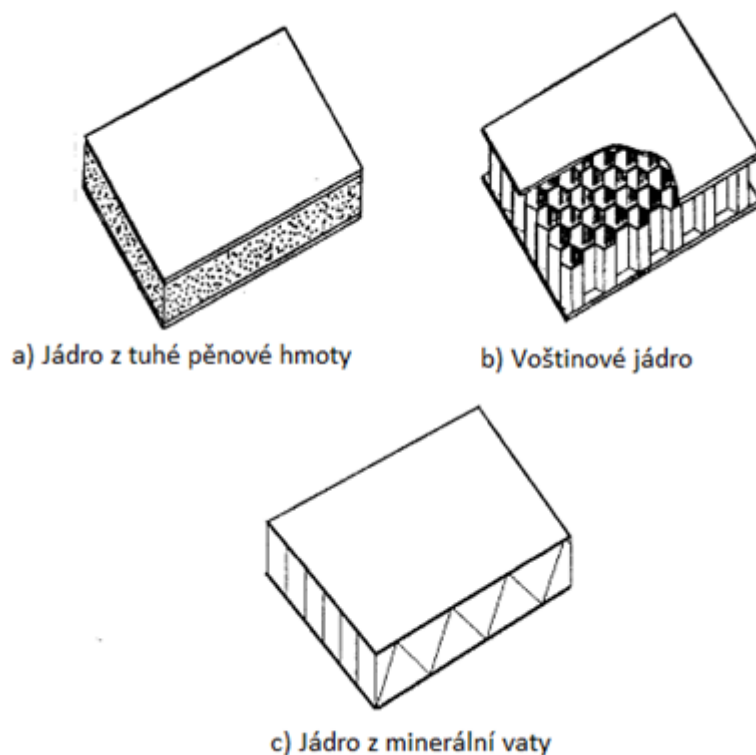
Obr. 1 - Struktura kompozitní sendvičové konstrukce [4]

1.1 Oblasti použití

Z počátku byla technologie sendvičových konstrukcí určena pouze pro účely letectví a kosmonautiky a jejím vývinem se zabývala např. NASA. Později se začala tato technologie rozšiřovat díky variabilním možnostem použití do lodního průmyslu, průmyslu nákladní dopravy a také do automobilového průmyslu. Například italská značka Pagani vyrábějící supersportovní automobily a využívající mnohé vyspělé technologie používá na všech svých modelech sendvičovou technologii. Také v oblasti prostorů tepelně či akusticky izolovaných od okolí je třeba zmínit využitelnost. Období, kdy se technologie začala rozšiřovat do oblasti civilního použití, začíná po roku 1960. [1]

1.2 Základní vlastnosti a složení struktur

Vnější krycí vrstvy mohou být vyrobeny z oceli, hliníku, dřeva, vyztužených vláken plastu nebo dokonce betonu. Jádra mohou být vyrobeny z korku, balzového dřeva, pryže, plastu (PE, PET, atd.), tuhé pěnové hmoty (PU, PS, fenolické pěny), minerální vaty nebo voštiny z kovu, plastu či papíru. Obr. 2 zobrazuje tři příklady použitých jader.



Obr. 2 - Příklady použitých jader [1]

Vnější krycí vrstvy mohou být kovové či nekovové. Tato možnost kombinování materiálů při tvorbě umožňuje plnit konkrétní požadavky pro aplikace. V kompozitních panelech mohou být pozitivní vlastnosti jednotlivých materiálů kombinovány a negativní eliminovány. Například dobré tepelně izolační vlastnosti plastových pěnových hmot popřípadě minerální vaty mohou být použity pouze v případě, že budou chráněny vnějšími vrstvami před vlhkostí. Kombinace nízkohustotního plastového jádra nebo jádra z minerální vaty společně s úzkými kovovými vnějšími vrstvami dosáhneme vlastností, které jsou ideální pro použití při stavbě budov ve stěnách a střeších. Spojují vlastnosti kovové vnější krycí vrstvy, která je vhodná díky jejím mechanickým vlastnostem a ochraně proti povětrnostním vlivům, a zvukově i tepelně izolační vlastnosti jádra. [1]

Výsledná struktura vděčí za svůj úspěch těmto vlastnostem:

- vysoká nosnost při nízké hmotnosti
- výborná tepelná izolace
- nepropustnost vody a par
- vzduchotěsnost
- povrchové vnější krycí vrstvy zaručují ochranu proti povětrnostním vlivům a agresivnímu prostředí
- ekonomická masová výroba při zachování vysoké kvality
- dlouhá životnost při nízkých nákladech na údržbu
- žáruvzdornost při použití jádra z minerální vlny

Sendvičové elementy mají i některé nepříznivé vlastnosti, mezi které patří:

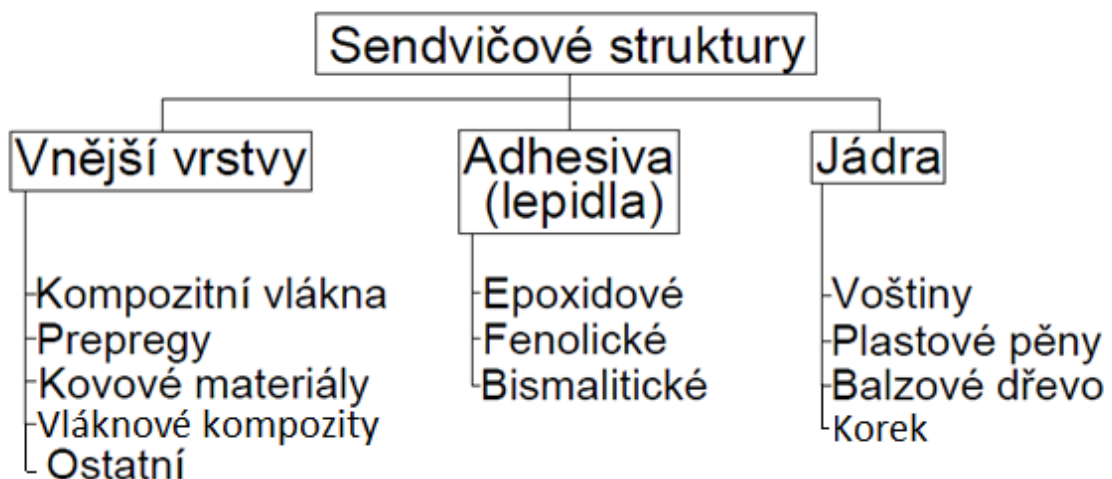
- chování prvků s plastovými jádry při vysokých teplotách
- deformace při jednostrannému vystavení vysokému teplu
- nízká tepelná kapacita [1]

Jak bylo zmíněno dříve, sendvičové struktury jsou složeny z vnitřní a vnější krycí vrstvy, která je tvořena plechem, polymerem či kompozitem. Tento krycí materiál působí současně s nízkou hmotností a dobrými izolačními vlastnostmi jádra a jejich volba je ovlivněna použitím dané struktury. Jádro a vnější materiál musí být k sobě připevněny tak, aby tento spoj vydržel po celou dobu jejich životnosti při určeném použití. K připevnění je použito různých lepidel či mechanického upevnění. Výše uvedené výhody a nevýhody nelze brát jako teze, vhodnou skladbou sendviče pro konkrétní užití je lze eliminovat. [1]

2 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY

Následující kapitola je věnována jak materiálům krycích vnějších vrstev, tak materiálům používaným pro jádra. Zmíněny jsou i některé základní kovové materiály používané pro sendvičové struktury pro srovnání vlastností s kompozitními. Sendvičové panely používané pro nejrůznější aplikace musí dosáhnout vlastností jiných zavedených materiálů, aby získaly na trhu své místo. Z toho plyne, že jejich konstrukce musí zajistit co nejlépe všechny konstrukční požadavky, včetně mechanických vlastností, trvanlivosti, estetiky jakožto i účinnosti výroby a hospodárnosti. [1]

Sendvičové panely jsou schopny tyto požadavky plnit díky správné úvaze při výběru materiálů pro jejich realizaci. Mezi výhody sendvičových struktur oproti ostatním materiálům na trhu je možnost užití různých prefabrikátů. Většina výrobců v Evropě soustředí své úsilí na panely s kovovými krycími vrstvami a jádrem z plastové pěny či minerální vaty. Kombinace různých materiálů jsou možné, ale vyžadují speciální výrobní metody. Typický sendvičový panel má třívrstvou strukturu viz Obr. 1 a Obr. 3. Tuhé vnější krycí vrstvy s relativně vysokým modulem pružnosti jsou uloženy okolo nízkohustotního jádra. Existují i vícevrstvé struktury obsahující více materiálů jader pro dosažení požadovaných vlastností. [1]



Obr. 3 - Rozdělení vrstev sendvičových struktur [1]

2.1 Kompozitní materiály pro konstrukci vnějších vrstev

Materiály pro konstrukci vnějších vrstev jsou obvykle tenké vysokopevnostní desky, které musí splňovat výrobní požadavky s ohledem na použitou technologii. Zároveň funkční požadavky jako třeba nepropustnost vody, páry a stálost při zvýšených teplotách a odpovídající mechanické vlastnosti. Každá aplikace vyžaduje určitou kombinaci těchto a mnohých dalších požadavků. Kovové komponenty krycích vrstev, stejně tak jako kompozitní, jsou vhodné pro jejich ekonomičnost, která je důsledkem možnosti navinout je do zásobníku. Tato schopnost usnadňuje začlenění do výrobního procesu na kontinuální lince. [1]

Kompozit je takový materiál, který tvoří více než jeden druh materiálu a jejich vzájemné působení vyvolává synergicky žádané vlastnosti. Nejčastěji máme zájem vytvořit velmi lehkou, korozi odolnou kompozitní strukturu, která bude poskytovat požadované mechanické vlastnosti. Z hlediska konstrukce je dělíme takto:

- Granulové
- Vlákenné
- Laminární [5]

2.1.1 Vlákenné kompozity

Vlákenné **mikrokompozity** obsahují vlákna o průměru 10 až 100 μm , ovšem mohou obsahovat vlákna o průměru pod 1 μm v podobě krátkých (diskontinuálních) nanovláken, díky čemuž se řadí mezi **nanokompozity**. Pevnost vláken je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Příčinou je malý příčný průřez vláken. V tenkých vláknech jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálu a také nebezpečnost povrchových vad je při velmi malých příčných rozměrech menší (tenká vlákna mají oproti stejně dlouhým vláknům větších průměrů významně menší povrch). Vady existují jen v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek a dutinek, které jsou přednostně orientovány (protaženy) v podélném směru vlákna. [6]

❖ Skelná vlákna

Jsou nejčastěji používaným kompozitním materiálem pro vnější vrstvy u sendvičové konstrukce. Skelné vlákno má dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči vnějším vlivům, ale jeho konkurenceschopnost pochází z relativně nízké ceny. Existuje několik

modifikací těchto vláken, jako příklad: E – electric, S – strength a C – corrosion. Rozdíl mezi nimi tvoří pro konstruktéry jejich rozdílné mechanické vlastnosti, ale vzhledem k tomu, že rozdíl v nich není nikterak zásadní a cenový rozdíl je značný, používají se nejvíce E-skleněná vlákna. Hlavní složkou skla je SiO_2 , cca 50-70%, ale často jsou přidány i jiné oxidy, jako Al_2O_3 , Fe_2O_3 a CaO . Hlavní nevýhodou skelných výztuží je, že modul pružnosti je poněkud malý a hustota je vyšší než u jiných kompozitních výztuh. Vybrané vlastnosti skelných vláken můžeme vidět v tabulce 1. [2]

Tab. 1 - Vlastnosti skelných vláken při 20°C [6]

	Sklo C	Sklo E	Sklo S
Průměr [μm]	10-13	5-16	9-13
Hustota [g/cm^3]	2.49	2.54	2.49
Modul pružnosti [GPa]	69	73	85.5
Pevnost v tahu [GPa]	až 3	2-4	až 4.6
Prodloužení [%]	4.8	1.8-3.2	5.7
Součinitel lineární teplotní roztažnosti $\alpha [10^{-6} 1/\text{K}]$	7.2	4.9	5.6
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda [\text{W}/\text{mK}]$	1	1	1
Teplota měknutí [°C]	750	800	970

❖ Aramidová vlákna

Tento typ vláknové výztuže je nejznámější pod obchodním názvem Kevlar® (výrobce Du Pont, PPTA). Dnes již existuje mnoho aramidových vláken od různých výrobců. Tento typ vlákna je vyroben z aromatického polyamidu s nízkou hustotou, vysokým modulem pružnosti a vysokou pevností. Přednosti aramidových vláken jsou vysoká odolnost proti opotřebení a žáruvzdornost. Obtížně se strojově zpracovávají díky jejich nesnadnému dělení. Je to vlákno s nejvyšší pevností vůči hmotnosti ze všech známých vláken, ale s mnohem horší pevností v tlaku. [2]

V tabulce (Tab. 2) uvedu některé vlastnosti aramidových vláken ve srovnání se standardním polyamidovým vláknem PA 66 (nylon). Obchodní název Nomex® náleží vláknům meta-aramidu, která mají horší mechanické vlastnosti než ostatní, ovšem cenově dostupná a také nehořlavá s odolností proti vysokým teplotám. HM-50 je kopolyamidové vlákno od společnosti Teijin. [6]

Tab. 2 - Vlastnosti vybraných aramidových vláken [6]

	Pevnost v tahu [MPa]	Modul E [GPa]	ϵ [%]	Hustota [g/cm ³]
HM-50	3100	80	4.2	1.39
Kevlar 29	3600	80	4	1.44
Kevlar 49	3600	130	2.5	1.44
Kevlar 149	3400	146	2	1.47
Kevlar 900	2800	65	4.3	1.44
Kevlar 930	3000	125	2	1.45
Nomex	700	17.3	22.4	1.4
Pa 66	900	5	13.5	1.14

❖ Uhlíková vlákna

Tyto tzv. karbonová vlákna jsou vyrobena z dlouhých uhlíkových molekulárních řetězců přinášejících velmi tuhá vlákna. Vyrábí se dva druhy vláken: HS-vysoko-pevnostní s relativně velkou schopností se deformovat (1-1,5%) a vlákna HM-high modulus - vlákna s vysokou tuhostí. Zejména HM vlákna našly velké uplatnění v leteckých aplikacích, kde je použití lehkých materiálů s vysokou tuhostí zásadní. Uhlíková vlákna mají nízký koeficient tepelné roztažnosti. Nevýhodou je vysoká cena a křehkost. [2]

Uhlíková vlákna se dnes vyrábějí převážně z vláken polyakrylonitrilových (PAN) a nejnověji z vláken novoloidu – vláken fenol-aldehydových. [6]

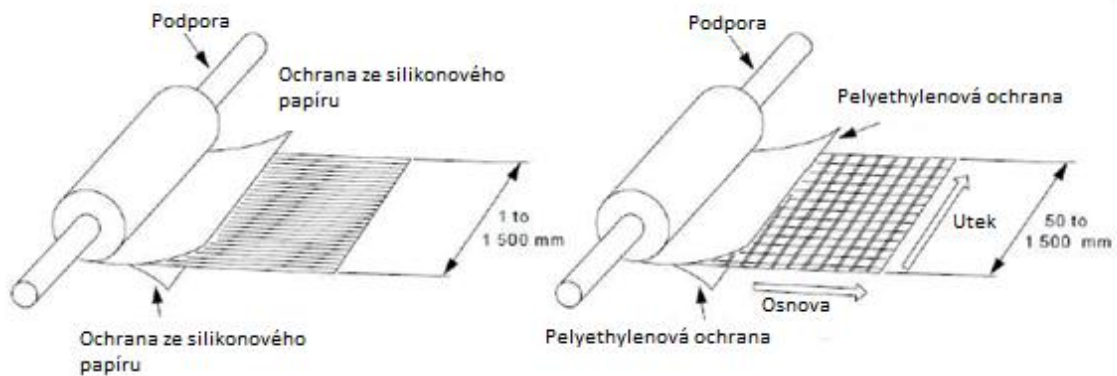
Tab. 3 - Vlastností uhlíkových vláken na bázi polymerních prekurzorů [6]

	Novoloid - Kynol	PAN
Teplota zpracování [°C]	800-2000	1500-2000
Hustota [g/cm ³]	1.4-1.5	1.8-2.0
Obsah uhlíku [hm. %]	95-99.8	93-99.5
Pevnost v tahu [MPa]	400-700	1500-3000
Poměrné prodloužení při přetržení [%]	1.5-3.0	1.0-0.5
Modul pružnosti [Gpa]	150-300	150-300

2.1.2 Prepregy

Prepreg je předimpregnovaná tkanina, která má výrobcem dané parametry ke zpracování. Podle orientace vláken je rozdělujeme na jednosměrné a vícesměrné.

Hlavní výhodou prepregů je přesně daný podíl vláken a pryskyřice. Pochopitelně je samotná využitelnost tohoto způsobu výroby laminovaných výrobků omezena cenou materiálu a požadavky na uskladnění. Uskladnění prepregů je řešeno v mrazničkách při teplotách okolo -20°C , které zabraňují předčasnému vytvrzení. Prepregy se prodávají ve formě rolí o určité šířce, z které výrobce stanovuje nástřihový plán. Úkolem nástřihového plánu je samozřejmě minimalizovat možný odpad, jeho objem přesto zůstává značný. Obr. 4 ukazuje výrobu jednosměrného a dvojsměrně orientovaného prepregu. [5]



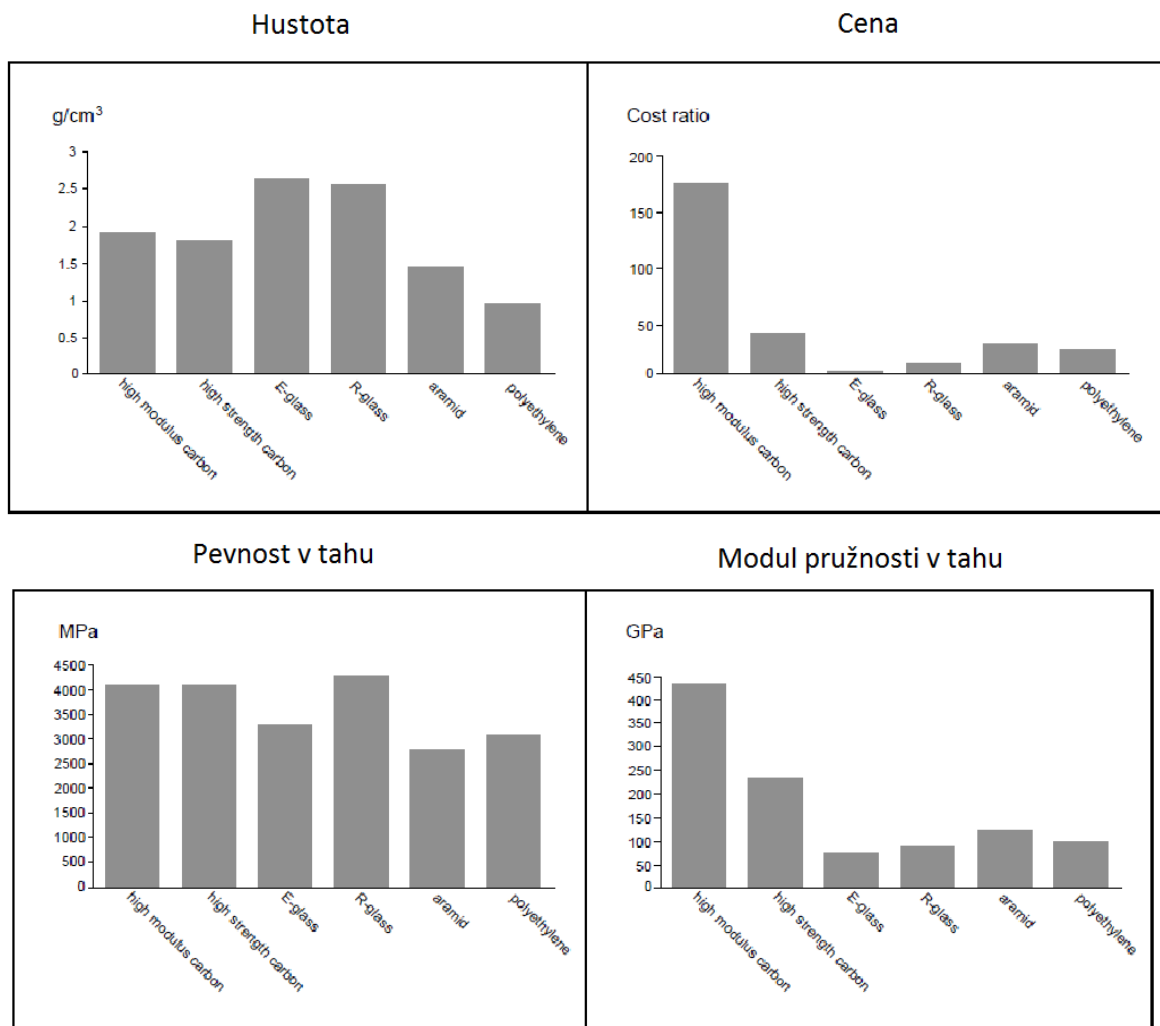
Obr. 4 - Jednosměrně a dvojsměrně orientovaný prepreg [5]

❖ Výztuže u prepregů

Výztuž přenáší zejména tahové napětí a z větší části určuje mechanické vlastnosti prepregu jako je jeho celková pevnost a houževnatost. Použité výztuže taktéž částečně charakterizují výslednou tepelnou a elektrickou vodivost. Na výsledné mechanické vlastnosti má vliv volba směru vláken v matrici. Ty se mohou vyskytovat v následujících formách:

- Tkaniny
- Pásky
- Rovingové svazky [5]

Materiály pro použití jsou vlákna aramidu, karbonu, skla a polyetyleny. Následující grafy (Obr. 5) zobrazují porovnání některých parametrů zohledňovaných při výběru vhodného materiálu.



Obr. 5 - Srovnání vlastností používaných výztuží [5]

❖ Matrice

Role matrice u prepregů je především ve fixaci (zajištění jejich vzájemné orientace) a přenosu napětí na vlákna. Matrice také zajišťuje ochranu vláken před účinkem prostředí a určuje maximální provozní teplotu prepregů. Právě provozní teplota výrobku je důležitým parametrem pro volbu prepregové matrice. Vlastnosti používaných matic jsou popsány v následující tabulce.

Tab. 4 - Vlastnosti matric

Epoxidová (EPOXY)	<ul style="list-style-type: none"> • Vynikající mechanické vlastnosti • Vysoká houževnatost • Snadné zpracování
Fenolická (PHENOLIC)	<ul style="list-style-type: none"> • Vynikající odolnost vůči hoření • Odolnost vůči vysokým teplotám • Nízká toxicita zplodin • Levná výroba
Bismalitická (Bismaleimide)	<ul style="list-style-type: none"> • Vynikající provozní odolnost vůči vysokým teplotám (až 260°C) • Dobré mechanické vlastnosti • Dobrá odolnost vůči působení chemikálií, ohně a radiačního záření

2.1.3 Ostatní nekovové materiály

Dřevotřísku a jiné druhy stavebních desek lze také použít jako materiál pro krycí vnější vrstvy sendvičové konstrukce. Obecný problém těchto desek je, že jsou vyrobeny v délkách, které málokdy překročí 3.5 m a nejsou tedy příliš vhodné pro použití v kontinuální výrobní lince. Sendvičové konstrukce s krycími vrstvami z překližky můžeme použít všude tam, kde se nevyskytují žádné větší změny vlhkosti. Ostatní stavení materiály, které mohou být využity pro výrobu sendvičových konstrukcí, jsou sádkartonové desky, sádkartonové desky vyztužené vlákny, desky na cementové bázi a plastové desky. [1]

➤ Překližka

Překližka se skládá z dřevěných vrstev, které byly spojeny dohromady tak, že se na dřevěnou vrstvu kladou kolmo další vrstvy, a vnější vrstvy jsou rovnoběžné se směrem namáhání. Tloušťka vrstev je 1.5 – 2.8 mm v závislosti na použitém dřevu a celková tloušťka dosahuje hodnoty 4 – 28 mm. Hustota se pohybuje okolo 600 kg/m³. Tab. 5 uvádí některé orientační hodnoty mechanických vlastností překližky v suchých podmínkách. [1]

Tab. 5 - Mechanické vlastnosti překližky za suchých podmínek [1]

	Bříza	Smrk
Pevnost v ohybu [MPa]	80	35
Pevnost v tlaku [MPa]	60	35
Pevnost v tahu [MPa]	70	30
Modul pružnosti [MPa]	15 000	11 000

Dřevotříska

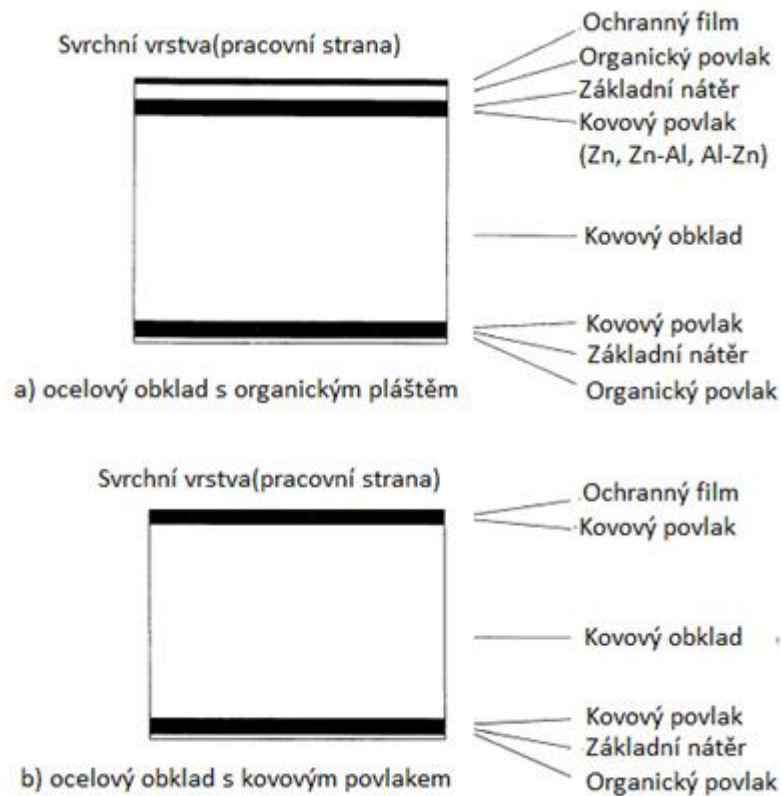
Dřevotřískové desky jsou vyrobeny z dřevěných třísek tloušťky 0.2 – 0.4 mm, které jsou spojeny za působení vysokého tlaku a teploty. Obsah lepidla je přibližně 10 % hmotnosti. Lepidlo může být použito i u cementových desek. Ty se vyrábí v tloušťkách 2 – 25 mm s hustotou okolo 700 kg/m³. Tab. 6 uvádí vlastnosti dřevotřískových desek za suchých podmínek. [1]

Tab. 6 - Mechanické vlastnosti dřevotřísky za sucha [1]

	Dřevotříska
Pevnost v ohybu [MPa]	7-8.5
Pevnost v tlaku [MPa]	4.0-5.0
Pevnost v tahu [MPa]	3.0-4.0
Modul pružnosti [MPa]	1200-1900

2.2 Kovové materiály

Tenké ocelové plechy jsou jedny z nejčastěji používaných materiálů na vnější vrstvy sendvičových struktur. Obecně lze říci, že se vnější ocelové vrstvy se používají pouze s jistou organickou povrchovou vrstvou nebo jinou ochranou proti korozi. Obr. 5 ukazuje dvě varianty nátěrů. První obrázek Obr. 6a zobrazuje organický nátěr povrchu, druhý Obr. 6b zobrazuje ocelovou vnější krycí vrstvu s povrchovou vrstvou korozivzdorného kovu nebo kombinaci korozivzdorných kovů (zinek, aluminium a jejich kombinace). Vrstvy zinku obecně neposkytují dostatečnou ochranu a nejsou esteticky vzhledné. Bývají proto přidávány svrchní organické nátěry (povlaky), které chrání povrch více proti mechanickému a chemickému opotřebení. Obě strany ocelového plechu jsou obvykle potaženy základním nátěrem (5 - 10μm), který poskytuje dobrou vazbu s kovovými vrstvami, viz Obr. 6a. Další organické povlaky jsou obvykle aplikovány ihned po základním nátěru.[1]



Obr. 6 - Ocelové povrchy s různými typy ochrany [1]

Organický povlak je nanášen následně na základový v tloušťce 7-15 μm s tím, že na nepracovní straně je vrstva menší. Na pracovní straně může být ještě další nátěr nebo vrstvy jiného materiálu. Obr. 6b ukazuje alternativní případ, kdy se kovový povlak považuje za dostatečně korozivzdorný. Vrstva nátěru se pak objevuje na rubové straně díky lepším adhezivním vlastnostem, tedy lepšímu spojení s jádrem. Všechny povlaky (nástříky) se vyrábějí za řízených podmínek v ocelárnách nebo speciálních lakovnách, a pokud jde o vrstvu zinku a hliníku, tak jsou dostatečně odolné pro tvářeni zastudena. Krycí vrstva z pozinkované oceli se používá ve vnitřních prostorech. [1]

Pozinkované oceli dané normou EN 10142 (ocel s nízkým obsahem uhlíku) a EN 10147 (konstrukční ocel) jsou označovány jako základní krycí materiál určený pro povrchy vystavené povětrnostním vlivům. Standarty EN 10214 a EN 10215 jsou vhodné pro použití různých kovových povlaků. Ocel používaná v praxi na krycí vrstvy má obvykle tloušťku 0.5 až 1.5 mm. Doporučená minimální tloušťka je 0,3mm na vnitřní straně a 0.5 mm na vnější straně. [1]

➤ Hliníkové plechy

Sendvičové panely s vnějšími krycími vrstvami z hliníkového plechu jsou někdy používány v aplikacích, které mají zvláštní požadavky na odolnost proti korozi nebo hygieny, například při výrobě a skladování potravin. Materiál má obvykle tloušťku v rozmezí 0.7 – 1.2 mm. Výjimečně je použit plech tloušťky 0.5 mm, ale hrozí vyšší pravděpodobnost porušení při manipulaci. Doporučené (legované) slitiny jsou AlMn, AlMg, AlMnMg. Takové materiály mají pevnost v tahu v rozmezí 200-250 MPa s mezí kluzu těsně pod 200 MPa Tab. 8 uvádí některé mechanické vlastnosti podle normy EN 485-2. [1]

Tab. 7 - Základní vlastnosti hliníku dle normy EN 485-2 [1]

Hliníková slitina	Mez kluzu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]
EN AW 3004 [AlMn1Mg1] H14	180	220
EN AW 3005 [AlMn1Mg0.5] H16	175	195
EN AW 5005A [AlMg1] H18	165	185
*H označuje tepelnou úpravu		

Mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi jsou značně závislé na chemickém složení. Tvrdší slitiny mohou mít velmi omezené možnosti pro tváření za studena. Modul pružnosti hliníkových slitin je přibližně o dvě třetiny menší než modul pružnosti u ocelí, což je okolo 70 kN/mm². Hustota má také zhruba třetinovou hodnotu. Naopak koeficient tepelné roztažnosti je téměř dvojnásobný oproti oceli, tj. $23 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. [1]

Bez nanesení nátěru hladké hliníkové povrchy začnou oxidovat ve velice krátké době. Nicméně vrstva vytvořených oxidů je odolná vůči povětrnostním vlivům a vlhkosti. Pokud se ovšem očekává vystavení agresivnímu prostředí, je doporučeno chránit hliníkový povrch ochranným povlakem. Slitiny AlMn mají obecně dobrou všeobecnou odolnost. Slitiny AlMg mají dobrou odolnost v pobřežních oblastech. Je proto důležitý pečlivý výběr hliníkové slitiny podle místa, kde se bude používat. Stejně jako v případě prosté pozinkované oceli je i u hladkého hliníkového plechu problém s adhezí při lepení k jádru. [1]

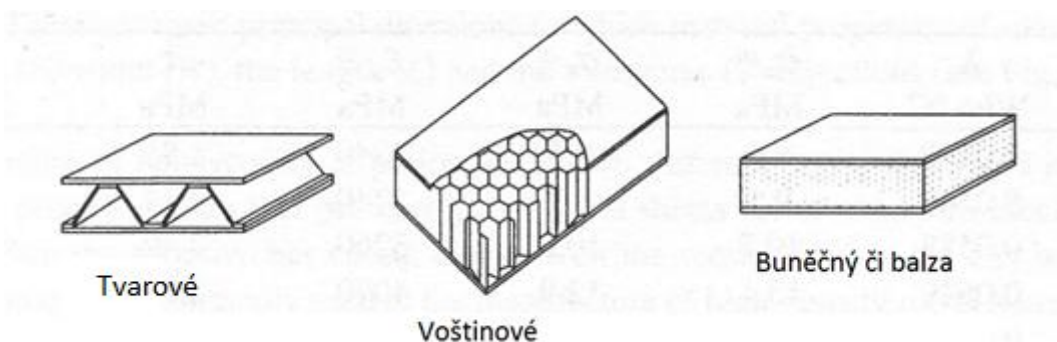
Pro zajištění kvalitního spojení hliníkového plechu a jádra je dobré použít vrstvu nátěru na zadní straně plechu. Při použití jiné metody, povrchové úpravy, je potřeba věnovat náležitou pozornost při testech adhezivním vlastnostem a trvanlivosti takového spojení. Hliníkové vnější krycí vrstvy jsou obvykle ošetřeny stejným organickým

povlakem, jako je použito při potahování ocelových pásů (viz EN 1396). Spíše je tak učiněno z estetických důvodů než z důvodu odolnosti proti korozi. V tomto případě je materiál potažen stejně jako u oceli. [1]

2.3 Materiály jádra

Jádra používaná v nosné sendvičové konstrukci lze dle materiálu rozdělit do čtyř hlavních skupin a to na tvarové, voštinové, balzové či korkové a pěnové viz Obr. 7. Jádra jsou nejčastěji vyrobená z nízko-hustotních látek. I když příčné síly vyvolávají normálové napětí, jsou obvykle velmi malé v jádru. Malý místní pokles v tloušťce jádra by totiž způsobil velké snížení tuhosti. Modul pružnosti kolmo k povrchu by měl být vysoký, protože jádro je vystaveno především stříhovým a smykovým napětím, které způsobí globální deformace. Proto musí být jádro zvoleno tak, aby neselhalo pod zatížením v příčném směru. Další vlastnosti sendvičové konstrukce, jako akustická izolace, závisí hlavně na materiálu použitého v jádru a jeho šířce. Vlastnosti důležité pro jádro lze shrnout jako:

- Hustota
- Modul pružnosti v tahu
- Modul smyku
- Tuhost kolmo k povrchu
- Teplotní izolace
- Akustická izolace [2]

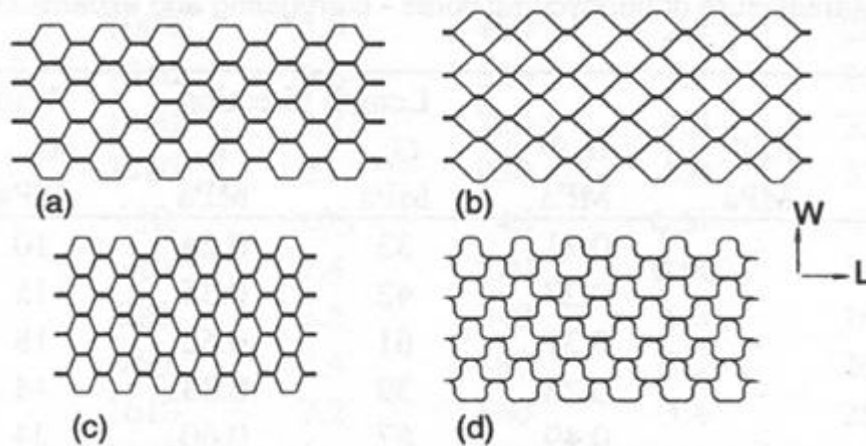


Obr. 7 - Hlavní skupiny materiálů jader [2]

2.3.1 Voštinové materiály:

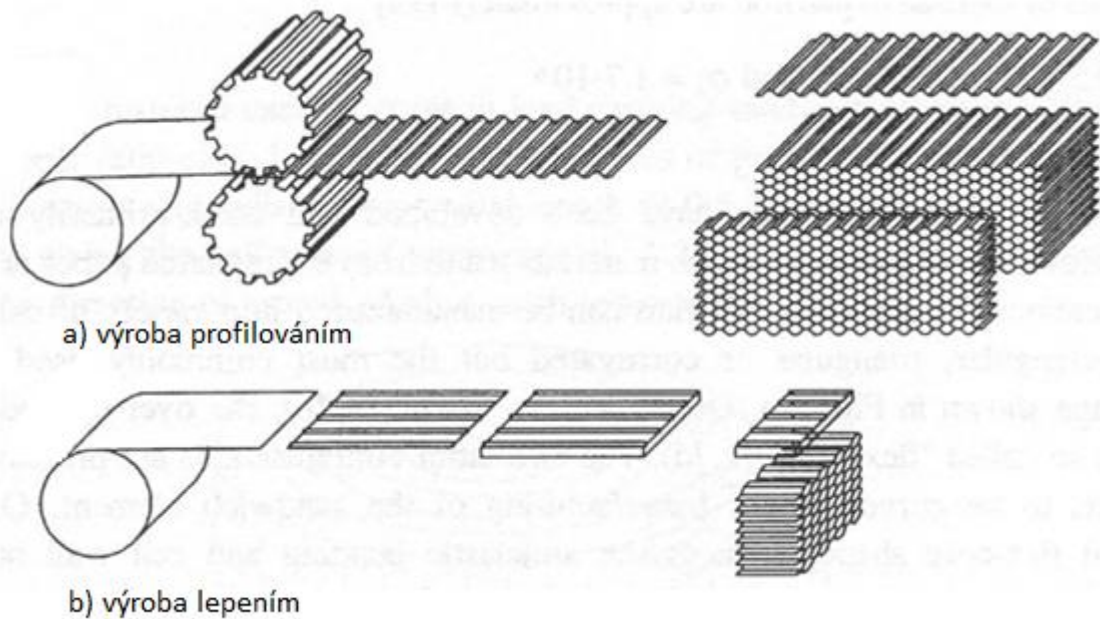
Základní materiály voštinového typu byly vyvinuty a používány především při leteckých nebo kosmických aplikacích. Ale levné voštinové materiály z impregnovaného papíru lze použít také při stavebních aplikacích. Voštinové materiály mohou být vyrobeny

v různých tvarech buněk, jako jsou čtvercové, trojúhelníkové, obdélníkové, avšak nejčastěji je použit tvar pravidelného šestiúhelníku znázorněného na Obr. 8a, Obr. 8b náleží čtvercovému typu, Obr. 8c rozšířenému šestihranu a Obr. 8d takzvanému „flex core“. Dvě posledně jmenované konfigurace se používají především pro zahnuté sendvičové konstrukce, přičemž k zakřivení musí dojít při výrobě. [2]



Obr. 8 - Běžně užívané druhy buněk voštinových (tzv. honeycomb) jader

Nejčastěji používané voštiny jsou vyrobeny z hliníku, impregnovaných skelných vláken či aramidu. Běžně používané voštinové materiály jsou vlastnostmi velmi vzdáleny těm používaným v leteckém průmyslu. Výroba voštin se provádí dvěma různými způsoby, na které odkazuje následující obrázek Obr. 9. První způsob (a) zahrnuje lepení či svařování vlnitých plechů na sebe. Tento proces se běžně používá při výrobě s vysokou hustotou vzoru. Druhý způsob (b) zahrnuje skládání vrstev materiálu na sebe, přičemž tyto vrstvy mají na sobě nanesené proužky lepidla, na jehož nanesení závisí výsledný produkt či jsou svařeny v příslušných místech. Vznik voštiny je způsoben prostým roztažením (po zaschnutí lepidla či po svaření). [2]



Obr. 9 - Výroba voštinových jader[2]

Papírové voštiny jsou vyráběny z impregnovaného papíru s přidavkem pryskyřice kvůli vyšší tuhosti, pevnosti a voděodolnosti. Toto zaručuje levné, nicméně stále mechanicky kvalitní sendvičové jádro. Někteří výrobci používají papírovou voštinu společně s lehkým buněčným plastem (např. PUR) pro zlepšení termo-izolačních vlastností. [2]

Hliníkové voštiny se používají v leteckých aplikacích (avšak nejen v nich) již po několika desetiletí. Hliníkový materiál pro voštiny má povětšinou označení 5052, 5056 nebo 2024. Hliník 5056 má velmi dobré pevnostní vlastnosti. Hliník 2024 má pak velmi dobré vlastnosti, co se týče změn teplot. Hliník 5056 a 5052 mohou být použity do teploty 180°C, materiál 2024 až do 210°C. [2]

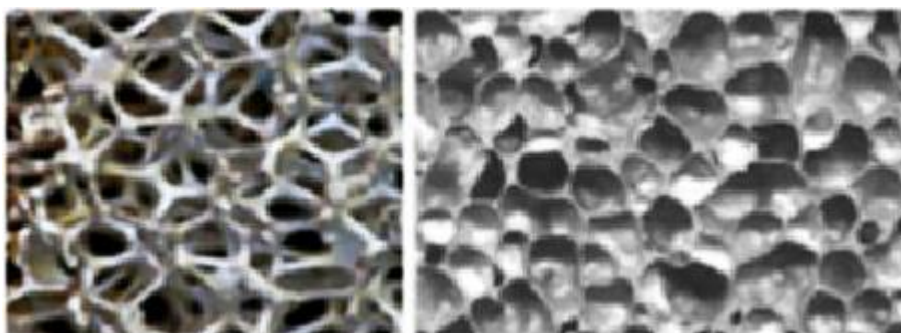
Nekovové voštiny, jako například z před-vyztužených plastových voštin, jsou vyráběny pouze pomocí prepregů. Různé typy voštin jsou k dispozici se skelným vláknem, aramidovým či karbonovým vláknem. Pro výrobu prepregů je obvykle použito fenolu, polyamidu či polyesteru. Fenolicky impregnované typy mají obvykle pracovní teplotu až do 180°C, polyamidové až do 250°C a polyesterové pouze do 80°C. [2]

Voštiny mají vynikající mechanické vlastnosti, vysokou tuhost kolmo k povrchu a nejlepší smykovou tuhost a pevnost v závislosti na hmotnosti. Hlavní nevýhody jsou nákladná výroba a složitá manipulace. [2]

2.3.2 Plastové pěny

Relativně nedávno bylo vyvinuto využití vysoce hustotní a vysoce kvalitní plastové pěny. Plastové pěny sice neposkytují stejnou tuhost a smykové vlastnosti vůči její váze jako voštiny, avšak mají i své výhody. Za prvé jsou tyto pěny obecně levné, ale nejdůležitější je jejich povrch, který má ideální adhezní vlastnosti, snadně se s ním pracuje a výroba sendvičových materiálů je s ním mnohem jednodušší. Kromě toho plastové pěny nabízí vysokou kvalitu tepelné izolace a akustického tlumení. Existují druhy pěn s různými výhodami a nevýhodami, některé z nich jsou stručně popsány níže. Na Obr. 10 je zobrazen rozdíl mezi pěnou s otevřenými a uzavřenými buňkami plastových pěn. [2]

Polymerní pěny se vytvářejí vakuovou expanzí, nebo vytlačováním taveniny polymeru do vakuové komory, ale také jednoduchým mícháním nebo tlakovým foukáním plynu do taveniny polymeru. Struktura polymerních pěn je tvořena buď uzavřenými, nebo otevřenými buňkami. [4]



Obr. 10 - Struktura s otevřenými a uzavřenými buňkami [4]

❖ Polyuretanové pěny (PUR)

Polymer vznikající polyadící diizokyanátů a dvoj nebo vícesytných alkoholů za vzniku uretanové vazby. Polyuretanové pěny se vyrábí v mnoha modifikacích od měkké až po tuhý typ. Hustota je díky těmto rozdílům ve velkém rozmezí, a to 30 – 500 kg/m³. Tyto pěny mohou být vyrobeny jako odolné proti požáru přidáním fosforu. Vzhledem k vysoké molekulové hmotnosti mají polyuretanové pěny nízkou tepelnou vodivost, což jim dává velmi dobré izolační vlastnosti. Polyuretanové pěny mají obecně nízkou tuhost a malou hodnotu protažení před přetržením.

Mechanické vlastnosti jsou horší než u ostatních pěn, nicméně PUR je pravděpodobně nejlevnější ze všech běžně dostupných. Proto je primární určení polyuretanové pěny pro

izolační účely nebo méně zatížené prvky. Základní vlastnosti polyuretanové pěny jsou vyobrazeny v tabulce Tab. 9. [2]

Tab. 8 - Základní vlastnosti PUR pěny [2]

Hustota [kg/m ³]	α [10 ⁻⁶ /°C]	λ [W/m°C]	T _{max} [°C]	σ - tah [MPa]	σ - tlak [MPa]
30	100	0.025	100	0.3	0.2
40	100	0.025	100	0.35	0.3
50	100	0.025	100	0.4	0.35

❖ Polystyrenové pěny (PS)

Pěnový polystyren je vyroben vytlačováním nebo expanzí v uzavřené formě. V obou případech je smíchán s nadouvadly, díky kterým pak expanduje za zvýšené teploty. PS má uzavřené buňky a je k dispozici v hustotách od 15 do 300 kg/m³. PS pěna má velmi dobré mechanické a tepelně izolační vlastnosti. Další výhodou je její finanční dostupnost. Nevýhodou pak citlivost na rozpouštědla, zejména styren. Proto nelze použít k lepení některá lepidla, ale doporučuje se spíše epoxid nebo polyuretan. [2]

Tab. 9 - Základní vlastnosti PS pěny [2]

Hustota [kg/m ³]	α [10 ⁻⁶ /°C]	λ [W/m°C]	T _{max} [°C]	σ - tah [MPa]	σ - tlak [MPa]
30	70	0.028	75	0.5	0.3
45	70	0.025	75	1.0	0.75
60	70	0.035	75	1.2	0.9

❖ Polyvinylchloridové pěny (PVC)

Polyvinylchloridová pěna existuje ve dvou různých formách, jedna čistě termoplastická taktéž nazývaná lineární PVC, druhá síťovaná s iso-kianátem. PVC má vysokou houževnatost, velmi dobré mechanické vlastnosti, ale změkne při vyšších teplotách. Síťovaný PVC je pevnější než lineární, má vyšší pevnost a tuhost, je méně citlivý na teplo, ale je křehký. Přesto má prodloužení v tahu až 10 %, které je podstatně vyšší než u jakékoli PUR pěny. PVC pěny jsou k dostání v hustotách od 30 do 400 kg/m³. Mechanické vlastnosti u PVC jsou mnohem lepší než u PUR a PS, ale také je dražší. Dále se možno také považovat materiál PVC za nehořlavý. PVC pěny jsou používány pro všechny druhy sendvičových aplikací od čistě izolačních po letecké. Teplotní odolnost je

však obvykle omezena na 100°C. PVC pěna má okolo 90% uzavřených buněk, takže není problém s použitím v prostředích, kde by jiné pěny mohly mít problém s vlhkostí. [2]

❖ Polymetakrylimidová pěna (PMI)

Je v mechanických vlastnostech velmi dobrá, z komerčně dostupných snad nejlepší z celulárních pěn, na druhou stranu je také nejdražší. PMI je poměrně křehké s konečným protažením přibližně 3 % v tahu. Hlavní výhodou je tepelná odolnost. Při použití PMI s epoxidovými prepregy je možno strukturu vystavit teplotě 180°C. Buněčná struktura je velmi jemná s uzavřenými buňkami a hustotou od 30 do 300 kg/m³. [2]

2.3.3 Balzové dřevo

Balza byl první materiál použitý pro výplň v nosných sendvičových konstrukcích. Balza je dřevo s vysokým poměrem stran uzavřené buněčné struktury. Vlákna nebo zrna jsou orientovány ve směru růstu (axiální) produkující buňky s typickou délkou 0.5 – 1 mm a průměru asi 0.05 mm, což dává poměr 1:25. Vlastnosti balzy jsou proto velmi dobré v axiálním směru, avšak mnohem nižší v ostatních. Balza existuje v různých kvalitách s hustotou v rozmezí 100 – 300 kg/m³. Balza je velmi citlivá na vlhkost, s jejímž přibýváním klesají její vlastnosti. Mechanické vlastnosti jsou lepší než u většiny lehčených plastů. Obr. 11 zobrazuje opracované balzové desky připravené k výrobě. [2]



Obr. 11 - Desky balzového dřeva

2.3.4 Korek

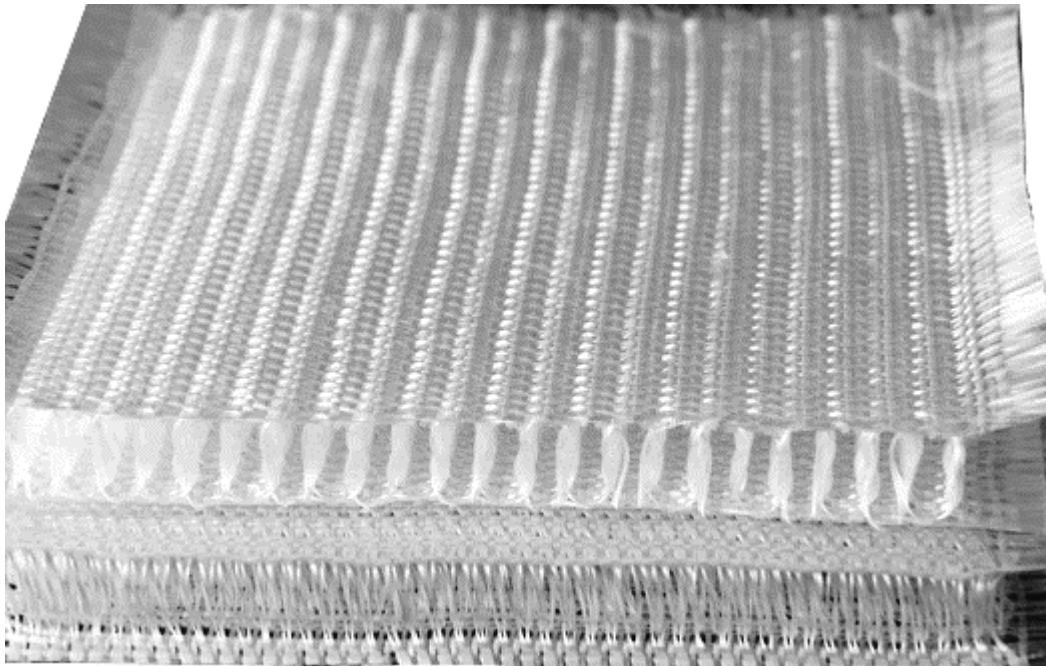
Vlastnosti korku vyplívají přirozeně z jeho struktury a chemického složení jeho buněčných membrán. Každý centimetr krychlový obsahuje až 40 milionů buněk a je z 90 % tvořen plynnou látkou, což má za následek hustotu 500 kg/m^3 . Sendvičové konstrukce s korkovým jádrem dobře izolují teplo a odolávají teplotám do 120°C . Pevnost v tahu se pohybuje v rozmezí $0.5 - 4 \text{ MPa}$, pevnost v tlaku $1 - 26 \text{ MPa}$.



Obr. 12 - Korek

2.3.5 3D Tkaniny

Tyto tkaniny se vyrábějí pouze se skleněnými vlákny (Obr. 11) pro pryskyřice. Dodávají se ve stlačeném stavu, s vlákny fixovanými pojivem rozpustným v pryskyřici. Po styku s rozpouštědlem pryskyřice (obvykle monomerní styren) dojde k expanzi tkaniny ve směru kolmém k jejímu povrchu. Distanční tkaniny jsou výrazně levnější než voštiny, umožňují snadnou výrobu tenkých profilů s proměnnou tloušťkou na rozdíl od voštiny z hliníkové fólie nebo z aromatického polyamidu (Kevlar) ve fenolformaldehydové matrici, které se do potřebného tvaru obrábějí na frézce s vysokými otáčkami speciálním jednobřitým nástrojem. Pásky distanční tkaniny se uplatňují např. při výrobě navíjených nádrží pro ekologicky nebezpečné látky. Uvnitř distanční tkaniny mohou být instalována čidla, která při úniku obsahu do meziprostoru varují obsluhu. [4]



Obr. 13 - 3D tkanina

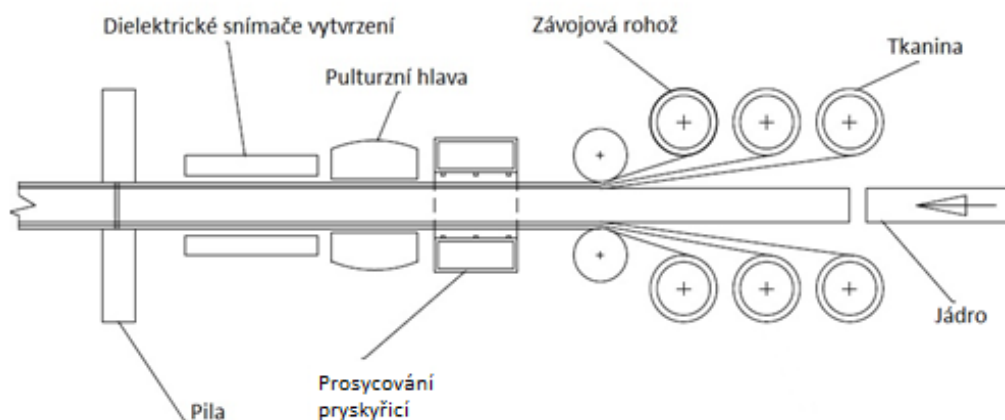
3 ZPŮSOBY VÝROBY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Pro kompozitní sendvičové struktury jako celek existuje mnoho možností, jak ovlivnit výsledné vlastnosti výrobku, 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 za velmi podstatný faktor, který v zásadě určuje nejen jeho konečné vlastnosti, ale i ekonomiku výroby. V této kapitole bude popsáno několik z mnoha používaných výrobních technologií pro výrobu laminátových a kompozitních sendvičových struktur. 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 [12]

3.1 Pultruze

Při klasické pultruzi je výztuž ve formě tkaniny kontinuálně impregnována tekutou epoxidovou nebo fenolickou pryskyřicí a vtahována do tvarovací a vytvrzovací hlavy. V ohřívané části vytvrzovací hlavy, kde probíhá mikrovlnný ohřev pryskyřice pro skleněná vlákna nebo indukční ohřev pro uhlíková vlákna, je pryskyřice vytvrzena a hotový profil je odtahován housenkovými pásy nebo dvojicí střídavě popojíždějících vozíků a řezán na potřebnou délku. Výroba pulturzí je vhodná pouze pro uzavřenou strukturu jader tzn., že pryskyřice nesmí prostoupit jádrem. Voštiny a pěny s otevřenou strukturou jsou tedy nevhodné. Výrobní linka má obvykle horizontální uspořádání jejích prvků. [4]



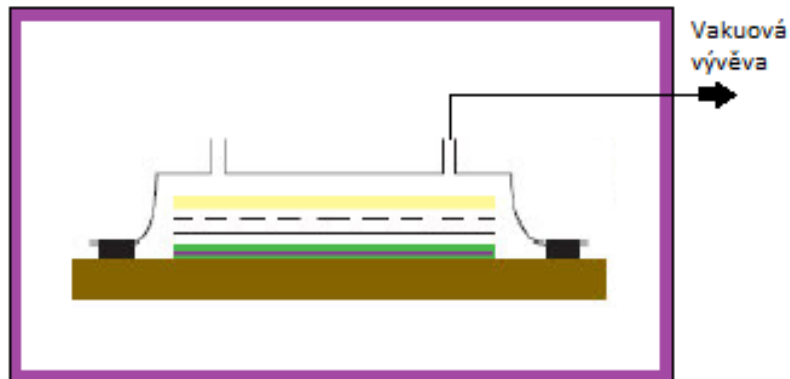
Obr. 14 - Technologie pultruze

Výhody patrné již z Obr. 14 jsou rychlost, respektive kontinuálnost výroby a kontrolovaný obsah dávkované pryskyřice. Dále pak jsou to velmi dobré konstrukční vlastnosti a velký obsah výztuže. Jako zápory této metody bychom mohli brát omezení na konstantní průřez součásti a neekonomické vyhřívání matrice. [4]

3.2 Vytvrzování v autoklávu

Jedná se o nejnákladnější a nejsložitější technologii pro sériovou výrobu velkorozměrných konstrukcí, vyobrazenou na Obr. 15. Výchozím materiálem jsou vždy prepregy, vyžadující vytvrzování za zvýšených teplot. Skladba vrstev je prakticky stejná jako při vakuování pod pružnou membránou, kdy se forma pokrytá pružnou folií nebo plachetkou se umístí do vyhřívaného autoklávu, provede se nejprve evakuace podtlakem cca 0.8 bar a pak se v autoklávu vytvoří přetlak cca 6 bar. Obsah výztuže se pak pohybuje přes 60 %. Poté, co se autokláv vyhřeje na požadovanou teplotu (120 - 200°C) začne se pryskyřice

vytvrzovat. Vyvozením přetlaku v autoklávu se ještě lépe přitlačí vrstvy prepregu k sobě, čímž je zaručen minimální obsah pryskyřice. [4]

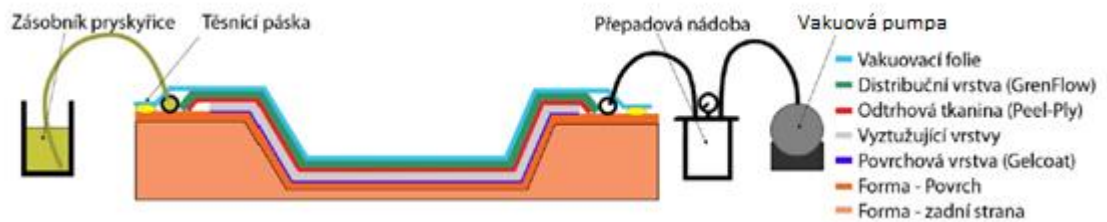


Obr. 15 - Autokláv [4]

Výhodou při použití autoklávu je vysoký obsah výztuže a možnost přesně stanovit obsah potřebné pryskyřice (stanoveno výrobcem). Náklady na tkaninu jsou minimalizovány použitím jednosměrných tkanin. Tato technologie je také šetrná ke zdraví díky odsávání par z procesu. Negativy jsou vyšší náklady na materiály, potřeba údržby autoklávu, pomalý provoz a omezená velikost výrobku. Sendvičové materiály pro použití tohoto výrobního postupu musí odolávat vysokým teplotám a tlakům. [4]

3.3 Vakuová infúze

Vakuová infúze pod pružnou fólií je technologie, která využívá podtlaku k nasátí pryskyřice, čímž dojde k prosycení suchých vrstev kompozitní (sendvičové) struktury. Jde v podstatě o vylepšení technologie ručního laminování. Materiály kompozitní struktury jsou do formy vkládány suché. Následně jsou vloženy pomocné materiály pro tok matrice (pryskyřice) a vytvoření vakua. K použití vakuové infuze musí být splněna vzhledem k jádru podmínka uzavřené struktury. [4]

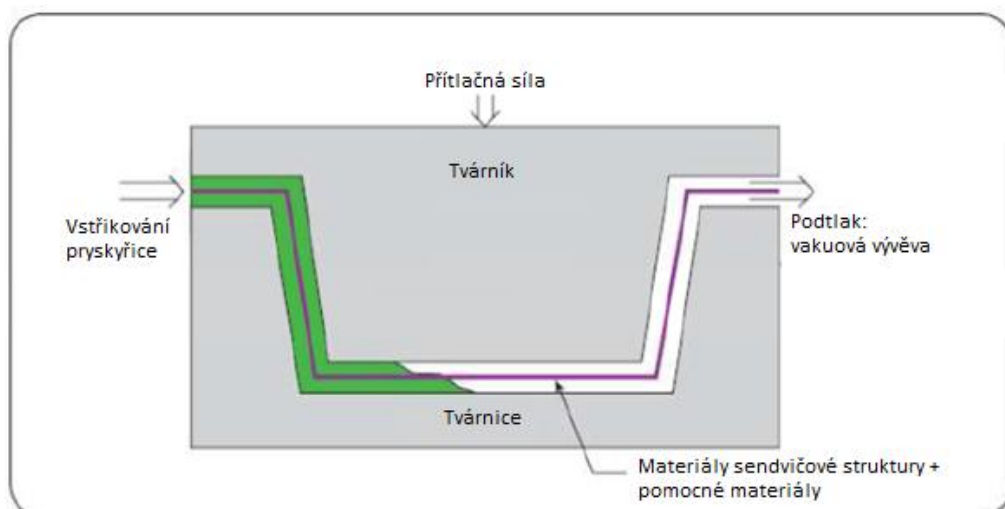


Obr. 16 - Schéma vakuové infúze pod pružnou fólií [4]

Výhodou výroby sendvičových struktur pomocí vakuové infúze je oproti standardnímu laminování vyšší podíl výtzuže. Dále pak nižší hmotnost, lepší mechanické vlastnosti a díky uzavření pod fólií i ochrana zdraví před výpary. Díky použití podpurných materiálů, které jsou vyobrazeny na Obr. 16 se zvyšuje cena výsledného výrobku. Kladení materiálu do formy klade vysoké nároky na zkušenost obsluhy. Vakuová infúze není vhodná pro voštinové jádrové materiály. [4]

3.4 RTM – resin transfer moulding

Metoda RTM je založena na transferu pryskyřice do uzavíratelné formy. Oproti ostatním metodám poskytuje vyšší produktivitu práce. Uplatňuje se zejména u sérií o velikosti 300-5000 kusů. Povrchové vlastnosti výrobku jsou závislé na kvalitě opracování formy tak jako při vstřikování plastů, což se zvláště u lesklých povrchů negativně projeví na ceně. Možnost využití této technologie je omezena zejména nutností následného odformování výrobku. Obr. 17 představuje schéma této technologie, která je z důvodů zatékání do voštin a pěn s otevřenou strukturou nevhodná pro tento typ jader. [4]



Obr. 17 - Schéma technologie RTM [4]

4 ZÁKLADNÍ DEFINICE ADHEZE

Adhezi lze definovat jako sílu přilnavosti, tj. mezimolekulární přitažlivé chemické a fyzikální síly na styčných plochách v nerovnostech a pórech spojovaných materiálů, které společně označují jako síly Van der Waalsovy. Van der Waalsovy síly jsou velmi slabé přitažlivé síly, které působí mezi nepolárními molekulami a jsou důsledkem vzniku okamžitého elektrického dipólu. Dosah těchto mezimolekulárních sil je v podstatě nižší než hloubka drsnosti mechanicky opracovaných ploch. Je tedy nutné, aby lepidlo vniklo do těchto povrchových nerovností a smáčelo dokonale obě plochy. [9]

Přitažlivá adheze je závislá na dobré snášivosti lepeného pevného povrchu tekutým lepidlem. Snášivost lepeného povrchu tekutým lepidlem s okrajovým úhlem, který svírá okraj kapky lepidla se základním materiálem a tedy s povrchovou energií obou látek. [10]

Má-li lepidlo smáčet pevný povrch látky, musí být jeho povrchová energie menší, než je kritická povrchová energie lepené látky. Nejvyšší povrchovou energii z kapalin má voda. Jestliže voda bude smáčet povrch materiálu, lze z toho usoudit, že materiál bude smáčen i jinými kapalinami (lepidly). Snášivost lepených povrchů můžeme hodnotit kapkovou metodou. [9]

Koheze je teoreticky definována jako stav, ve kterém jsou částice jednoduché látky drženy pohromadě valenčními a mezimolekulárními silami (van der Waalsovo přitahování). [9]

Látky s tekutými krystaly se vyznačují vysokým stupněm strukturního uspořádání. Epoxidové pryskyřice s tekutými krystaly, jestliže se v tomto stavu vytvrzují (fotochemicky), vykazují zřetelně vyšší kohezní a adhezní pevnost spoje ve srovnání s izotropní strukturou. Za předpokladu, že je to spojeno s vyšším stupněm uspořádání molekul v blízkosti rozhraní mezi spojovaným dílcem a lepidlem, mohlo by to vést k novému rozvoji výzkumu v oblasti adheze. [9]

4.1 Požadavky na lepený spoj

❖ Příprava povrchu

Kovové a kompozitní povrchy vnějších krycích vrstev by měly být připraveny stejným způsobem, jako by byly lepeny navzájem k sobě. To obvykle zahrnuje mechanické či chemické čištění. Jádra by měla být také očištěna, zbavena všech mastnot a jiných povrchových nečistot, které mohou mít vliv na vzniklou vazbu. Čištění pěn a balzy je poněkud obtížnější od kovových voštin, na které stačí použít například trichlor. Pěny a balzu je lepší skladovat tak, aby se neznečistila. Prachové částice je nejjednodušší odstranit stlačeným vzduchem. Při řezání plastové pěny je třeba dbát na odpovídající nabroušení nástroje, aby nedocházelo k nadměrnému poškození buněk. Při špatném přípravě povrchu k lepení většinou případů dojde ke spojení, ale vlastnosti spoje budou zhoršeny. [2]

❖ Rozpouštědla

Některé materiály jádra jsou velmi citlivé na určitá rozpouštědla. Například polystyrenové pěny jsou citlivé na přítomnost styrenu, což znamená, že polyesterová a vinylesterová pryskyřice nelze použít jako lepidlo. Epoxidy a polyuretany jsou vhodné pro použití. [2]

❖ Vytvrzování

Uzavřený prostor mezi vnějšími krycími vrstvami a jádrem by mohl při vytvrzování a současném odpařování vézt k několika problémům:

- Vnitřní tlak se nehromadí v jednom místě a má za následek lokální defekt - delaminaci
- Tlak může způsobit poškození jádra
- Koroze mezi plochami z důvodu chemického působení par
- Materiál jádra se může pohybovat při vytvrzování [2]

❖ Tlak při lepení

Některé lepidla vyžadují zvýšený tlak při lepení, aby se zamezilo vzniku pórů během vytvrzování. V tomto případě je potřeba dbát na to, aby při samotném stlačení nebylo poškozeno jádro. [2]

❖ Viskozita lepidla

Při spojování vnější vrstvy s voštinovým jádrem musí mít lepidlo přesně danou viskozitu, aby nezaplňovalo buňky. Je vhodné, když lepidlo mírně do buňky zateče, aby se zvětšila plocha styku s voštinovým jádrem. Při spojení s balzovým nebo pěnovým jádrem musí být viskozita dostatečně malá, aby došlo ke správnému zatečení do povrchových vrstev jádra. Příliš nízká viskozita může vést k tomu, že bude lepidlo úplně vytlačeno díky tlaku z některých částí spoje. Je proto vhodné najít vždy určitý kompromis. [2]

❖ Tloušťka lepidla

Tloušťka lepidla musí být dostatečně velká, aby se zajistilo, že oba povrchy budou dostatečně pokryté lepicí vrstvou a nebudou na nich suchá místa. Každý typ jádra bude vyžadovat jinou tloušťku v závislosti na velikosti buněk, tvaru buněk a druhu lepidla. Materiálové listy výrobce obvykle poskytnou dostatečné informace. [2]

❖ Pevnost spoje

Lepený spoj musí být schopen přenášet navrhovaná zatížení, kterými jsou pevnost v tahu a smyku. I když vazba plní požadované mechanické vlastnosti, může předčasně selhat v důsledku únavy. Je proto nutné volit lepidlo v závislosti na pracovním prostředí. [2]

❖ Teplotní namáhání

Častou příčinou uvolňování vazby je působení teplotních změn. Je-li jedna vnější krycí vrstva zahřívána například slunečním zářením nebo jiným zdrojem tepla, bude se deformovat kvůli tepelné roztažnosti. Vzhledem k tomu, že jádra jsou povětšinou skvělé tepelné izolanty, bude gradient teplot mezi povrchy značný. To znamená, že se může vyvinout značné smykové napětí mezi jádrem a vnějšími krycími vrstvami, které může vést k rozlepení spoje. Aby se tomuto jevu zabránilo, je potřeba použít houževnaté lepidlo. [2]

❖ Houževnatost

Když se mluví o houževnatosti lepidla, máme na mysli jeho odolnost vůči šíření trhlin pod rázovou zátěží. Houževnatost spoje závisí na spoustě parametrů, jakou je příprava materiálu před lepením, samotném druhu spojovaných materiálů, velikosti buněk, tloušťce lepidla atd. Existují však na trhu tvrzené lepidla se zvýšenou odolností vůči nárazu. Často jsou to obyčejné pryskyřice s přídavkem elastomeru. [2]

❖ Smrštění

V reálných podmínkách dochází často ke smrštění lepidla během tvrdnutí. Zvláště polyesterové lepidla vykazují až sedmiprocentní zmenšení objemu při jeho vytvrzování. U některých materiálů jádra, zvláště u vysoko-hustotních pěn, může toto smrštění zvýšit povrchové smykové napětí spoje. Tím může dojít k významnému snížení pevnosti lepeného spoje. [2]

4.2 Lepidla a jejich vlastnosti

Existuje celá řada lepidel a bylo by velmi zdlouhavé zmínit všechny v rámci tohoto textu. Některé z nich jsou určeny pro speciální účely, např. PUR lepidla pro lepení nerezové oceli, tvrzený epoxid pro hliník při vysokých teplotách atd. Tento text proto odkazuje pouze k těm nejpoužívanějším. Volba lepidla vychází primárně z toho, aby zajistily požadované vlastnosti, tj. splnění mechanických požadavků a požadovanou vazbu mezi povrchy. Také musí být bráno v úvahu prostředí, ve kterém se bude spoj nacházet. Tyto požadavky jsou brány jako nejdůležitější pro volbu správného lepidla. [2]

❖ Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou pryskyřice s nízkou vytvrzovací teplotou, obvykle v rozhraní 20 – 90 °C, ale některé formy potřebují i vyšší teploty (120 – 220 °C). Mají výhodu použití bez potřeby použít rozpouštědla a vytvrzování probíhá bez tvorby těkavé složky. Absence rozpouštědel činí epoxidy vhodné pro téměř každý typ materiálu. Mají obecně dobré mechanické vlastnosti s pevností ve smyku v rozmezí 20 – 25 MPa při pokojové teplotě. Nevýhodou je, že můžou způsobit vážné zdravotní problémy. [2]

❖ **Modifikované epoxidy**

Tvrzené epoxidy vycházejí z klasických epoxidů, ale s použitím různých příměsí, například ze syntetického kaučuku pro zlepšení některých vlastností, jako třeba odolnost proti odlupování. [2]

❖ **Fenolické adheziva**

Fenolické adheziva mají vynikající pevnost a trvanlivost za zvýšených teplot, naopak nevýhodou je tvorba vodní páry při vytvrzování. Do fenolické pryskyřice jsou často přimíchávány modifikovány přidavkem syntetického kaučuku pro zlepšení její houževnatosti. [2]

❖ **Polyuretany**

Polyuretanová (PUR) lepidla jsou pravděpodobně nejpoužívanější lepidla pro sendvičové konstrukce. Jejich hlavní předností je poskytnutí skvělé vazby s většinou materiálů. Mohou být použita jako kapaliny nebo pasta v široké škále viskozit s dlouhou nebo krátkou dobou vytvrzování. Jsou také vodě a ohni odolné. Jsou také z uvedených nejšetrnější k životnímu prostředí a nejméně toxické. Vyskytují se jako jednosložkové a dvousložkové. Vytvrzování musí probíhat při zvýšeném tlaku. Zvýšení teploty výrazně urychlí vytvrzení, ale není bezpodmínečně potřebné. [2]

❖ **Uretanové akryláty**

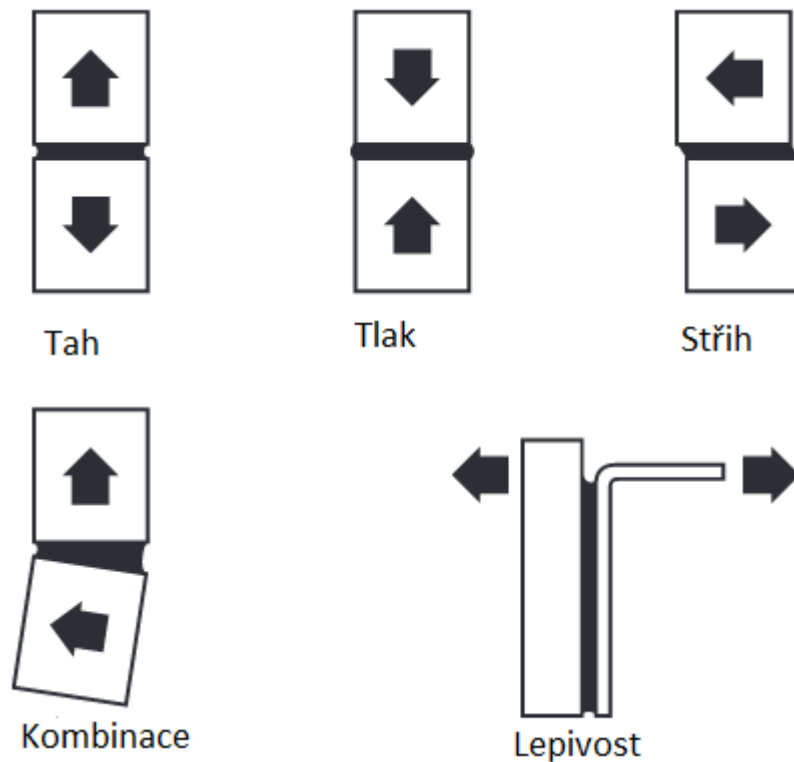
Uretanový akrylát je pryskyřice, která je kompatibilní s polyestery a vinylestery. Uretanové akryláty jsou velmi tvrdé a nevykazují smrštění při tuhnutí. Použití tohoto druhu adheziva zajistí výrazné zvýšení kvality spoje jádra s povrchovými deskami. [2]

❖ **Polyesterové a vinylesterové pryskyřice**

Jsou nejvíce používané materiály pro vyztužení plastových kompozitů mimo letecký průmysl. Problém těchto pryskyřic je vysoké smrštění při vytvrzení způsobující vysoké smykové napětí na povrchu jádra. [2]

5 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ ADHEZE SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

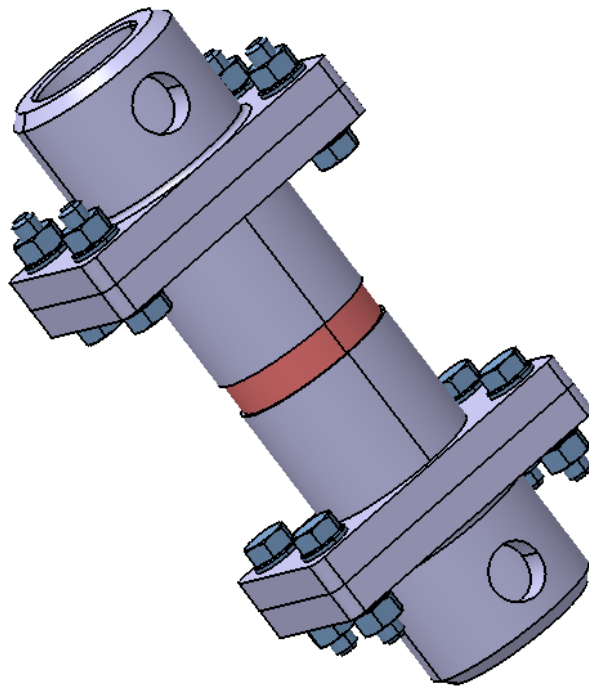
Jedním z nejdůležitějších požadavků pro sendvičové panely je, že přilnavost mezi vrstvami bude stálá a souvislá. Mechanické vlastnosti samotného panelu jsou plně závislé na této adhezivní vrstvě spojující jádro a krycí vnější vrstvu. V současnosti bohužel není dostupných mnoho informací o lepení různými druhy adheziv na různé povrchy a jejich povrchové úpravy. Kritéria pro tento lepený spoj jsou taková, že musí být natolik pevný, aby vydržel víc než jádro při pokusu je oddělit. Z toho vyplívá, že vazebné vlastnosti lepidla nejsou testována, protože jsou obvykle vyšší, než vazebné vlastnosti jádra. Základní principy mechanického testování adheze schematicky zobrazuje Obr. 18.[1]



Obr. 18 - Schéma základních testů [12]

5.1 Zkouška lepeného spoje plochým tahem (z ang. Flatwise tensile test)

Zkušební postup vyžaduje, aby dva proužky lícujícího materiálu se stejnou povrchovou úpravou, jako v praxi, byly spojeny dohromady s jádrem pomocí navrhovaného lepidla. Zkušební vzorek je poté zatížen tahem, který způsobí jeho porušení ve stříhové části, to znamená v místě jádra. [12]



Obr. 19 - Zkouška plochým tahem lepeného spoje

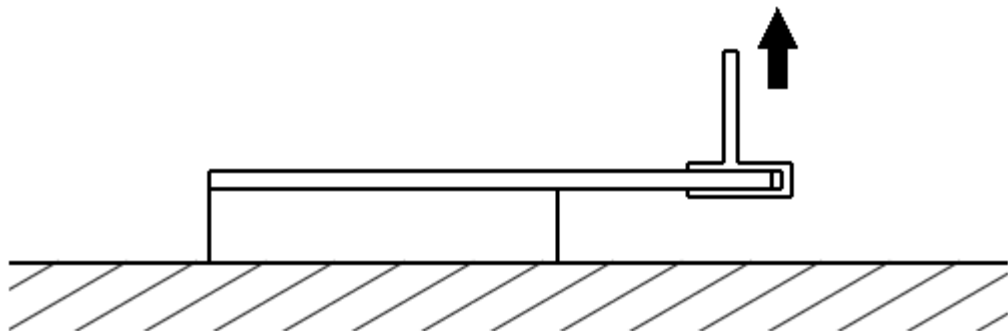
Zbývající vzorky můžeme nechat stárnout po dobu 24. hodin v lázni o teplotě 70°C a následně můžeme porovnat výsledky testů před a po této proceduře. Při testech kde lze naměřit přímo numerické hodnoty, jako smykový a peel test, by neměl být rozdíl před a po stárnutí více než 30 %. [1]

5.2 Zkouška odlupem konzolou v tahu: tzv. peel test

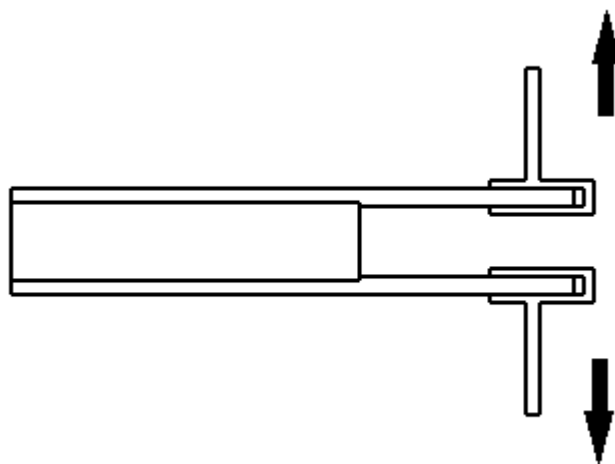
Peel test je jeden z mála způsobů, jak charakterizovat lepené spoje. Tento druh testu má rozmanité použití, nikoliv pouze u sendvičových struktur, ale také přilnavost lepicích pásek, zubních materiálů atd. Typické testy zahrnují oddělení dvou proužků materiálu spojeného adhezivem, nebo přímo oddělování jádra od krycí vrstvy sendvičové struktury. Peel testy jsou obvykle prováděny při konstantní rychlosti v různých úhlech, nejčastěji 90° a

180°. Výsledkem testu jsou parametry jako maximální síla před poškozením, průměrná pevnost při loupání atd.[12]

Na schematickém zobrazení Obr. 20 je zobrazen tzv. single cantilever beam test, který spočívá v tahu za jednu přesahující vnější vrstvu. Na schématu Obr. 21 je zobrazen test double cantilever beam, rozdíl mezi těmito testy je na první pohled patrný.



Obr. 20 - Schematické zobrazení SCB peel testu



Obr. 21 - Schematické zobrazení DCB peel testu

5.3 Zkouška odlupu pomocí navíjecího bubnu

Climbing drum peel test vychází vždy ze stejné předlohy zobrazené na Obr. 21. Doporučené rozměry vzorku jsou šířka 76mm a délka nejméně 305mm a přesahem jedné vnější vrstvy 25mm. Tloušťka jádra není důležitá, ale nesmí docházet při testu k jeho ohybu. [2]

Aparatura

Skládá se z bubnové příruby, flexibilních popruhů nebo kabelů a vhodných čelistí pro uchycení testovaného vzorku. Dále pak zkušební stroj, který je schopen zajistit konstantní rychlost průběhu testu a zaznamenat potřebné veličiny.

Výpočet průměrného krouticího momentu potřebného k odloupení:

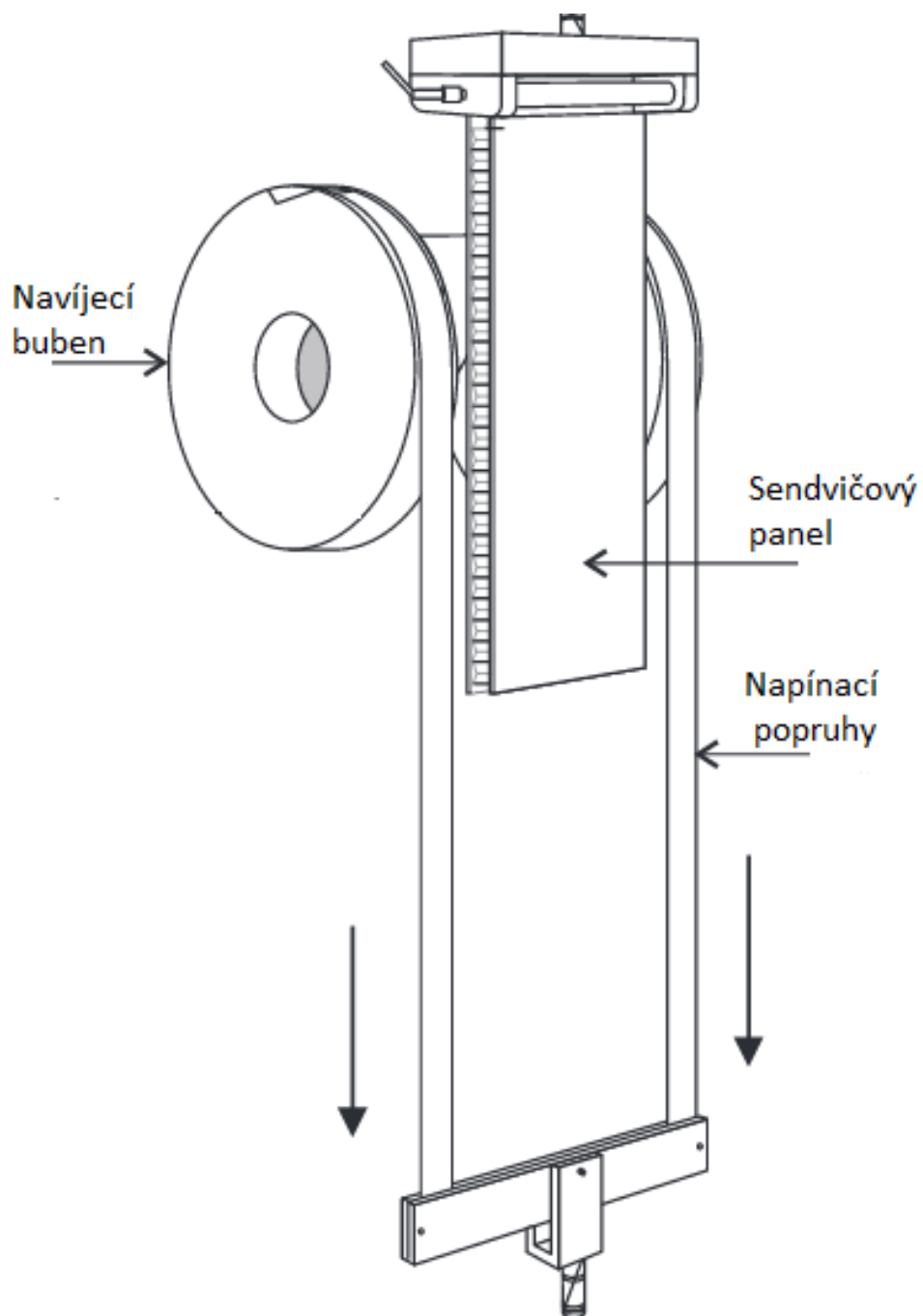
$$T = \frac{(r_o - r_i) \cdot (F_p - F_o)}{W} [N \cdot m]$$

r_o – rádius příruby + polovina tloušťky popruhů

r_i – rádius bubnu + polovina tloušťky vnější krycí vrstvy

$F_p - F_o$ - průměrné zatížení pro ohyb a odlupování

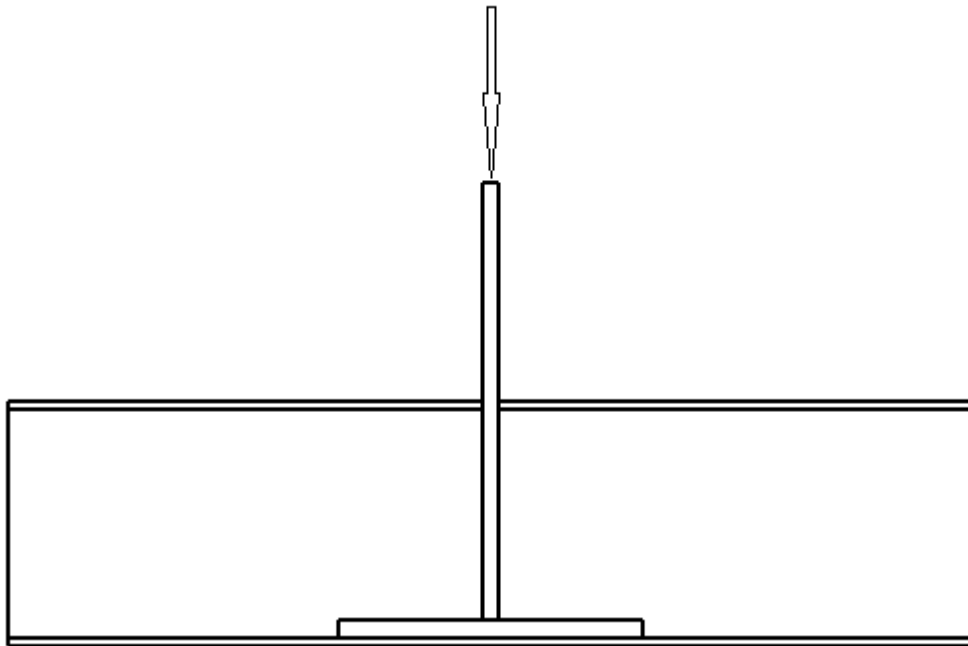
W – šířka vzorku (width)[2]



Obr. 22 - Test pomocí navíjecího bubnu [12]

5.3.1 Peel test využívající tlak vzduchu

Tento test využívá tlak vzduchu ke zjištění vlastností lepeného spoje, jeho schéma je uvedeno na obrázku (Obr. 23). Panel je zatěžován pomocí tlaku vzduchu v místě mezi vnější krycí vrstvou a jádrem. V místě působení stlačeného vzduchu je část vnější krycí vrstvy nepřilepena, čehož je dosaženo vložení kruhového teflonového filmu. [2]



Obr. 23 - Schematické znázornění peel testu pomocí tlaku vzduchu

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Úkolem je podle zadání vypracovat konstrukční řešení pro testování síly potřebné k odlupu vnější vrstvy od jádra sendvičové struktury. Při modelování byly uvažovány reálné rozměry vzorku společně s potřebnou přírubou pro uchycení v trhacím stroji. K práci bude přiložena kompletní výkresová dokumentace potřebná pro výrobu jednotlivých částí přípravků.

Mezi hlavní cíle bakalářské práce patří následující body:

- návrh konstrukcí pro testování soudržnosti sendvičových struktur
- tvorba modelu vybrané konstrukce
- příprava výkresové dokumentace vybrané konstrukce

7 UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ STROJ

Přípravky na zkoušku odlupu v praktické části jsou svým způsobem uchycení přizpůsobeny zkušebnímu stroji Zwick 1456, který je k dispozici v laboratořích UTB. Tento univerzální stroj se používá pro testy tahem, tlakem a ohybem různých materiálů (kompozitů, textilií, plastu atd.).

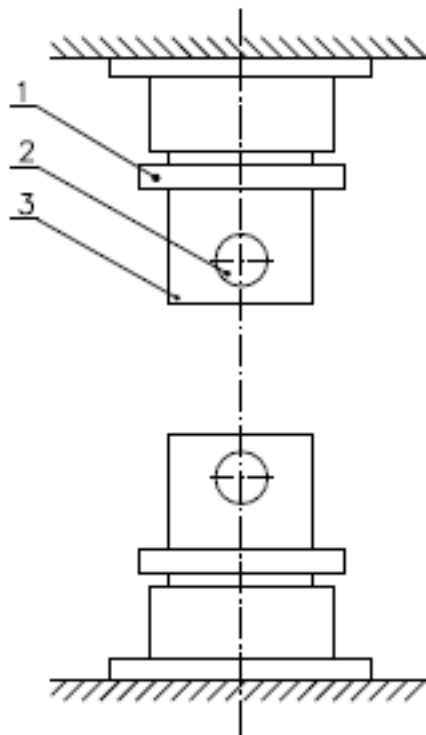


Obr. 24 - Univerzální zkušební stroj

7.1 Technické parametry stroje Zwick 145 665

- Maximální zkušební síla 20kN
- Pracovní šířka 420mm
- Strojová výška 1284mm
- Celková výška 2012mm
- Celková šířka 630mm
- Hmotnost 150kg

7.2 Upínací zařízení stroje

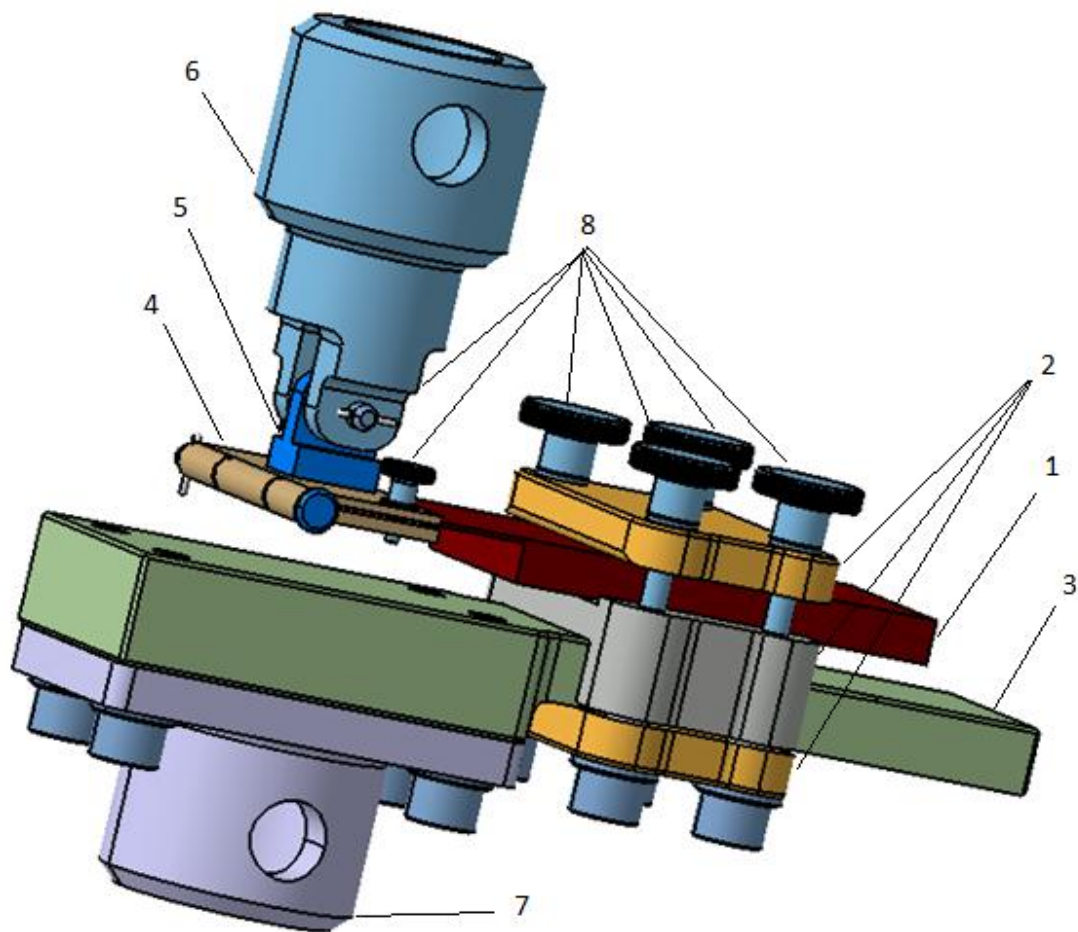


Obr. 25 - Upínací zařízení stroje

- 1..... Utahovací matice
2..... Otvor pro pojistný kolík
3..... Spojovací čep

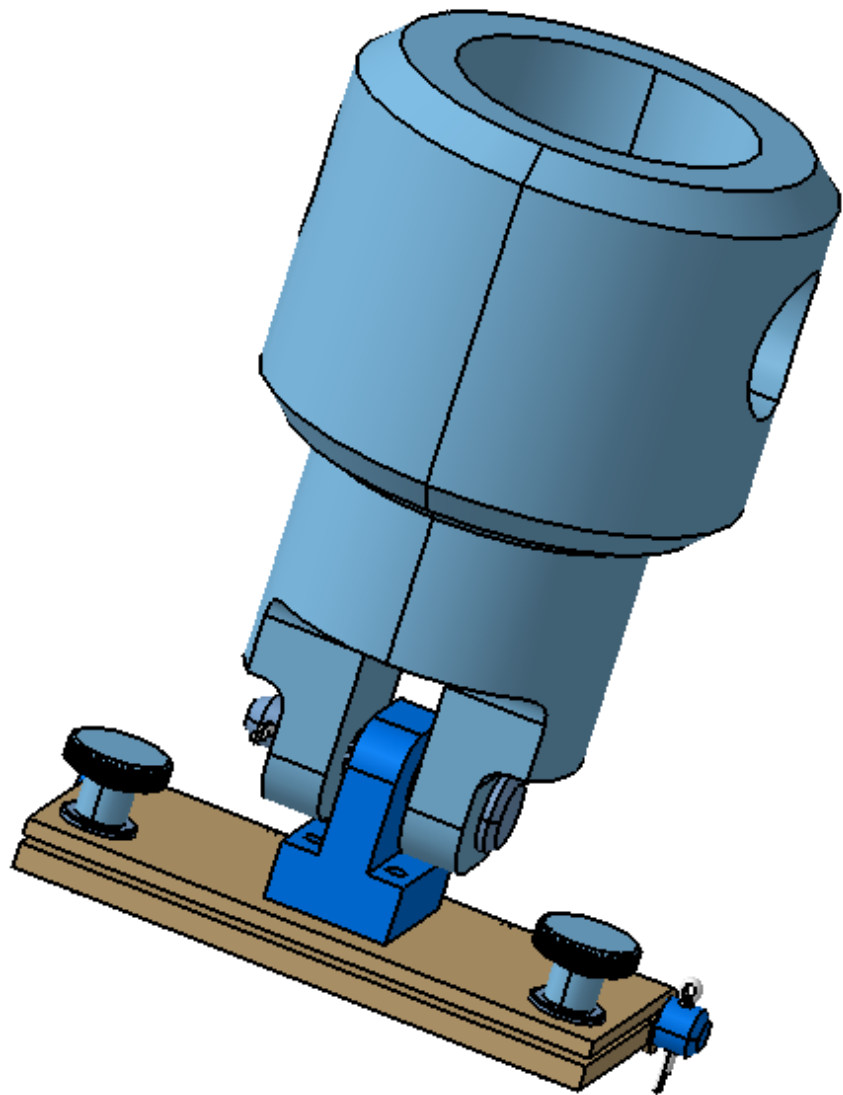
8 PŘÍPRAVEK PRO SCB PEEL TEST

K uchycení vzorku (1) je využito posuvných čelistí (2) pro možnost nastavení jejich vzdálenosti od místa odlupu posuvem po základním dílu čelistí (3). Druhá část vzorku je uchycena v čelistech (4), jejichž horní část je napevno viz Obr. 23 a spodní je se rozevírá díky nenormalizovanému čepu. Celé čelisti jsou uchycené přes frézovaný díl (5) k upínacímu dílu (6) na normalizovaném čepu ISO 2341 6x30, který je zajištěn závlačkou proti vysunutí viz Obr. 24.



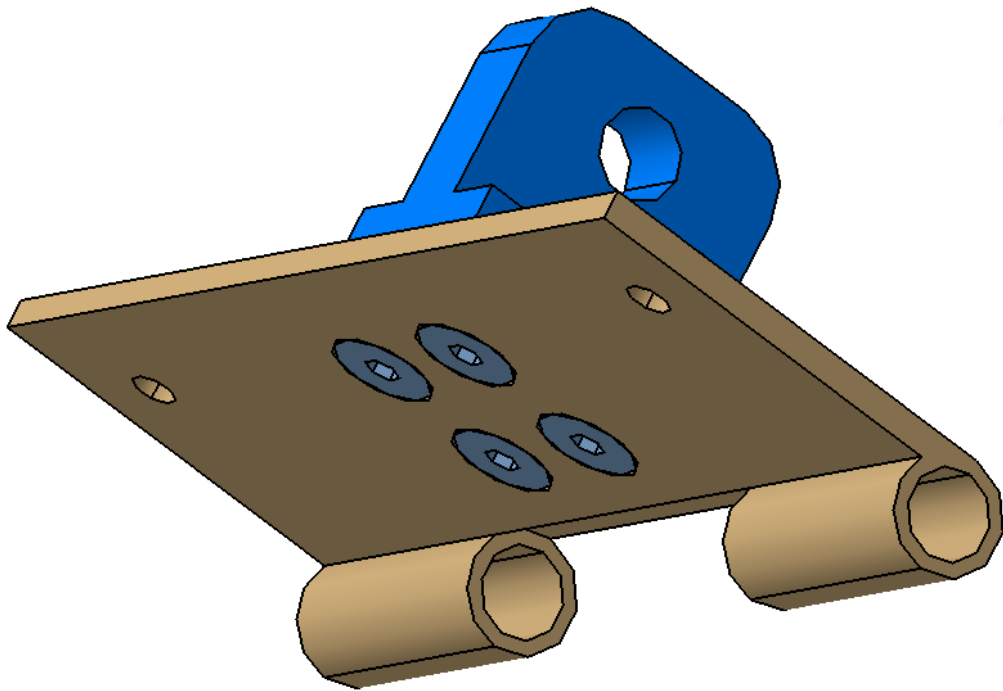
Obr. 26 - Model přípravku pro DCB peel test

Přítlačnou sílu, která udržuje vzorek na místě, vyvolávají dva šrouby s vysokou rýhovanou hlavou M3x8 ČSN 02 1161, které jsou zde pro snadnější a rychlejší výměnu vzorku, viz Obr. 25. Dále mají čelisti v místě kontaktu se vzorkem zdrsňená povrch pomocí rýhování. Oba dva čepy jsou zajištěné proti vysunutí pomocí závlačky. Možnost natočení celých čelistí je důležitá pro neovlivnění zkoušky samotným přípravkem.



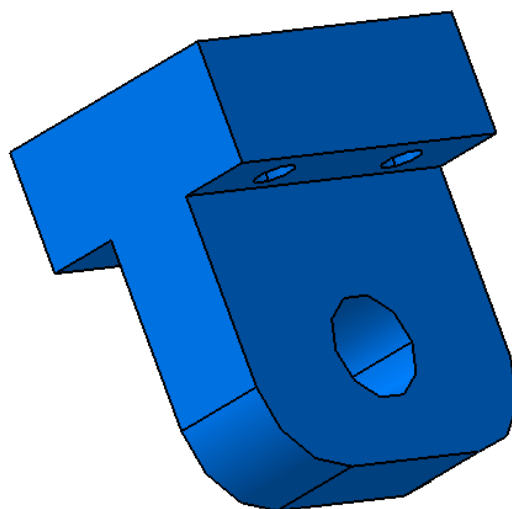
Obr. 27 - Vrchní část přípravku

K čelistem je připevněn frézovaný díl pomocí čtyř šroubů se zápusťnou hlavou s vnitřním šestihranem ČSN EN ISO 10 642.



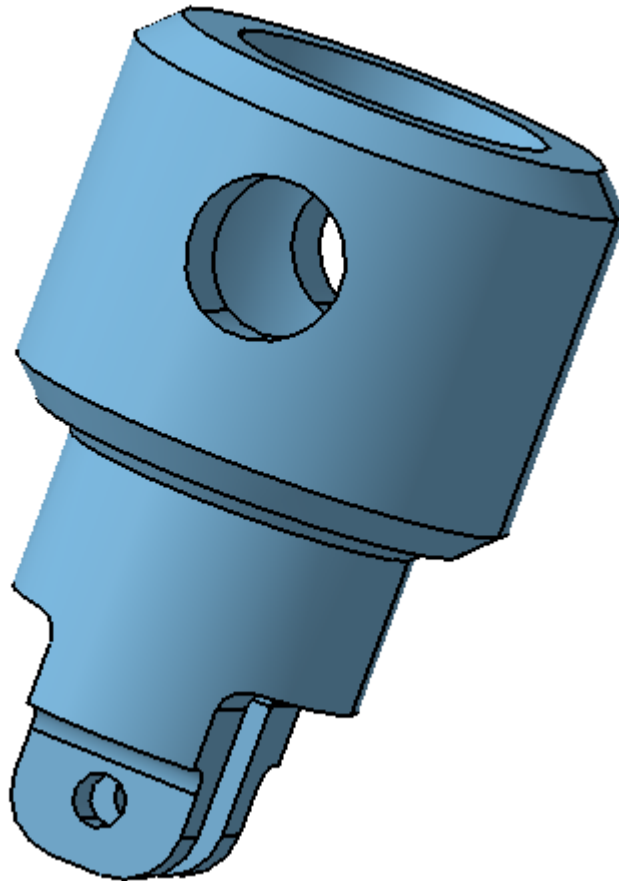
Obr. 28 - 3D model čelisti

Pomocí čepu a závlačky je k upínacímu dílu na Obr. 25 připojen otočný pant Obr. 27, který představuje mezičlen mezi čelistmi a trhačím strojem. K výrobě je použito frézování a vrtání. Do čtyř děr je poté pro přichycení k čelistem vyřezán závit M3.



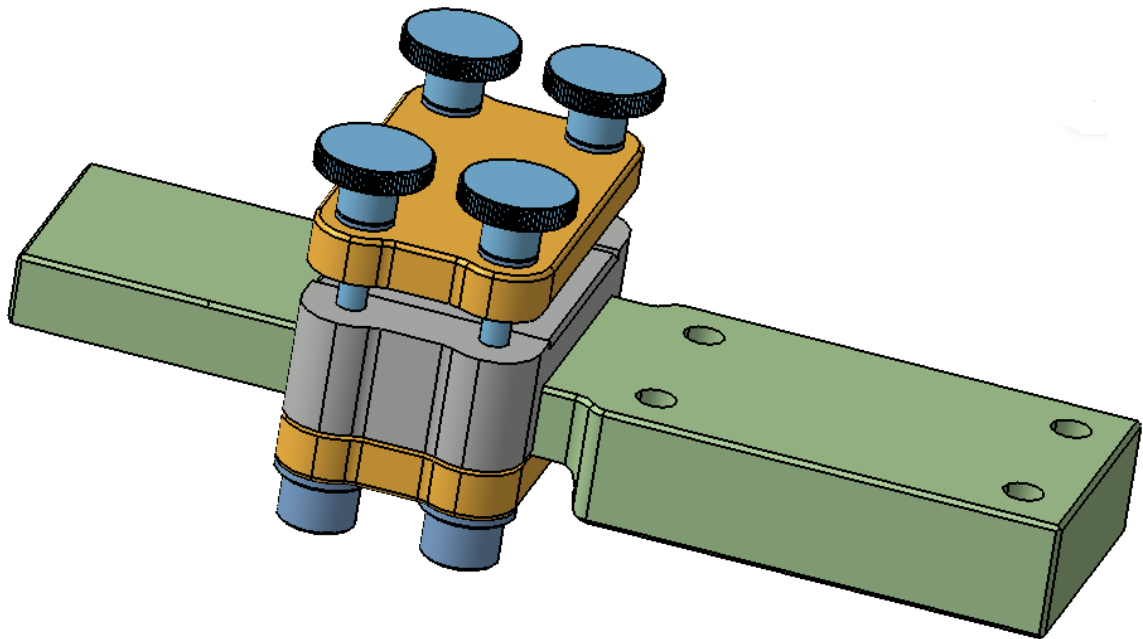
Obr. 29 - Otočný pant pro zajištění pohyblivosti čelistí

Soustružený a frézovaný upínací díl vyobrazený na Obr. 28 je určen k připojení do trhacího stroje. v horní části dílu je vystružena díra ϕ 18 H8. Ve spodní části je pak vrtaná díra ϕ 6mm.



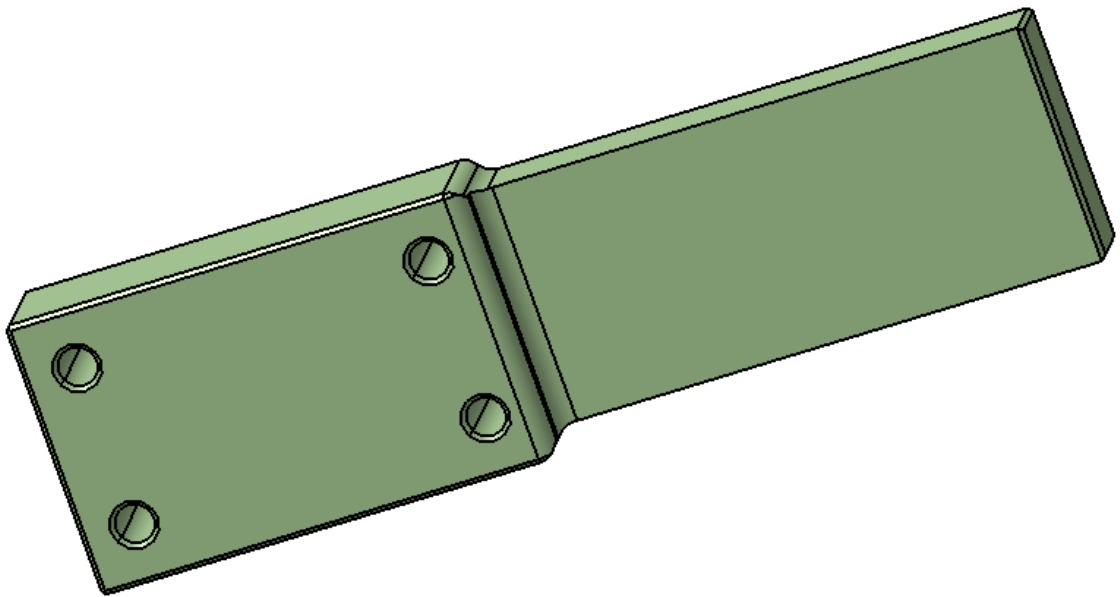
Obr. 30 - Vrchní díl přípravku

Spodní část přípravku se skládá ze čtyř frézovaných dílů Obr. 29. Jsou určeny pro statické uchycení testovaného vzorku po dobu testu. Vzájemné propojení dílů zajišťují ze spodní strany šrouby s vnitřním šestihranem ISO 4762 M10x25 a s podložkami 10x20. Frézovaný přitlačný díl, který přímo přidržuje testovaný vzorek je pro snadnou manipulaci přichycen pomocí šroubů s vysokou rýhovanou hlavou M6x30 ČSN 02 1161.



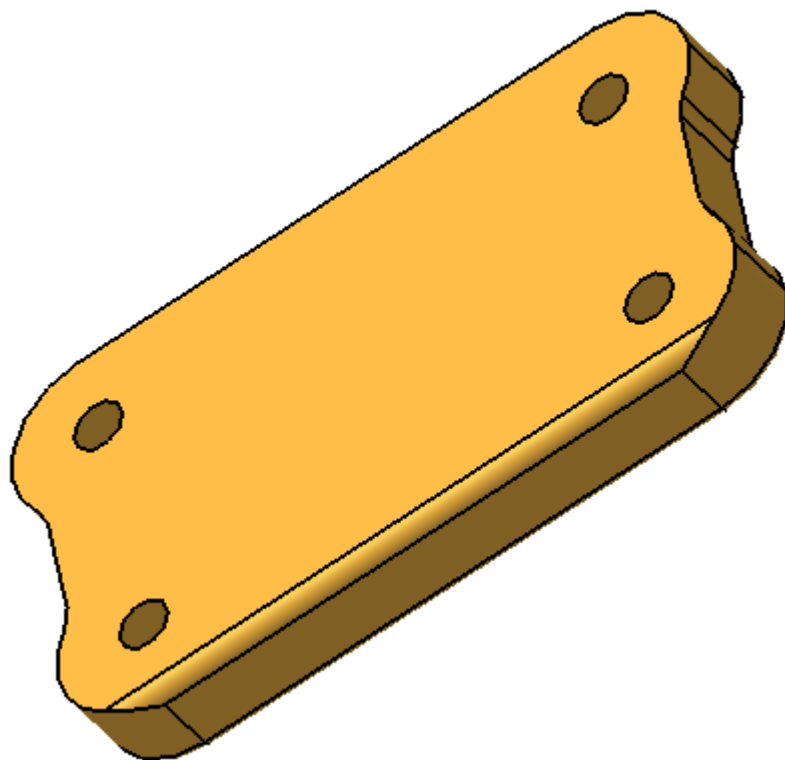
Obr. 31 - Spodní část čelistí

Základní díl čelistí vyobrazený na Obr. 30 je vyfrézován z polotovaru o rozměrech 222x62x37mm a je provrtán dírami se závity M10 pro přichycení k dílu vkládaného do trhacího stroje. Dále je určen k posuvu čelistí se vzorkem do technikem určené vzdálenosti tak, aby při testování nedocházelo k pružení vzorku, jež by znehodnotilo získaná data.



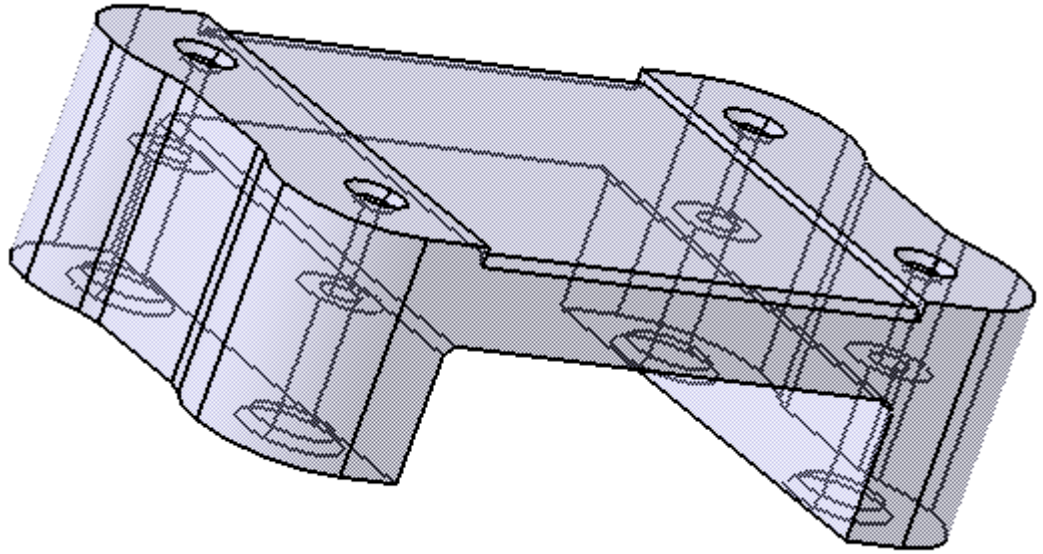
Obr. 32 - Základní díl čelistí

Přítlačný dílec Obr. 31 je v sestavě využit dvakrát, první zajišťuje přichycení k předchozímu dílu a jsou v něm vrtány díry $\phi 10\text{mm}$, druhý zajišťuje pomocí šroubů přitlačení testovaného vzorku k přípravku a jsou v něm vyvrtány díry $\phi 6\text{mm}$ a má zaoblenou hranu v místě, kde by mohlo docházet při zkoušce k porušení vzorku ostrou hranou.



Obr. 33 - 3D model přítlačného dílce

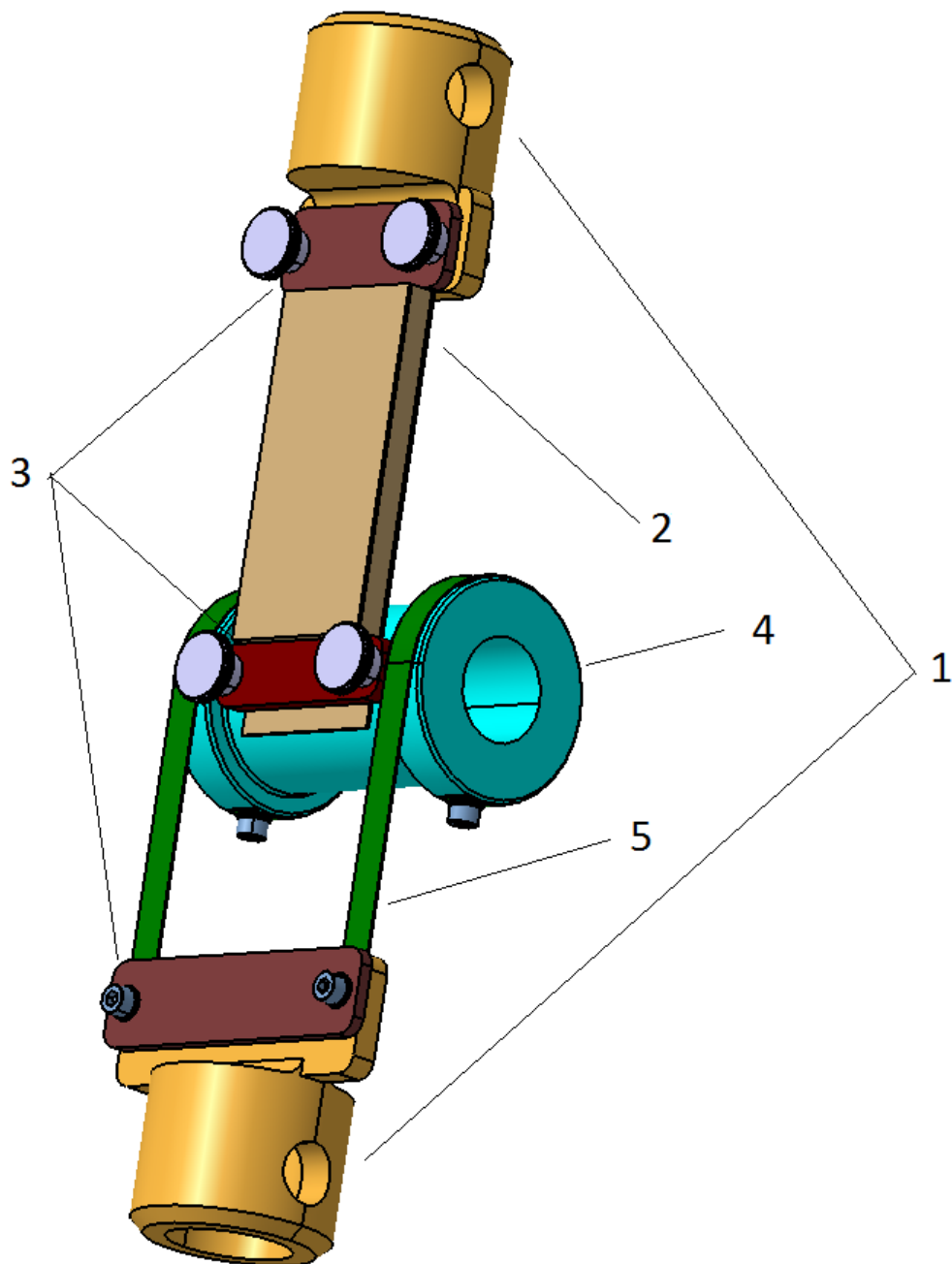
Opěrná kostka viz Obr. 32 má ve vrchní části vyfrézovanou drážku o šířce 50,5mm pro snadnější umístění vzorku. Dále jsou v něm vyvrtány díry se závity M10 a M6. Rozdíl ve velikosti závitů je uzpůsoben různým druhům použitých šroubů.



Obr. 34 - Opěrný stůl

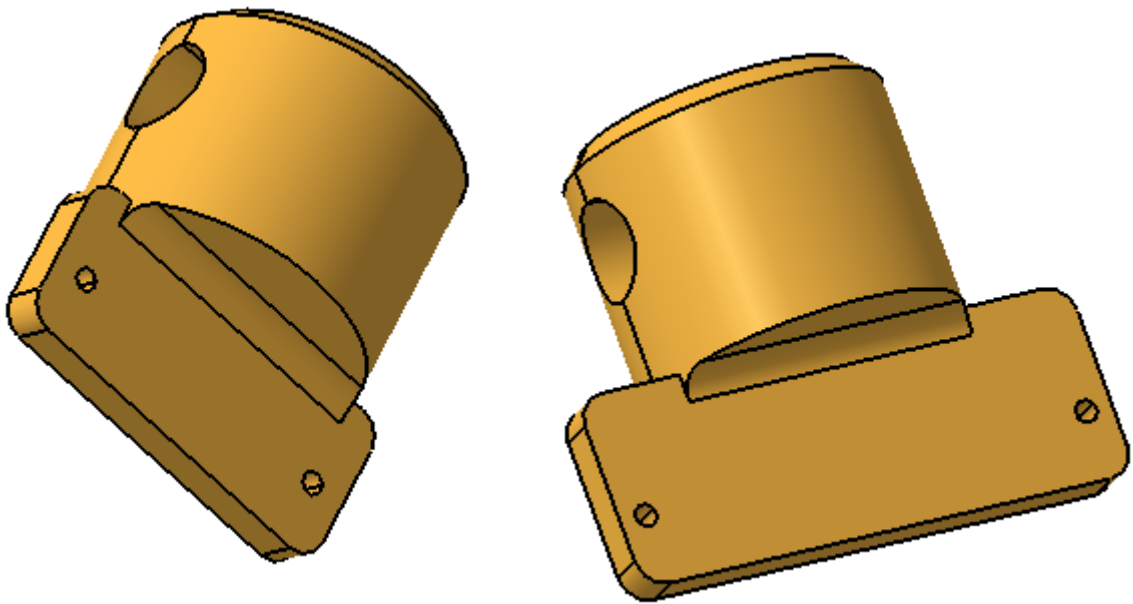
9 PŘÍPRAVEK PRO CLIMBING DRUM PEEL TEST

Při modelování bylo dbáno na snadnou vyrobiteľnost všech dílů. Rozměry byly voleny tak, aby vyhověly požadavku na velikost vzorku a jednoduchost konstrukce. Na Obr. 33 je vyobrazen model celého přípravku. Pomocí upínacích částí (1) je připevněn do trhacího stroje. Samotný vzorek (2) je přichycen k upínací vrchní části pomocí přitlačné desky (3) z jedné strany, na druhé je připevněn k bubnu (4) stejným způsobem. Buben je napojen na spodní upínací desku přes dva kusy plechu, které zajišťují jeho navíjení při testu.



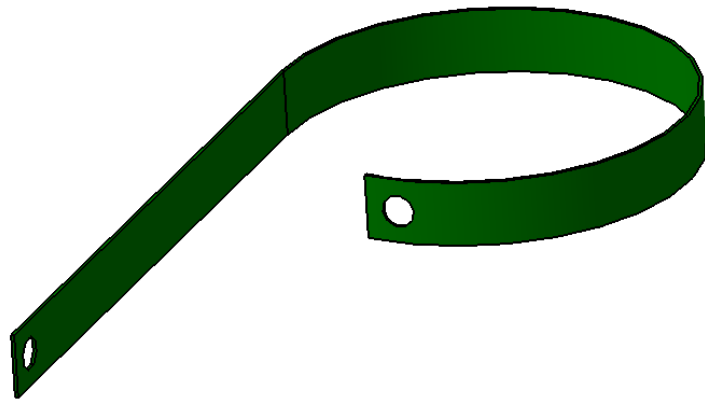
Obr. 35 - 3D model peel testu pomocí bubnu

Vrchní a spodní část přípravku tvoří dva díly (Obr. 34), které jsou určeny ke statickému přichycení vzorku (přípravku). Oba dva jsou vyrobeny soustružením a je v nich vystružena díra H8 pro zajištění v trhacím stroji, dále pak je k nim přivařena deska tloušťky 8mm se dvěma dírami pro šrouby. U upínací části, která slouží k uchycení vzorku je v místě styku se vzorkem využito drážkování pro zvýšení tření mezi vzorkem a přípravkem. Přivařené desky mají rozdílné rozměry kvůli druhu použití.



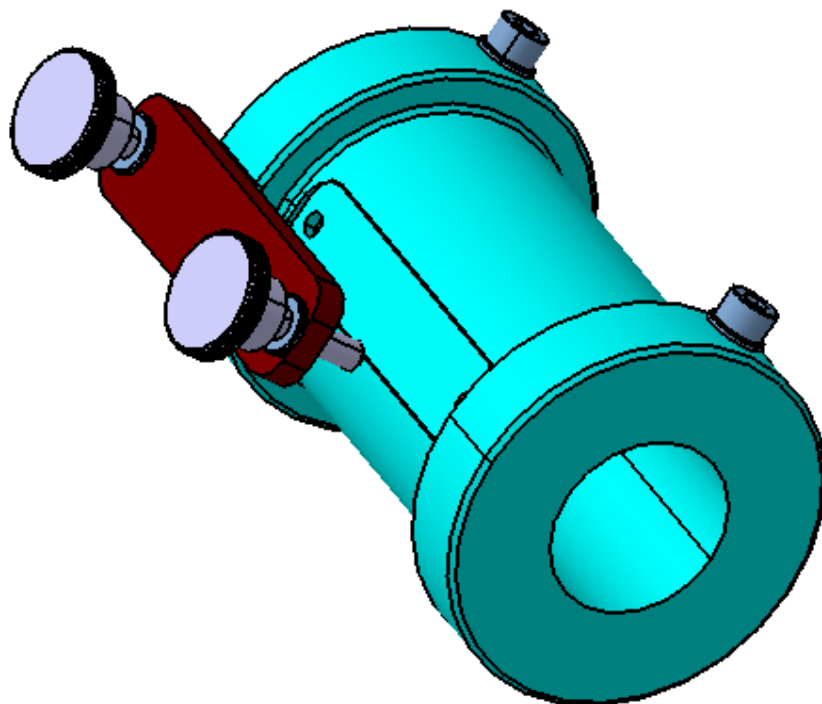
Obr. 36 - Upínací části přípravku

Na Obr. 35 je vyobrazena součást určená pro navíjení bubnu. Jde o houževnatý plech z oceli 11 425 o tloušťce $t = 0,5\text{mm}$ v němž jsou prostříženy díry k uchycení.



Obr. 37 – Navíjecí plech

Obr. 36 vyobrazuje buben s osazením. Buben je vysoustružen z kulatiny průměru $d=65\text{mm}$ a délky $L=100\text{mm}$. Šrouby s vysokou rýhovanou hlavou M4 x 14 ČSN 02 1161 pomocí přítlačné desky drží vzorek na místě. Další dva šrouby s vnitřním šestihranem 5x10 ISO 7462 jsou zde pro připevnění plechů z Obr. 35. Buben a přítlačná deska mají v místě kontaktu se vzorkem rýhování.



Obr. 38 - Buben a osazení

10 FINANČNÍ KALKULACE

V této kapitole bych rád přiblížil ve dvou tabulkách náklady pro nákup polotovarů a normálií potřebných k výrobě a sestavení obou přípravků. Budu vycházet s cen, které byly v době psaní bakalářské práce aktuální na stránkách pronext.cz a akros.cz. Materiál polotovarů je až na výjimky ocel 11 523.

Tab. 10 - Ceny polotovarů k výrobě přípravku climbing drum

Polotovar climbing drum	Délka	Hmotnost [kg]	Cena
Tyč plochá 28 x 5 - ČSN 42 5522.01 - 11 523	102	0,145	3,335
Tyč plochá 32 x 10 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	72	0,181	4,163
Tyč plochá 25 x 5 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	2x67	0,132	3,036
Tyč plochá 38 x 10 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	102	0,192	4,416
Tyč plochá 20 x 6 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	67	0,063	1,449
Tyč kruhová ϕ 60 ČSN 425510.12 - 11523	2 x 47	2,09	48,07
Tyč kruhová ϕ 65 ČSN 425510.12 - 11523	102	1,356	31,188
Celkový součet		4,159	95,657

Tab. 11 - Ceny polotovarů k výrobě přípravku pro SCB odlup

Polotovar SCB	Délka	Hmotnost [kg]	Cena
Tyč plochá 40 x 10 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	10	0,209	4,807
Tyč plochá 25 x 16 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	22	0,069	1,587
Tyč plochá 32 x 5 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	72	0,091	2,093
Tyč plochá 32 x 5 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	72	0,091	2,093
Tyč plochá 55 x 12 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	2 x 87	0,902	20,746
Tyč plochá 55 x 25 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	87	0,855	19,665
Tyč plochá 65 x 30 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	202	3,096	71,208
Tyč plochá 32 x 10 Z - ČSN 42 5522.01 - 11 523	47	1,422	32,706
Tyč kruhová ϕ 60 ČSN 425510.12 - 11523	92	2,045	47,035
Tyč kruhová ϕ 10 ČSN 425510.12 - 11524	72	0,064	1,472
Tyč kruhová ϕ 10 ČSN 425510.12 - 11525	16	0,014	0,322
Celkový součet		8,858	203,734

Cena kilogramu oceli 11 523 je podle webu pronext.cz je přibližně 23Kč/kg bez DPH. Cena navíjecích plechů pro climbing drum peel test se na webu nepodařilo najít.

Ceny normálií byly dohledány na webu pronext.cz všechny až na čep pro upevnění frézovaného dílu čelistí

Tab. 12 - Ceny normálií pro climbing drum

Typ normálie	Počet kusů	Cena [Kč/ks]	Celkem cena [bez DPH]	Druh
ISO 4762 M5X10	2	0,91	1,80	šroub
ISO 4762 M5X12	2	0,71	1,40	šroub
ČSN 01 1161.20 M5X16	4	50,86	203,40	šroub
ISO 7089 4X9	4	0,09	0,40	podložka
ISO 7089 5X10	4	0,10	0,40	podložka
Celkový součet			207,44	

Tab. 13 - Ceny normálií SCB test

Typ normálie	Počet kusů	Cena [Kč/ks]	Celkem cena [bez DPH]	Druh
ISO 4762 M10X30	4	5,73	22,90 Kč	šroub
ISO 4762 M10X25	4	5,60	22,40 Kč	šroub
ISO 10 642 M3X8	4	0,28	1,10 Kč	šroub
ČSN 01 1161.20 M3X8	2	23,11	46,20 Kč	šroub
ČSN 01 1161.20 M6X25	4	94,17	376,70 Kč	šroub
ISO 7089 6X12	4	0,20	0,80 Kč	podložka
ISO 7089 10X20	8	0,63	5,00 Kč	podložka
ISO 7089 5X10	8	0,10	0,80 Kč	podložka
ISO 1234 1,6X8	2	0,26	0,50 Kč	závlačka
ISO 2341	1	60,00	60,00 Kč	čep
Celkový součet			536,50	

Ceny polotovarů a normálií samozřejmě nemusí být koncové a je potřeba počítat ještě s poštovným atd. Při výrobě by bylo nejspíše využito místních prodejců, ve Zlíně například normované díly prodává firma Brammer a.s., jejíž ceny se budou jistě mírně lišit od orientačních z bakalářské práce.

ZÁVĚR

Představená bakalářská práce se zabývá návrhem upínacích čelistí pro různé testy lepivosti a soudržnosti jednotlivých vrstev sendvičových struktur.

V teoretické části jsou popsány jednotlivé mechanické zkoušky pro testy lepivosti jak dynamicky tak staticky. Konkrétně tato část se zaměřuje na climbing drum peel test a single cantilever peel test, neboť v pozdější části této práce jsou navrženy upínací čelisti právě pro tyto zkoušky lepivosti. Současně byla teoretická část taktéž zaměřena na skladbu sendvičových struktur a materiály pro jejich výrobu. Úkolem těchto částí je komplexně obsáhnout danou tematiku a zahrnout veškeré dostupné možnosti využití materiálů pro sendvičové struktury.

V úvodu praktické části bakalářské práce je uvedena specifikaci univerzálního zkušebního stroje Zwick 1456, pro který dle zadání bakalářské práce jsou navrženy oba testovací přípravky. Návrh upínacích čelistí byl proveden tak, že jsou designy snadno vyrobitelné z konvenčních materiálů, snadno modifikovatelné dle testovaných struktur a jednoduché na obsluhu. Finanční zhodnocení jak polotovarů, tak normálií ukazuje, že počáteční investice pro výrobu bude vyšší v případě přípravku pro SCB peel testu. Dá se předpokládat finančně i časově náročnější výroba, a to hlavně díky využití většího počtu dílů než v případě přípravku pro climbing drum peel test. V případě climbing drum testu lepivosti byly inspirací obdobné přípravky využívané ve světě pro tuto zkoušku.

Návrh a výkresová dokumentace byla kompletně vypracována v Catii V5R19. Kompletní výkresová dokumentace je přiložena v příloze bakalářské práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DAVIES, J. M. *Lightweight sandwich construction*. The University of Manchester, UK: Wiley-Blackwell; 1 edition, 2001. ISBN 0-632-04027-0.
- [2] ZENKERT, D. *Nordic Industrial Fund: The Handbook of Sandwich Construction*. Worchestershire; EMAS Publishing, 1997. ISBN 0-947817-96-4.
- [3] CAMPBELL, F. C. *Structural Composite Materials*. Ohio; ASM International, 2010
- [4] FABRIGER, Daniel. *Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur pomocí vakuové infuze pod pružnou folií*. Zlín, 2011. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [5] ROLEK, Vítězslav. *Studium prepreg sendvičových konstrukcí s fenolickou maticí*. Zlín, 2012. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [6] KOŘÍNEK, Zdeněk. Vlákna. In: KOŘÍNEK, Zdeněk. *Vlákna* [online]. 2010 [cit. 2013-01-29]. Dostupné z: www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf
- [7] *Hodnocení pevnosti lepených spojů v konstrukci autobusů*. Pardubice, 2008. Dostupné z: <https://dspace.upce.cz:8443/bitstream/10195/28913/1/text.pdf>. Bakalářská práce. UNIVERZITA PARDUBICE DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA.
- [8] *Gurit.com* [online]. c2011 [cit. 2011-04-17]. Guide to Composites. Dostupné z: [http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites\(1\).pdf](http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites(1).pdf)
- [9] OSTEN, Miloš. *PRÁCE S LEPIDLY A TMELY*. Praha: STNL, 1982. ISBN 80-7169-338-3.
- [10] Lepidla - tmely [online]. [cit. 2008-03-31]
Dostupný na WWW: <http://www.oblibene.cz/lepidla/?cap=4852>.
- [11] Peel testing. *Web firmy MTS* [online]. 2010 [cit. 2013-01-29]. Dostupné z: www.mts.com/en/products/application/materials-testing/adhesives-coatings/peel/index.htm
- [12] Adhesive bonding technology. *Www.hexcel.com* [online]. 2003 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Adhesive_Bonding_Technology.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

p	[MPa]	Tlak
ρ	[kg/m ³]	Hustota
α	[10 ⁻⁶ 1/K]	Součinitel lineární tepelné roztažnosti
λ	[W/mK]	Součinitel tepelné vodivosti
ε	[-]	Poměrné prodloužení
t	[°C]	Teplota
T_{\max}	[°C]	Maximální teplota
σ	[MPa]	Normálové napětí
r	[mm]	Poloměr
W	[mm]	Šířka vzorku (width)
F	[N]	Zatěžující síla
m	[kg]	Hmotnost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Struktura kompozitní sendvičové konstrukce [4].....	11
Obr. 2 - Příklady použitých jader [1].....	12
Obr. 3 - Rozdělení vrstev sendvičových struktur [1].....	14
Obr. 4 - Jednosměrně a dvojsměrně orientovaný prepreg [5].....	18
Obr. 5 - Srovnání vlastností používaných výztuží [5]	19
Obr. 6 - Ocelové povrchy s různými typy ochrany [1].....	22
Obr. 7 - Hlavní skupiny materiálů jader [2].....	24
Obr. 8 - Běžně užívané druhy buněk voštinových (tzv. honeycomb) jader.....	25
Obr. 9 - Výroba voštinových jader[2].....	26
Obr. 10 - Struktura s otevřenými a uzavřenými buňkami [4].....	27
Obr. 11 - Desky balzového dřeva	29
Obr. 12 - Korek.....	30
Obr. 13 - 3D tkanina	31
Obr. 14 - Technologie pulturze.....	33
Obr. 15 - Autokláv [4]	34
Obr. 16 - Schéma vakuové infúze pod pružnou fólií [4]	35
Obr. 17 - Schéma technologie RTM [4]	35
Obr. 18 - Schéma základních testů [12].....	41
Obr. 19 - Zkouška plochým tahem lepeného spoje	42
Obr. 20 - Schematické zobrazení SCB peel testu	43
Obr. 21 - Schematické zobrazení DCB peel testu	43
Obr. 22 - Test pomocí navíjecího bubnu [12].....	45
Obr. 23 - Schematické znázornění peel testu pomocí tlaku vzduchu	46
Obr. 24 - Univerzální zkušební stroj.....	49
Obr. 25 - Upínací zařízení stroje.....	50
Obr. 26 - Model přípravku pro DCB peel test	51
Obr. 27 - Vrchní část přípravku	52
Obr. 28 - 3D model čelisti	53
Obr. 29 - Otočný pant pro zajištění pohyblivosti čelistí.....	53
Obr. 30 - Vrchní díl přípravku	54
Obr. 31 - Spodní část čelistí.....	55
Obr. 32 - Základní díl čelistí.....	56

Obr. 33 - 3D model přitlačného dílce	56
Obr. 34 - Opěrný stůl	57
Obr. 35 - 3D model peel testu pomocí bubnu.....	58
Obr. 36 - Upínací části přípravku	59
Obr. 37 - Navíjecí plech.....	60
Obr. 38 - Buben a osazení.....	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Vlastnosti skelných vláken při 20°C [6]	16
Tab. 2 - Vlastnosti vybraných aramidových vláken [6].....	16
Tab. 3 - Vlastností uhlíkových vláken na bázi polymerních prekurzorů [6]	17
Tab. 4 - Vlastnosti matric	20
Tab. 5 - Mechanické vlastnosti překližky za suchých podmínek [1].....	21
Tab. 6 - Mechanické vlastnosti dřevotřísky za sucha [1]	21
Tab. 7 - Základní vlastnosti hliníku dle normy EN 485-2 [1]	23
Tab. 8 - Základní vlastnosti PUR pěny [2]	28
Tab. 9 - Základní vlastnosti PS pěny [2]	28
Tab. 10 - Ceny polotovarů k výrobě přípravku climbing drum.....	61
Tab. 11 - Ceny polotovarů k výrobě přípravku pro SCB odlup	61
Tab. 12 - Ceny normálií pro climbing drum.....	62
Tab. 13 - Ceny normálií SCB test.....	62

SEZNAM PŘÍLOH

PI	3D sestava climbing drum peel přípravku
PII	Výrobní výkres bubnu
PIII	Výrobní výkres upínacího dílu I
PIV	Výrobní výkres upínacího dílu II
PV	Výrobní výkres přitlačného dílu I
PVI	Výrobní výkres přitlačného dílu II
PVII	Výrobní výkres vložky do bubnu
PVIII	Výrobní výkres přitlačného dílu II
PIX	Výrobní výkres plechu
PX	Sestava SCB peel přípravku
PXI	Výrobní výkres přitlačné desky
PXII	Výrobní výkres stolu
PXIII	Výrobní výkres základního dílu přípravku
PXIV	Výrobní výkres otočného pantu
PXV	Výrobní výkres přitlačného dílu I
PXVI	Výrobní výkres vrchní části přípravku
PXVII	Výrobní výkres čepu
PXVII	Výrobní výkres vrchní části pantu
PXVIII	Výrobní výkres vrchního dílu pantu
PXIX	Výrobní výkres spodního dílu pantu
PXX	Výrobní výkres spodního přitlačného dílu
PXXI	CD disk s bakalářskou prací ve formátu .pdf a .doc, dále obsahuje 3D modely všech částí přípravků z programu CATIA V5 + výkresy ve formátu .CATDrawing a .pdf