

Návrh a testování sendvičového dílu pro dopravní aplikaci vyráběného technologií autoklávového lisování

Bc. Hana Mudráková

Diplomová práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Hana Mudráková
Osobní číslo:	T21517
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Návrh a testování sendvičového dílu pro dopravní aplikaci vyráběného technologií autoklávového lisování

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku zpracování kompozitních sendvičových materiálů, rozdělení, výroba a využití v dopravním průmyslu.
2. Popis aktuální situace využití sendvičových kompozitů v dopravním průmyslu.
3. Zrealizujte experimentální výrobu zvolené kompozitní sendvičové aplikace, návrh materiálové skladby, volba technologických podmínek.
4. Testování mechanických vlastností.
5. Experimentální vyhodnocení dosažených výsledků.
6. Závěr.

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

Seznam doporučené literatury:

Barbero, Ever J. 2018, Introduction to composite materials design, Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group an informa business, Boca Raton.

ŠUBA, Oldřich. Mechanika polymerů a kompozitů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 978-80-7454-015-8.

ŠUBA, Oldřich. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.

EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha, nakladatelství SCIENTIA v Praze, 351s, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – 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 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 diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta: Hana Mudráková

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem praktické části diplomové práce je navrhnout úložný prostor pro příruční zavazadla a zvolit nejvhodnější materiál pro tuto aplikaci.

Teoretická část se zabývá popisem kompozitních materiálů, a to především sendvičovými prvky, jejich složením, vlastnostmi, technologií výroby, zkouškami a použitím.

Závěrečná část je zaměřena na výrobu a přípravu zkušebních vzorků, testování materiálů zkouškou tříbodového ohybu, která nejvíce odpovídají namáhání úložného prostoru.

Klíčová slova: sendvičový prvek, autokláv, kompozitní materiály, sendvičové panely

ABSTRACT

The aim of the practical part of the thesis is to design a storage space for hand luggage and to choose the most suitable material for this application.

The theoretical part deals with the description of composite materials, mainly sandwich elements, their composition, properties, production technology, tests and use.

The final part is focused on the production and preparation of test samples, the testing of materials by the three-point bending test, which most correspond to the stress of the storage area.

Keywords: sandwich element, autoclave, composite materials, sandwich panels

Moje poděkování patří vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D., která mi poskytovala cenné rady, svůj čas a pomoc při vypracování. Dále patří poděkování také firmě Form s.r.o., která zajistila nařezání zkušebních vzorků.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	11
1.1 VÝZTUŽE.....	12
1.2 MATRICE	12
2 KOMPOZITNÍ SENDVIČOVÉ PRVKY	13
2.1 JÁDRA SENDVIČOVÝCH PRVKŮ	14
2.1.1 Voštiny	14
2.1.2 Pěny.....	17
2.1.3 Balzové dřevo.....	20
2.1.4 Korek.....	21
2.1.5 3D Tkaniny.....	21
2.2 POTAHY SENDVIČOVÝCH PRVKŮ	22
2.2.1 Kovové potahy	22
2.2.2 Nekomové potahy	23
3 VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH PRVKŮ	26
3.1 TUHOST A PEVNOST V OHYBU	26
3.2 TEPelná ODOLNOST A ODOLNOST PROTI OHNI	27
3.3 NÍZKÁ HMOTNOST	27
3.4 IZOLAČNÍ VLASTNOSTI	28
4 TECHNOLOGIE VÝROBY SENDVIČOVÝCH PRVKŮ	29
4.1 LISOVÁNÍ POMOCÍ VAKUOVANÉHO VAKU	29
4.2 LISOVÁNÍ POMOCÍ TLAKOVÉHO VAKU	30
4.3 PREPREG TECHNOLOGIE - LISOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	31
4.4 VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ – RTM.....	32
5 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH PRVKŮ	34
5.1 ODOLNOST PROTI ODLUPOVÁNÍ ASTM D1781	34
5.2 ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM ASTM C393	34
5.3 SMYKOVÉ ZKOUŠKY ASTM S273	36
5.4 PEVNOST V TAHU ASTM C297	37
5.5 PEVNOST V TLAKU ASTM C364	38
6 VYUŽITÍ SENDVIČOVÝCH PRVKŮ V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU	39
6.1 LETECKÝ PRŮMYSL	39
6.2 LODNÍ PRŮMYSL.....	40
6.3 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL.....	41

6.3.1	Aktuální využití sendvičových panelů pro podlahy kufru v Hyundai Creta ix25	42
6.4	ŽELEZNIČNÍ PRŮMYSL	45
6.5	KOSMICKÝ PRŮMYSL.....	46
II	PRAKTICKÁ ČÁST	48
7	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	49
8	NÁVRH ÚLOŽNÉHO PROSTORU PRO PŘÍRUČNÍ ZAVAZADLA	50
8.1	PANELOVÝ DÍL	51
8.2	VOLBA VHODNÝCH LEPIDEL.....	52
8.3	HYDRAULICKÉ TLUMIČE.....	53
8.4	UCHYCENÍ K RÁMU LETADLA	54
9	VOLBA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ.....	56
9.1	POTAH.....	56
9.2	JÁDRO Z HLINÍKOVÉ VOŠTINY.....	56
9.3	JÁDRO Z NOMEXOVÉ VOŠTINY	57
9.4	PĚNOVÉ JÁDRO	57
10	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ SENDVIČOVÉHO PANELU S VYBRANÝMI JÁDRY	59
10.1	POPIS AUTOKLÁVU POUŽITÉHO NA VÝROBU VZORKŮ	61
10.2	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ, DLE ZVOLENÝCH METOD	62
11	REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	63
11.1	ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM	63
11.1.1	Jádro z hliníkové voštiny	64
11.1.2	Pěnové jádro.....	66
11.1.3	Jádro s nomexovou voštinou.....	69
11.2	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	72
11.2.1	Únosnost vybraných zkušebních panelů – přepočet na 1 m ²	73
	ZÁVĚR	75
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	84
	SEZNAM OBRÁZKŮ	85
	SEZNAM TABULEK.....	87
	SEZNAM PŘÍLOH.....	88

ÚVOD

Najít dostatečný prostor pro uložení příručních zavazadel nad hlavou cestujících je pro letecké společnosti výzvou. Velký počet pasažérů a množství jejich cestovních zavazadel převyšuje objem prostoru nabízeného pro příruční zavazadla, což způsobuje problémy cestujícím i letovým posádkám.

Věci se zhoršily, když aerolinky začaly postupně přidávat do letadel více sedadel, aby zvýšily kapacitu. Například letadla Boeing 737-800 společnosti American Airlines se změnila ze 148 sedadel na 172 bez přidání dalších úložných prostor nebo instalace větších příhrádek. S přibývajícemi sedadly se také snižoval prostor na zavazadla pod nohama cestujících a z těchto důvodů bylo potřeba umístit co nejvíce zavazadel do horních úložných boxů.

Tento problém se ještě zhoršil, když aerolinky jako JetBlue začaly účtovat poplatky za odbavená zavazadla, které jsou umísťovány do podpalubí, takže více cestujících se rozhodlo vzít si sebou zdarma příruční zavazadlo na palubu.

Je proto nutné najít vhodnou konstrukci úložného boxu, která zvyšuje kapacitu vnitřní příhrádky, aniž by zasahovala do prostoru uličky a zároveň cestujícím usnadnila manévrování se zavazadly do příhrádek nad hlavou. Tím se urychlí proces nastupování, protože jsou úložné prostory více přístupné a cestující se nemusí obávat, že pro svoje osobní zavazadlo nenajdou místo.

Praktická část této diplomové práce se bude zabývat konstrukcí úložného boxu pro příruční zavazadla v letadle a volbou vhodného materiálu pro tuto aplikaci. Sendvičové prvky se v dnešní době již běžně využívají pro aplikaci v leteckém a raketovém průmyslu, a to především kvůli snížení hmotnosti. Nyní se tyto prvky dostávají i do ostatních odvětví dopravního průmyslu například v oblasti kolejových vozidel, jako přední čela, střešní segmenty, podlahy nebo příčky v interiéru. Nejvíce využívané jsou materiály z uhlíkových vláken, skelných vláken, nomexu a jiných kompozitů.

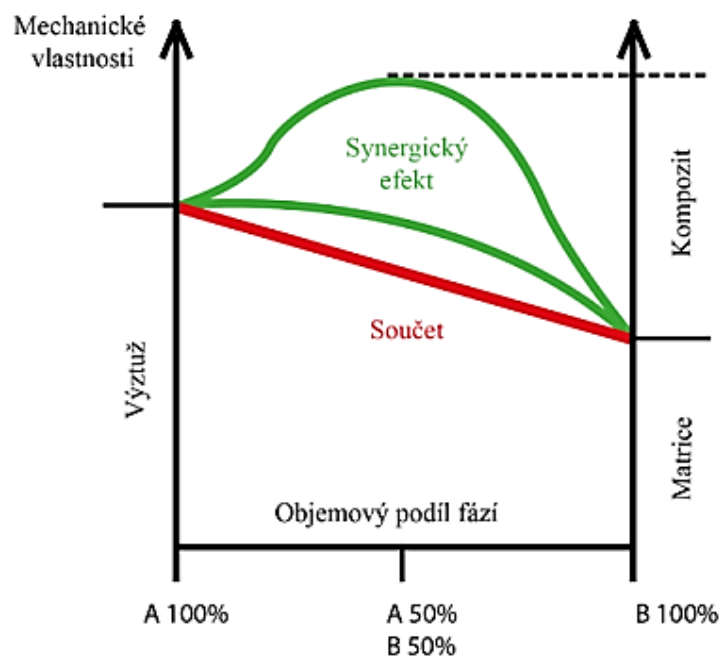
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitem je obecně vzato každý vícefázový materiál, ve kterém jsou obě fáze (složky) významně zastoupeny (min. 5 objemových %) a tím je docíleno lepší kombinace vlastností. [1]

Kompozitní materiál se skládá nejméně ze dvou nebo více substancí. Ty jsou odlišné svým tvarem, složením a také mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Složky se navzájem neslučují ani nerozpouštějí. Mezi jednotlivými substancemi jsou viditelná rozhraní. Nejčastěji je jedna ze složek výrobků tuhá (výztuž) pro dodání dobrých mechanických vlastností a druhá slouží jako pojivo (matrice). Na směru a orientaci výztuže závisí výsledné vlastnosti kompozitu. Spojení musí být co nejdokonalejší s velkou vzájemnou adhezí. [2, 3]

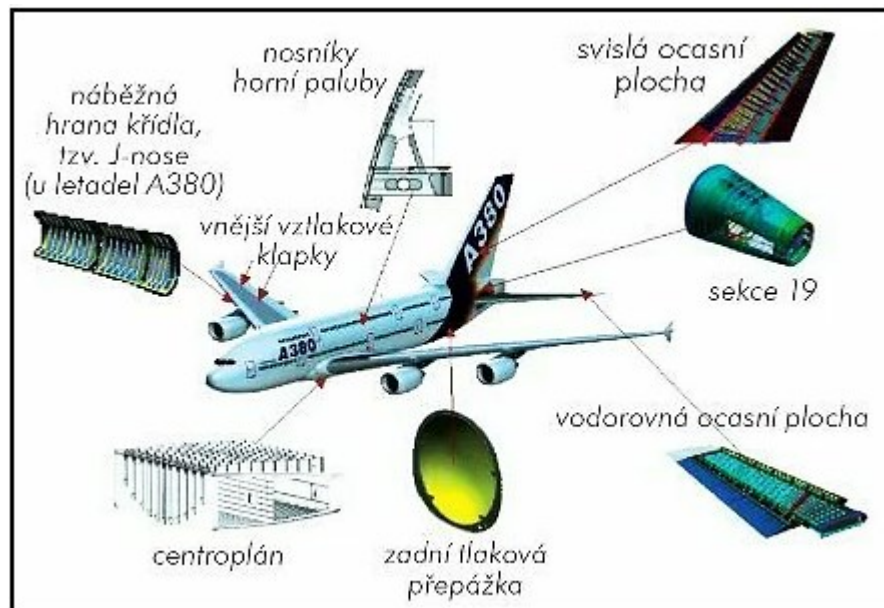
Pozitivní vlastnosti výsledného materiálu nejsou pouze součtem vlastností jednotlivých složek, ale u kompozitů dochází k synergickému efektu, při kterém jsou vhodně zkombinovány kladné vlastnosti jednotlivých substancí tak, že výsledný celek je větší, než součet složek. Obvykle se snažíme docílit u kompozitních materiálů největšího synergického účinku, a to zejména u těch vlastností, které jsou pro nás nejdůležitější. [2]



Obrázek 1 Synergický efekt [3]

Kompozity se čím dál více používají v dopravním průmyslu, jak pro exteriérové tak pro interiérové aplikace. Největší výhodou kompozitů je hlavně jejich nízká hmotnost s relativně dobrými pevnostními vlastnostmi pro různé druhy namáhání, které závisí na orientaci vláken.

Mimo dopravní průmysl nacházejí kompozity uplatnění také ve stavební, energetickém nebo zbrojním průmyslu. [1, 2, 3]



Obrázek 2 Využití kompozitních materiálů v případě Airbus A380 [4]

1.1 Výztuže

Výztuž zajišťuje převážně zvýšení mechanických vlastností (pevnost a tuhost) v kompozitním materiálu. Druh a způsob uložení výztuže má velký vliv na výsledné vlastnosti. Výztuž musí splňovat tyto podmínky:

- musí být pevnější než matrice
- musí mít větší tuhost než matrice
- matrice nesmí být porušena dřív než vlákno

Vyztužující materiál může být ve formě krátkých nebo dlouhých vláken, rohoží, rovingu, tkanin, úpletu nebo trojrozměrné tkaniny (3D tkaniny). [4]

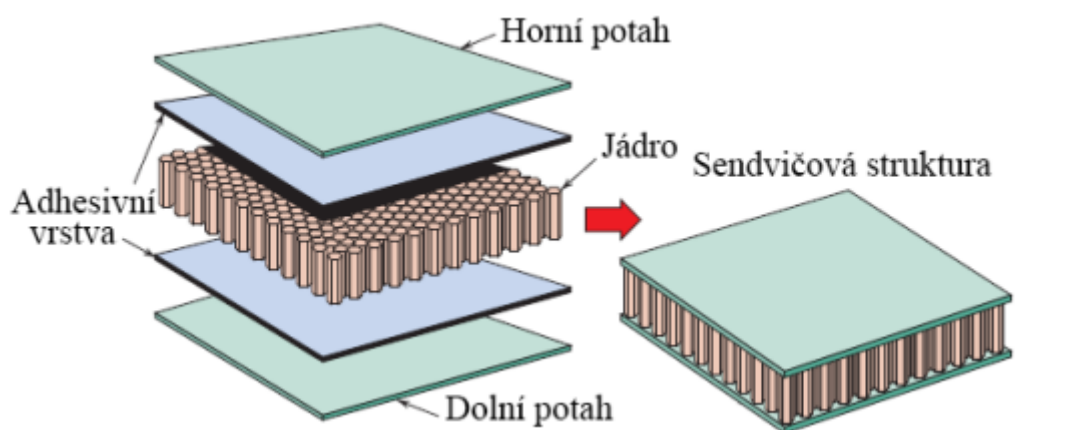
1.2 Matrice

Spojité složka, která zastává funkci pojiva výztuže a chrání většinou křehká vlákna, se nazývá matrice. Polymerní matrice jsou výrazně poddajnější než vlákna. Pevnost v tahu je u všech matic menší, než pevnost v tahu vláken (u polymerních matic až o dva řády). Druh matrice určuje také další vlastnosti, jako je odolnost proti korozi, elektricko-izolační vlastnosti, odolnost proti teplotě a ohni.[5]

2 KOMPOZITNÍ SENDVIČOVÉ PRVKY

Sendvičové struktury mohou být klasifikovány jako kompozitní materiály v tom smyslu, že se skládají ze dvou nebo více jednotlivých složek s různými vlastnostmi, jejichž kombinace vede k vysoce výkonnému materiálu. Na rozdíl od monolitických kompozitů, které se skládají z dokonalé směsi vláken (sklo, kevlar, uhlík, kov atd.) umístěných v kontinuální matici (např. termoplast nebo termosetová pryskyřice) mají sendvičové prvky odlišnou strukturu, ve které je materiál jádra spojený s materiálem potahu. [6, 43]

Sendvičový kompozit je speciální třída kompozitních materiálů, která se vyrábí připojením dvou tenkých, ale tuhých a velmi pevných vrstev potahů k lehkému, poddajnému, ale tlustému jádru. Jsou navzájem spojené tak, aby uplatnily výhody vlastností jednotlivých složek. Potahový materiál má obvykle vysokou tuhost, zatímco jádro má typicky vysokou pevnost v tlaku a ve smyku. Když jsou tyto vzájemně spojeny, tato kombinace dává sendvičové struktuře vysoký modul v ohybu s nízkou hustotou. Na přenos napětí má velký vliv rozhraní mezi potahem a jádrem (adhezivní vrstva). Adhezivní vrstva je buď z vhodného druhu materiálu, nebo je součástí matrice kompozitu vnější vrstvy. Při zatížení ohybem je na potah aplikováno normálové napětí, zatímco smykové napětí přenáší jádro. [6, 8, 25]



Obrázek 3 Základní schéma sendvičových struktur [6]

Nejčastěji jsou sendviče složeny z jádra a dvou potahů, které mají stejný materiál, orientaci vláken a tloušťku. Existují i různé případy, kdy jsou potahy z odlišných materiálů, tloušťky, orientace vláken a různých vrstvení. Tyto případy mohou ovlivnit tuhost a odolnost v ohybu. Nejčastějším důvodem je zatížení sendviče pouze z jedné strany, kdy jsou vnější vlákna konstrukce namáhána tahem a vnitřní vlákna tlakem. [51, 52, 53]

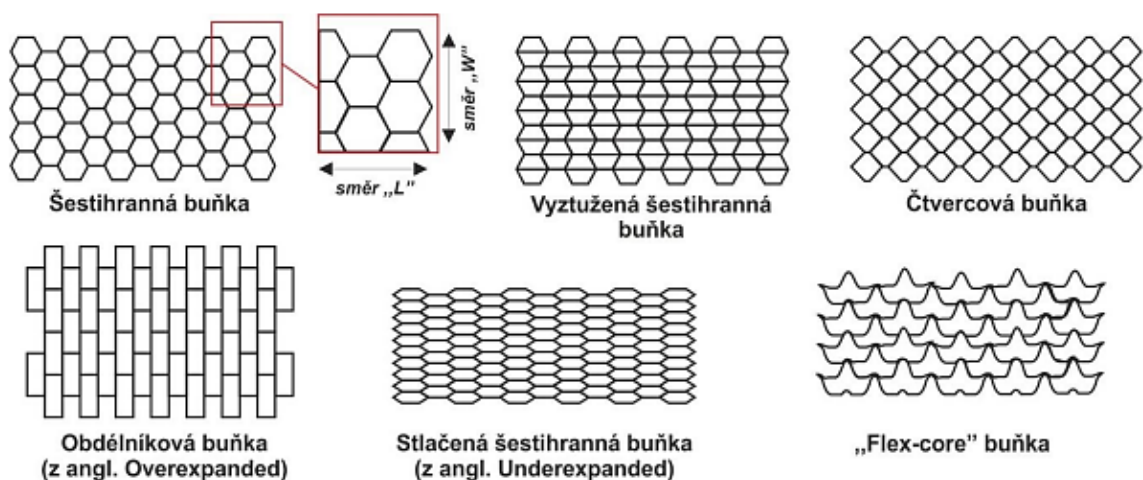
Sendvičová konstrukce nemusí nutně znamenat „jen“ konstrukci o třech vrstvách spojených lepidlem. Příkladem může být hybridní materiál Glare. Jedná se o laminát, který je složený z více tenkých vrstev hliníku a polymerního kompozitu vyztuženého skleněnými vlákny (prepreg). Konstrukce s využitím této kombinace vrstev (kov + polymer) se jeví jako velmi perspektivní směr v oblasti vícevrstvých kompozitních materiálů. [7]

2.1 Jádra sendvičových prvků

Jádro sendviče je vrstva s nízkou hustotou, která vyrovnává působení smykových sil mezi potahy. Mohou být různých typů a různých materiálů. Nejběžnější jsou jádra voštinová a pěnová. Volbou typu konstrukce, tloušťky a materiálu jádra jsou dány výsledné vlastnosti sendviče. Použitím vhodného jádra lze zvýšit tepelnou vodivost, zvukovou izolaci, požární odolnost, odolnost vůči vzniku a šíření trhlin, odolnost proti rázům, únavová odolnost a také tlumení vibrací. [13]

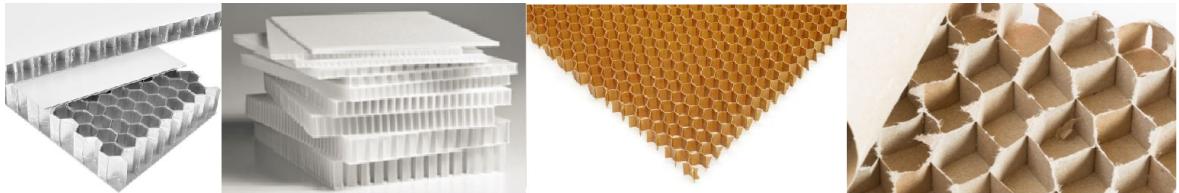
2.1.1 Voštiny

Voštiny lze charakterizovat tvarem a velikostí buněk, tloušťkou stěny buňky a výškou voštiny. Jedná se o druh výplně, které v nejběžnějším provedení připomínají šestiúhelníkové (hexagonální) buňky včelích pláství. Důležitá je také orientace buněk vůči namáhání. Pro šestiúhelníkové buňky se rozlišuje podélný směr L (z angl. longitudinal) a příčný směr W (z angl. width). Voština orientovaná ve směru W dosahuje vyššího ohybového modulu pružnosti než voština orientovaná ve směru L. Tvary buněk nemusí být pouze šestiúhelníkové, existují také obdélníkové, čtvercové... [14, 43]



Obrázek 4 Vybrané tvary buněk voštinových materiálů [14]

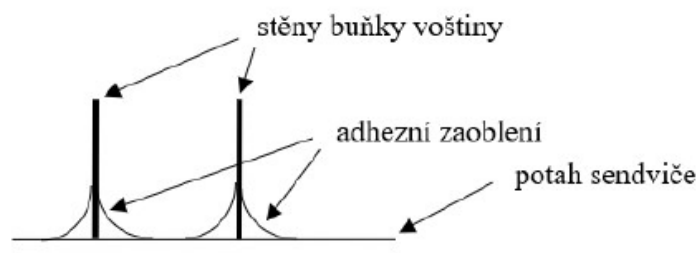
Mezi voštinové materiály patří papír, hliník, fenolickou pryskyřicí impregnovaná skleněná vlákna, polypropylen a fenolický papír ošetřený aramidovými vlákny. Fyzikální vlastnosti se do značné míry liší podle konkrétního materiálu a hustoty. Různé typy vyráběných voštinových jader se ve velké míře používají v leteckém a dopravním průmyslu. [16]



Obrázek 5 Příklad materiálu pro voštinové jádra (hliník, termoplast, nomex, papír) [54, 55, 56, 57]

Výroba voštiny může probíhat několika různými technologiemi. Nejpoužívanější jsou tvarování a technologie využívající expanze (roztáhnutí). Vstupní materiál je vždy plošný jako například skleněná, aramidová, uhlíková fólie či textilie nebo hliníkový plech. První technologie je převážně pro výrobu kovových voštin. Jedná se o tvarování plechu pomocí válců, skládání do bloků a lepení či svařování v místě styku. Při druhé technologii jsou tenké pláty materiálu vrstveny na sebe. V místech styku je nanášena vrstva lepidla. Po vytvrzení lepidla jsou pláty nařezány do požadované tloušťky a roztáhnuty do příslušného tvaru buněk. Po roztažení a naimpregnování požadovanou pryskyřicí dochází k zafixování stavu (tvaru) účinkem tepla (vytvrzením) v peci. Při výrobě sendvičů se voštinová plástev před přiložením potahu překryje lepicí fólií, která se pak při vyšší teplotě roztaví. [50]

Největším problémem voštinového jádra je jeho adheze k potahu, protože styčná plocha mezi potahem a jádrem je pouze plocha stěny buňky, která je v řádech desetin milimetru. Vrstva lepidla nebo pryskyřice musí být taková, aby vytvořila na rozhraní jádra a potahu rádius, který nazýváme adhezivní zaoblení. Kdyby lepidla bylo mnoho, zatékalo by do buněk voštiny, tím se však může zvýšit výslednou hmotnost sendviče. Zároveň je nutné dosáhnout co největší pevnosti mezi potahem a jádrem, aby bylo možné přenášet napětí. Toho lze docílit snížením velikosti buněk voštiny. [69]



Obrázek 6 Schématické adhezivní zaoblení [69]

2.1.1.1 Hliníková voština

Hliníková voština se vyznačuje největší pevností vzhledem ke své hmotnosti. Mechanické vlastnosti ovlivňuje tloušťka voštiny a velikost jejích buněk. I přestože má hliníková voština dobré mechanické vlastnosti, nízkou cenu a nízkou hustotu, není její použití vždy vhodné. Například není žádoucí pro díly, které jsou vystaveny působení vody, protože zde může dojít ke korozi. Další nevýhodou hliníkových voštin je jejich nevratná deformace. Pokud by byla poškozená voština použita pro výrobu sendviče, v místě deformace nedojde ke spojení s potahem, což výrazně sníží mechanické vlastnosti sendviče. [16, 49]

2.1.1.2 Termoplastické voštiny

Termoplastické voštiny se vyrábí pomocí extruze, jsou vhodné pro svoji lehkost a snadnou recyklovatelnost. Největšími nevýhodami je nízká tuhost a obtížné spojení s potahem. Nejčastěji se používají do dílů v interiérových aplikacích. Nejvhodnějšími termoplasty pro voštiny jsou ABS, polypropylen, polykarbonát nebo polyethylen. [16, 48]

2.1.1.3 Nomex

Polotvarem pro nomexovou voštinu je nomexový papír, který není vyrobený z celulózy, ale z kevlaru. Papír je dále namáčen do fenolické pryskyřice, aby se dosáhlo vysoké pevnosti a velmi dobré požární odolnosti. Při správné kombinaci s fenolickou pěnou lze vyrobit i voštiny zpomalující hoření. Voštiny nomex se díky svým vysokým mechanickým vlastnostem, nízké hustotě a dlouhodobé stabilitě používají především pro lehké interiérové panely v leteckém průmyslu. V současné době se dále rozšiřují i do jiných odvětví. Jsou ovšem podstatně dražší než jiné materiály jádra. [18]

2.1.1.4 Papírová voština

Papírové voštiny se nejčastěji používají v nábytkářském průmyslu jako výplně do dveří, nábytku, stěnových příček, školních a kancelářských tabulí. Zde je jejich největší výhodou vyšší lehkost a nižší cena než u dřeva. Dalšími výhodami jsou úplná recyklovatelnost, snadná manipulace, vysoká pevnost v tlaku vzhledem k objemové hmotnosti a jsou šetrné k životnímu prostředí. Jejich uplatnění najdeme i v leteckém a automobilovém průmyslu, ve stavebnictví nebo jako výplňový materiál pro balení křehkých výrobků. [16]

2.1.2 Pěny

Nejběžněji používaným materiálem pro jádra sendvičů jsou pěny z polymerního materiálu. Omezeně jsou používány i kovové, keramické nebo skelné pěny. [40]

Výroba kompozitních pěn spočívá v lehčení základního materiálu. Tím vzniká dvoufázový systém se spojitou termoplastovou nebo reaktoplastovou maticí, v níž je ve značném objemovém podílu od 50 do více než 90% dispergovaná plynová fáze. Zvětšení nebo zmenšení objemu materiálu při lehčení je nežádoucí a je důležité mu předcházet. [41, 42]

Vlastnosti pěny jsou ovlivněny především druhem výchozího materiálu, tloušťkou stěn buněk, chemickým složením stěn buněk, struktúře dutin, hustotě dutin nebo vzájemným poměrem dutin v materiálu. Samotná struktura polymerních pěn může být tvořena buď otevřenými (propojenými), nebo uzavřenými dutinami. [43, 44]

2.1.2.1 Polyvinylchloridové (PVC) pěny

Pěnová jádra z PVC se vyrábějí kombinací polyvinylkopolymeru a polyuretanu se stabilizátory, změkčovadly, síťovacími sloučeninami a nadouvadly. Směs se zahřívá pod tlakem, aby se iniciovala zesíťovací reakce, a poté se ponoří do nádrže s horkou vodou, aby se rozšířila na požadovanou hustotou.

Pěny PVC nabízejí vyváženou kombinaci statických a dynamických vlastností a dobrou odolnost proti nasákavosti. Mají také velký rozsah provozních teplot a jsou odolné vůči mnoha chemikáliím. Obecně jsou PVC pěny hořlavé, ale lze přidávat retardéry, které zpomalují hoření. Takovéto pěny jsou pak vhodné pro použití v leteckém nebo dopravním průmyslu. [13, 16]



Obrázek 7 PVC sendvičový panel [59]

Existují dva hlavní typy pěnového PVC:

- síťované (*příčně a lineárně*)
- nesíťované

Nesíťované pěny jsou houževnatější a pružnější, lze je snadněji tvarovat za tepla kolem křivek. Mají však některé nižší mechanické vlastnosti než ekvivalentní síťované PVC a nižší odolnost vůči zvýšeným teplotám a styrenu. Jejich síťované protějšky jsou tvrdší, ale křehčí a vytvoří tužší panel, méně náchylný k měknutí nebo tečení v horkém klimatu. [16]

2.1.2.2 Polystyrenové (PS) pěny

PS pěny se vyznačují nízkými mechanickými vlastnostmi. Jejich zvukově izolační vlastnost je poměrně špatná a lze ji srovnat se dřevem. Tyto nevýhody jsou vyváženy cenou, která není vysoká. Uplatnění nacházejí především jako jádra pro sportovní pomůcky (výroba plachetnice a surfových prken), zde je využita především jejich nízká hmotnost. Nejsou vhodné pro výrobu pevnostních konstrukčních dílů a nemohou být použity s polyesterovými pryskyřicemi, protože jsou rozpustné ve styrenu. [16, 25]

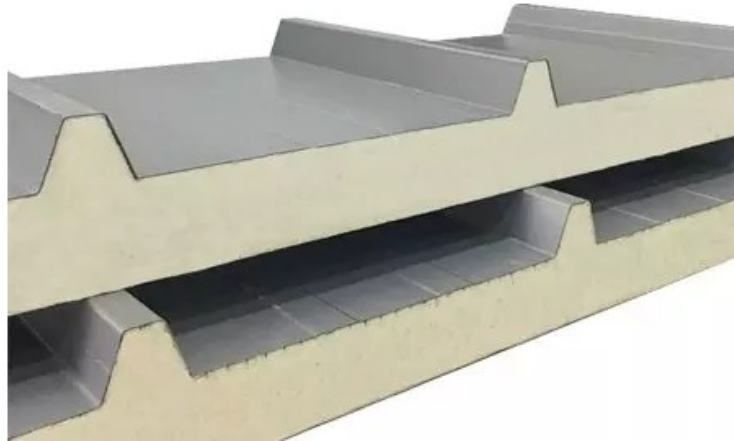
2.1.2.3 Polymetakrylimidové (PMI) pěny

PMI pěny dosahují nejlepších mechanických vlastností mezi polymerními pěnovými jádry. Díky jejich dobré rozměrové stabilitě je možné jejich použít v kombinaci s prepregy. Další výhodnou je dobrá obrobitelnost, zásluhou které je možné vyrábět i tvarově složité díly. Nejčastěji se používají v leteckém průmyslu k výrobě rotorů vrtulníků, klapek dopravních letadel, přepážek v tlakových nádobách a při výrobě částí raketoplánů. Ve sportovním odvětví se PMI pěna aplikuje v sendvičové konstrukci ráfku kol. [13, 16, 45]

2.1.2.4 Polyuretanové (PUR) pěny

PU materiály jsou používány díky jejich jednoduché přípravě, která spočívá ve smíchání dvou nebo více složek. Pěny ale vykazují pouze mírné mechanické vlastnosti a mají tendenci s věkem zhoršovat svůj povrch na rozhraní pryskyřice/jádro, což vede k delaminaci potahu. Jejich konstrukční použití je proto obvykle omezeno na výrobu formovacích prvků pro vytváření rámců nebo výztuh pro výztužné komponenty. Polyuretanové pěny však mohou být použity v málo zatížených sendvičových panelech, přičemž tyto panely jsou široce používány pro tepelnou izolaci. Pěna má také přiměřené vlastnosti při zvýšené provozní

teplotě, dobrou akustickou absorpci, odolnost proti nasákavosti a kyselinám. Pěnu lze snadno řezat a opracovávat na požadované tvary nebo profily. [16, 25]



Obrázek 8 Polyuretanové jádro ve střešním panelu [61]

2.1.2.5 Polymethylmethakrylátové (PMMA) pěny

Pro danou hustotu mají polymethylmethakrylátové (akrylové) pěny jedny z nejvyšších celkových pevností a tuhostí pěnových jader. Pro jejich jedinečně vysokou rozměrovou stabilitu je lze snadno použít s konvenčními prepregy vytvrzovanými při zvýšené teplotě. Jsou však drahé, což znamená, že jejich použití bývá omezeno na letecké kompozitní díly, jako jsou listy rotoru vrtulníků a klapky letadel. [16]

2.1.2.6 Styrenakrylonitrilové (SAN) pěny

SAN pěny se chovají podobně jako tvrzené zesíťované PVC pěny, mají ale mnohem vyšší tažnost a houževnatost. Proto lépe absorbují nárazy, než pěny konvenční i tvrzené. Na rozdíl od PVC pěn nejsou změkčovány plastifikátory, z toho důvodu si zachovávají déle své houževnaté vlastnosti. [16, 46]

Pěny SAN nahrazují lineární PVC pěny v mnoha aplikacích, protože mají velkou část houževnatosti a tažnosti lineárního PVC, ale mají vyšší teplotní výkon a lepší statické vlastnosti. Stále jsou však tepelně tvarovatelné, což pomáhá při výrobě zakřivených dílů. Tepelně stabilizované druhy SAN pěn lze také jednodušeji použít s nízkoteplotně vytvrzovanými prepregy, protože nemají rušivé chemické vlastnosti jako PVC. [16]

2.1.2.7 Polyethylentereftalátové (PET) pěny

Jádra vyrobená z PET pěn disponují největší únavovou odolností mezi pěnovými jádry. Dále vykazuje nízkou nasákavost, vysokou chemickou stálost, velkou odolnost vůči tlaku, dobrou tepelnou stabilitu při vysokoteplotním zpracování a dobrou recyklovatelnost. Uplatňují se především ve výrobě trupů lodí nebo pro další díly v dopravním průmyslu. Jsou odolné do teploty až 150°C, proto jsou vhodné na výrobu v autoklávu. Jádra z PET odolávají všem druhům pryskyřic, je tedy možné užít téměř pro jakoukoliv aplikaci. [19, 47]



Obrázek 9 Jádro z PET pěny [62]

2.1.2.8 Polyetherimidové (PEI) pěny

Kombinací polyetherimid s polyethersulfon vznikají PEI pěny, které disponují vynikající odolností proti požáru a odolností proti provozní teplotě. Přestože je tato pěna drahá, používá se v konstrukčních, tepelných a protipožárních aplikacích v rozmezí teplot od -194°C do +180°C. Je velmi vhodná pro interiéry letadel a vlaků, protože splňuje některé z nejprísnejších požadavků na požární odolnost. [16]

2.1.3 Balzové dřevo

Prvním používaným materiálem na jádra sendvičů bylo balzové dřevo. Jedná se o velmi lehký druh dřeva, které je značně pórovité. Nevýhodou je nynější nedostatek tohoto materiálu, jeho hořlavost a rozmanitost vlastností napříč objemem. Vlhnutí dřeva může rovněž do značné míry ovlivňovat mechanické vlastnosti. [25]

Struktura balsy s uzavřeným zrnem se skládá z protáhlých, prizmatických buněk o délce (směru zrna), která je přibližně 16krát větší než průměr. Tento materiál vykazuje vynikající tuhost a pevnost vazby. Balsa s koncovým zrnem je k dispozici ve formě plechu pro

konstrukci plochých panelů, nebo v blokovém uspořádání, které odpovídá složitým křivkám. Balsa má vysoký poměr stran a směrově zarovnané buňky tak, že zrno je orientováno ve směru maximálního napětí. Balsa se používá u produktů, jako jsou trupy rekreačních lodí, vojenská letadla, námořní plavidla, vozidla, lopatky větrných turbín a průmyslové nádrže odolné proti korozi. [13, 16]



Obrázek 10 Dekorativní panel s balzovým jádrem [63]

2.1.4 Korek

Korek je tvořen uzavřenými buňkami, které vytváří přírodní voštinu. Jako jeho největší výhody lze označit nízkou hustotu, schopnost vracet se do původního stavu, vysokou stlačitelnost, nízkou tepelnou vodivost a dobrou odolnost proti smykovému napětí. Korková jádra jsou vhodná pro části lodí, sportovní potřeby nebo pro letecký či stavební průmysl. [28, 29]

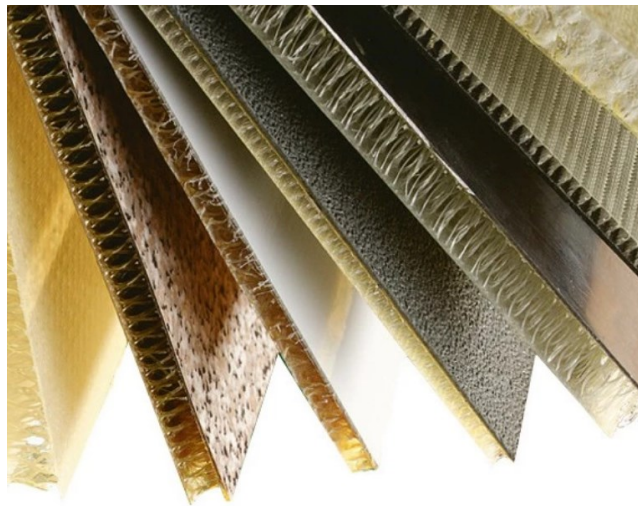


Obrázek 11 Podlahový panel s korkovým jádrem [64]

2.1.5 3D Tkaniny

Tkaniny pro výrobu jader se nazývají buď jádrové tkaniny nebo laminátové bulkery. Používají se různé materiály. Ve většině případů jsou používána polyesterová vlákna, která jsou spojena do konfigurace blotteru podobné rohoži. Tyto výrobky jsou navlhčeny pryskyřicí a laminovány podobně jako výztuž ze skleněných vláken. Jsou přepravovány ve

stlačeném stavu a vlákna jsou zafixována pomocí pojiva rozpustného v pryskyřici. Po přidání rozpouštědla dojde k roztažení tkaniny v kolmém směru na její povrch. 3D tkaniny jsou výrazně levnější než voštinové jádro a lze je vyrábět s výrazně nižším profilem. Uplatnění nacházejí především při výrobě navíjených nádrží pro ekologicky nebezpečné látky. Uvnitř tkanin mohou být totiž umístěna čidla, která detekují únik této látky. [27]



Obrázek 12 Sendvičová jádra z 3D tkaniny [60]

2.2 Potahy sendvičových prvků

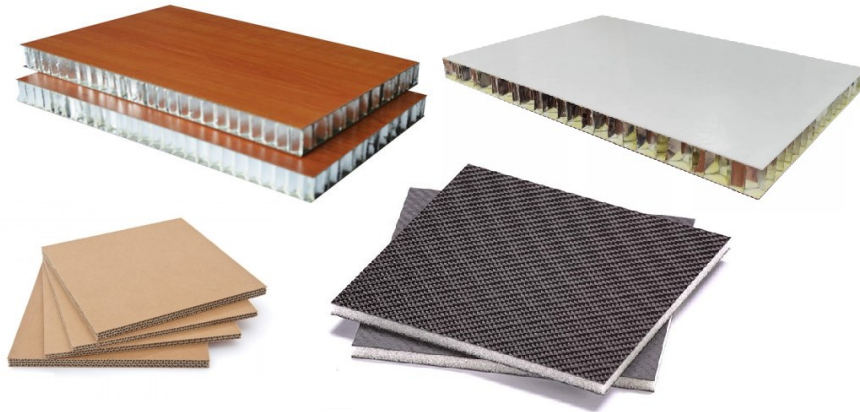
Potahy jsou vnější tenké vrstvy, kterými u sendviče docílíme vysoké tuhosti v ohybu. Potahový materiál je nosným prvkem konstrukce, proto jsou na něj kladeny tyto požadavky: odolnost zatížení v tahu, tlaku, smyku i ohybu. Dále se u něj vyžaduje rozměrová stálost, hladký povrch a stejně tak je nutné, aby splňoval i estetické požadavky. Pro tyto účely lze používat například různé druhy vláknových kompozitů, slitiny hliníku, hořčíku a titanu, korozivzdornou ocel a v neposlední řadě také dřevo, impregnovaný papír apod. [11, 7]

2.2.1 Kovové potahy

Kovové potahy se uplatňují především v dopravním a stavebním průmyslu. Ocelové potahy jsou voleny v případech, kdy je požadována vysoká mechanická, tepelná a erozivní odolnost. Hliníkové slitiny se volí především kvůli jejich malé hustotě a korozivní odolnosti. Nejčastěji se používají tloušťky plechu 0,3 až 1,6 mm. A ve speciálních případech až 6,3 mm. [11, 26]

2.2.2 Nekovové potahy

Nekovové materiály mají využití v mnoha oborech. Dřevo, plasty nebo papírová lepenka jsou využívány především za účelem designu (dekorace nábytku, budov...). [7]



Obrázek 13 Příklady nekovových potahů [65, 66, 67, 58]

Sendviče nemusí být pouze rovné desky, ale mohou tvořit i složité plochy s výstupky a prolisy. Pro složitě tvarované sendviče je použití kovových potahů velmi nákladné, proto se zde převážně používají kompozitní potahy. [8]

Hlavní složky vláknového kompozitu jsou vlákna a polymerní matrice. Nejčastěji jsou používána skelná, uhlíková nebo aramidová vlákna. Jako polymerní matrice se používá pryskyřice, nejvíce termosetová (reaktoplastická) a termoplastická. Mohou být použity přídatné složky pro zlepšení vlastností (odolnost proti UV záření, odolnost proti únavě, lepší pevnost na rozhraní matrice-vlákno...). [2, 3]

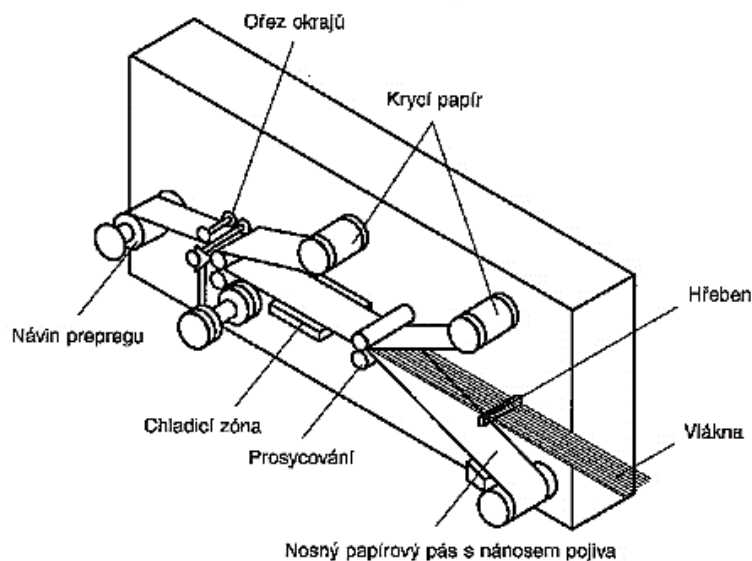
Podle uložení vláken jsou kompozity rozděleny na tkaniny, prepregy, pásy, rohože nebo rovingy. Prepregy jsou polotovary určené k dalšímu zpracování, jedná se o nasycené a částečně vytvrzené vlákna. Tkaniny vznikají ze dvou navzájem kolmých propletených soustav vláken. Rovingy jsou svazky nekonečných tenkých vláken, bez zákrutu. Slouží pro výrobu tkanin nebo preperegů. U rohoží nejsou vlákna tkaná, ale jsou uspořádána kontinuálně. [2, 3]

Vlastnosti polymerních kompozitů lze upravovat v širokém rozmezí hodnot v závislosti na volbě matrice, vláken, objemovém podílu výztuže a jejím prostorovém uspořádání. Orientace vláken ve vrstvě (tedy i vrstvy v laminátu) má značný vliv na výsledné mechanické vlastnosti. [6]

2.2.2.1 Prepreg

Jedná se o kompozitní polotvar, který slouží k dalšímu zpracování při výrobě kompozitů. Jedná se o plochý útvar požadovaného tvaru a tloušťky. Skládá se z „předimenzovaného“ vlákna ve formě vazby a částečně vytvrzené polymerní matrice, která umožňuje snadnou manipulaci a snadné spojení s dalšími součástmi během výroby. Protože teplo urychluje proces polymerace, je nutné prepreg skladovat v chladných prostorech. [27, 71]

Prepregu je celá řada a rozlišují se podle typu použité tkaniny nebo rohože. Prepregy, které mají uložena všechna vlákna rovnoměrně, se nazývají jednosměrné. Při jejich výrobě jsou vlákna pomocí stavitelného hřebenu vyrovnána a takto připravené jsou uloženy na papírový nosič, který je opatřen silikonovou vrstvou, na kterou je předem nanášena požadovaná vrstva pryskyřice. K prosycení výztuže dochází pomocí vytápěného kalandru. Dále se v chladicí zóně zastaví vyztužovací reakce, prepreg se ořízne a je navinut na cívku. [27]



Obrázek 14 Výroba jednosměrně orientovaného prepregu [27]

Prepregy se na sebe vrství do požadované tloušťky a následně jsou pomocí forem dotvarovány na požadovaný tvar. Matrice většinou vyžadují k vytvrzení teplo nebo tlak, což znamená pec nebo autokláv. Na prepregy se většinou využívají nenasyčené polyesterové pryskyřice, vinylové a epoxidové pryskyřice. [27]

Díky tomu, že je matrice již součástí polotvaru a vlákna jsou tedy nasycena ve správném poměru, dosahují součásti vyrobené z prepregů maximálních pevnostních vlastností. Typicky při ručním kladení dosahujeme významného množství přebytečné pryskyřice, které zvyšuje křehkost a snižuje celkové vlastnosti. Ideální obsah pryskyřice je asi 35%. Již

prosycené polotvary mají mnoho dalších výhod. Například stálost jejich rozměrů a stejnoměrné prosycení v celém objemu. Snižují nepořádek a odpad, který vzniká při ručním laminování. Značně snižují dobu výroby, protože ihned po vytvrzení je možné výrobek použít. Prepregy prakticky eliminují vzduchové bubliny a hladký, lesklý povrch je snadněji dosažitelný, i když příprava formy a uvolnění formy je stále nutné a bude mít přímý vliv na kosmetiku dílu. [70]

Nevýhodou prepegů je jejich cena, která je stále vyšší, i když sečtete náklady na pryskyřici, vytvrzení a tkaninu při ručním vytvrzování. Menším problémem je jejich skladovatelnost, moderní prepregy lze skladovat až šest měsíců při pokojové teplotě, ale udržováním materiálu v chladu se výrazně prodlouží jejich životnost. A poslední nevýhodou je nutnost vytvrzení teplem. Mnoho pokročilých výrobců používá autoklávy, ale postačí jakýkoli zdroj tepla. [70]

Prepregy se využívají pro díly převážně pro letecký a kosmický průmysl, ale i v dalším odvětvích energetiky, automobilového průmyslu, sportovního zboží. Nově se využívají k výrobě podmorských trubek pro těžbu ropy a zemního plynu nebo výrobě vysokotlakých nádob. [27]

3 VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH PRVKŮ

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. Ohybová tuhost a pevnost nejsou jejich jedinými přínosy.

Mezi další výhody patří:

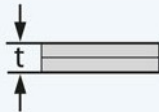
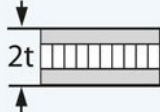
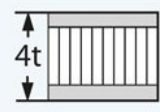
- únavová odolnost
- odolnost proti šíření trhlin
- odolnost proti rázům
- tepelná odolnost a odolnost proti ohni
- tepelná a akustická izolace

Tyto vlastnosti jsou určeny převážně materiálem jádra. [9]

Z porovnání pevností pěnových a voštinových jader vyplývá, že voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnová jádra při stejné hustotě. Ovšem při volbě vhodného jádra sendviče je nezbytné zohlednit všechny faktory. [8]

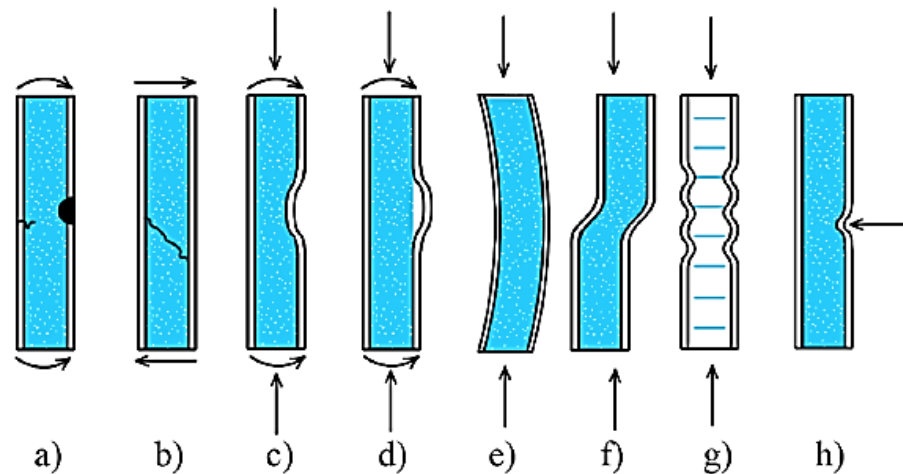
3.1 Tuhost a pevnost v ohybu

Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná druhé mocnině její tloušťky. Výhodou je, že se zvětšováním tloušťky sendviče dochází k velmi malému nárůstu jeho hmotnosti, zvětšuje se pouze tloušťka lehkého jádra, které obvykle má hustotu okolo $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pevnost v ohybu také roste se vzdáleností potahů, ale při dimenzování sendviče je nutné zároveň posuzovat smykovou pevnost jádra. Obecně lze říci, že pevnost jádra ve smyku roste s jeho hustotou. [8]

Material	Homogenní materiál	Síla panelu 1t	Síla panelu 4t
Schéma			
Tuhost panelu	1	7	37
Pevnost v ohybu	1	3,5	9,2
Hmotnost	1	1,03	1,06

Obrázek 15 Srovnání tuhosti a pevnosti hliníkového sendvičového panelu versus homogenní materiál [9]

O pevnosti sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky rozhoduje především pevnost jádra v tlaku, ale i tuhost a tloušťka potahů. Pevnost v tlaku jádra roste s jeho hustotou. Adhesivní vrstva musí být schopná přenášet smykové síly mezi potahem a jádrem. Obecným pravidlem je, že má být schopná přenést smykové napětí stejně velké jako jádro sendviče. [8]



Obrázek 16 Příklady porušení sendvičových struktur

a) lom nebo plastické chování potahu, b) smykové porušení jádra, c) zborcení jádra a zvlnění potahu, d) porušení adhesivní vrstvy a zvlnění potahu, e) ztráta vzpěrné stability, f) zvlnění smykem, g) zvrásnění, h) lokální stlačení [10].

3.2 Tepelná odolnost a odolnost proti ohni

Stejně jako na ostatní strojírenské výrobky i na sendviče jsou kladeny požadavky na tepelnou odolnost. Zde se však musí brát v úvahu tepelná odolnost všech složek sendviče, tj. potahů, jádra i spojovacího lepidla. U tepelné odolnosti také hraje velký vliv tepelná vodivost použitých materiálů. Při vysoké tepelné vodivosti použitých materiálů je ohřev sendviče nižší než při nízké tepelné vodivosti (při ohřevu sendviče pouze na jedné straně). Této vlastnosti se využívá při stavbě kosmických raket, kde se právě z tohoto důvodu používají hliníkové voštiny. [8]

3.3 Nízká hmotnost

Jeden z hlavních faktorů, který podmiňuje aplikaci sendvičových konstrukcí v praxi, je požadovaná úspora hmotnosti. Tato nesporná výhoda se výrazně zaslouží o zvýšenou ekonomičnost, která se kladně projeví v podobě ušetřeného paliva při jakémkoliv druhu přepravy. [11]

Jako vzor pro snížené hmotnosti lze vzít v úvahu kormidla letounů, kde jsou použity sendviče s extrémně tenkými potahy. Další úspora v hmotnosti je téměř kompletní odstranění nýtů, což má také vliv na aerodynamickou účinnost této pohyblivé součásti. Zavedením sendvičových prvků do leteckých konstrukcí je ušetřeno 15 – 30% z celkové hmotnosti.

3.4 Izolační vlastnosti

Izolační vlastnosti sendviče jsou závislé na druhu jádra. V případě pěnových jader ještě závisí na typu použitého lehčení. Z porovnání obecně vyplývá, že pěnová jádra mají mnohem lepší tepelné i zvukové izolační vlastnosti než jádra voštinová. [11]

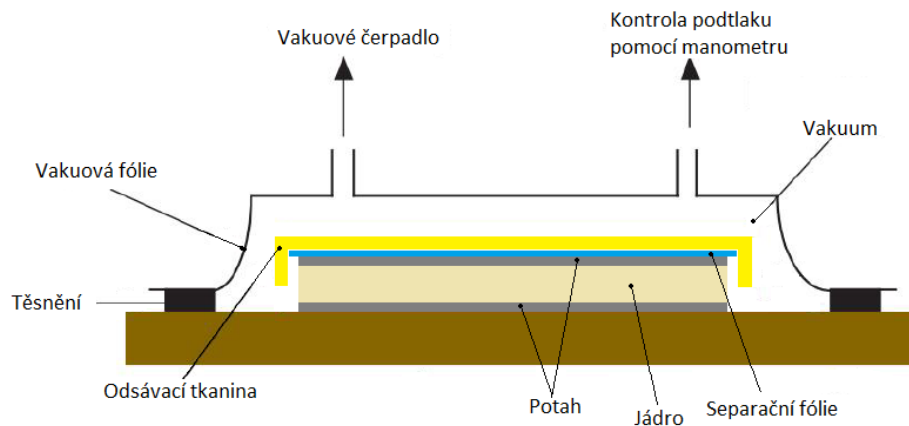
4 TECHNOLOGIE VÝROBY SENDVIČOVÝCH PRVKŮ

Sendvičové prvky je možné vyrábět několika různými technologiemi, většinou jsou stejné jako pro výrobu samostatných kompozitních výrobků, ale s tím rozdílem, že v sendvičích je přidán jádrový materiál. Volba vhodné technologie je závislá na sériovosti výroby, složitosti a velikosti dílce, výrobních nákladech, vstupních materiálech, kvalitě povrchu, rozměrové toleranci a výsledných vlastnostech sendviče, jako je pevnost, tuhost, houževnatost, tepelná odolnost... Dále je kladen důraz na to, aby byly co nejvíce omezeny dokončovací operace na vyrobeném dílu, jako je obrábění, začišťování, lakování, leštění... [16, 68]

Nástroj pro výrobu sendvičů je forma, která může být z různých materiálů. Volba vhodného materiálu závisí především na počtu kusů, které budeme vyrábět. Na prototypy nebo malou sérii se nejčastěji využívají laminátové formy vyrobené ze skla a polyesteru, které jsou levné. Na sériovou výrobu je vhodné použít formy hliníkové nebo ocelové, které jsou více trvalé. Ve zvláštních případech je možné použít formy betonové nebo dřevěné. Dále se formy dělí na dvoudílné a jednodílné, které jsou buď v pozitivním, nebo negativním tvaru. Na formu je nutné před použitím nanést vhodný separátor a ochranný gelcoat, podle druhu použité pryskyřice. [12, 43, 52]

4.1 Lisování pomocí vakuovaného vaku

Používá se jednodílná forma, na kterou se nejdříve nanese první vrstva ochranného gelcoatu (pryskyřice) na kterou se postupně kladou vrstvy výztuže ve formě prošíváných, tkaných, pletených nebo lepených tkanin. Každá vrstva tkaniny musí být dostatečně nasycena pryskyřicí. Ta se nanáší pomocí válečku nebo štětce. Až dosáhneme požadované tloušťky potahu je na tyto vrstvy umístěno jádro a následuje další pokládání vrstev na potah. Následně je na tyto vrstvy umístěna ještě separační fólie a odsávací tkanina, které slouží k zachycení přebytečné pryskyřice. Celá forma se utěsní pomocí fólie a těsnění a připojí se k čerpadlu, které vyvolá uvnitř formy vakuum. Za působení atmosférického tlaku se materiál zhutní a díky vakuu se zbaví přebytečných vzduchových bublin. Výlisky vyrobené touto metodou mají hladký povrch z obou stran. [16, 27]

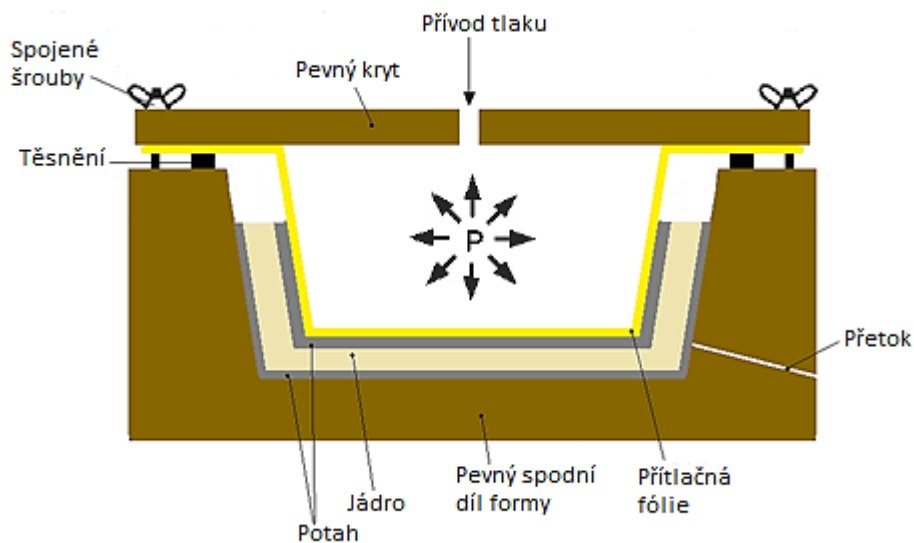


Obrázek 17 Lisování pomocí vakuového vaku [16]

Pro zjednodušení a zlepšení kvality procesu je možné místo ručního kladení použít jako potah prepregový polotovar. Prepregy určené pro tuto metodu jsou vyrobeny z epoxidové pryskyřice, které se vytvrzuje při teplotách od 60 °C do 120 °C. Problém může nastat při výrobě silných potahů (>3mm) kde je při vytvrzování obtížné odsát vzduch, který je mezi jednotlivými vrstvami. Tomu lze předejít nahříváním jednotlivých vrstev. Což může vést k významnému prodloužení výrobních časů. V posledních letech se proto začaly vyrábět různé druhy modifikovaných prepregů, které umožňují výrobu vysoce kvalitních tlustých potahů v jediném kroku. [16]

4.2 Lisování pomocí tlakového vaku

Princip této metody je opačný jako lisování ve vakuu. Forma pro tlakové lisování je negativem výrobku. Do této formy jsou postupně kladeny jednotlivé vrstvy stejně jako u předchozího druhu lisování. Rozdíl nastane v uzavření formy. Zde je forma uzavřena pevným krytem tak, aby bylo možné dosáhnout rovnoměrného přetlaku uvnitř formy. V porovnání z předchozí technologií musí být forma mnohem stabilnější, ale díky vysokým rozdílům v tlacích se docílí lepšího zhutnění materiálu. [27]



Obrázek 18 Lisování pomocí tlakového vaku [16]

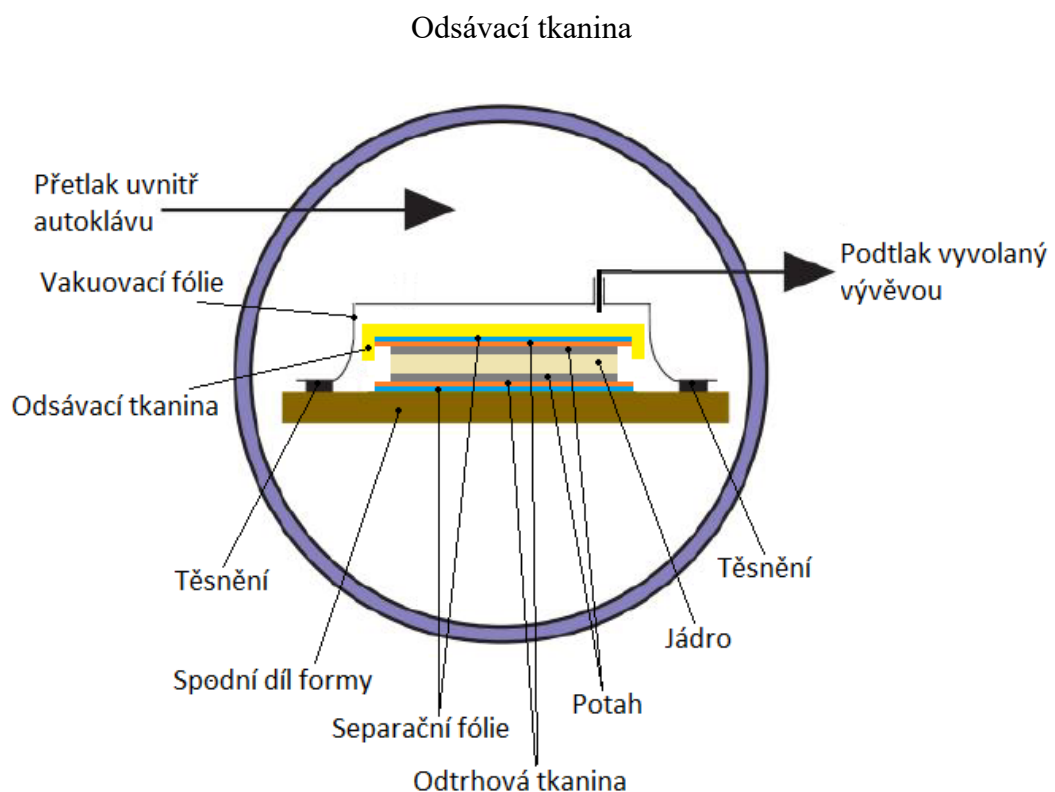
4.3 Prepreg technologie - lisování v autoklávu

Pro výrobu sendvičových panelů pomocí autoklávu se jako potah nejčastěji používají prepregy. Ty jsou výhodné především díky tomu, že složitý proces výroby prepregu je oddělen od dalšího zpracování pomocí autoklávu. [27]

Jde o spojení dvou technologií výroby kompozitu, lisování pomocí vakuového a tlakového vaku. Autokláv je vytápěná uzavíratelná nádoba, kde probíhají reakce za vysokého tlaku a teploty. Je zde možné přesně řídit teplotní, tlakové a vakuové cykly, což pomáhá při stabilizaci a vytvrzení kompozitních materiálů. Je možné dosáhnout velmi účinného zhuštění materiálu a odstranění bublin. Autokláv vhodný pouze pro malosériovou výrobu a vzhledem ke zvýšeným vstupním investicím i přesnosti vyráběných dílů je využíván především pro letecký a raketový průmysl. [27]

Při lisování v autoklávu není potřeba konstruovat formu jako uzavřenou nádobu. Je možné ji i značně odlehčit a to díky hydrostatickému tlaku, který působí na všechny strany. Forma může být laminátová nebo kovová. Ukládání sendvičů do formy se provádí ručně, poloautomaticky nebo automaticky mimo autokláv. Před samotným umístěním prepregů do formy je nutné je upravit na požadovaný tvar a velikost pomocí řezacího plotru. Potah se může skládat z několika vrstev, při jejich kladení na formu je výhodou jejich lepivost, která se dá pomocí ohřevu zvýšit. Po položení dostatečného množství vrstev je na řadě umístění jádra. Druh jádra není nijak omezen. Na jádro je opět umístěno požadované množství vrstev prepregu, které budou tvořit druhý potah. Po položení všech vrstev potřebných pro sendvič

je potřeba umístit i tzv. pomocné materiály. Prvním pomocným materiálem je separační fólie, která se umístí hned na poslední vrstvu prepregu. Slouží k odvedení těkavých látek a přebytečné pryskyřice mimo sendvič. Tyto přebytečné látky zadrží odsávací tkanina tzv. bleeder. Díky tomu se zamezí ucpání odsávacího ventilu. Jako poslední je umístěna vakuovací fólie s těsnicí páskou, která zahalí všechny předchozí vrstvy. Pro tvarově složité výrobky je možné tuto fólii nahradit pružnou membránou z pryže, která má předlisovaný tvar. Dalším pomocným materiálem je odtrhová tkanina, která není pro zaformování nezbytně nutná. Je možné ji umístit z obou stran kompozitu pod separační fólii. Využívá se pro snadné odformování a po jejím odstranění vznikne povrch, který je vhodný pro nanesení lepidla nebo barvy bez nutnosti dalších úprav. Všechny použité materiály musí vydržet teploty vytvrzování. Čas a teplota vytvrzování závisí především na druhu pryskyřice použité v prepregu. Ochlazování je pozvolné až na úroveň pokojové teploty. Po ochlazení jsou všechny pomocné materiály odstraněny z formy a putují do odpadu. Formu je možné využít opět pro další výrobní cyklus. [15, 27]

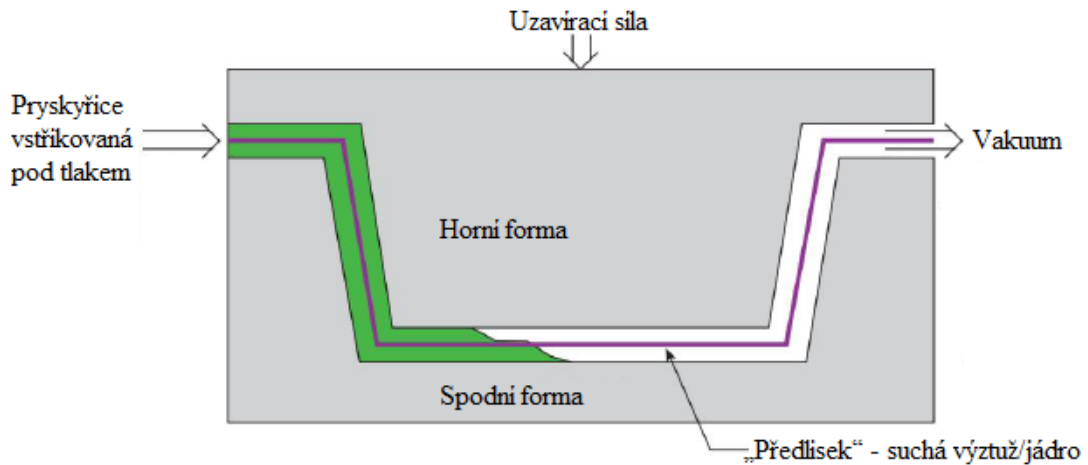


Obrázek 19 Lisování v autoklávu [16]

4.4 Vysokotlaké vstřikování – RTM

RTM využívá uzavřené formy, která zabraňuje uvolňování rozpouštědla z UP a VE pryskyřice a díky níž jsou obě strany pohledové. Při této technologii jsou výztuže a jádro

pokládány jako suchý stoh materiálů, někdy jsou předlisovány do tvaru formy a drží tvar pomocí pojiva. Tyto „předlisky“ se pak snadněji vkládají do dutiny formy. Po uzavření formy je pryskyřice spolu s tvrdidlem vstřikována pod tlakem cca 0,2 – 0,35 MPa. Plnění probíhá do té doby, než jsou zaplněny i odtokové otvory. Aby tkanina lépe nasávala pryskyřici je možné vstřikování podpořit vakuem. Toto je známé jako vakuové vstřikování - VARI [16, 68]



Obrázek 20 RTM technologie [16]

Tato technologie není vhodná pro sendviče s voštinovými jádry, protože by se dutiny naplnily pryskyřicí. U ostatních druhů jader je nutné vyvrtat kanálky, pro distribuci materiálu z jedné strany na druhou. Obecně se využívá pro spíše menší komponenty ve středně až velkosériové výrobě vzhledem k vyšší hmotnosti a ceně formy než při jiných technologiích. [16, 68]

5 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH PRVKŮ

Zkušební metody pro sendvičové panely existují od doby, co se tyto panely používají jako konstrukční materiály. Jejich zdokonalování a standardizace je ovšem mnohem novější.

Vlastnosti nebo charakteristiky sendvičového panelu se vyhodnocují dle pravděpodobného místa selhání. To závisí na geometrických a výrobních charakteristikách panelu a na tom, jak je zatížen. Například čelní vrstva může selhat v tahu, tlaku, smyku nebo místním vybočení. Kromě toho může jádro selhat ve smyku nebo rozdrčením. Lícni vrstva se může oddělit od jádra v důsledku nadměrného smyku nebo normálního tahového napětí v adhezivním spoji. Byly vyvinuty zkušební metody k izolaci a simulaci každého z těchto specifických režimů selhání.

Nejčastěji se používá pět metod, které jsou standardy ASTM. Tyto metody se staly standardem již v 50. letech minulého století, ale v této době se sendvičové prvky příliš nepoužívaly, a proto se začaly více využívat až o 40 let později. [72]

5.1 Odolnost proti odlupování ASTM D1781

ASTM D1781 ukazuje odolnost adhezivního spoje proti odlupování. Výsledkem je, jak velký krouticí moment je potřeba k odloupení dvou vrstev. Nejčastěji se používá k porovnání výsledků dvou alternativních podmínek procesů za účelem jeho zlepšení. Přímé srovnání lze provádět v případech, kdy je identický návrh vzorku a zkušební podmínky. [73, 74]

U relativně křehkých materiálů určuje metoda ASTM D1781 stupeň vytvrzení. Vyšší hodnoty mohou tedy indikovat neúplně vytvrzené materiál. [74]

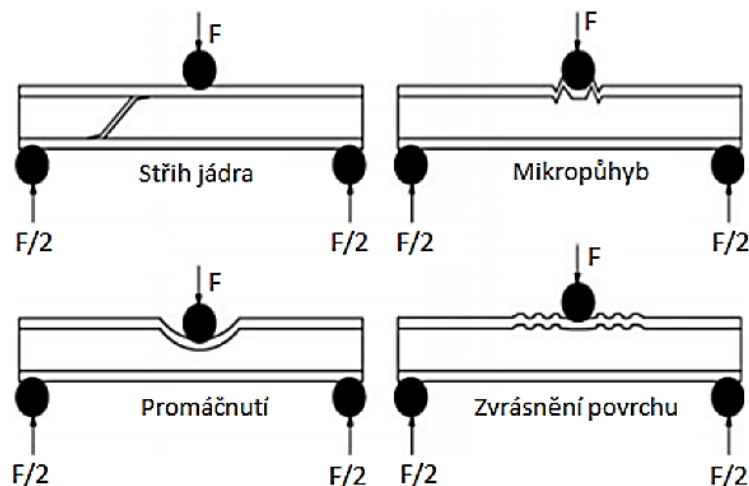
Aby bylo možné přesně změřit sílu odlupování relativně pružného jádra z tuhého potahu, používá se speciální zařízení nazývané odlupovací přípravek pro stoupací buben. Ten zajišťuje, aby působily pouze síly potřebné k odlupování, a tím je dosaženo přesného měření. [73, 74]

5.2 Zkouška tříbodovým ohybem ASTM C393

Zkušební metoda stanovuje smykové vlastnosti jádra u plochých sendvičových konstrukcí vystavených ohybu takovým způsobem, že aplikované momenty způsobí zakřivení sendvičové čelní roviny. Lze vyhodnotit především pevnost v ohybu, pevnost jádra ve smyku a smykové napětí jádra. [73,74]

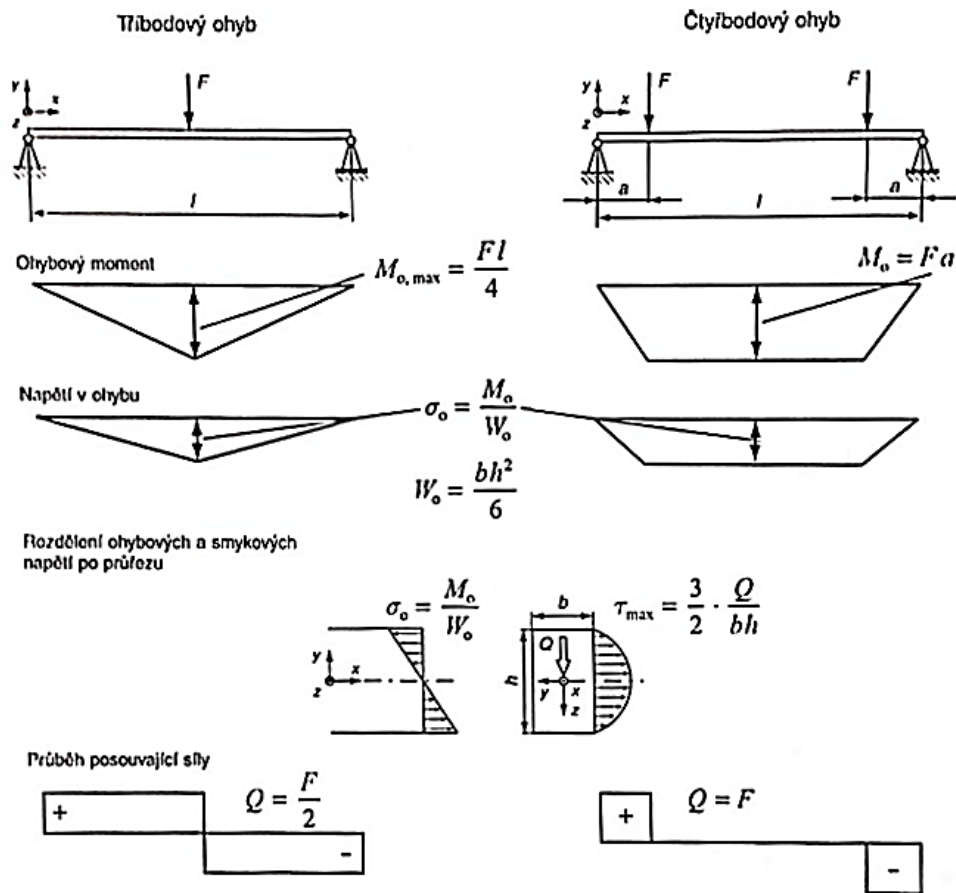
Tato zkouška vyžaduje unikátní kloubový ohybový přípravek s přitlačnými podložkami, který pomáhá poskytovat co nejpřesnější a nejkonzistentnější výsledky ve smyku jádra, a to i při někdy obtížně říditelném procesu výroby sendvičových konstrukcí. Obdélníkový zkušební vzorek je rovnoměrně umístěn na dva nosníky. Uprostřed mezi nimi se na vzorek aplikuje tlakové zatížení pomocí konstantní rychlosti posunu, které je dostatečně velké, aby způsobilo selhání během 3 - 6 min. V tomto místě vzniká maximální napjatost. Maximální smykové napětí je ve středu tloušťky. Předpokládá se, že rozložení normálních sil je lineární. Poloha vláken vůči neutrální rovině výrazně ovlivňuje pevnost v tahu. [73]

Je možné i vyhodnocovat a porovnávat druhy porušení vzorku. Akceptovatelné jsou pouze porušení vyvolané tahem nebo tlakem. Můžou nastat čtyři druhy porušení: stříh jádra sendviče, mikroprůhyb, promáčknutí nebo zvrásnění. [27, 75]



Obrázek 21 Druhy porušení při zkoušce tříbodovým ohybem [75]

Obdobou zkoušky tříbodovým ohybem je zkouška čtyřbodovým ohybem, kde je přidána jedna přitlačná podložka. Tím vznikne mezi místy zatížení konstantní moment a napětí. V oblasti mezi dvěma přitlačnými čepy nejsou žádné smykové síly. Zkouška čtyřbodovým ohybem je proto vhodná zejména pro křehké materiály, které příliš dobře odolávají smykovému namáhání. [27]

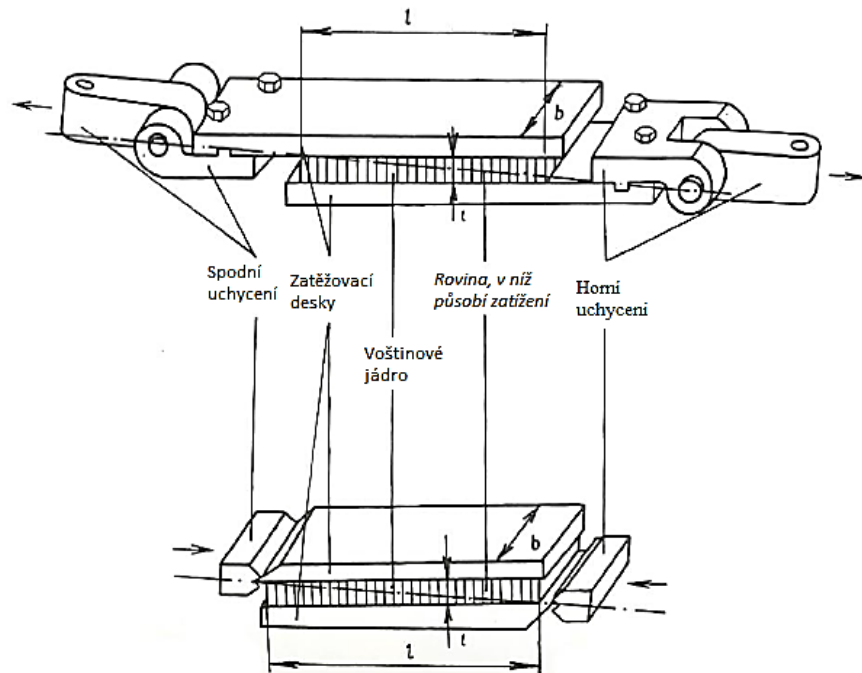


Obrázek 22 Porovnání zkoušky třibodovým ohybem a zkoušky čtyřbodovým ohybem [27]

5.3 Smykové zkoušky ASTM S273

Touto metodou lze zjistit smykovou pevnost jádra ve směru rovnoběžném s potahy a modul ve smyku v rovině kolmé k potahům.

Normou je přesně definovaný počet a velikost zkušebních vzorků. Většinou se jedná pouze o jádro, které je přilepeno k zatěžovacím deskám. Tyto desky se posunují rychlostí 7,5 mm/min a tím vyvolají smykovou sílu na sendvičové jádro. Pro tuto zkoušku může být použito buď tahové, nebo tlakové zatížení. [73, 74]



Obrázek 23 Zkouška ve smyku, nahoře – zkouška tahem, dole – zkouška tlakem
 t – tloušťka, l – délka, b šířka [11]

5.4 Pevnost v tahu ASTM C297

Podstatou zkoušky je zatěžování vzorku tahem kolmo na rovinu potahu. K realizaci této zkoušky je použit univerzální trhací stroj se speciálními přípravky, aby se zamezilo excentrickému působení sil. Vzorek přesně definovaného tvaru a rozměrů je k přípravku přilepen. Tento spoj je potřeba vytvrdit za pokojové teploty, nebo za teploty minimálně o 30 °C nižší, než byla vytvrzovací teplota při lepení sendvičového panelu. Normou je předepsaný i minimální počet pěti vzorků a rychlost posuvu čelistí. V ideálním případě dojde k přetržení vzorku a to při selhání jádra nebo selhání soudržnosti lepidla mezi jádrem a potahem. Pokud dojde k poruše vytvrzené vrstvy mezi čelistmi a potahem není možné tento testovací vzorek vyhodnotit. [73, 74]

Zkušební metoda ASTM C297 poskytuje informace o plošné pevnosti v tahu, stabilitě spojení mezi jádrem a lícem a přenosu zatížení materiálů sendvičového jádra. Výsledky testů pomáhají při výběru materiálu pro navrhování dílů, které vydrží aplikační sílu, a zajišťují kontrolu kvality vybraných materiálů. Průběh zkoušky je graficky znázorněn pomocí tahového diagramu, který zaznamenává závislost síly (napětí) na prodloužení (poměrném prodloužení). [74]

5.5 Pevnost v tlaku ASTM C364

Protikladem předchozí zkoušky je stanovení tlakových vlastností ploché sendvičové konstrukce kolmo k rovině potahu. Normou je přesně definovaný rozměr vzorku, počet vzorků a rychlost posuvu čelistí. Výsledkem zkoušky je tlakový diagram, který stejně jako tahový zobrazuje závislost síly (napětí) na prodloužení (poměrném prodloužení). Z toho lze určit pevnost v tlaku při libovolném zatížení, modul pružnosti, mez úměrnosti nebo maximální zatížení, které je vyvoláno, než dojde k porušení vzorku. [73, 74]

Je možné vyhodnotit i pevnost samotného voštinového jádra, které musí být přizpůsobeno tak, aby nedocházelo ke zborcení konců buněk. Tomu lze zamezit pomocí epoxidové pryskyřice, kterou se voština z obou stran zalije v určité výši. [74]

6 VYUŽITÍ SENDVIČOVÝCH PRVKŮ V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU

Sendvičové prvky nacházejí uplatnění téměř ve všech oblastech dopravního průmyslu, a to převážně tam, kde je potřeba zredukovat hmotnost. Využívají se i v případech, kde by bylo využití konvenčních materiálů nákladné nebo konstrukčně nemožné. Nejvíce jsou používány pro letecký a kosmický průmysl. [20]

Sendviče je možné použít i v jiných oblastech než pouze v dopravě. Své využití nacházejí ve stavebnictví nebo ve sportovních pomůckách. [20]

6.1 Letecký průmysl

V leteckém průmyslu jsou sendvičové panely použity téměř u většiny dílů do interiéru a vybavení. Pevně jako stěny toalet, v konstrukci kuchyněk, podlah, zavazadlových schránek, nebo dalších úložných prostor. Nejčastější jsou jako jádro voštiny, které jsou vyrobeny ze skelných vláken, tím získají potřebnou stabilitu, pevnost, aby unesli hmotnost zavazadel, ale zároveň lehkost, která sníží celkovou hmotnost letadla a tím sníží i náklady na provoz. [21, 2 2]



Obrázek 24 Kuchyně do Airbus 380 vyrobená ze sendvičových panelů [37]

Sendvičové prvky je možné použít i na konstrukční díly letadel jako jsou křídla, vrtule nebo podvozek. Takovým případem je ocasní část letadla Airbus A310-300, kde je potah z uhlíkových vláken a jádro z aramidové voštiny. [22]



Obrázek 25 příklady využití sendvičových prvků v letadle ATR 72 [38]

6.2 Lodní průmysl

Sendviče můžeme najít u závodních člunů, výletních lodích, jachet nebo na vrtných plošinách, a to jak v konstrukci, tak i jako panely nebo přepážky do interiéru. Nejčastěji jsou v používány sendviče s pěnovým jádrem, které splňuje kritické požadavky na pevnost, vztlak, odolnost proti mořské vodě a má nízkou nasákavost. Je možné použití i hliníkových voštin, ale pouze v omezené míře tam, kde se nedostane vlhkost, aby nedošlo ke korozi. [20]



Obrázek 26 příklady využití sendvičových prvků pro díly interiérů na jachtě LAVER [36]

6.3 Automobilový průmysl

Sendviče s velmi tenkým plastovým jádrem jsou v automobilovém průmyslu využívány převážně díky svým tlumícím a antivibračním schopnostem. Uplatnění nacházejí jako materiály pro komponenty převodovek a agregátů. [30]

V posledních letech je kladen čím dál větší důraz na zmírnění emisí CO₂. S tím souvisí i tlak na efektivnější konstrukci karoserie s cílem snížení její hmotnosti. Ve středních a nižších třídách automobilů stále přetrvávají ocelové konstrukce karoserií, určité úspory hmotnosti již byly dosaženy v posledních letech použitím nových lehkých ocelí. Ve vyšší třídě je použit převážně hliník, díky kterému je konstrukce sice lehčí, ale jeho zpracování je nákladnější a není tak odolný vůči nárazu jako ocel. Novinkou na trhu je plast vyztužený uhlíkovými vlákny, který váží o polovinu méně než ocel a je také o 30 % lehčí než hliník. V porovnání s ocelí je ale 6x dražší, není tak snadno recyklovatelný a výrobní proces je časově náročný, proto není možné jej použít v sériové výrobě. Alternativu nabízí využití sendvičových prvků, které se skládají z velmi tenkých ocelových krycích plechů na vnější straně a má jádrou vrstvu z lehkého plastu. Tím jsou spojeny výhody obou materiálů, vysoká pevnost oceli i nízká hmotnost plastu. [30, 31]

Dalším příkladem využití sendviče jsou pancíře tanků, protože po zásahu projde střela vnějším potahem a dostane se do vrstvy jádra, která rázové vlny roztrhne. Vzniklé kousky nalétávají do vnitřního potahu, který je houževnatější a měkčí než přední. Během let se používali různé materiály na jádra i potahy. U mnoha nejmodernějších tanků, ale výrobci přesné složení pancíře tají, aby potenciálním nepřátelům neposkytovali návod na jeho penetraci a nepomáhali konkurenci. [34]

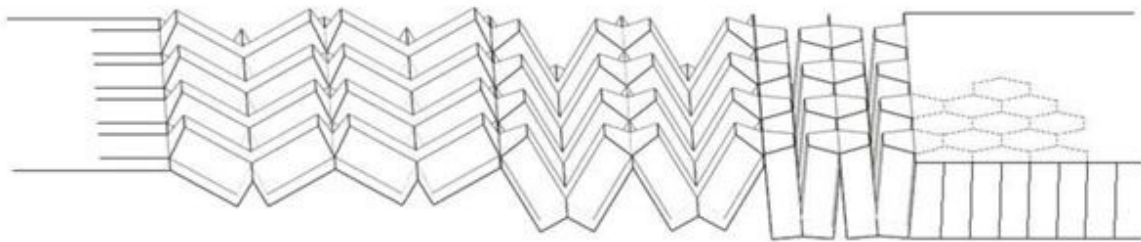


Obrázek 27 Sendvičový pancíř tanku M1 Abrams tvořený vrstvami oceli-plastu-keramiky-plastu-oceli [35]

6.3.1 Aktuální využití sendvičových panelů pro podlahy kufry v Hyundai Creta ix25

Voštinová jádra nejsou při výrobě sendvičových panelů nová, ale jsou relativně nová na trhu s automobilovými kompozity. Společnost ThermHex Waben GmbH nabízí polypropylenové voštinové jádro pro kompozitní sendvičové struktury v automobilových panelech. Standardní objemová hmotnost tohoto jádra je 80 kg/m^3 . Pro aplikace, které vyžadují menší pevnost v tlaku, je k dispozici také jádro o hustotě 60 kg/m^3 . Tloušťka jádra se pohybuje od 3 do 28 mm, s velikostí buněk 3 až 9,6 mm. [78]

Proces ThermHex, patentovaný společností EconCore NV v Leuvenu, umožňuje výrobu termoplastických voštinových jader v kontinuální výrobě, tzn. že všechny výrobní kroky probíhají na jediné výrobní lince. Po vytlačení je pás rotačně vakuově tvarován, rozkládán, laminován a řezán na délku požadovanou zákazníkem. Zatímco u jiných výrobních metod musí být každá vrstva voštiny jednotlivě vyříznuta z bloku a poté laminována, proto jsou tyto konvenční metody výroby voštinových jader složité a drahé. [79]



Obrázek 28 Kontinuální proces výroby společnosti ThermHex [79]

Od roku 2017 používá DPA Moldados černou verzi polypropylenového voštinového jádra ThermHex, které nahrazuje jádrové materiály jiných výrobců. Voštinová jádra se používají k výrobě například podlahy kufry v Hyundai Creta ix25. [78]

V této aplikaci jsou prepregy ze skelných vláken přehřáté, naskládány na horní a spodní stranu voštinového jádra ThermHex a poté lisovány do sendvičové struktury. Společnost DPA Moldados je jedním z mála výrobců na světě, která je technicky schopna vyrábět tento typ sendvičového lisovaného dílu sériově. Kromě toho jsou použité materiály 100% recyklovatelné a vyžadují méně energie na výrobu než konkurenční materiály. [79]

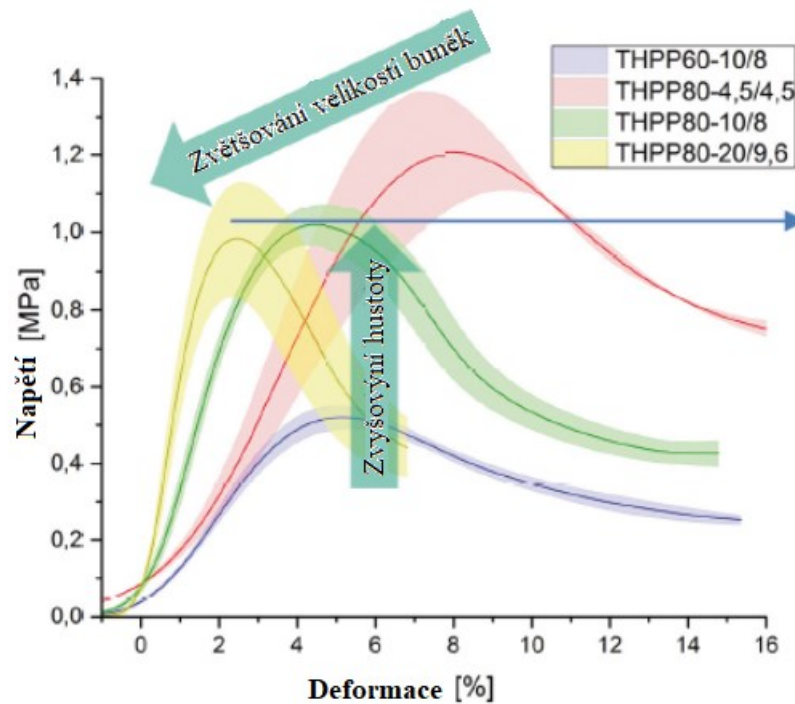


Obrázek 29 Automobilový panel DPA Moldados s polypropylenovým jádrem [78]
Voštinové jádro od firmy ThermHex pomáhá snižovat hmotnost automobilových komponentů až o 80% ve srovnání s monolitickými materiály s podobnými pevnostními vlastnostmi. Kromě výroby automobilových komponentů lze tyto voštinová jádra nalézt v karoseriích nákladních automobilů, v interiérech lodí, bazénech a nábytku. [78, 80]

6.3.1.1 Mechanické zkoušky a materiálové charakteristiky panelu ThermHex

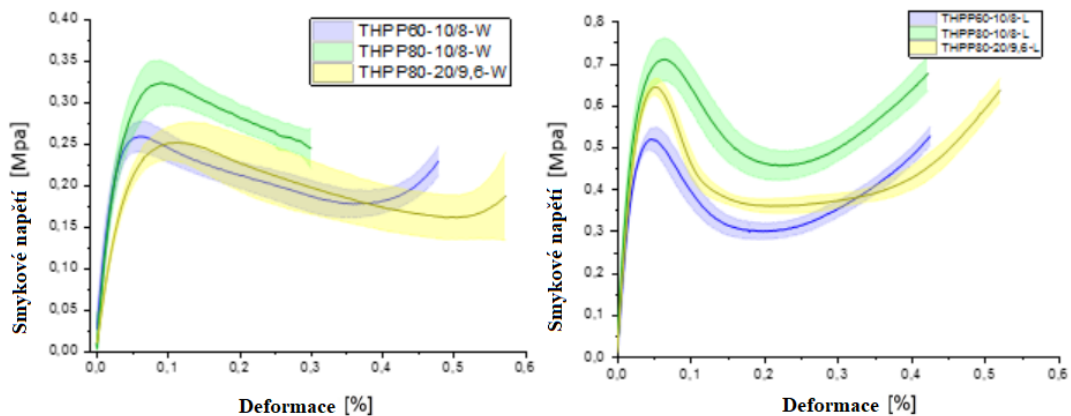
Panel se skládá z $0^{\circ}/90^{\circ}$ příčných laminátových potahových vrstev (CP) vyrobených z kontinuálního polypropylenu vyztuženého skelnými vlákny (GF/PP) a rovněž skládaný voštinový jádrový materiál je vyroben z polypropylenu. [80]

Zkoušky pevnosti v tlaku byly uskutečněny na vzorcích se čtvercovým průřezem v souladu s ASTM 364. Během testu byl zaznamenáván diagram. Při testech byla použita jádra o různých hustotách (60 a 80 kg/m³), výšce jádra (4.5; 10; 20 mm) a velikosti buněk (4.5: 8: 9.6 mm). Z naměřených hodnot je patrné, že modul v tlaku a pevnost v tlaku se zvyšuje v závislosti na hustotě jádra. S rostoucí výškou jádra a velikosti buněk se modul v tlaku zvyšuje, zatímco pevnost v tlaku klesá. [79]



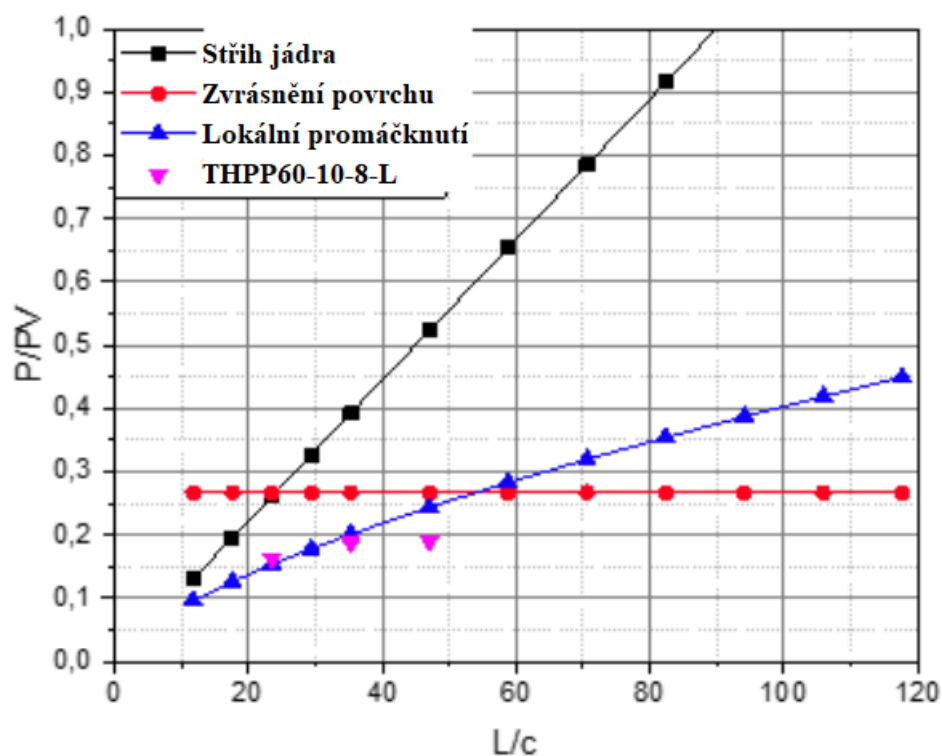
Obrázek 30 Diagram napětí – deformace tlakových zkoušek [79]

Smykové zkoušky byly provedeny na základě ASTM C273. Diagramy napětí - deformace byly vypočteny ze signálu síly testovacího stroje a opticky změřeného relativního posunutí testovaného vzorku. V závislosti na směru uložení voštiny lze pozorovat významné rozdíly ve smykovém chování. Ve směru L je modul ve smyku až trojnásobně vyšší. Kromě toho lze vidět i vliv hustoty voštinového jádra (zde 60 a 80 kg/m³) a také výšky jádra a velikosti buněk. Se zvyšující se hustotou jádra dochází ke zvýšení smykového modulu. Zvýšením jak výšky jádra, tak velikosti buněk se snižuje smykový modul i maximální napětí. [79]



Obrázek 31 Diagram napětí – deformace smykových zkoušek [79]

Ohybové zkoušky tříbodovým ohybem byly provedeny na základě ASTM C393. Pro tento účel byly testovány vhodné sendvičové vzorky s různými vzdálenostmi podpěr (200; 300; 400 mm). Během testů byla měřena středová výchylka testovaného kusu pomocí extenzometru. Zatížení při porušení v ohybu určené pro různé délky rozpětí bylo zakresleno do diagramu. Tyto takzvané mapy poruchových režimů mohou poskytnout informace o tom, která konfigurace sendviče (hustota jádra, výška jádra, materiál povrchové vrstvy) by měla být vybrána pro konkrétní aplikaci. Mapy ukazují kromě naměřených hodnot i další grafy pro různé typy sendvičového porušení (včetně lokálního promáčknutí jádra, zvrásnění vrchní vrstvy, stříhu jádra). [79, 80]



Obrázek 32 Příklad mapy poruchových režimů pro THPP60-10-8 (směr L) [79]

6.4 Železniční průmysl

Sendvičové panely představují velmi lehký a pevný konstrukční prvek, díky kterému je snížena celková váha vlaku nebo tramvaje i při zachování dostatečných mechanických vlastností. Nejčastěji jsou sendviče použity na interiérové (alternativně i exteriérové) obložení stěn hrubé konstrukce. Použité panely se navrhují přesně dle požadovaných podmínek, a proto je možné docílit různých vlastností v různých částech panelu. Například nahrazením překližky v konstrukci podlah sendvičovými panely se snížila celková hmotnost podlah o 35%. [24]



Obrázek 33 Sendvičové panely na vnitřním obložení vlaků [39]

6.5 Kosmický průmysl

Jako první se ve velkém množství začali používat sendviče a kompozity v raketové technice. Jsou vhodné téměř pro všechny exteriérové i interiérové díly raketoplánů, teleskopů družic a solárních panelů. [14, 32]

Příkladem použití je tepelný štít rakety Parker Solar Probe. Jeho hlavní úlohou je izolace proti vysokým teplotám sálajícím směrem od Slunce a zabraňuje přehřátí sondy – nazývaný systém tepelné ochrany nebo TPS – je sendvič uhlíkuhlikového kompozitu obklopující téměř čtyři a půl palce uhlíkové pěny, což je asi 97% vzduchu. Přestože má TPS průměr téměř osm stop, přidává k hmotnosti sondy Parker Solar Probe jen asi 160 liber díky svým lehkým materiálům. [33]



Obrázek 34 Instalace tepelného štítu na kosmickou loď Parker Solar Probe [33]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem praktické části diplomové práce je navrhnout úložný prostor pro příruční zavazadla a zvolit nejvhodnější materiál pro tuto aplikaci.

Závěrečná část je zaměřena na testování materiálů zkouškou třibodového ohybu, která nejvíce odpovídají namáhání úložného prostoru. Proto je nutná výroba a příprava zkušebních vzorků.

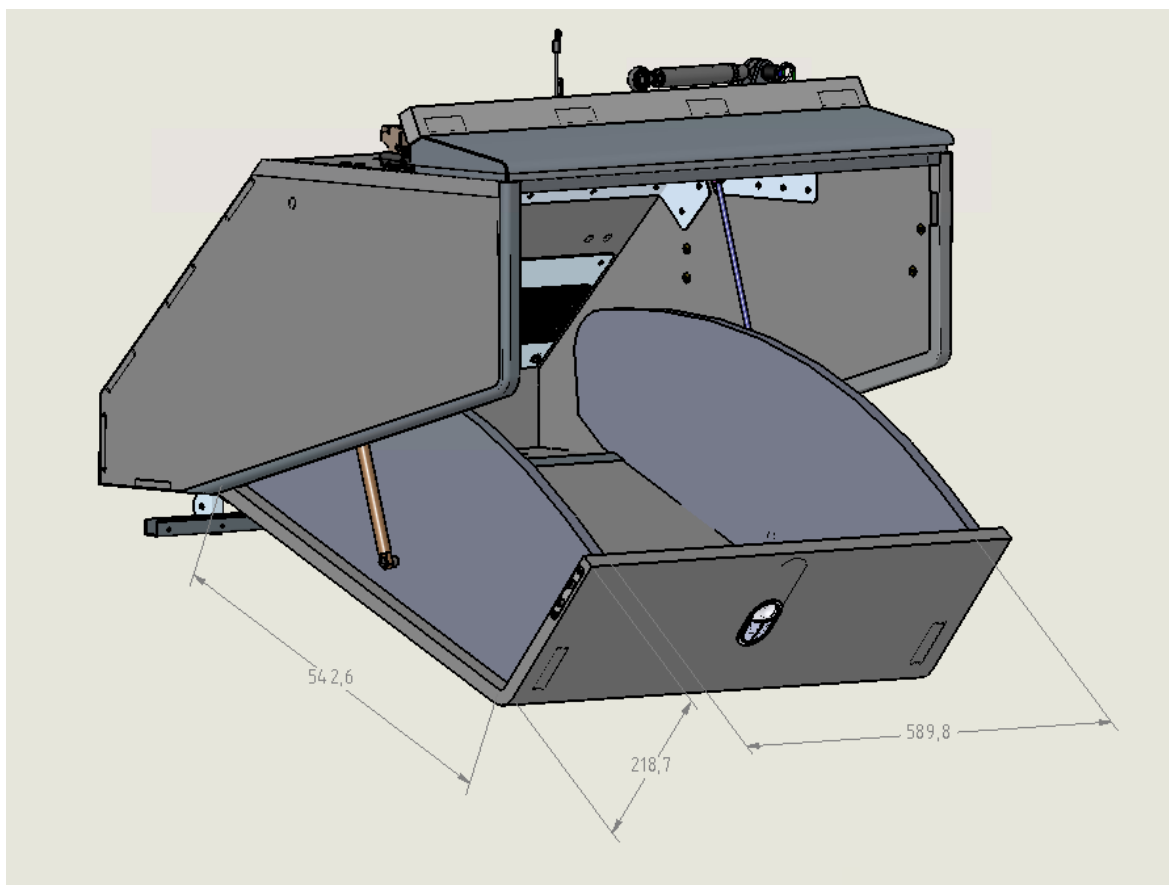
Cíle diplomové práce je možné shrnout do následujících bodů:

- Návrh úložného prostoru pro příruční zavazadla a volba pomocných prvků
- Volba materiálu ve formě prepregu vhodného pro zpracování v autoklávu na potah sendvičového panelu
- Výběr několika typů jader pro porovnání
- Výroba zkušebních vzorků pomocí autoklávu dle vytvrzovacího cyklu doporučeného výrobcem prepregu
- Příprava zkušebních vzorků pro testování na rozměry dané normou
- Experimentální testování mechanických vlastností vzorků zkouškou třibodového ohybu
- Vyhodnocení výsledků pomocí sloupcových grafů
- Závěr a volba nejvhodnějšího jádra pro aplikaci v letectví.

8 NÁVRH ÚLOŽNÉHO PROSTORU PRO PŘÍRUČNÍ ZAVAZADLA

Aktuálně je poptávka po větších úložných prostorech přímo na palubě letadla. Tato problematika, představuje pro letecké společnosti velkou výzvu. Nyní je povolena velikost příručního zavazadla $40 \times 25 \times 20$ cm s maximální hmotností 12 kg. Dalším aspektem, který je však třeba vzít v úvahu, je urychlit nastupování tak, aby byli cestující schopni rychle najít místo a uložit si příruční zavazadlo. Pro pasažéry menšího vzrůstu ovšem nastává komplikace s uložením zavazadla do vyvýšené přihrádky. Protikladem jsou vyšší cestující, kterým zase může překážet úložný prostor nad hlavou při nastupování. S rostoucím počtem sedadel v letadle se zvyšuje i zatížení zavazadel.

Řešením těchto problémů může být sklopný úložný box, který pojme dvě příruční zavazadla, je vhodnější pro ukládání zavazadel a zabere méně místa do uličky mezi sedadly.

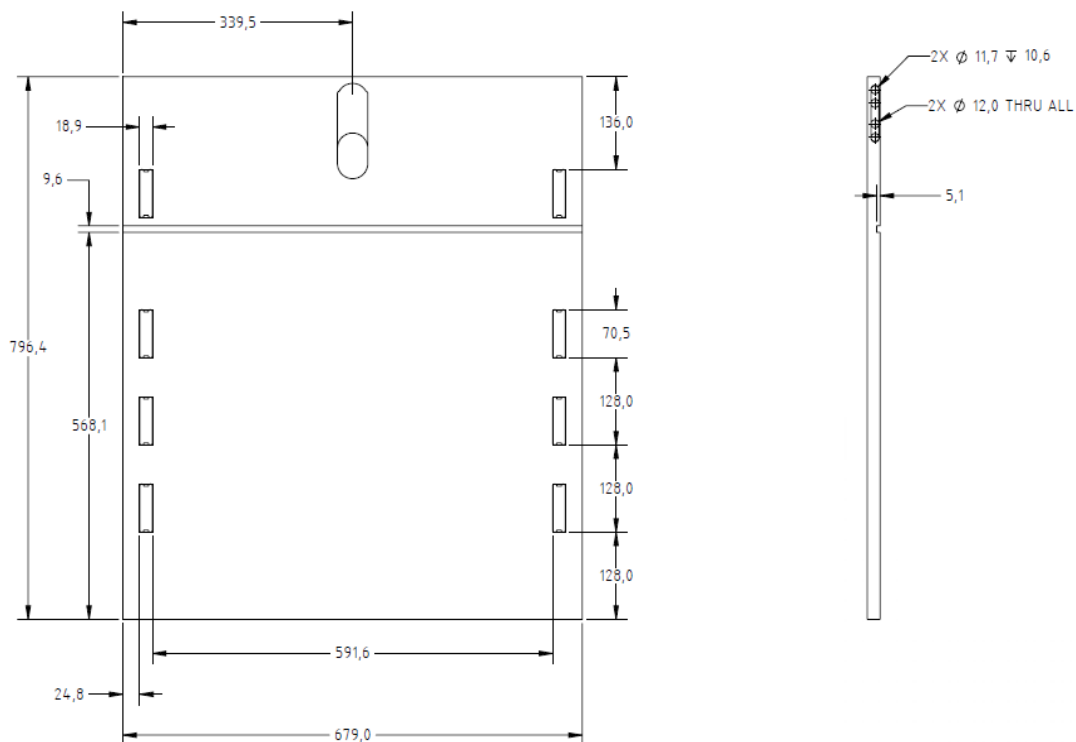


Obrázek 35 Návrh úložného prostoru

8.1 Panelový díl

Hlavním dílem sklopného úložného prostoru je spodní panel, na kterém jsou uloženy zavazadla. Je tedy nejvíc namáhán a zatěžován, proto nejdříve zvolíme vhodný materiál pro tento panel a ostatní panely v konstrukci budou ze stejného materiálu.

Panel je ohýbaný. Pro snadnější tvarování je v místě ohybu vytvořena drážka. Ohýbání panelu se provádí až při skládání boxu. To znamená, že nejprve je polotovar vytvrzen pomocí autoklávu a následně pomocí CNC jsou vytvořeny drážky a otvory. Při sestavení je spodní díl ohnutý kolem bočních dílů spodní sklopné části boxu. Vzájemná poloha panelů je zafixována pomocí drážek ve spodním dílu a čepů v bočních panelech. Hloubka drážek je určena velikostí jádra a potahu. Rozměry rozloženého panelu jsou na obrázku 36 a definují prostor pro uložení zavazadel. Tloušťka panelu zde není uvedena, protože jednotlivá jádra zvolená pro sendvičový panel mají rozdílnou tloušťku.



Obrázek 36 Rozměry spodního panelu

V panelu je umístěna západka pro snadné otevírání spodního dílu úložného prostoru. Rozměry otvorů pro západku nejsou zakótovány, protože jsou dány výrobcem západky. Z boků panelu jsou dva otvory pro vložku se závitem, aby mohly být uchyceny boky západky pomocí šroubů k panelu.



Obrázek 37 Příklady západek [76]

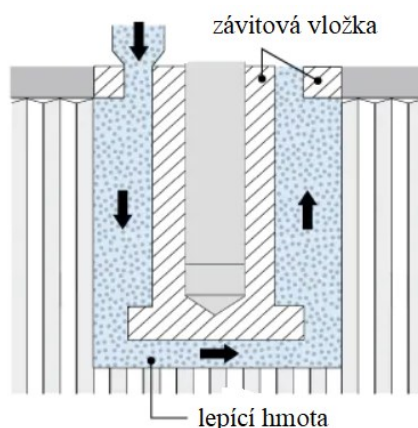
8.2 Volba vhodných lepidel

Jednotlivé panely konstrukce jsou k sobě navzájem přichyceny vhodným lepidlem. Pro tuto konstrukci jsem zvolila lepidlo 3M™ Scotch-Weld™ EC-2815 B/A FR. Jedná se o dvousložkové epoxidové lepidlo s vytvrzováním při pokojové teplotě nebo s přídavným teplem za účelem vytvoření pevného, nárazuvzdorného spoje. Má vynikající přilnavost k mnoha kovovým, kompozitním a plastovým podkladům. Je navrženo pro voštinové sendvičové konstrukce, které se obvykle nacházejí v interiérech letadel, jako jsou kuchyně, přihrádky na zavazadla, dělicí stěny, záchodové konstrukce, odpočívadla posádky, konstrukce sedadel, stropy, skříně, panely bočních stěn, panely nákladového prostoru, šatny a dveře pro cestující. Splňuje požadavky na hořlavost podle 14 CFR 25.853 (a)

Tabulka 1 Vlastnosti lepidla 3M™ Scotch-Weld™ EC-2815 B/A FR

	Složka A	Složka B
Složení	Epoxid	Aminy
Barva	bílá	šedá
Hustota v nevytvrzeném stavu	$1,4 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$	$1,2 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$
Poměr míchání podle hmotnost	100	40
Poměr míchání podle objemu	100	50
Vytvrzená hustota	$1,3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$	
Doba vytvrzení	24 h při 24 °C nebo 1 h při 82 °C	
Konzistence	pasta	
Aplikace	ručně pomocí dávkovací pistole	

Pro uchycení závitových vložek a dalších kovových nepohyblivých dílů k panelu je také nutné zvolit vhodnou lepicí hmotu. Na tuto aplikaci není předchozí typ lepidla vhodný, proto jsem zvolila dvousložkové epoxidové lepidlo 3M™ Scotch-Weld™ EC-3542 B/A FR, které má vysokou odolnost proti krouticímu momentu a je ideální pro zalévací aplikace. Také splňuje požadavky na hořlavost podle 14 CFR 25.853 (a)



Obrázek 38 Aplikace závitové vložky do panelu

Tabulka 2 Vlastnosti lepidla 3M™ Scotch-Weld™ EC-3542 B/A FR

	Složka A	Složka B
Složení	Epoxid	Aminy
Barva	bílá	šedá
Hustota v nevytvrzeném stavu	$0,67 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$	$0,68 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$
Poměr míchání podle hmotnost	100	52
Poměr míchání podle objemu	100	50
Vytvrzená hustota	$0,71 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$	
Doba vytvrzení	7 dní při 24 °C nebo 5 h při 82 °C	
Konzistence	pasta	
Aplikace	ručně pomocí dávkovací pistole	

8.3 Hydraulické tlumiče

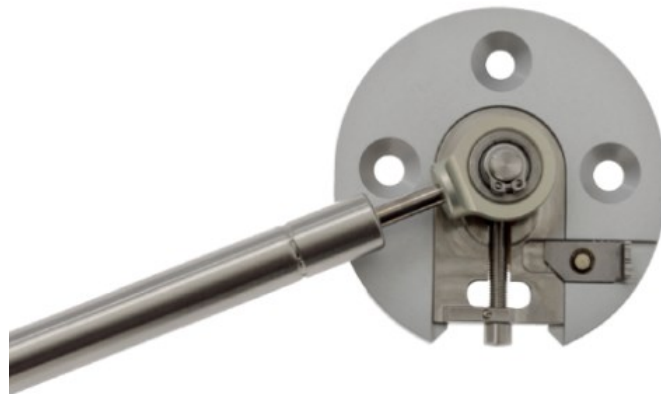
Volba vhodných komponentů pro ovládání pohybu je velmi důležitá, protože zajišťují hladký a bezpečný provoz. Pro tuto aplikaci jsou zvoleny hydraulické tlumiče od firmy General Aerospace, které se od jiných produktů liší v jednom klíčovém aspektu. Jejich posilovač vždy otevírá dveře a víka konstantní rychlostí, a to bez ohledu na zatížení. Tyto

tlumiče mají integrovaný koncový doraz, což šetří místo a váhu úložných prostorů. Snížení hmotnosti je zajištěno také použitím inteligentní směsi pokročilých materiálů, jako jsou hliníkové slitiny, nerezová ocel a titan. Válec tlumičů je vyroben z nerezové oceli, která umožňuje vytvářet velmi tenké konstrukce. Do titanové pístnice jsou přidány slitiny, aby ještě více snížily hmotnost.

Tyto tlumiče jsou nabízeny v několika standardních rozměrech:

- Ø válce mm: od 11 do 52
- Zdvih v mm: 5 až 500
- Síla vytažení v N: 10 až 500

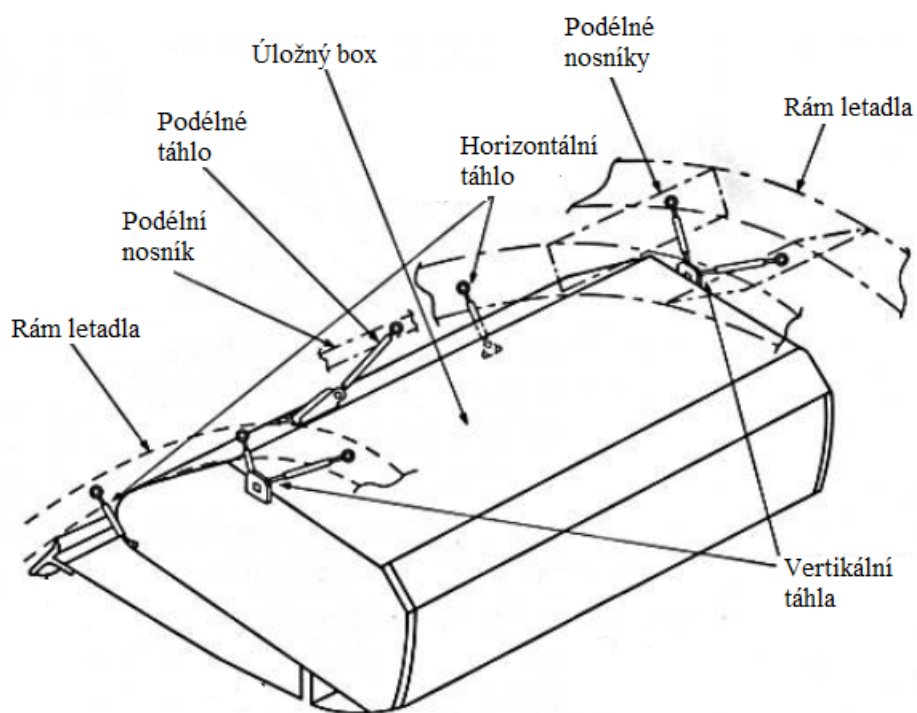
Pro rychlou opravu nebo výměnu spodní části úložného prostoru na zavazadla vyžadují hydraulické tlumiče silný, inteligentní montážní hardware, který dovoluje rychlé uvolnění. Při použití tlumičů firmy General Aerospace lze příslušný zavazadlový prostor od hydraulického tlumiče oddělit několika pohyby.



Obrázek 39 Hardware pro uchycení tlumiče k panelu [77]

8.4 Uchycení k rámu letadla

Uchycení úložného boxu k rámu letadla je zobrazeno na obrázku 40. Nejdříve se box uchytí pomocí horizontálních táhel a šroubů přímo k rámu letadla. Vertikální táhla jsou uchycena šrouby na podélné nosníky. Nakonec je pozice zafixována pomocí podélného táhla přes strunu na podélný nosník.



Obrázek 40 Uchycení úložného boxu

9 VOLBA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Materiál pro konstrukci úložného prostoru na příruční zavazadla musí splňovat:

- Dostatečnou pevnost a tuhost
- Vyšší odolnost proti zatížení zavazadly
- Co nejlehčí materiál
- Nehořlavost materiálu

Proto je jako nejvhodnější materiál zvolen sendvičový panel s různými typy jader.

9.1 Potah

Jako potah je vybrán prepreg s uhlíkovou výztuží a epoxidovou matricí (GG 204P IMP503Z), plošná hmotnost tkaniny je 380 g/m^2 . Využití je vhodné pro vysoké kosmické požadavky. Lze jej použít s kovovou formou a standardními technologiemi, jako je lisování za tepla, autokláv, vakuový sáček...

Tabulka 3 Vlastnosti pryskyřice uvedené v materiálovém listu

Vlastnosti	Velikost	Jednotka
Hustota	1,20 ÷ 1,22	g/cm ³
Doba želatizace při 125 °C	6 ÷ 8	min
Doba želatizace při 110 °C	20 ÷ 25	min
Lepivost	Střední	-
Doba skladování při 23 °C	5	Týdnů
Doba skladování při -18 °C	1	Rok

9.2 Jádro z hliníkové voštiny

Hliníkové voštinové jádro je jedním z nejpoužívanějších vysoce výkonných voštinových materiálů pro svůj vynikající poměr pevnosti k hmotnosti. Hliníková voština je široce používána v motoristickém, námořním a leteckém průmyslu. Jako jádro panelů má několik výhod, a to především lehkost, tuhost, reakce na oheň, odolnost proti tlaku, smyku a korozi.

Běžně se hliníková voština dodává jako neroztažený blok. Je to ze dvou důvodů; za prvé proto, že přeprava expandované voštiny by byla nákladná a za druhé proto, že ve své expandované nestabilizované formě je voština velmi náchylná k poškození a je nepravděpodobné, že by přežila přepravu neporušená. Tloušťka neexpandovaných bloků je

standardně 1000 mm, průměr buňky od 3 do 25 mm. Hustota voštiny závisí na tloušťce fólie a průměru buněk. Hliníková voština je dostupná perforovaná nebo neperforovaná (mikroperforace umožňující proudění vzduchu mezi buňkami, pro použití ve vakuu nebo dekompresi) ve třech formách: neexpandovaný blok neperforovaný, neexpandované plátky, expandované listy.

Voština použitá pro testování má tloušťku 13 mm a průměr jednotlivých buněk 7mm.

9.3 Jádru z nomexové voštiny

Nomexové voštiny jsou v letectví běžně využívané pro interiérové aplikace. Vhodné jsou na vnitřní panely letadel včetně podlah, bočních stěn, stropů, kuchyní, záchodů a vnější panely letadel včetně odtokových a náběžných hran, klapek, křidélek, aerodynamických krytů, listů vrtulníků, přístupových panelů a dveří.

Pro první vzorky je využita voština vyztužená meta-aramidovými vlákny, která je potažena tepelně odolnou fenolovou pryskyřicí. Tato voština zaručuje vysoký poměr pevnosti k hmotnosti, odolnost proti korozi, ohnivzdornost (samozhášecí), dobrou tepelnou stabilitu, dobré tepelné a elektrické izolační vlastnosti, vysokou houževnatost, dobrou odolnost proti únavě a nárazu, vynikající dielektrické vlastnosti, dobrou tvarovatelnost pro tvarování křivek. Nabízí také dostupnost v několika provedeních a tloušťkách. Zvolená voština má tloušťku 13mm a průměr buněk 0,4 mm.

9.4 Pěnové jádro

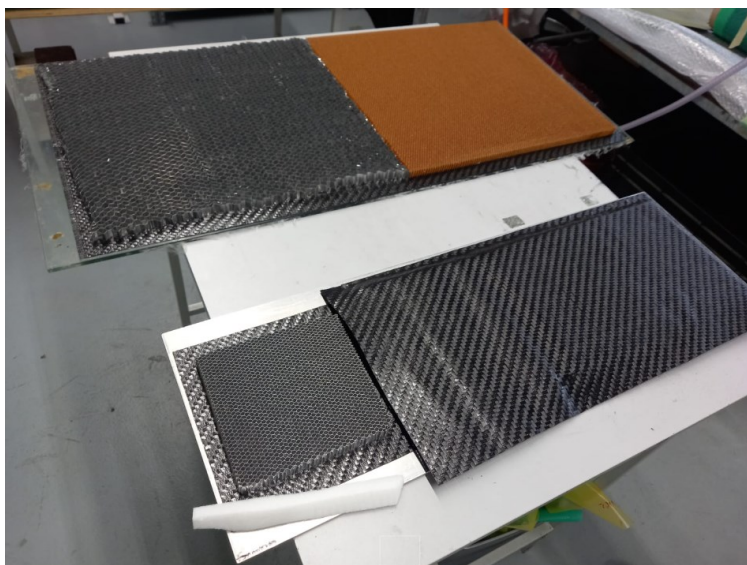
Udržitelnost jednotlivých materiálů a snaha o úsporu emisí CO₂ je relativně velkým kritériem při výběru materiálu. Toto jádro ArmaPET od společnosti Armacell je zvoleno díky použití 100% recyklovaného PET jako základní surovina při výrobě. Strukturální lehké desky z polyethylentereftalátové pěny jsou používány v široké škále kompozitních sendvičových struktur. Ať už jako materiály v sektoru větrné energie, izolační materiály ve stavebnictví, požárně bezpečnostní materiály pro železniční kompozitní aplikace. Použitím ArmaPET jako jádro sendvičové struktury je možné také zvýšit životnost panelu. Tyto pěny nabízejí odolnost proti únavě, jsou kompatibilní se všemi možnými systémy pryskyřic a jejich zpracování je možné za vysokých teplot nebo i ve tvarově složitých aplikacích. ArmaPET poskytuje vysoce výkonnou a vysoce ekologickou alternativu k PVC, balsa, SAN, PUR nebo voštinovým materiálům jádra a dalším srovnatelným pěnovým produktům. Nevýhoda této PET pěny jsou toxické výpary (oxid uhličitý a oxid uhelnatý) při

požáru. V případě požáru je nutné použít izolační dýchací přístroj. Tloušťka pěny použité při testování je 14 mm.

10 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ SENDVIČOVÉHO PANELU S VYBRANÝMI JÁDRY

Pro výrobu zkušebních vzorků byla použita technologie výroby v autoklávu. Jak už bylo popsáno v teoretické části, je tato metoda vhodná pro zpracování prepregů. Autokláv dovoluje řídit proces během vytvrzování pomocí přetlaku, podtlaku a teploty v čase. Díky tomu se dosahuje přesnějších výsledků vytvrzování než u technologie ručního laminování.

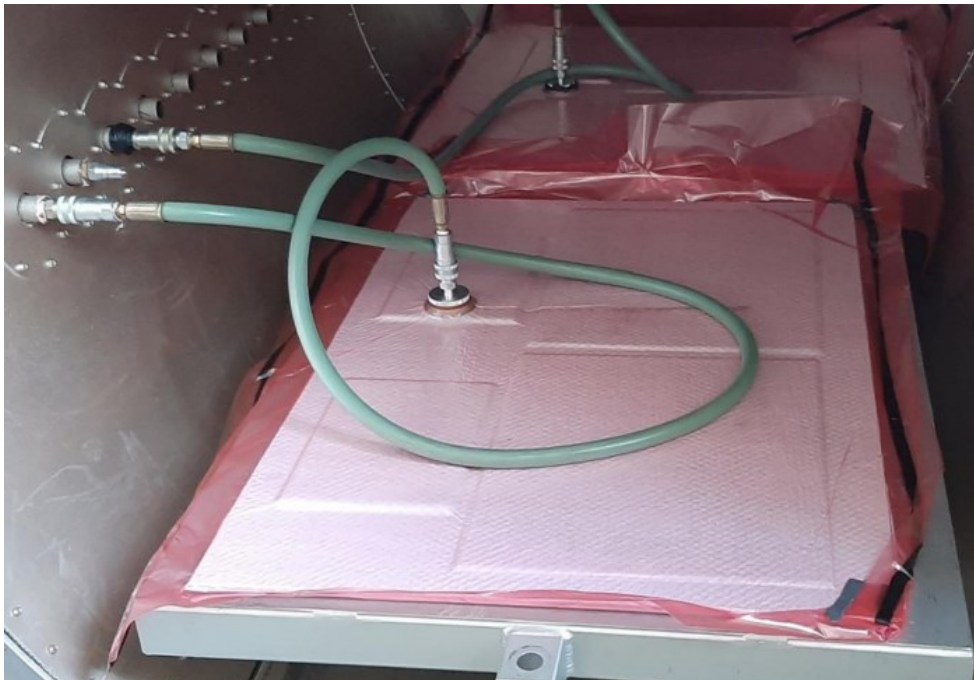
Před samotnou výrobou vzorků je nezbytné si nejprve správně připravit formu. V prvním kroku bylo zapotřebí očistit formu od starých zbytků z předchozí výroby. Pro vyhlazení formy byl použit přípravek Chem Trend Zyvac, který se pomocí papírového ubrousku rozleštil na formě, a to ve dvou vrstvách. Doba vyžrání první vrstvy byla 15 min, druhé vrstvy 30 min. Jako další byla použita separační vrstva Chem Trend Chemlease A219W. Tu je potřeba nanést a rozleštit ve třech vrstvách s intervalem vyžrání po 10 minutách. Jako další byl kladen na formu prepreg ve dvou stejně orientovaných vrstvách, následovalo jádro dle zvoleného typu a pak opět dvě vrstvy prepregu. Pro snadné odformování následovala na horní prepreg odtrhová tkanina a dále pro odsání přebytečné pryskyřice absorpční tkanina. Pro spojení s autoklávem byl na střed formy uložen spodní díl vakuovací rychlospojky. V posledním přípravném kroku byla kolem formy pomocí těsnící pásky připevněna vakuovací fólie a uprostřed ní vytvořen otvor pro sestavení druhého dílu rychlospojky.



Obrázek 41 Příprava zkušebních vzorků

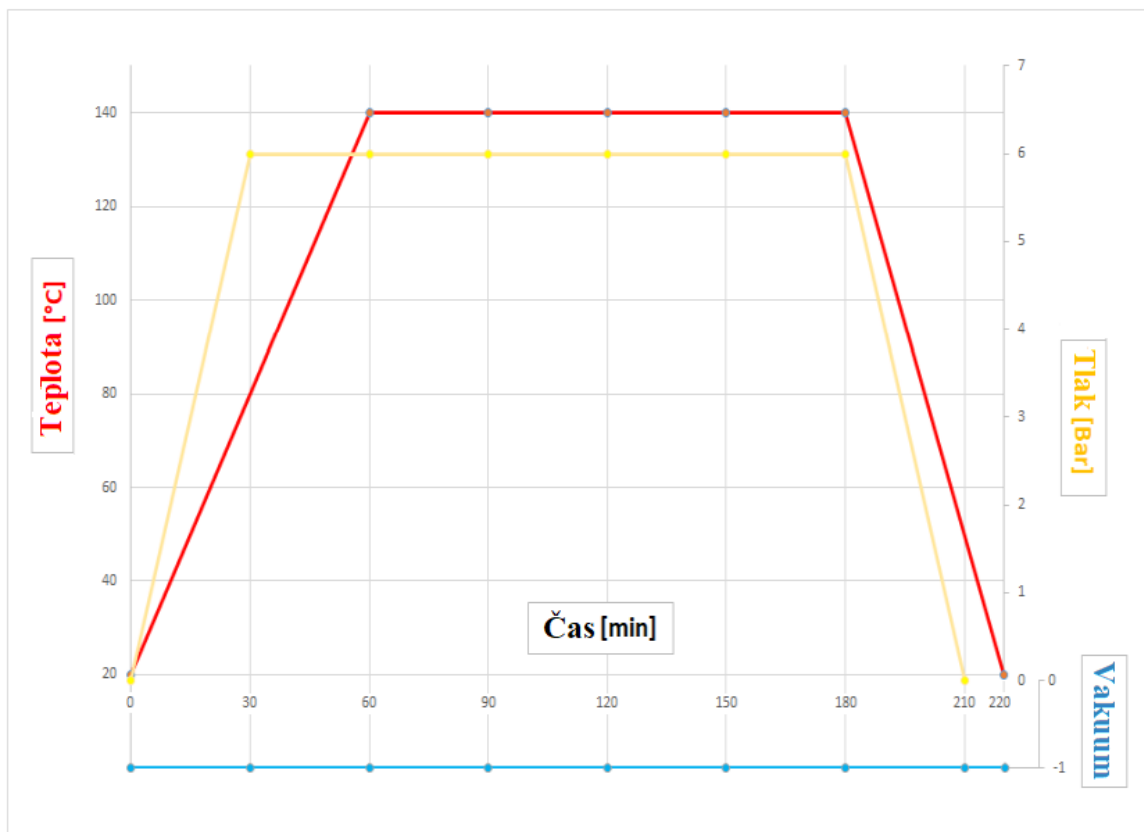
Nejprve bylo nutné zapnout autokláv, uvolnit ventil pro přívod tlakového vzduchu a vstup chladící změkčené vody. Až po provedení těchto úkonů bylo možné otevřít dveře a vložit

formu dovnitř autoklávu. Přes rychlospojku umístěnou ve formě byl připojen vakuovací systém a následně byly dveře uzavřeny. Vytvrzovací cyklus byl zvolen dle doporučení výrobce prepregu.



Obrázek 42 Uložení zkušebních vzorků do autoklávu

Od začátku vytvrzovacího cyklu byl nastaven maximální podtlak, který působil pod vakuovací fólií. Přetlak byl nastaven na $6,0 \pm 1,0$ bar. Rychlost ohřevu byla řízena pomocí termočlánků $1,0$ až $2,0$ °C/min z pokojové teploty na 140 °C. Tolerance od skutečné teploty vytvrzování je $+5$ °C -0 °C. Při dosažení teploty 140 °C je tato teplota udržována po dobu 120 minut. Následné ochlazení zpět na pokojovou teplotu bylo nastaveno na rychlost $2,0$ až $3,0$ °C/min.



Obrázek 43 Průběh teploty a tlaku v autoklávu

10.1 Popis autoklávu použitého na výrobu vzorků

Pro účely diplomové práce byl použit autokláv OP Panini S.r.l., model G00300572, který umožňuje přetlak až 10 barů. Při zkouškách prošel zatížením 17,1 bar. Teplota pracovního cyklu se může pohybovat v rozmezí 0 °C až 250 °C. Vzduch je ohříván pomocí elektrických odporů. Díky ventilátoru je zaručena rychlá recirkulace vzduchu, tím je zajištěno i rovnoměrné rozložení tepla. Chlazení probíhá pomocí studené změkčené vody, která je přiváděna do chladicího radiátoru. Pro dostatečné zajištění správných hodnot tlaku a teploty uvnitř komory je autokláv vybaven několika pneumatickými ventily. Řízení cyklu probíhá pomocí PLC na obslužném panelu.



Obrázek 44 autokláv OP Panini S.r.l., model G00300572

10.2 Příprava zkušebních těles pro experimentální testování, dle zvolených metod

Vzorky vzniklé v autoklávu bylo nutné rozdělit na testovací tělíska. K tomu byl využit vodní paprsek PTV UniJet model WJ 3020-2Z-UJ-PJ ve firmě Form s.r.o. Byly zvoleny dvě velikosti zkušebních tělísek. Pro zkoušku třibodovým ohybem to byly obdélníky o velikosti 45 x 200 mm. Pro každý panel byl vytvořen speciální řezný plán, protože rozměry vytvořených panelů nebyly totožné. Při volbě vhodného nářezového plánu bylo nutné vzít v úvahu nejen orientaci prepregu, ale i kruhový náběh pro vyřezání jednotlivých tělísek, aby v místě náběhu nedošlo k poškození vzorků.



Obrázek 45 Řezný plán

11 REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Zkušební vzorky byly testovány zkouškou třibodovým ohybem, která slouží pro stanovení modulu pružnosti v ohybu, pevnosti v ohybu a dalších parametrů mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Vyhodnocovat a porovnávat můžeme i druhy porušení vzorku.

11.1 Zkouška třibodovým ohybem

Tato zkouška je realizována dle normy ASTM C393 popsané v kapitole 5.2. Pro měření je použit stroj Zwick 1456, který zaznamenává výsledky do programu testXpert. Počet vzorků je stanoven normou na pět kusů v každé sérii a velikost také na obdélníky o velikosti 45 x 200 mm. Jejich tloušťka odpovídá reálné tloušťce sendvičového panelu, použitého v úložném prostoru. Vzdálenost podpěr pro sendvičové panely není definována normou, a proto je nastavena na 180 mm. Zkouška byla realizována za pokojové teploty. Zkušební tělíska jsou otočená pohledovou stranou směrem k trnu.



Obrázek 46 Zkouška třibodovým ohybem

Pro každý druh jádra bylo testováno pět vzorků. Software testExpert vyhodnotil pro každý vzorek:

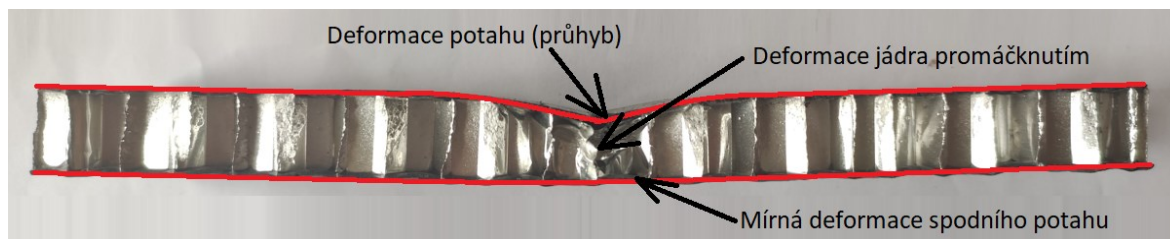
- modul pružnosti – E_o [MPa],
- maximální sílu – F_{max} [N],
- ohybového napětí – σ_o [MPa],
- průhyb zkušebního tělíska – y_{FMAX} [mm],
- poměrnou deformaci – ε [%]

11.1.1 Jádro z hliníkové voštiny

Porušení nastalo v místě působení trnu nejprve na tlakové straně promáčknutím vrstvy prepregu a postupným promáčkáváním hliníkové voštiny. Zatěžování způsobilo značnou deformaci i na tahové straně, ale ta po uvolnění téměř vymizela.



Obrázek 47 Poškozené vzorky s hliníkovou voštinou



Obrázek 48 Detail poškozeného vzorku s hliníkovou voštinou
Následující tabulka ukazuje hodnoty naměřené na jednotlivých vzorcích.

Tabulka 4 Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem pro hliníkovou voštinu

n	E_o [MPa]	F_{max} [N]	ε [%]	σ_o [MPa]	y_{Fmax} [mm]
1	4700	693	0,4	17,2	1,4
2	5170	639	0,4	15,9	1,3
3	5640	708	0,4	17,6	1,3
4	4880	670	0,4	16,6	1,5
5	4960	615	0,4	15,2	1,3

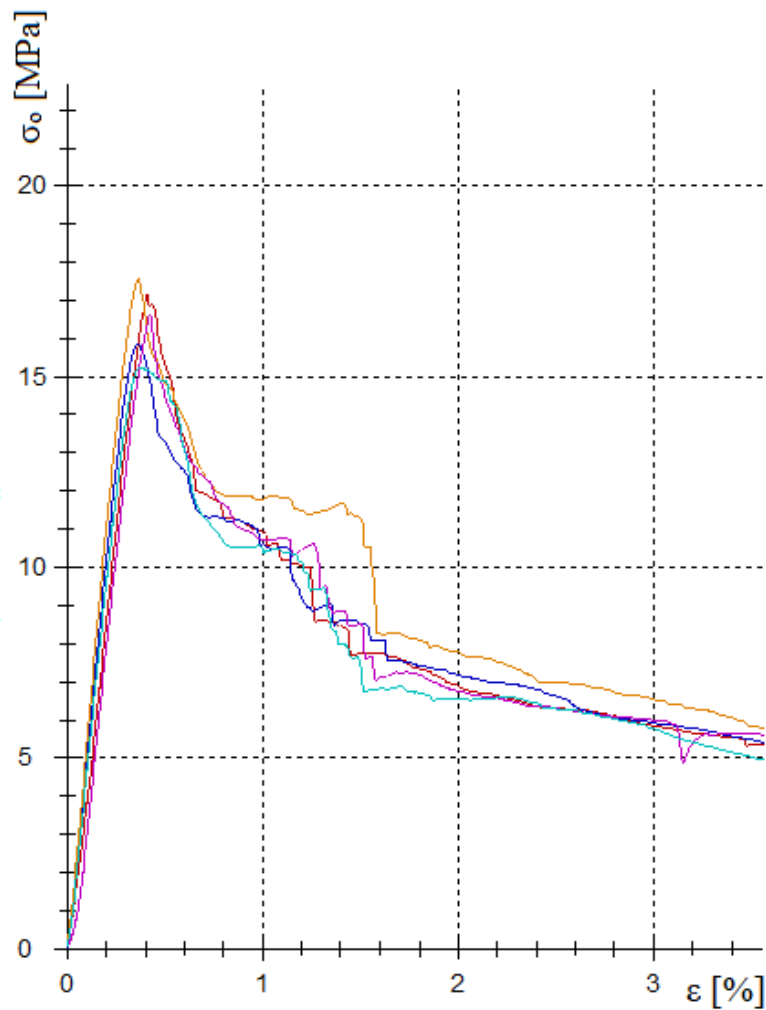
Z naměřených dat u vzorků s hliníkovou voštinou je průměrný modul pružnosti E_o (5070 ± 361) MPa. Maximální napětí dosahovalo průměrně σ_o ($16,5 \pm 0,9$) MPa a deformace při tomto napětí byla $\varepsilon = 0,4$ %. Tyto data jsou zaznamenána v následující tabulce za pomoci:

- Průměrných hodnot - \bar{x}
- Směrodatné odchytky - s
- Variačního koeficientu - V

Tabulka 5 Průměrné výsledky zkoušky tříbodovým ohybem pro hliníkovou voštinu

n = 5	E_o [MPa]	F_{max} [N]	ε [%]	σ_o [MPa]	y_{Fmax} [mm]
\bar{x}	5070	665	0,4	16,5	1,3
s	361	38,3	0	0,949	0,1
V	7,12	5,75	7,16	5,75	7,16

Naměřené hodnoty lze určit i z grafu, který popisuje závislost ohybového napětí na poměrné deformaci zkušební tělíska během zkoušky. V grafu na obrázku 49 jsou zaznamenány průběhy zkoušek všech pěti zkušebních tělísek s hliníkovou voštinou. V místě největšího napětí je tělísko považováno za porušené a další deformace je nevratná.



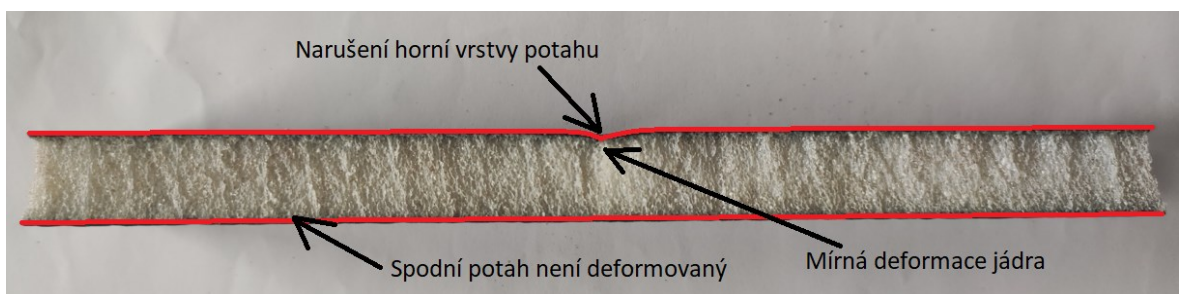
Obrázek 49 Graf závislosti ohybového napětí na poměrné deformaci pro vzorky s hliníkovou voštinou

11.1.2 Pěnové jádro

Nejprve došlo k mírnému prohnutí vzorku v místě trnu a tím vznikla deformace na tlakové i na tahové straně. Se zvyšujícím se zatížením došlo k narušení horní vrstvy prepregu a velmi mírnému promáčknutí pěnového jádra. Prohnutí vzorku rostlo se zvyšujícím se zatížením. U některých vzorků došlo k úplnému zlomení vrstvy prepregu na tlakové straně. Po odlehčení zaniklo prohnutí vzorku a zůstala pouze deformace promáčknutím na tlakové straně.



Obrázek 50 Poškozené vzorky s pěnovým jádrem



Obrázek 51 Detail poškozeného vzorku s pěnovým jádrem

Následující tabulka ukazuje hodnoty naměřené na jednotlivých vzorcích.

Tabulka 6 Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem pro pěnové jádro

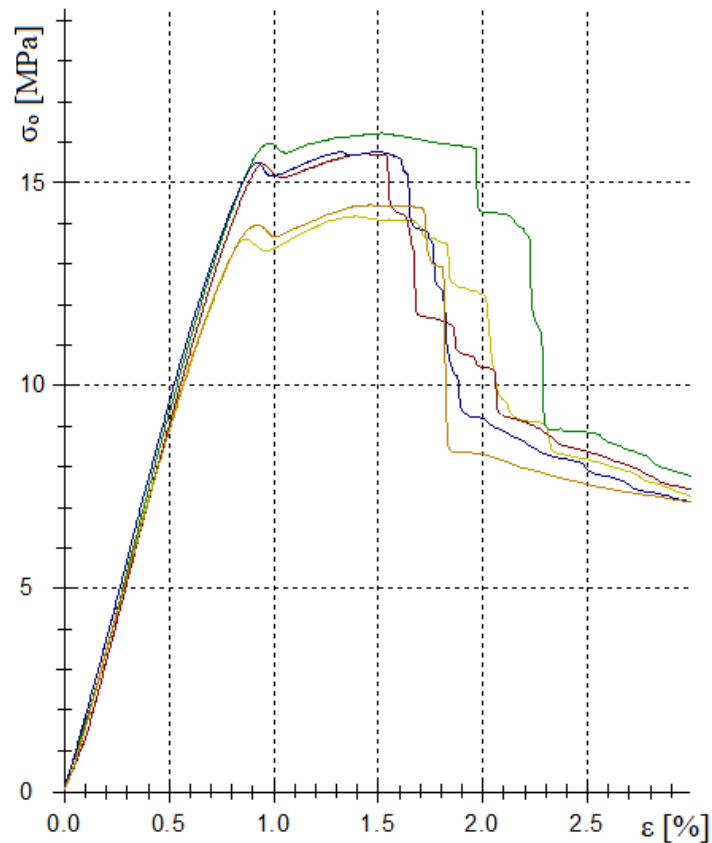
n	E_o [MPa]	F_{max} [N]	ε [%]	σ_o [MPa]	y_{Fmax} [mm]
1	1840	592	1,4	14,2	4,6
2	1810	670	1,4	15,7	4,7
3	1760	700	1,5	16,2	5
4	1890	672	1,3	15,8	4,4
5	1850	613	1,5	14,5	4,9

Z naměřených dat u vzorků s pěnovým jádrem je průměrný modul pružnosti E_o (1830 ± 47) MPa. Maximální napětí dosahovalo průměrně σ_o ($15,3 \pm 0,9$) MPa a deformace při tomto napětí byla ε ($1,4 \pm 0,1$) %.

Tabulka 7 Průměrné výsledky zkoušky tříbodovým ohybem pro hliníkovou voštinu

n = 5	E_o [MPa]	F_{max} [N]	ε [%]	σ_o [MPa]	y_{Fmax} [mm]
\bar{x}	1830	676	1,4	15,3	4,7
s	47,4	39,7	0,1	0,896	0,2
V	2,58	5,87	4,88	5,87	4,88

V grafu na obrázku 52 jsou zaznamenány průběhy zkoušek všech pěti zkušebních tělísek s pěnovým jádrem. Tyto tělíska mají výraznou mez kluzu, kde je tělísko deformováno bez zvětšujícího napětí.



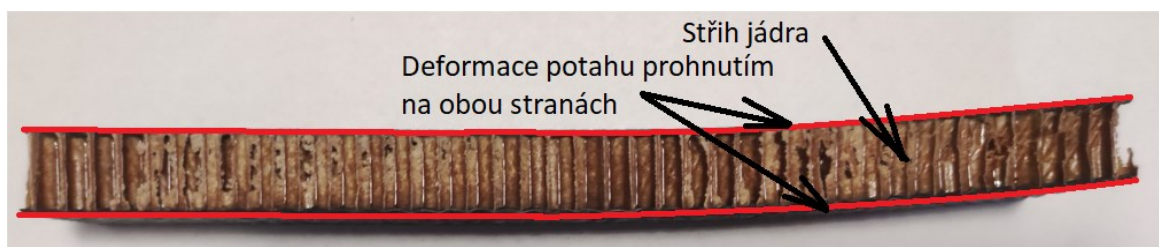
Obrázek 52 Graf závislosti ohybového napětí na poměrné deformaci pro vzorky s pěnovým jádrem

11.1.3 Jádro s nomexovou voštinou

U vzorků s nomexovou voštinou nejprve nastane prohnutí vzorku. Se zvyšujícím zatížením dochází ke stříhu jádra. Tento stříh se postupně rozšiřuje od místa zatížení trnem až k okrajům. Tím je horní vrstva prepregu uvolněna a nedojde k jejímu porušení. Vzorky po uvolnění zůstanou prohnuté.



Obrázek 53 Poškozené vzorky s nomexovou voštinou



Obrázek 54 Detail poškozeného vzorku s nomexovou voštinou

Následující tabulka ukazuje hodnoty naměřené na jednotlivých vzorcích.

Tabulka 8 Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem pro nomexovou voštinou

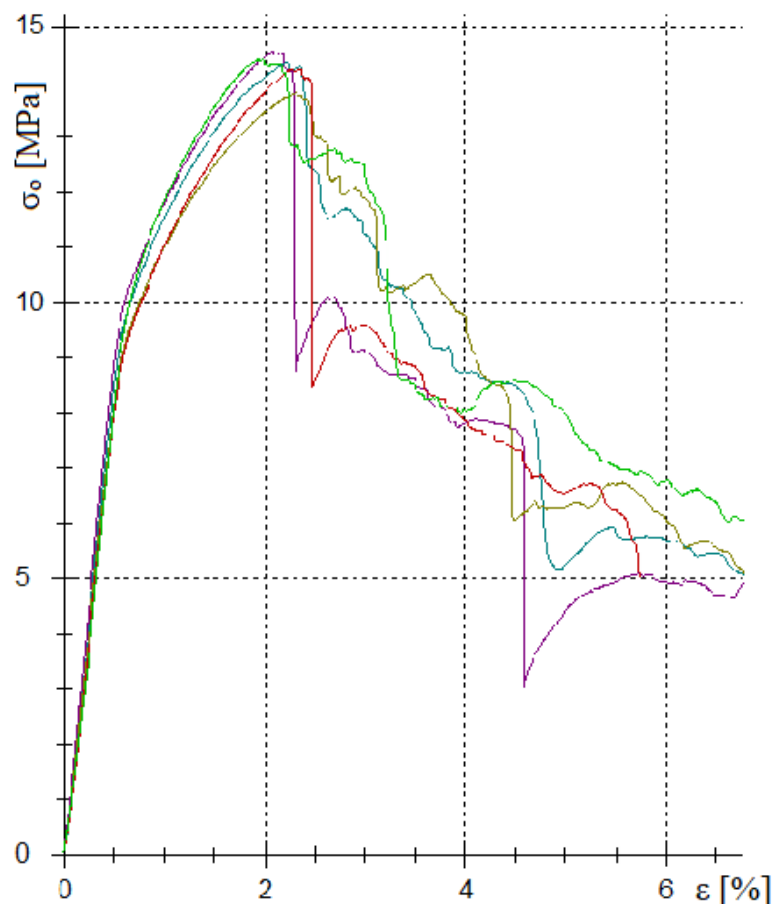
n	E_o [MPa]	F_{max} [N]	ε [%]	σ_o [MPa]	y_{Fmax} [mm]
1	1870	550	2,1	14,6	7,5
2	1800	542	2,2	14,4	8
3	1710	521	2,3	13,8	8,3
4	1640	538	2,4	14,2	8,5
5	1480	544	1,9	14,4	6,9

Z naměřených dat u vzorků s nomexovou voštinou je průměrný modul pružnosti E_o (1700 ± 150) MPa. Maximální napětí dosahovalo průměrně σ_o ($14,3 \pm 0,3$) MPa a deformace při tomto napětí byla ε ($2,2 \pm 0,2$) %.

Tabulka 9 Průměrné výsledky zkoušky tříbodovým ohybem pro hliníkovou voštinu

$n = 5$	E_o [MPa]	F_{max} [N]	ε [%]	σ_o [MPa]	y_{Fmax} [mm]
\bar{x}	1700	539	2,2	14,3	7,8
s	150	10,7	0,2	0,284	0,6
V	8,84	1,99	8,06	1,99	8,06

Na obrázku 55 v grafu lze vidět průběh zkoušky u všech pěti zkušebním vzorků. V místě největšího napětí dojde k prvnímu narušení jádra. U některých vzorků je viditelné uvolnění horní části sendviče.

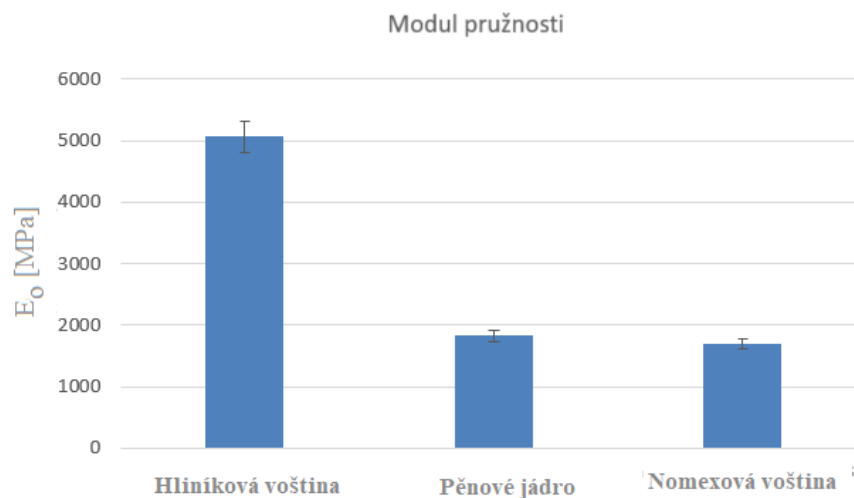


Obrázek 55 Graf závislosti ohybového napětí na poměrné deformaci pro vzorky s nomexovou voštinou

11.2 Zhodnocení výsledků

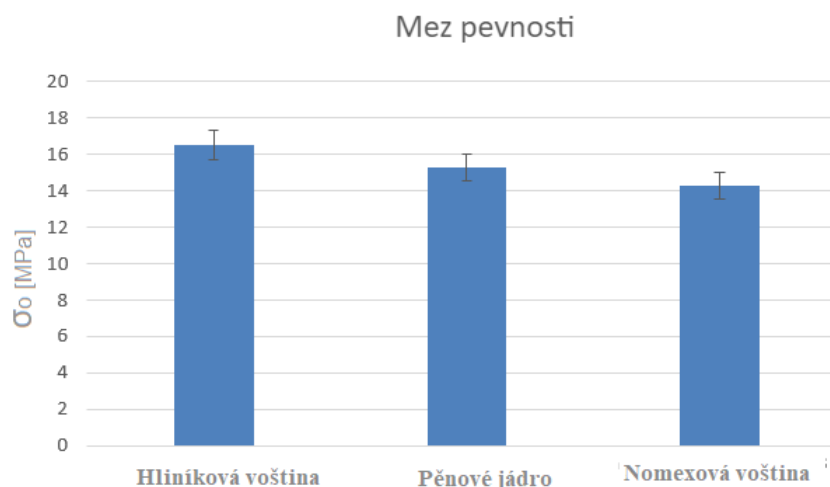
Pro porovnání jednotlivých typů použitých jader jsou výsledky graficky vyhodnoceny formou sloupcových diagramů, který zobrazuje rozdělení měřeného souboru na dílčí kvartily. Minimum a maximum je znázorněno pomocí vodorovných okrajových čár.

Na obrázku 56 je viditelné, že nejvyššího modulu pružnosti dosahují vzorky s hliníkovou voštinou. Vzorky s nomexovou voštinou a pěnovým jádrem dosahují téměř totožných hodnot.



Obrázek 56 Vyhodnocení modulu pružnosti při zkoušce tříbodovým ohybem

Na obrázku 57 jsou zobrazeny výsledky pro maximální mez pevnosti. Z grafu je patrné, že nejvyšších zatížení snese hliníková voština. Naopak nejnižších zatížení bylo naměřeno na nomexové voštině.



Obrázek 57 Vyhodnocení meze pevnosti při zkoušce tříbodovým ohybem

11.2.1 Únosnost vybraných zkušebních panelů – přepočít na 1 m²

Ze zkoušky tříbodovým ohybem je nutné určit F_{DOV} [N] při které ještě nedochází k trvalým plastickým deformacím. Na únosnost použitého panelu má vliv použitý materiál a šířka panelu.

Tabulka 10 Únosnost na 1 m² pro různé typy jader

Typ jádra	Tloušťka vzorku t_0 [mm]	Šířka vzorku b_0 [mm]	Dovolená síla F_{DOV} [N]	Únosnost [kg/m ²]
Hliníková voština	15,55	45	585	119,64
Pěnové jádro	16,3	45	649	129,85
Nomexová voština	15,05	45	411	82,23

Pro výpočet únosnosti panelu o ploše 1 m² ze zkoušky tříbodovým ohybem platí:

$$M_{mez} = \frac{F_{dov}}{2} \cdot \frac{L_p}{2}$$

Kde: F_{DOV} – maximální dovolená síla

L_p - vzdálenost podpěr při zkoušce (180 mm)

Příklad výpočtu pro hliníkovou voštinu:

$$M_{mez} = \frac{F_{dov}}{2} \cdot \frac{L_p}{2} = \frac{598}{2} \cdot \frac{180}{2} = 26\,910 \text{ Nmm}$$

Pro panel 1 m² bude vzdálenost podpěr $L_p = 1000$ mm

Šířka zkušebního tělesa b_0 je v našem případě 45 mm

Pak platí, že mezní momenty se pro těleso délky 160 mm a 1000 mm musí rovnat:

$$M_{mez1180} = M_{mez1000}$$

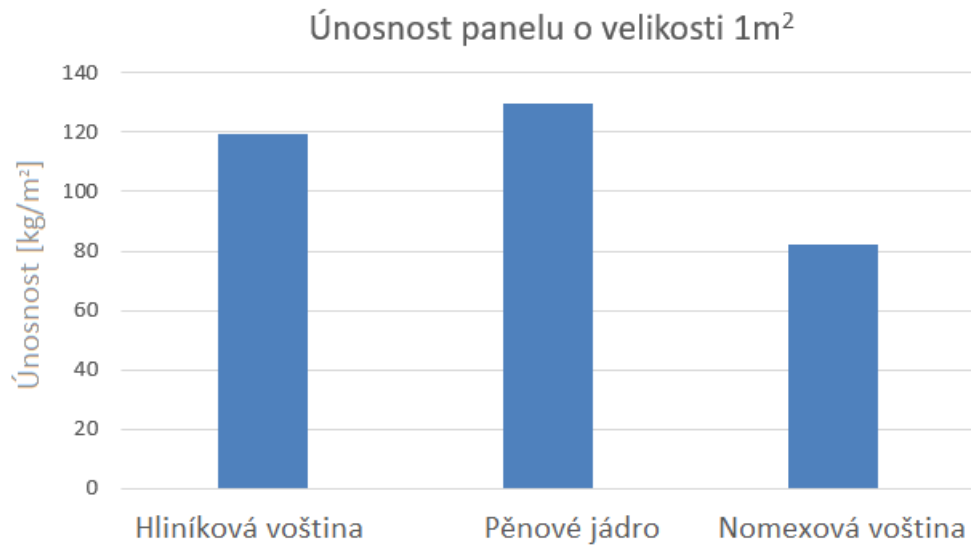
$$29\,910 = \frac{F}{2} \cdot \frac{1000}{2}$$

$$F = \frac{2 \cdot 26\,910}{1000}$$

$$F = 53,82 \text{ N}$$

Pro panel šířky 45 mm je nutno tuto sílu vynásobit $1000 \text{ mm}/45 \text{ mm} = 22,23$ krát

Panel s hliníkovou voštinou, který má plochu 1 m², je možné zatížit silou 1196,4 N tj. 119,64 kg bez trvalých (plastických) deformací. Únosnost panelů s dalšími typy jader se vypočítají obdobným postupem.



Obrázek 58 Vyhodnocení únosnosti jednotlivých panelů

ZÁVĚR

Teoretická část diplomové práce se zabývá popisem sendvičových prvků. Je zde popsána jejich konstrukce a popis jednotlivých částí. Následující kapitola se zaměřuje na materiály, které je možné využít pro jednotlivé části (potah, jádro) sendvičové struktury. Dále byly popsány jednotlivé vlastnosti, metody výroby a zkoušky. Závěrečná kapitola teoretické části je věnována použití sendvičových panelů v dopravním průmyslu.

Praktická část je zaměřena na návrh úložného prostoru pro příruční zavazadla. V první kapitole je popsána problematika úložných prostorů na palubě letadla. Na základě těchto poznatků je navržena vhodná konstrukce úložného prostoru, pro kterou jsou následně navrženy pomocné prvky (hydraulické tlumiče, lepidla, uchycení k rámu letadla...). Jako vhodný materiál pro potah sendvičového panelu je zvolen prepreg z uhlíkových vláken, který je možné zpracovávat v autoklávu. K tomuto potahu byly pro porovnání vybrány tři typy jader. Prvním je hliníkové voštinové jádro zvolené díky jeho lehkosti, tuhosti, reakci na oheň, odolnosti proti tlaku, smyku a korozi. Nomexové voštiny jsou v letectví běžně využívány pro interiérové aplikace, proto je zvolena voština vyztužená meta-aramidovými vlákny, která je potažena tepelně odolnou fenolovou pryskyřicí. Pěnové jádro ArmaPET od společnosti Armacell je vybráno díky použití 100% recyklovaného PET jako základní surovina při výrobě. V další kapitole je popsán proces výroby zkušebních vzorků pomocí autoklávu OP Panini S.r.l. a jejich následné nařezání na požadovanou velikost vodním paprskem PTV UniJet model WJ 3020-2Z-UJ-PJ ve firmě Form s.r.o.

Závěrečná kapitola praktické části je zaměřena na testování vzorků třibodovým ohybem a vyhodnocení výsledků. Z výpočtu únosnosti zkušebních panelů je patrné, že nejvyšší únosnosti dosahuje pěnové jádro $129,85 \text{ kg/m}^2$, které ale není příliš vhodné pro použití na palubě letadla, a to vzhledem k toxickým výparům (oxid uhličitý a oxid uhelnatý) při požáru. Proto je jako nejvýhodnější materiál zvolena hliníková voština, která dosahuje únosnosti $119,64 \text{ kg/m}^2$. Z testovaných vzorků má nejvyšší mez pevnosti $(16,5 \pm 0,9) \text{ MPa}$ a modul pružnosti $(5070 \pm 361) \text{ MPa}$.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Ime.fme.vutbr.cz [online]. c2011 [cit. 2022-12-11].Kompozitní materiály. Dostupné z WWW: <http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM/11-BUM.ppt>.
- [2] Daďourek, Karel. Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007. str. 113. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [3] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [4] RŮŽIČKA, Vlastimil. Kompozitní materiály mění svět. *Mmspektrum* [online]. 2013, 10. 04. 2013, 1.(1.), 1 [cit. 2022-10-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kompozitni-materialy-meni-svet>
- [5] *S stefanmichna.com* [online]. c2007 [cit. 2022-11-11].Kompozitní materiály. Dostupné z WWW: <http://www.stefanmichna.com/download/technickematerialy_II/kompozitni_materialy.pdf>
- [6] CALLISTER, William D. a David G. Rethwisch. Materials science and engineering: An Introduction. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2010, 885 s. ISBN 978-0-470-41997-7
- [7] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. Perspektivní materiály. Vyd. 3. Praha: České vysoké učení v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [8] *Mmspektrum.com* [online]. c2011 [cit. 2022-10-17].Sendvicové konstrukce. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce>>
- [9] FM sendvičové panely s hliníkovou voštinou. In: Forlit & Metal [online]. [cit. 2022-09-10]. Dostupné z: <https://www.fmetal.cz/cz/sendvicove-panely/>
- [10] BUCŇÁK, Ondřej. ANALÝZA SENDVICOVÝCH STRUKTUR METODOU KONEČNÝCH PRVKU [online]. BRNO, 2014 [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87130.
Bakalářská práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNE. Vedoucí práce VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNE.
- [11] PETERKA, Jindřich. Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. Praha: SNTL, 1980.

- [12] NIU, Michael Chun-Yung. Composite airframe structures: practical design information and data. 1th published. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press Ltd, 1992, 664 s. ISBN 96-271-2806-6.
- [13] Core. *Compositelab* [online]. [cit. 2022-09-06]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/composite-materials/core/>
- [14] BITZER, T. N. Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing. 1st ed. London: Chapman & Hall, 1997, 233 s. ISBN 978-94-011-5856-5
- [15] DOSTAL C. A. Engineered Materials Handbook: Composites, Volume 1 Ohio: ASM International, 1987, 983 s. ISBN: 978-0871702791
- [16] GUIDE TO COMPOSITES. *Gurit* [online]. [cit. 2022-10-03]. Dostupné z: <https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>
- [17] Melecky a.s: Papírové voštiny. Melecky.cz [online]. Vítkov [cit. 2022-10-12]. Dostupné z: <https://www.melecky.cz/download/product/5/papirove-vostiny.pdf>
- [18] NOMEX HONEYCOMB-COMMERCIAL GRADE. CEL COMPONENTS [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.honeycombpanels.eu/en/products/honeycomb/nomex-honeycombcommercial-grade>
- [19] AIREX® T10. 3A Core Materials [online]. [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: <https://www.3accorematerials.com/en/products/airex-foam/airex-t10-pet-foam>
- [20] Intechopen.com [online]. [cit. 2017-27-11]. Finite elements analysis of loading area effect on sandwich panel behaviour beyond the yield limit. Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/39769.pdf>.
- [21] Dopagcz [online]. [cit. 2022-10-15]. Dostupné z: <https://www.dopagcz.com/aplikace/vyroba-kompozitu/zalevani-vostinovy-ch-panelu-a-plneni-jader/>
- [22] KAW, Autar K., 2006. Mechanics of composite materials. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press. ISBN 08-493-1343-0.
- [23] GAY, Daniel, Suong V. HOA a Stephen W. TSAI, 2003. Composite materials: design and applications. 4th. Boca Raton: CRC Press. ISBN 15-871-6084-6.

- [24] Železniční doprava. 5M [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/odvetvi/zeleznicni-vozidla>
- [25] MIRACLE, Daniel B. a Steven L. Donaldson. *ASM Handbook: Volume 21 - Composites*. Ohio: ASM International, 2001. 1201 s. ISBN 0-87170-703-9
- [26] LEHMHUS D., BUSSE M., HERRMANN A., KAYVANTASH K. *Structural Materials and Processes in Transportation*, 1st ed. New York: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2013, 598s. ISBN: 978-3527327874
- [27] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V CR 1. vyd. Praha : Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [28] PODOLSKI, Aron. Korek jako základní materiál pro vícevrstvé konstrukce. *Korek* [online]. 2021, 16. 9. 2021 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://korekprodejna.cz/2021/09/16/korek-jako-zakladni-material-pro-vicevrstve-konstrukce/>
- [29] Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Korek>
- [30] PILVOUSEK, Ing. Tomáš a doc. Ing. Jan ŠANOVEC, CSC. *Lehké konstrukce automobilů - sendvičové materiály*. Mmspektrum [online]. Praha: Škoda Auto, ČVUT FS, 2016, 08. 06. 2016 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-automobilu-sendvicove-materialy>
- [31] SÜNKEL, Ralf. Leicht gleich teuer? Nicht mit einem Stahl-Hybrid-Werkstoff!. *Blechnet* [online]. 17.07.2015 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.blechnet.com/leicht-gleich-teuer-nicht-mit-einem-stahl-hybrid-werkstoff-a-497499/>
- [32] NIU, M. C. Y. *Composites Airframe Structures; Practical Design Information and Data*. 1st ed. Hong Kong: Conmilit Press Ltd., 1992, 664 s. ISBN 962-7128-06-6
- [33] PRESS, Kit. Parker Solar Probe: A Mission to Touch the Su. NASA [online]. NASA, 2018, August 2018 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/parkersolarprobe_presskit_august2018_final.pdf

- [34] MAŠEK, Miroslav. Od oceli k antiraketám: Jak funguje ochrana tanků? (1). 100+1 [online]. 29.08.2019, 1 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.stoplusjednicka.cz/od-oceli-k-antiraketam-jak-funguje-ochrana-tanku-1>
- [35] 1. vyrobený stroj: Otevřená encyklopedie. In: Wikipedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/M1_Abrams#/media/Soubor:M1-Abrams-LIRP.jpg
- [36] Engine & Boat [online]. [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.engine-boat.com/laver-52x-1625-metru/>
- [37] V Plzni byl vyroben už tisíce kuchyňský set do letadel Airbus. In: Český rozhlas [online]. Plzeň, 25. červen 2016 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://plzen.rozhlas.cz/v-plzni-byl-vyrobena-uz-tisici-kuchynsky-set-do-letadel-airbus-6737735#&gid=1&pid=1>
- [38] Cross-sectional view of a typical sandwich beam element and various face/core systems used in ATR -72 series type aircraft (picture courtesy, ATR Aircraft). In: ResearchGate [online]. [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Cross-sectional-view-of-a-typical-sandwich-beam-element-and-various-face-core-systems_fig2_336568324
- [39] FABIÁN, Milo. Interiér vozňov súpravy modernizovaného vlaku SC 241 Pendolino Košičan. In: Webnovinky [online]. Žilina: webnovinky, 2017, 25. september 2017 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.webnoviny.sk/predstavili-prvy-zmodernizovany-rychlovlak-pendolino-kosice-s-prahou-spoj-za-rekordny-cas/>
- [40] Acta astronautica: Aluminium foam sandwich structures for space applications [online]. June-August 2007 [cit. 2023-05-22]. ISSN 0094-5765. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576507000513>
- [41] ZENKERT, D. Nordic Industrial Fund, The Handbook of Sandwich Construction. Worcestershire: EMAS Publishing, 1997, 447 s. ISBN 978-094-7817-961
- [42] LEHMHUS D., BUSSE M., HERRMANN A., KAYVANTASH K. Structural Materials and Processes in Transportation, 1st ed. New York: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2013, 598s. ISBN: 978-3527327874

- [43] CAMPBELL, Flake C. Structural Composite Materials. Novelty, Ohio, USA: ASM International, 2010. ISBN 978-161-5031-405
- [44] ALTAN, Mihrigul, 2018. Thermoplastic Foams: Processing, Manufacturing, and Characterization. In: [online]. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.71083
- [45] PMI Structural Foam. RIFENG [online]. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <http://www.rfpmi.com/product.html>
- [46] SAN Foam Core. COMPOSITES ONE [online]. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.compositesone.com/product/core-materials/san-foam-core/>
- [47] WANNER, Markus a Danilo LAZZERI. La nueva espuma PET para aplicaciones de núcleos [online]. 2007, 27/11/2007 [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/19103-La-nueva-espuma-PET-para-aplicaciones-de-nucleos.html>
- [48] Thermoplastic Honeycomb Cores. Plascore [online]. [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-cores/thermoplastic/>
- [49] Aluminium Honeycomb Cores. YAMEIJIA [online]. [cit. 2021-06-06]. Dostupné z: http://www.al-honeycomb-panels.com/product_custom-aluminium-honeycomb-core_24074.html
- [50] Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vo%C5%A1tina_\(konstrukce\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vo%C5%A1tina_(konstrukce))
- [51] ŠUBA, Oldřich. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [52] WANBERG, J. Composite Materials Fabrication Handbook 2. Stillwater: Wolfgang Publications Inc., 2010. ISBN 978-1-929133-93-2
- [53] MALLICK, P.K. Composites engineering handbook. New York: Marcel Dekker, 1997. ISBN 08-247-9304-8.
- [54] ALUCORE® | Aluminium Wabenpaneele. In: Almet [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://www.almet-benelux.eu/de/almet-verbundmaterialien>
- [55] Termoplastické voštinové materiály pro automobilový průmysl, letecký průmysl aplikace. In: Honor [online]. Mar 13, 2018 [cit. 2022-10-18]. Dostupné z:

- <http://cz.chinatestingequipment.com/info/thermoplastic-honeycomb-materials-for-automoti-24391468.html>
- [56] Voštinové Jádro Nomex. In: Hexcore [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <http://cz.haxhoneycombcore.com/honeycomb-core/nomex-honeycomb/nomex-honeycomb-core.html>
- [57] Papírová voština. In: OBALY VALMEZ s.r.o. [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <http://www.obalyvalmez.cz/nase-vyroba/papirova-vostina>
- [58] Carbon Fiber Foam Sandwich Panels. In: *TOPOLO* [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://topolocfrt.com/carbon-fiber-sandwich-panels/>
- [59] PVC sandwich panel. In: MEP [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://www.mepfurniture.it/en/projects/sandwich-panels-pvc/>
- [60] Parabeam 3D E-glass and hybrid fabrics, core materials. In: CompositesWorld [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/camx-2018-preview-parabeam>
- [61] PU Roof Sandwich Panel. In: BDRECO [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://www.brdecogroup.com/PU-Roof-Sandwich-Panel.html>
- [62] FRP Skin PET Foam Panel. In: *TOPOLO* [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://topolocfrt.com/pet-foam-sandwich-panel/>
- [63] Decorative sandwich panel Balsa W80. In: Nautic Expo [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://www.nauticexpo.com/prod/kuiper-holland-dutch-marine-panels/product-28939-365832.html>
- [64] Floor sandwich panel Sapiliège. In: Archi Expo [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://www.archiexpo.com/prod/simonin/product-72546-1290221.html>
- [65] Polyester Resin Coating Aluminium Honeycomb Panel. In: Made-in-China [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://cncnbolliya.en.made-in-china.com/product/TBqQFzwVAiWr/China-Polyester-Resin-Coating-Aluminium-Honeycomb-Panel.html>
- [66] Fiberglass FRP GRP Honeycomb Panels. In: *LZ panels* [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://www.lzpanels.com/fiberglass-frp-grp-honeycomb-panels.html>

- [67] Honeycomb Paperboard. In: PLL PACKAGING SDN. BHD.: your "Green Partner" in packaging [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <http://www.pllpac.com.my/index.php?ws=ourproducts&cid=211464&cat=Honeycomb-Paperboard>
- [68] MIRACLES D. B., DONALDSON S.L. *ASM Handbook Volume 21: Composites*, Volume 21 Ohio: ASM International, 2001, 1201 s. ISBN: 978-0871707031
- [69] POPHAM, E., S.M. S.M.GROVE a M.E. MILES. An investigation of the skin/core bond in honeycomb sandwich structures using statistical experimentation techniques. Science Direct [online]. UK: School of Engineering, Advanced Composites Manufacturing Centre, University of Plymouth, Plymouth PL4 8AA, UK, 2005, 1 [cit. 2022-10-26]. ISSN ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X05002848>
- [70] Co jsou prepregy?. *Fibreglast* [online]. 1 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center
- [71] Pre-preg. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pre-preg>
- [72] ADAMS, DR. DONALD. Sandwich panel test methods. *CompositesWorld* [online]. 2006, 9/1/2006, 1 [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/columns/sandwich-panel-test-methods>
- [73] *Infinita lab* [online]. [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://infinitalab.com/>
- [74] *ADMET* [online]. [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://www.admet.com/>
- [75] SHARMA, Nitin, Ronald F. GIBSON a Emmanuel O. AYORINDE. *Fatigue of Foam and Honeycomb Core Composite Sandwich Structures: A Tutorial* [online]. 2006, 8(4), 263-319 [cit. 2021-04-18]. ISSN 1099-6362. Dostupné z: doi:10.1177/1099636206063337
- [76] *Aeroworks: Inovative aerospace product* [online]. Nizozemsko [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://aeroworks.nl>
- [77] *General Aerospace: Astabilus company* [online]. [cit. 2023-05-06]
- [78] SLOAN, Jeff. Polypropylene honeycomb lightens, strengthens automotive panels. *CompositesWorld* [online]. 2020, 4/21/2020, 1 [cit. 2023-05-07]. Dostupné

z: <https://www.compositesworld.com/articles/polypropylene-honeycomb-lightens-strengthens-automotive-panels>

- [79] hermHex organosandwich: The patented ThermHex production process. *Organosandwich* [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://organosandwich.de/en/technology/>
- [80] Thermoplastic sandwich panel with PP honeycomb core and glass fiber/PP-skins. *ThermHex* [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://thermhhex.com/products/organosandwich/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°C	Stupeň celsia
°F	Stupeň Fahrenheita
mm	Milimetr
kg.m ⁻³	Kilogram na metr krychlový
t	Tloušťka
MPa	Megapaskal
min	Minuta
mm/min	Milimetr za minutu
cm	Centimetr
kg	Kilogram
g/m ²	Gram na metr čtvereční
g/cm ³	Gram na centimetr krychlový
°C/min	Stupňů za minutu
m ²	Metr čtvereční
N	Newton
VE	Epoxidová
UP	Polyesterová

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Synergický efekt [3]	11
Obrázek 2 Využití kompozitních materiálů v případě Airbus A380 [4]	12
Obrázek 3 Základní schéma sendvičových struktur [6].....	13
Obrázek 4 Vybrané tvary buněk voštinových materiálů [14].....	14
Obrázek 5 Příklad materiálů pro voštinové jádra (hliník, termoplast, nomex, papír) [54, 55, 56, 57]	15
Obrázek 6 Schématické adhezivní zaoblení [69].....	15
Obrázek 7 PVC sendvičový panel [59].....	17
Obrázek 8 Polyuretanové jádro ve střešním panelu [61]	19
Obrázek 9 Jádro z PET pěny [62]	20
Obrázek 10 Dekorativní panel s balzovým jádrem [63]	21
Obrázek 11 Podlahový panel s korkovým jádrem [64]	21
Obrázek 12 Sendvičová jádra z 3D tkaniny [60]	22
Obrázek 13 Příklady nekovových potahů [65, 66, 67, 58]	23
Obrázek 14 Výroba jednosměrně orientovaného prepregu [27].....	24
Obrázek 15 Srovnání tuhosti a pevnosti hliníkového sendvičového panelu versus homogenní materiál [9].....	26
Obrázek 16 Příklady porušení sendvičových struktur	27
Obrázek 17 Lisování pomocí vakuového vaku [16].....	30
Obrázek 18 Lisování pomocí tlakového vaku [16].....	31
Obrázek 19 Lisování v autoklávu [16]	32
Obrázek 20 RTM technologie [16].....	33
Obrázek 21 Druhy porušení při zkoušce tříbodovým ohybem [75]	35
Obrázek 22 Porovnání zkoušky tříbodovým ohybem a zkoušky čtyřbodovým ohybem [27]	36
Obrázek 23 Zkouška ve smyku, nahoře – zkouška tahem, dole – zkouška tlakem	37
Obrázek 24 Kuchyně do Airbus 380 vyrobená ze sendvičových panelů [37].....	39
Obrázek 25 příklady využití sendvičových prvků v letadle ATR 72 [38].....	40
Obrázek 26 příklady využití sendvičových prvků pro díly interiérů na jachtě LAVER [36]	40
Obrázek 27 Sendvičový pancíř tanku M1 Adams tvořený vrstvami oceli-plastu-keramiky-plastu-oceli [35]	41
Obrázek 28 Kontinuální proces výroby společnosti ThermHex [79].....	42
Obrázek 29 Automobilový panel DPA Moldados s polypropylenovým jádrem [78]	43
Obrázek 30 Diagram napětí – deformace tlakových zkoušek [79].....	44

Obrázek 31 Diagram napětí – deformace smykových zkoušek [79]	44
Obrázek 32 Příklad mapy poruchových režimů pro THPP60-10-8 (směr L) [79]	45
Obrázek 33 Sendvičové panely na vnitřním obložení vlaků [39]	46
Obrázek 34 Instalace tepelného štítu na kosmickou loď Parker Solar Probe [33]	47
Obrázek 35 Návrh úložného prostoru	50
Obrázek 36 Rozměry spodního panelu	51
Obrázek 37 Příklady západek [76]	52
Obrázek 38 Aplikace závitové vložky do panelu	53
Obrázek 39 Hardware pro uchycení tlumiče k panelu [77]	54
Obrázek 40 Uchycení úložného boxu	55
Obrázek 41 Příprava zkušebních vzorků	59
Obrázek 42 Uložení zkušebních vzorků do autoklávu	60
Obrázek 43 Průběh teploty a tlaku v autoklávu	61
Obrázek 44 autokláv OP Panini S.r.l., model G00300572	62
Obrázek 45 Řezný plán	62
Obrázek 46 Zkouška třibodovým ohybem	63
Obrázek 47 Poškozené vzorky s hliníkovou voštinou	64
Obrázek 48 Detail poškozeného vzorku s hliníkovou voštinou	65
Obrázek 49 Graf závislosti ohybového napětí na poměrné deformaci pro vzorky s hliníkovou voštinou	66
Obrázek 50 Poškozené vzorky s pěnovým jádrem	67
Obrázek 51 Detail poškozeného vzorku s pěnovým jádrem	67
Obrázek 52 Graf závislosti ohybového napětí na poměrné deformaci pro vzorky s pěnovým jádrem	69
Obrázek 53 Poškozené vzorky s nomexovou voštinou	70
Obrázek 54 Detail poškozeného vzorku s nomexovou voštinou	70
Obrázek 55 Graf závislosti ohybového napětí na poměrné deformaci pro vzorky s nomexovou voštinou	71
Obrázek 56 Vyhodnocení modulu pružnosti při zkoušce třibodovým ohybem	72
Obrázek 57 Vyhodnocení meze pevnosti při zkoušce třibodovým ohybem	72
Obrázek 58 Vyhodnocení únosnosti jednotlivých panelů	74

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vlastnosti lepidla 3M™ Scotch-Weld™ EC-2815 B/A FR	52
Tabulka 2 Vlastnosti lepidla 3M™ Scotch-Weld™ EC-3542 B/A FR	53
Tabulka 3 Vlastnosti pryskyřice uvedené v materiálovém listu	56
Tabulka 4 Výsledky zkoušky třibodovým ohybem pro hliníkovou voštinu.....	65
Tabulka 5 Průměrné výsledky zkoušky třibodovým ohybem pro hliníkovou voštinu	65
Tabulka 6 Výsledky zkoušky třibodovým ohybem pro pěnové jádro	68
Tabulka 7 Průměrné výsledky zkoušky třibodovým ohybem pro hliníkovou voštinu	68
Tabulka 8 Výsledky zkoušky třibodovým ohybem pro nomexovou voštinu	70
Tabulka 9 Průměrné výsledky zkoušky třibodovým ohybem pro hliníkovou voštinu	71
Tabulka 10 Únosnost na 1 m ² pro různé typy jader.....	73

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list prepregu

Příloha P II: Materiálový list hliníkové voštiny

Příloha P III: Materiálový list nomexové voštiny

Příloha P IV: Materiálový list pěnového jádra

Příloha P V: Sestava úložného prostoru na zavazadla v sw. SolidWorks

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PREPREGU



COMPANY WITH QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015 CERTIFIED BY BUREAU VERITAS N° 223933

Via Tiepolo, 19 20022 CASTANO PRIMO (MI) Tel. +39 0331 880564 www.impregnatex.it

MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z-HT

ST-010415- rev12-09/09/2020

DESCRIPTION

Modified epoxy matrix IMP503Z-HT prepregs are suitable for high cosmetic applications such as Carbon Look composite parts.

IMP503Z-HT can withstand higher service temperatures than IMP503Z.

Both composite and metal tools can be used.

IMP503Z-HT prepregs are best processed by autoclave curing or press moulding.

IMP503Z-HT is available with woven carbon, glass, aramid and natural fibers reinforcements.

Light-black pigmented IMP503Z-HT, named IMP503Z-HT P, is also available.

BENEFITS AND FEATURES

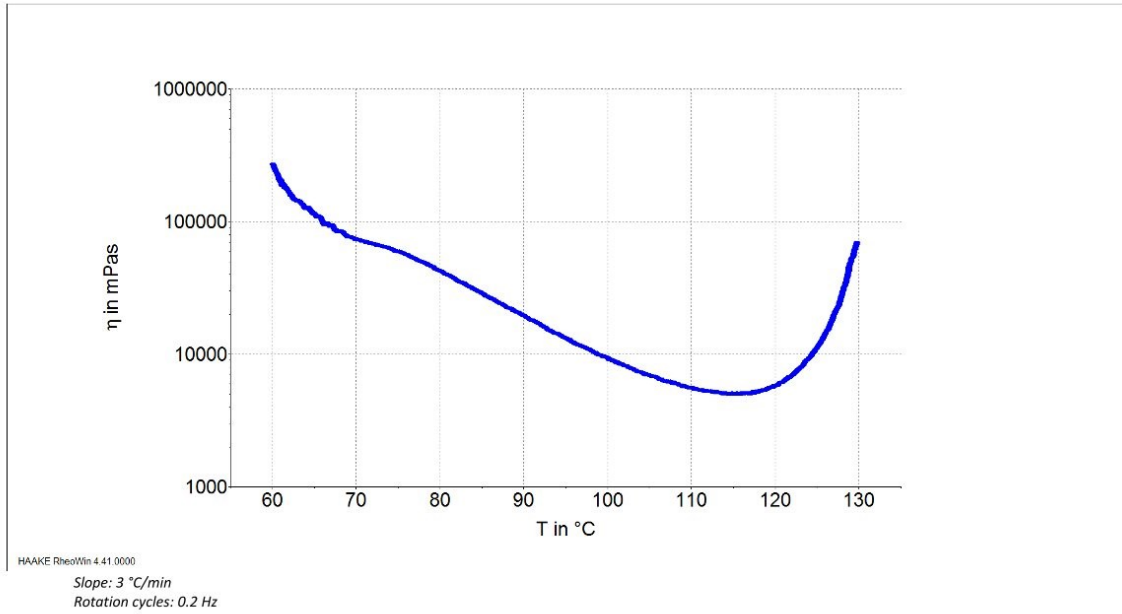
- IMP503Z-HT finds its main uses in automotive, sports & leisure, marine and industrial applications.
- Good mechanical properties.
- Toughened resin.
- Compatible with IMP503Z and IMP505L prepregs.
- Excellent UV resistance and environmental stability for aesthetic cosmetic components.

RESIN PROPERTIES

TYPE		TOUGHENED
Cured resin's density	g/cm ³	1.20 to 1.22
Gel Time at 125 °C	min	6 to 8
Gel Time at 110 °C	min	20 to 25
TACK		MEDIUM
Out-life (23 °C)	weeks	5
Shelf Life (-18 °C)	months	12

VISCOSITY PROFILE

The chart below shows the rheological behaviour of IMP503Z-HT.
Cone-plate rheometer, frequency 0.2 Hz and heating rate 3 °C/min



RECOMMENDED CURE SCHEDULES

One of the following autoclave cure schedules needs to be selected:

2 Hours @ 140°C For Development of Maximum Glass Transition Temperature (115 °C to 120 °C, DMA Onset Tg).

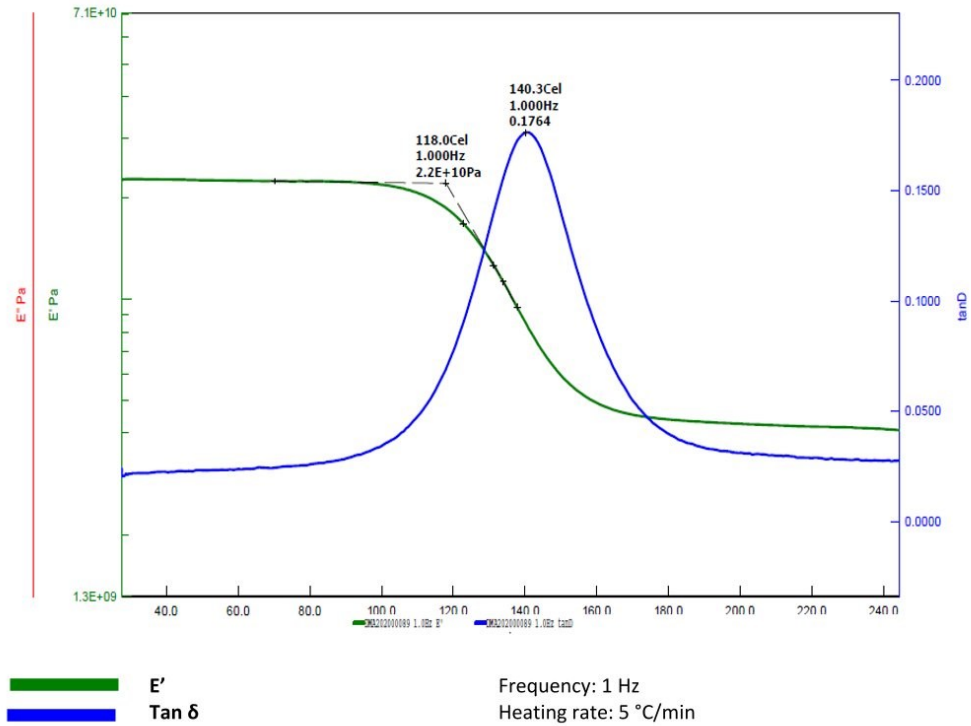
or

1.5 Hours @ 135°C General Cure Cycle (Tg approximately 110 °C).

THERMAL PERFORMANCE

The following chart shows a DMA-Tg trace for GG204T-GG380T-IMP503Z-HT laminate, tested to ASTM D7028.

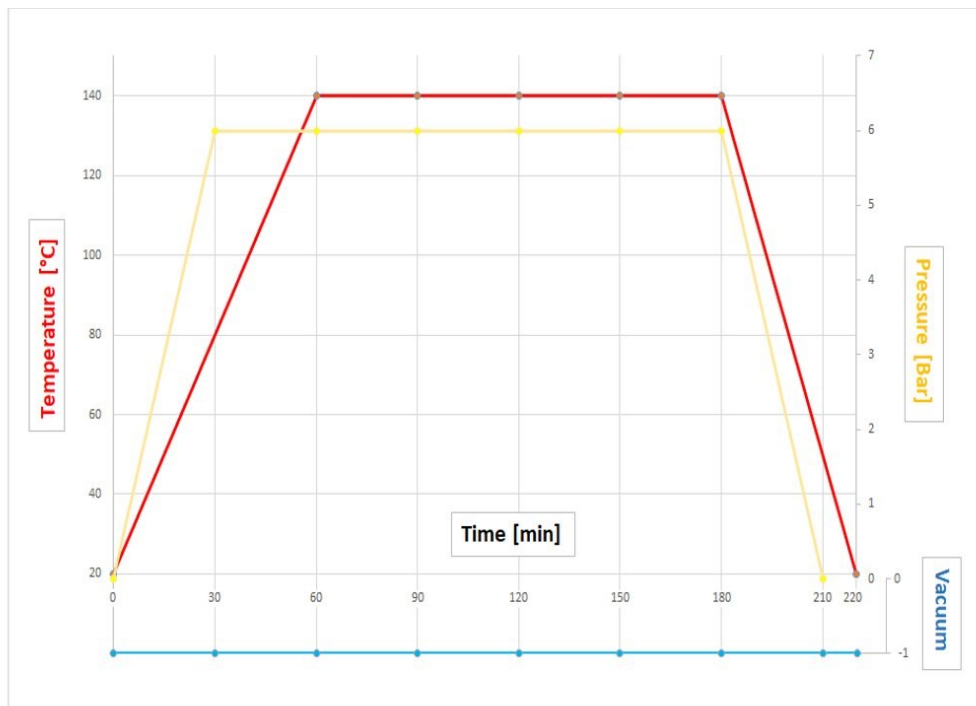
Cure schedule: 120 minutes @ 140 °C.



PROCESSING GUIDELINES

Recommended 140°C Autoclave Cure Cycle:

- From the beginning of the cure cycle apply maximum vacuum pressure to the bagged component(s).
- From the beginning of cure cycle apply an over pressure of 6.0 ± 1.0 Bar.
- Use temperature monitoring thermocouples applied to the surface of the component(s) to define the actual cure temperature. At those places with the highest thermal inertia in responding to heating ("Coldest Area").
- Use a controlled heating rate of 1.0 to 2.0 °C/min from room temperature to 140 °C.
- The tolerance on actual cure temperature on the component bag is 140 °C, +5 °C -0 °C.
- The cure cycle dwell duration starts once the slowest monitoring thermocouple on the component(s) reaches the 140 °C.
- The tolerance on the 120 minutes cure time at 140 °C is +30 minutes, -0 minutes.
- Once cured, the cooling rate can be 2.0 to 3.0 °C/min back to room temperature or 30 °C whichever is higher.



IMP503Z-HT is a reactive resin formulation which may undergo high exothermic heating during initial curing process if guidelines are not followed. Carefully setting recommended heating rate and dwell temperatures cure schedules is required. Exotherm risk increases with increasing laminate thickness.

MECHANICAL PROPERTIES

The table below shows average mechanical properties of IMP503Z-HT laminates.

Reinforcement	Flexural Strength ASTM D790 [MPa]	Flexural Modulus ASTM D790 [GPa]	ILSS ASTM D2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
GG204T	830	57	68	58
GG204P	846	58	67	59
GG 240T	901	54	59	54
GG380T	930	60	71	60
GG428T	920	57	69	62
GG450T	890	59	63	58
GG630T	705	62	55	63
UD-DYX HS 15/130 DLN2	1350	88	-	45
DYF15 GG180P	660	42	54	43
KK285T	456	22	46	58
GV335UD	650	234	59	43
VV 350	400	21	45	60

The mechanical data shown above refers to laminates press-mould cured 90 minutes @ 135°C.

STORAGE

Prepreg materials should be stored as received @ - 18 °C.

Shelf-life @ -18 °C : 12 months

Out-life @ 23 °C: 5 weeks

Allow the material to fully thaw before removing it from its packaging.

MATERIAL HANDLING - SAFETY

Operators should wear protective gloves to avoid direct contact with the skin and to prevent product contamination. Please consult MSDS.

NOTE

The technical specifications, data and measures provided are accurate to the best of Impregnatex Compositi knowledge. Impregnatex Compositi give no warranty, express or implied, as to the completeness, accuracy, reliability or fitness for any specific or particular use, field of use, application, performance, result or purpose. Above mentioned technical information are based on our actual knowhow and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST HLINÍKOVÉ VOŠTINY



CEL Components S.r.l.
Via Ca' dell'Orbo Sud 4 - 40055 Castenaso (Bologna) Italy
Tel. +39 051 782505 Fax +39 051 782477
www.cel.eu info@cel.eu
P.IVA 04102600378 CCIAA BO 0339628
ALUMINIUM AND THERMOPLASTIC HONEYCOMBS, LAMINATES, SANDWICH PANELS

ENG

Aluminium honeycomb

Aluminium honeycomb is used for several of applications (i.e. for tool machines, for serigraphy..etc.) and in different sectors such as: public transport industry, nautical sector, building industry, etc...

As core material, aluminium honeycomb is used in sandwich panels and it is utilised in: floors, roofs, doors, partitions, facades, working surfaces for automatic machines and for all products which require an optimal stiffness-to-weight-ratio.

Aluminium honeycomb as panels' core has several advantages:

- lightweight
- stiffness
- reaction to fire
- compression, shear and corrosion resistance

Aluminium honeycomb can be used as deflector for laminar flow-ventilation, and as crash-absorber for kinetic energy.

Thickness of non-expanded Blocks: 1000mm standard, the diameter of the cells from 3 to 25 mm. The density of the honeycomb depends on the thickness of the foil and the diameter of the cells.

Thickness of expanded section from 3mm to 60 / 200mm approx. (depending on the cell diameter).

Honeycomb density (from 20 to 163 kg/m³) depends on foil's thickness and on cell size.

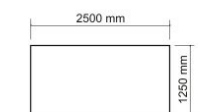
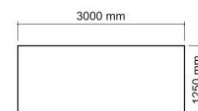
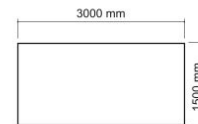
CERTIFICATE FOR SHIPBUILDING INDUSTRY: IMO MED, FTP CODE 2010 Mod. B. and D

CERTIFICATE FOR CONSTRUCTION INDUSTRY: UNI EN 13501-1 Fire Class A1

Honeycomb core's properties	50 Microns				
Aluminium Alloy series 3000	3003/3005/3103/3104				
Ø honeycomb in mm ca.	3,8	6	9	12	19
Ø honeycomb in inches	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"
Density kg/m ³	112	56 - 59	39 - 40	29 - 30	20 - 21
Compressive stabilised strength MPa	6,8	3,0 - 3,5	1,4 - 1,95	0,8 - 0,95	0,4 - 0,6
thickness' tolerance mm	± 0,1 (± 0,05 on request)				
dimension's tolerance mm	± 30				
maximum use temperature °C	180°				

Honeycomb core's properties	70 Microns				
Aluminium Alloy series 3000	3003/3005/3103/3104				
Ø honeycomb in mm ca.	3,8	6	9	12	19
Ø honeycomb in inches	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"
Density kg/m ³	123	80 - 83	54	40 - 42	27 - 29
Compressive stabilised strength MPa	7,7	4,3 - 4,6	2,5 - 2,6	1,41 - 1,5	0,85 - 0,9
thickness' tolerance mm	± 0,1 (± 0,05 on request)				
dimension's tolerance mm	± 30				
maximum use temperature °C	180°				

Standard dimensions
(other dimensions available on request)



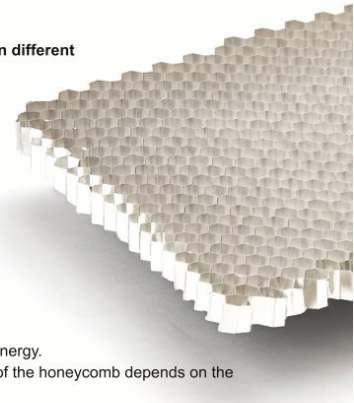
Alloy 3000/3003/3005/3103/3104 aluminium honeycomb is sold **perforated** or **non perforated** (the micro perforations allowing air flow between cells, for use under vacuum or decompression) in three forms: **unexpanded block non perforated, unexpanded slices, expanded sheets.**



LIABILITY DISCLAIMER: The above data are to the best of our knowledge correct and are intended to give information about our products and their potential applications. No warranty is given or implied in respect of certain properties of the products or their suitability for a particular application. We reserve the right for technical changes without further notice. We guarantee impeccable product quality under our terms of sale.

1/2

Aluminium
Last Revised: 12/21_Rev.12







CEL Components S.r.l.
 Via Ca' dell'Orbo Sud 4 - 40055 Castenaso (Bologna) Italy
 Tel. +39 051 782505 Fax +39 051 782477
 www.cel.eu info@cel.eu
 P.IVA 04102600378 CCIAA BO 0339628
ALUMINIUM AND THERMOPLASTIC HONEYCOMBS, LAMINATES, SANDWICH PANELS

ENG

Certified version Aluminium honeycomb must be required while asking for a quotation.
 Certified products must be required in advance and might have a price surcharge due to certified materials.

CLASSES FOR FIRE REACTION			
SHIPBUILDING	MED, IMO  0407	MOD. B. Certification Nr.: MED- 147 (IG-293-2013) REV.2 2017CS011592 MOD. D. Certification Nr.: MED- 154 (IG-178-2014) REV.13	ALUMINIUM HONEYCOMB aluminium honeycomb complying with the MED directive for the application in ships registered or applied in the European Union. Item N. MED/3.13, IMO 2010 FTP Code, Annex 1
	 U.S. Coast Guard	MOD. B. USCG N. approval Nr.: 164.109/EC0407 MOD. D. N. approval.: 164.109/EC0407/MED000154 (for MED/3.13)	ALUMINIUM HONEYCOMB
BUILDING	UNI EN 13501-1	A1 Classification, non-combustible Class Certification Nr. IN-01746/2017-OC-E	ALUMINIUM HONEYCOMB A1 - Incombustible
BUILDING	NF P92-501-1995 NF EN ISO 171	M0 Classification, non-combustible Class Classification RA21-0114	ALUMINIUM HONEYCOMB M0 - Incombustible

PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST NOMEXOVÉ VOŠTINY



THE GILL CORPORATION



PRODUCT DATA SHEET

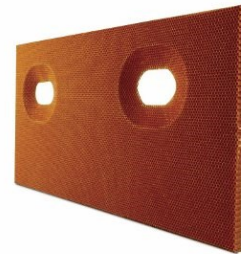
Gillcore® HD Honeycomb

DESCRIPTION

Gillcore® HD is a meta-aramid fiber reinforced honeycomb which is coated with heat resistant phenolic resin. Gillcore® HD provides a wide range of honeycomb types, including different cell sizes, cell geometries, paper thicknesses and densities, for commercial and aerospace defense applications.

APPLICATIONS

Interior aircraft panels including flooring, sidewalls, ceilings, galleys and lavatories.
 Exterior aircraft panels including trailing and leading edges, flaps, ailerons, radomes, fairings, helicopter blades, access panels and doors.
 Sports and leisure industry such as surfboards, pleasure boats, skis and auto racing bodies.
 Ceilings, walls and floors of portable structures.
 Dividing berthing areas, staterooms and hulls for marine applications.



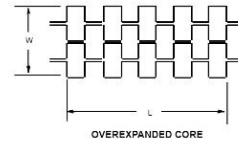
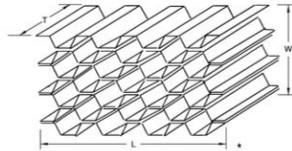
FEATURES

- High strength to weight ratio
- Corrosion resistant
- Fire resistant (self-extinguishing)
- Good thermal stability
- Good thermal and electrical insulating properties
- High toughness
- Good fatigue and impact resistance
- Excellent dielectric properties
- Good formability for curve forming

AVAILABILITY

Hexagonal Shaped Core
 L = Ribbon Dimension
 W = Dimension normal to ribbon
 T = Thickness dimension

* Per BMS 8-124



Available in sheet form or block form

Direction/Configuration	Hexagonal Core	Hexagonal Core	Overexpanded Core
	Ribbon dimension as block width	Ribbon dimension as block length	
L (Ribbon dimension)	Typical 48 inch (1,219 mm) Maximum 65 inch (1,651 mm)	Maximum 96 inch (2,438 mm)	Maximum 50 inch (1,270 mm)
W (Dimension normal to ribbon)	Typical 96 inch (2,438 mm) Maximum 144 inch (3,658 mm)	Maximum 48 inch (1,219 mm)	Maximum 144 inch (3,658 mm)
Thickness	0.080 inch (2.03 mm) - 34 inch (864 mm)		

CONSTRUCTION

Reinforcement: Meta-aramid paper

Resin: Phenolic



SPECIFICATIONS

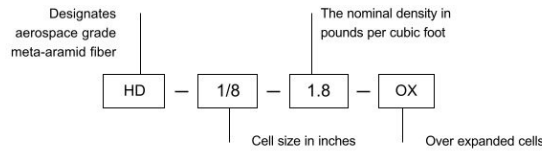
- Qualified to FMS 1030
- Qualified to McDonnell Douglas DMS 1974 Gr A
- Qualified to Lockheed LCM 28-1041
- Qualified to Vought 10425.1957
- Qualified to AMS 3711, Aerospace Material Standards
- Qualified to Raytheon/Beech - BS 23732
- Meets the requirements of AMS-C-81986
- Qualified to Airbus AIMS 11-01-001/ABS5035
- Qualified to Lockheed-Georgia STM 28-105. [1/8 - 1.8 (1.5) and 1/8 - 3.0 (2)]
- DHMS P1.26 DeHavilland
- Qualified to Boeing BMS 8-124 Cl IV
- Qualified to Lockheed STM 28-105
- Qualified to Northrop Grumman GC101
- Qualified to Cessna CMNP083, Ty II, Cl 4, Gr 1.8, 3.0, 6.0
- Qualified to Bell Helicopter (Textron) 299-947-103
- Qualified to AIM Aviation AIM-M-1013, AIMS 11-01-001
- Meets the requirements of Rockwell LB0130-022
- Qualified to Lockheed C28-105

HEALTH PRECAUTIONS

This product is safe to use and apply when recommended precautions are followed. Before using this product, read and understand the Safety Data Sheet (SDS), which provides information on health, physical and environmental hazards, handling precautions and first aid recommendations. A SDS is available at <https://www.thegillcorp.com/msds.php>.

For industrial use only. Keep away from children. Additional information can be found at: www.thegillcorp.com. For sales and ordering information call 1-626-443-6094.

PERFORMANCE PROPERTIES, TYPICAL



The following tests are run in accordance with BMS 8-124 requirements.

Gillcore® HD Honeycomb Description	Gillcore® HD Honeycomb Configuration	Compressive				Plate Shear					
		Bare		Stabilized		L Direction			W Direction		
		Strength		Strength		Strength		Modulus	Strength		Modulus
		TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	TYP	MIN	TYP
		psi	psi	psi	psi	psi	psi	ksi	psi	psi	ksi
HD-1/8-1.8	HD111	107	93	114	96	99	82	5.28	51	44	2.37
HD-1/8-3.0	HD132	309	263	329	288	224	192	7.26	109	93	3.97
HD-1/8-4.0	HD142	554	460	595	514	277	238	9.04	153	129	5.15
HD-1/8-5.0	HD153	715	606	773	681	415	364	11.79	231	202	6.48
HD-1/8-6.0	HD163	1,074	963	1,187	1,016	466	438	14.35	287	257	7.76
HD-1/8-8.0	HD183	1,722	1,435	1,835	1,644	548	488	18.61	398	347	10.37
HD-1/8-9.0	HD193	1,934	1,737	2,133	1,901	564	529	20.51	422	380	12.08
HD-3/16-2.0	HD322	127	104	138	108	126	102	5.29	62	50	2.74
HD-3/16-3.0	HD332	303	237	365	304	209	185	7.22	111	93	4.45
HD-3/16-4.0	HD343	521	449	573	523	331	303	10.18	178	154	5.16
HD-1/4-1.5	HD412	81	73	87	78	96	81	4.37	52	44	2.81
HD-1/4-3.0	HD433	302	261	323	279	236	206	7.47	128	103	4.24
HD-3/8-3.0	HD533	277	240	328	305	223	200	7.37	134	114	4.77
HD-3/16-1.8-OX	HD312O	107	86	160	142	59	54	2.11	61	53	3.74
HD-3/16-3.0-OX	HD332O	323	253	365	289	128	112	3.30	146	130	6.84
HD-3/16-4.0-OX	HD342O	552	424	607	484	190	180	4.60	271	256	9.40



Gillcore® HD Honeycomb Description	Gillcore® HD Honeycomb Configuration	Cell Size	Density	Compressive				Plate Shear					
				Bare		Stabilized		L Direction			W Direction		
				Strength		Strength		Strength		Modulus	Strength		Modulus
				TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	TYP	MIN	TYP
		mm	kg/m³	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Gpa	Mpa	Mpa	Gpa
HD-1/8-1.8	HD111	3.2	29	0.74	0.64	0.79	0.66	0.68	0.56	0.036	0.35	0.30	0.016
HD-1/8-3.0	HD132	3.2	48	2.13	1.81	2.27	1.98	1.54	1.32	0.050	0.75	0.64	0.027
HD-1/8-4.0	HD142	3.2	64	3.82	3.17	4.10	3.54	1.91	1.64	0.062	1.05	0.89	0.035
HD-1/8-5.0	HD153	3.2	80	4.93	4.18	5.33	4.69	2.86	2.51	0.081	1.59	1.39	0.045
HD-1/8-6.0	HD163	3.2	96	7.40	6.64	8.18	7.00	3.21	3.02	0.099	1.98	1.77	0.053
HD-1/8-8.0	HD183	3.2	128	11.86	9.89	12.64	11.33	3.78	3.36	0.128	2.74	2.39	0.071
HD-1/8-9.0	HD193	3.2	144	13.33	11.97	14.70	13.10	3.89	3.64	0.141	2.91	2.62	0.083
HD-3/16-2.0	HD322	4.8	32	0.88	0.72	0.95	0.74	0.87	0.70	0.036	0.43	0.34	0.019
HD-3/16-3.0	HD332	4.8	48	2.09	1.63	2.51	2.09	1.44	1.27	0.050	0.76	0.64	0.031
HD-3/16-4.0	HD342	4.8	64	3.59	3.09	3.95	3.60	2.28	2.09	0.070	1.23	1.06	0.036
HD-1/4-1.5	HD412	6.4	24	0.56	0.5	0.60	0.54	0.66	0.56	0.030	0.36	0.30	0.019
HD-1/4-3.0	HD433	6.4	48	2.08	1.08	2.23	1.92	1.63	1.42	0.051	0.88	0.71	0.029
HD-3/8-3.0	HD533	9.5	48	1.91	1.65	2.26	2.10	1.54	1.38	0.051	0.92	0.79	0.033
HD-3/16-1.8-OX	HD312O	4.8	29	0.74	0.59	1.10	0.98	0.41	0.37	0.015	0.42	0.37	0.026
HD-3/16-3.0-OX	HD332O	4.8	48	2.23	1.74	2.51	1.99	0.88	0.77	0.023	1.01	0.90	0.047
HD-3/16-4.0-OX	HD342O	4.8	64	3.80	2.92	4.18	3.33	1.31	1.24	0.032	1.87	1.76	0.065

Flammability: Gillcore® HD honeycomb meets the flammability requirements of BMS 8-124.

Water migration: Gillcore® HD honeycomb does not exceed 1 cell migration in 24 hours when tested per BMS 8-124.

Figures shown reflect typical values and should not be used as design specifications.

Updated: 12/01/19

All recommendations, statements, values and technical data herein are based on tests The Gill Corporation believes to be reliable and correct, but accuracy and completeness of said tests are not guaranteed and are not to be construed as a warranty, either expressed or implied. Users shall rely on their own information and tests to determine suitability of the product for the intended use and assume all risks and liability resulting from their use of the product. The Gill Corporation's sole responsibility shall be to replace that portion of the product that proves to be defective. The Gill Corporation will not be liable to the buyer or any third person for any injury, loss or damage directly or indirectly resulting from use of, or inability to use, the product. Recommendations or statements not contained in a written agreement signed by an officer of The Gill Corporation shall not be binding upon The Gill Corporation. Gillcore® is a registered trademark of The Gill Corporation.

PŘÍLOHA P IV: MATERIÁLOVÝ LIST PĚNOVÉHO JÁDRA

DESIGNED FOR A GREENER TOMORROW

ArmaForm[®] Core

Structural lightweight PET foam boards, used as a core material in a wide range of composite sandwich structures.

Made by Armacell's patented r-PET technology of producing PET foams, made of 100% recycled PET.

www.armacell-core-foams.com



 **armacell**[®]
ArmaForm[®]

Technical Data ArmaForm® PET/W GR

Polyethylene Terephthalate based structural foam cores. Made from 100% post-consumer PET.

			GR70	GR80	GR100	GR115	GR135	GR150	GR200	GR250	GR320 ⁽¹⁾
Density	ISO 845	kg/m ³	70 ⁽²⁾	80 ⁽²⁾	100 ⁽²⁾	115 ⁽²⁾	135 ⁽²⁾	150 ⁽³⁾	200 ⁽³⁾	250 ⁽³⁾	320 ⁽³⁾
		lb/ft ³	4.4 ⁽²⁾	5.0 ⁽²⁾	6.2 ⁽²⁾	7.2 ⁽²⁾	8.4 ⁽²⁾	9.4 ⁽³⁾	12.5 ⁽³⁾	15.6 ⁽³⁾	20.0 ⁽³⁾
Compression Strength	ISO 844	MPa	0,75	1,0	1,5	1,8	2,3	2,6	4,0	5,3	7,0
		psi	110	145	220	260	335	375	580	770	1,015
Compression Modulus	ISO 844	MPa	40	57	77	90	105	120	175	235	320
		psi	5,800	8,265	11,165	13,050	15,225	17,400	25,375	34,075	46,400
Shear Strength⁽⁴⁾	ISO 1922	MPa	0,5	0,6	0,75	0,95	1,2	1,35	1,75	2,0	2,1
		psi	75	85	110	140	175	195	255	290	305
Shear Modulus⁽⁴⁾	ISO 1922	MPa	13	16	21	26	35	37	51	70	90
		psi	1,885	2,320	3,045	3,770	5,075	5,365	7,395	10,150	13,050
Shear Strain⁽⁴⁾	ISO 1922	%	15	13	10	10	7	7	5	3	2
		%	15	13	10	10	7	7	5	3	2
Tensile Strength	ASTM C 297	MPa	1,8	2,0	2,5	2,9	3,0	3,3	3,9	4,3	4,8
		psi	260	290	365	420	435	480	565	625	695
Tensile Modulus	ASTM C 297	MPa	66	80	120	140	140	185	235	270	350
		psi	9,570	11,600	17,400	20,300	20,300	26,825	34,075	39,150	50,750
Thermal Conductivity	at 23 °C	W/(m·K)	0,034	0,034	0,034	0,034	0,037	0,041	0,043	0,047	tbd
		at 73.4 °F	BTU.in/ FT ² .hr.°F	0.236	0.236	0.236	0.236	0.257	0.284	0.298	0.326

Fire Performance⁽⁵⁾

B2	EN ISO 11925:2	tbd	B2 ⁽⁶⁾	B2 ⁽⁶⁾	B2 ⁽⁶⁾	B2 ⁽⁶⁾	B2 ⁽⁶⁾	B2 ⁽⁶⁾	tbd	tbd
-----------	-----------------------	-----	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-----	-----

Tolerances

		Length	Width	Diagonal	Thickness
Dimensions⁽⁷⁾	mm	2.448	1.008	⁽⁸⁾	GR70-GR80: 10-150mm GR100-GR150: 5-150mm GR200-GR320: 5-100mm
	inch	96.38	39.68	⁽⁸⁾	GR70-GR80: 0.39 - 5.91 GR100-GR150: 0.2 - 5.91 GR200-GR320: 0.2 - 3.94
Tolerances at room temperature	mm	+/- 5	+/- 5	≤ 4	≤ 100mm: +/- 0.5 ≥ 100mm: +/- 1
	inch	+/- 0.2	+/- 0.2	≤ 0.16	≤ 3.94: +/- 0.02 ≥ 3.94: +/- 0.04

[1] Preliminary data (indication based on a limited number of tests).
 [2] Tolerances: +/- 5 kg/m³, +/- 0.3 lb/ft³
 [3] Tolerances: +/- 5 %
 [4] // direction (parallel to the weld)
 [5] For detailed test results and certificates please contact us.
 [6] As of 50 mm - 1.97 inch
 [7] Standard dimension. Further dimensions on special request.
 [8] Depending on length and width combination.

All values are average production figures.
 Minimum values on request.
 Our products are CFC / HFC free.
 Physical properties are not affected by variances in colour.
 Customs tariff code: 39.21.19.00

Technical Data ArmaForm® PET/W FR, GFR

Polyethylene Terephthalate based fire retardant structural foam cores.

			GFR70	FR100	FR150
Density	ISO 845	kg/m ³	70 ^[1]	100 ^[1]	150 ^[1]
		lb/ft ³	4.4 ^[1]	6.2 ^[1]	9.4 ^[1]
Compression Strength	ISO 844	MPa	0,8	1,5	2,6
		psi	115	220	375
Compression Modulus	ISO 844	MPa	30	70	105
		psi	4,350	10,150	15,225
Shear Strength ^[2]	ISO 1922	MPa	0,55	0,85	1,3
		psi	80	125	190
Shear Modulus ^[2]	ISO 1922	MPa	14	20	40
		psi	2,030	2,900	5,800
Shear Strain ^[2]	ISO 1922	%	15	15	8
		%	15	15	8
Tensile Strength	ASTM C 297	MPa	1,6	2,4	3,4
		psi	230	350	495
Tensile Modulus	ASTM C 297	MPa	60	105	180
		psi	8,700	15,225	26,100
Thermal Conductivity	at 23 °C	W/(m·K)	0,034	0,034	0,041
	at 73.4 °F	BTU.in/FT ² .hr.°F	0.236	0.236	0.284

[*] Preliminary data March 2017.
 [1] Tolerances: +/- 5 kg/m³, +/- 0.3 lb/ft³
 [2] // direction (parallel to the weld)
 [3] For detailed test results and certificates please contact us.
 [4] 10 to 25 mm, 0.39 to 0.79 inch.
 [5] As of 15 mm, 0.59 inch.
 [6] Final sandwich design to be tested.
 [7] Standard dimension. Further dimensions on special request.
 [8] Depending on length and width combination.

All values are average production figures. Minimum values on request. Our products are CFC / HFC free. Only halogen-free flame retarded additives. Physical properties are not affected by variances in colour. Customs tariff code: 39.21.19.00

Fire Performance ^[3]

Flammability	DIN 5510-2	tbd	S4	S4
Smoke Density	DIN 5510-2	tbd	SR2	SR2
Dripping	DIN 5510-2	tbd	ST2	ST2
Toxicity (FED)	DIN 5510-2	tbd	<0.1	<0.1
Edge Ignition	DIN 5510-2	tbd	K1	K1
Flammability	NF F16-101	M1 ^[4]	M1 ^[5]	M1 ^[5]
Smoke Density	NF F16-101	F1	F1	F1
FST	EN 45545-2 ^[6]	tbd	conform	conform
Contribution to fire	EN 13823	tbd	D	tbd
Smoke Production	EN 13823	tbd	s2	tbd
Flaming Droplets	EN 13823	tbd	d0	tbd

Tolerances

		Length	Width	Diagonal	Thickness
Dimensions ^[7]	mm	2.448	1.008	^[8]	5-150 mm
	inch	96.38	39.68	^[8]	0.2 - 5.9
Tolerances at room temperature	mm	+/- 5	+/- 5	≤ 4	≤ 100mm: +/- 0,5 ≥ 100mm: +/- 1
	inch	+/- 0.2	+/- 0.2	≤ 0.16	≤ 3.94: +/- 0.02 ≥ 3.94: +/- 0.04



All data and technical information are based on results achieved under typical application conditions. It is the customer's responsibility to verify if the product is suitable for the intended application. The responsibility for professional and correct installation and compliance with relevant building regulations lies with the customer. By ordering/receiving product you accept the **Armacell General Terms and Conditions of Sale** applicable in the region. Please request a copy if you have not received these.

© Armacell, 2018. ArmaForm® is a trademark of the Armacell group.
00076 | PET/W Core | ArmaForm | TDS | 082018 | Global | EN Master

ABOUT ARMACELL

As the inventors of flexible foam for equipment insulation and a leading provider of engineered foams, Armacell develops innovative and safe thermal, acoustic and mechanical solutions that create sustainable value for its customers. Armacell's products significantly contribute to global energy efficiency making a difference around the world every day. With 3,000 employees and 27 production plants in 17 countries, the company operates two main businesses, Advanced Insulation and Engineered Foams. Armacell focuses on insulation materials for technical equipment, high-performance foams for high-tech and lightweight applications and next generation aerogel blanket technology.

For more information, please visit:
www.armacell-core-foams.com

