

# Tvarovatelnost sendvičových struktur

Bc. Radek Světlík

---

Diplomová práce  
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Radek Světlík
Osobní číslo:	T22390
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Tvarovatelnost sendvičových struktur

## Zásady pro vypracování

- Literární rešerše na problematiku kompozitních sendvičových struktur pro dopravní aplikace.
- Přehled sendvičových materiálů, výtěžní systémy, vlastnosti a použití.
- Návrh kompozitní sendvičové konstrukce pro zvolenu aplikaci.
- Experimentální testování dle doporučení.
- Tvarovatelnost zvolených polymerních pěn.
- Vyhodnocení výsledků a formulace závěru.

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

**Seznam doporučené literatury:**

Barbero, Ever J., 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, 2018.

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

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

Jim Low, Yu Dong: Composite Materials: Manufacturing, Properties and Applications, Edition: 1st, Elsevier, ISBN 978-0128205129, 2021.

Jawaid Mohammad, Thariq Mohamed, Saba Naheed: Aging Mechanisms in Polymer Composite Materials. Elsevier, ISBN 978-0-08-102298-6, 2019.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**  
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 27. února 2024

## **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 na 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:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá návrhem sendvičového prototypového dílu a obsahuje část teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou popsány materiály sendvičových konstrukcí, aplikace v některých oblastech a jejich výrobní technologie. Dále se zde nacházejí informace o tvarování polymerních pěn a zkoušení mechanický vlastností sendvičových konstrukcí. Praktická část je věnována návrhem a výrobou zkušebních sendvičových tělísek a otestováním jejich mechanických vlastností. Dále je zjištěna tvarovatelnost vybraných polymerních pěn. Posledním krokem bylo zvolení vhodné materiálové skladby prototypového dílu pro danou aplikaci a určení jeho technologického postupu.

Klíčová slova: Sendvičová konstrukce, polymerní pěna, tvarování, kompozitní materiály, prepreg, zkoušky mechanický vlastností

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with the design of a sandwich prototype part and contains a theoretical and practical part. The theoretical part describes the materials of sandwich structures, their applications in some areas and their production technology. In addition, there is information on the forming of polymer foams and testing the mechanical properties of sandwich structures. The practical part is dedicated to the design and manufacture of test sandwich bodies and the testing of their mechanical properties. Furthermore, the formability of selected polymer foams is determined. The last step was the selection of a suitable material composition of the prototype part for the given application and determination of its technological procedure.

Keywords: Sandwich construction, polymer foam, forming, composite materials, prepreg, testing of mechanical properties

Touto cestou bych chtěl poděkovat své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce a Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při měření mechanických vlastností. Dále bych rád poděkoval firmě Mežlik Propellers s.r.o. a Ing. Michalu Gruntovi za poskytnutí materiálů a pomoc při výrobě sendvičových panelů.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE</b> .....	<b>11</b>
1.1 MATERIÁLY KRYCÍCH PLÁŠŤŮ.....	11
1.1.1 Kompozitní materiály.....	12
1.1.2 Prepregy .....	15
1.1.3 Ostatní .....	17
1.2 JÁDROVÉ MATERIÁLY.....	18
1.2.1 Polymerní pěny .....	19
1.2.2 Kovové pěny .....	21
1.2.3 Voštinová jádra .....	21
1.2.4 Dřevěná jádra .....	23
1.3 VÝROBA PĚNOVÝCH JADER .....	24
1.3.1 Metody zpracování.....	25
<b>2 APLIKACE SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ</b> .....	<b>27</b>
2.1 HISTORIE .....	27
2.2 LETECTVÍ .....	28
2.3 VĚTRNÁ ENERGETIKA.....	32
<b>3 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE</b> .....	<b>34</b>
3.1 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU .....	34
3.2 LISOVÁNÍ .....	35
3.3 VYTVRZOVÁNÍ V PECI .....	36
<b>4 TVAROVÁNÍ POLYMERNÍCH PĚN</b> .....	<b>38</b>
4.1 TEPELNÉ TVAROVÁNÍ .....	38
4.2 OBRÁBĚNÍ .....	40
<b>5 STANDARDNÍ ZKUŠEBNÍ METODY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ</b> .....	<b>42</b>
5.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA NA PLOCHO (ASTM C297) .....	42
5.2 TLAKOVÉ ZKOUŠKY (ASTM C365 A ASTM C364).....	43
5.3 ZKOUŠKA V OHYBU (ASTM D7249).....	44
5.4 SMYKOVÁ ZKOUŠKA (ASTM C273) .....	45
5.5 ODLUPOVACÍ ZKOUŠKA (ASTM D1781).....	46
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>47</b>
<b>6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>48</b>
<b>7 NÁVRH A VÝROBA SENDVIČOVÝCH PANELŮ</b> .....	<b>49</b>

7.1	NÁVRH MATERIÁLOVÉ SKLADBY A SLOŽENÍ.....	49
7.2	VÝROBA SENDVIČOVÝCH PANELŮ .....	50
7.2.1	Příprava lisovacích desek .....	50
7.2.2	Stříhání prepregů .....	51
7.2.3	Kladení prepregů .....	51
7.2.4	Debulking .....	52
7.2.5	Vytvrzení sendvičových panelů .....	53
<b>8</b>	<b>ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ .....</b>	<b>55</b>
8.1	ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM .....	55
8.1.1	Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem.....	56
8.1.2	Poruchy zkušebních tělísek .....	60
8.1.3	Porovnání výsledků zkoušky tříbodovým ohybem .....	61
8.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA NA PLOCHO .....	62
8.2.1	Výsledky tahové zkoušky na plocho .....	63
8.2.2	Porovnání výsledků tahové zkoušky na plocho .....	68
8.3	ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA CYKlickÝM OHYBEM .....	69
8.3.1	Výsledky únavové zkoušky cyklickým ohybem.....	70
<b>9</b>	<b>TVAROVATELNOST POLYMERNÍCH PĚN .....</b>	<b>77</b>
9.1	FORMY PRO TVAROVÁNÍ.....	77
9.2	POSTUP TVAROVÁNÍ .....	77
9.2.1	Příprava pěnových desek.....	77
9.2.2	Ohřev pěnových desek .....	78
9.2.3	Tvarování .....	79
<b>10</b>	<b>FRÉZOVÁNÍ POLYMERNÍCH PĚN .....</b>	<b>81</b>
10.1	UPÍNACÍ SYSTÉM .....	81
10.2	FRÉZOVACÍ NÁSTROJE A ŘEZNÉ PODMÍNKY .....	82
10.3	PRŮBĚH FRÉZOVÁNÍ .....	83
<b>11</b>	<b>NÁVRH PROTOTYPOVÉHO DÍLU .....</b>	<b>84</b>
11.1	3D NÁVRH DÍLU.....	84
11.2	VOLBA MATERIÁLŮ .....	84
11.3	NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU VÝROBY .....	85
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>87</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURYA.....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>93</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>94</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>97</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>98</b>



## ÚVOD

Sendvičové materiály mají v dnešním inženýrském světě významné postavení díky své rozmanitosti aplikací a výjimečným mechanickým vlastnostem. Tento inovativní konstrukční prvek, složený ze dvou nebo více vrstev materiálů propojených mezi sebou, nabízí unikátní kombinaci pevnosti, tuhosti a lehkosti, čímž se stává ideální volbou pro použití v leteckém průmyslu, stavebnictví, automobilovém průmyslu a mnoha dalších oblastech.

Pro krycí vrstvy sendvičových konstrukcí jsou často používány kovy a kompozitní materiály, jako jsou skelná nebo uhlíková vlákna impregnována pryskyřicí. Tyto materiály nabízejí vynikající pevnost a odolnost v kombinaci s relativně nízkou hmotností, což je zásadní pro aplikace, kde je požadována vysoká mechanická stabilita při nízké celkové hmotnosti konstrukce.

Pro jádro sendvičových konstrukcí se často používají pěnové materiály, voštiny a balsa. Tyto materiály jsou vybrány pro svou nízkou hmotnost a schopnost absorbovat energii při nárazech. Pěnové materiály jsou také často volbou pro konstrukce, kde je potřeba tepelná nebo zvuková izolace, díky jejich schopnosti efektivně izolovat teplo a zvuk.

Proces tvarování těchto konstrukcí poskytuje inženýrům a designérům nezbytnou flexibilitu při modelování struktur do požadovaných tvarů a geometrií, které optimálně vyhovují konkrétní aplikaci. Tento proces umožňuje přizpůsobit konstrukci specifickým potřebám a požadavkům daného průmyslu, a tím maximalizovat využití dostupných materiálů a zlepšit celkový výkon konstrukce. Díky schopnosti formování do přesných tvarů je možné minimalizovat zbytečné materiálové ztráty a snížit hmotnost konstrukce, což v konečném důsledku přináší efektivnější využití zdrojů a zvýšenou účinnost výsledného produktu.

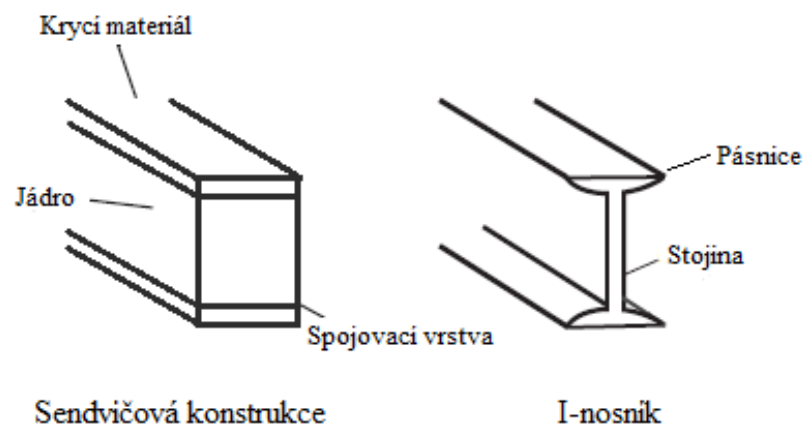
Cílem této diplomové práce je provést testování mechanických vlastností navržených a vyrobených kompozitních sendvičových konstrukcí. Součástí zkoumání bude také analýza tvarovatelnosti použitých polymerních pěn s cílem vybrat optimální konstrukci pro výrobu tvarovaného prototypového dílu pro zvolenou aplikaci.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Sendvičové konstrukce jsou definovány jako lehké multifunkční kompozitní konstrukce, které jsou tvořeny vložením jádra s nízkou hustotou mezi dva tenké a tuhé krycí pláště. Tyto části jsou k sobě spojovány lepením nebo vytvrzováním pryskyřice.

Sendvičové konstrukce jsou často přirovnávány k nosníkům profilu I (viz Obrázek 1), protože krycí pláště přenáší tahová a tlaková zatížení jako pásnice nosníku. Jádro pak přenáší smyková zatížení jako stojina nosníku. [1,2]



Obrázek 1 Srovnání sendvičové konstrukce a I-nosníku [1]

Konstruktéři kompozitů brzy zjistili, že sendvičová konstrukce může výrazně zvýšit tuhost laminátu při malé přidané hmotnosti. Sendvičová konstrukce je cenově velmi výhodná, protože relativně levné jádro nahrazuje dražší kompozitní výztužný materiál. A tužší, ale lehčí sendvičový panel vyžaduje méně nosné konstrukce než plný laminát. [1]

### 1.1 Materiály krycích plášťů

Krycí pláště sendvičové konstrukce slouží v závislosti na použití k mnoha účelům, ale ve všech případech přenášejí hlavní působící zatížení. Mohou být vyrobeny téměř ze všech konstrukčních materiálů, které jsou k dispozici ve formě tenkých desek a mohou být použity k vytvoření obkladů sendvičového panelu. Vlastnosti, které jsou pro krycí materiály nejdůležitější, jsou vysoká osová tuhost, vysoká pevnost v tahu a v tlaku, odolnost proti teplotě a proti vlivům okolního prostředí. [1]

Krycí materiály někdy plní i další funkce, například zajišťují profil s náležitou aerodynamickou hladkostí, drsný neklouzavý povrch nebo odolnou podlahovou krytinu proti opotřebení. Pro lepší splnění těchto speciálních funkcí je někdy jeden krycí plášť

sendviče vyroben silnější nebo s mírně odlišnou konstrukcí než druhý (Nesymetrická konstrukce). [3]

Běžně používané materiály pro krycí pláště lze rozdělit do dvou hlavních skupin na kovové a nekovové. Kovovou skupinu tvoří především ocel, nerezová ocel a slitiny hliníku ve formě plechů. Do nekovové skupiny patří vláknové kompozity, předimpregnované výztuže neboli prepregy a dřevěné desky. [1]

### 1.1.1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály lze definovat jako kombinaci dvou nebo více materiálů, která vede k lepším vlastnostem, než jaké mají jednotlivé složky použité samostatně. Dvěma složkami jsou výztuž a matrice. Podíl výztuže musí být vůči matici vyšší než 5 %. [4]

#### 1.1.1.1 Výztuž

Výztuž zajišťuje pevnost a tuhost kompozitního materiálu. Jedná se obvykle o vlákno nebo částice. Částicové výztuže mají rozměry přibližně stejné ve všech směrech. Mohou mít kulovitou, destičkovou nebo jinou pravidelnou či nepravidelnou geometrii. Bývají mnohem slabší a méně tuhé než kompozity s kontinuálními vlákny, ale obvykle jsou mnohem levnější.

Vláknové výztuže mohou být ve formě nití, rovingů (pramenců), rohoží a tkanin. U tkanin se výztužná vlákna vyrábějí do rovinných polotovarů pomocí běžných tkalcovských technik. Nejčastější tkalcovské vazby jsou zobrazeny na Obrázku 2. Jednotlivé vazby hrají velký význam při zpracování a finálních mechanických vlastnostech výrobku. Například u plátňové vazby je jednoduché zpracování tkaniny a malý otřep při řezání. Keprová vazba má vyšší pevnost a tuhost, je ohebnější, a proto vhodnější pro tvarové prvky. Atlasová vazba je vhodnější pro prostorově složité prvky a umožňuje dosáhnout velmi hladký povrch. [4,5,6]



Obrázek 2 Běžné vazby tkanin [5]

Nejběžnějším a nejlevnějším typem výztuže jsou skleněná vlákna. Vyrábí se tažením roztaveného skla přes trysky z platinové slitiny do konečného průměru 3,5 až 24  $\mu\text{m}$ . K dispozici jsou dva hlavní typy skleněných vláken. První je E-sklo, které se používá pro své elektroizolační vlastnosti, a druhé S-sklo, vyvinuté pro svou vysokou pevnost, která je až o 40 % vyšší než u E-skla. Mají také o 20 % větší modul pružnosti. Dalšími typy jsou například AR-sklo odolné proti alkáliím nebo C-sklo odolné proti kyselinám. [4,6,7,8]

Dalším používaným typem jsou uhlíková vlákna. Mají průměr od 5 do 10  $\mu\text{m}$ . Jedná se o vlákna s vysokou pevností a tuhostí. Dále mají nízkou hustotu, vysokou odolnost proti korozi a dobrou tepelnou a elektrickou vodivost. Jsou ale spojena s nízkou tažností a vyššími náklady. Dalším nedostatkem je velký dopad na životní prostředí v souvislosti s výrobou.

Aramidová vlákna, známá také pod obchodním názvem „kevlar“, jsou skupina syntetických vláken, která se běžně používá pro jejich vysokou pevnost, tuhost, vysoký bod tání, odolnost proti oděru, nárazu a elektroizolační vlastnosti. Mezi hlavní nevýhody aramidových vláken patří nízká pevnost v tlaku a absorpce vlhkosti. Obvykle se používají pro aplikace, jako jsou nehořlavé oděvy a neprůstřelné vesty, ale také v kombinaci se sklem a uhlíkem pro zlepšení některých jejich vlastností. [6,7]

Bazaltová vlákna se vyrábí vytlačováním čedičové horniny. Na trhu jsou stále poměrně mladá a díky své nízké ceně a dobrým mechanickým vlastnostem na pomezí skla a uhlíku vykazují značný potenciál v průmyslových odvětvích, jako je stavebnictví. Hlavní nevýhodou bazaltových vláken je jejich omezená dostupnost s malým dodavatelským řetězcem a nedostatek údajů o jejich mechanických vlastnostech a trvanlivosti. [7]

Posledním typem výztuží jsou přírodní vlákna, jako je len, juta, konopí a bavlna. Reagují na rostoucí poptávku po udržitelnějších a potenciálně recyklovatelných kompozitů. Lněná vlákna jsou již používána v automobilovém, námořním a sportovním zboží. Jsou odolné proti stárnutí a mají čichovou nezávadnost při měnících se podmínkách. Mezi jejich nevýhody patří schopnost absorbovat vlhkost, nízká chemická odolnost a potenciální variabilita mezi šaržemi. [6,7]

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [9]

Vlákno	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Deformace do lomu [%]
Sklo E	2,54	72,5-78	3100-3800	4,7
Sklo S	2,49	83-91	4020-4830	5,3-5,6
Uhlík	1,86	230-600	3500-6000	1,5-2
Kevlar 29	1,45	60	2700	5
Kevlar 49	1,45	130	2900	2,5
Twaron	1,44	70-110	2400-3600	2,2-4,4
PE Spectra	0,97	172	3000	1,7
Len	1,3	180	2600	3,1
Bazalt	2,63	79,3-110	3000-4840	3,1-3,2

### 1.1.1.2 Matrice

Funkcí matrice v kompozitních materiálech je spojit vlákna (výztuž) do uspořádaného celku a chránit je před okolním prostředím. Úkolem matrice je také přenos zatížení na vlákna a jeho rovnoměrné rozložení. Zajišťuje kompozitu houževnatost, odolnost proti poškození a odolnost proti nárazu a oděru. Vlastnosti matrice také určují maximální teplotu použití, odolnost vůči vlhkosti a kapalinám, a tepelnou a oxidační stabilitu. Lze je rozdělit do tří kategorií, a to na polymerní, kovové a keramické. [4,10] Avšak polymery jsou bezesporu nejpoužívanějšími matricovými materiály v moderních kompozitech. Dělí se na reaktoplasty (termosety) a termoplasty. [8]

Termosetické pryskyřice se vytvrzují procesem chemického zesíťování. Zesíťování je nevratný proces a tyto pryskyřice se nikdy nemohou roztavit. Nejběžnějšími termosetickými pryskyřicemi jsou následující:

- Epoxidová pryskyřice
- Polyesterová pryskyřice
- Polyuretanová pryskyřice
- Fenolická pryskyřice
- Vinylesterová pryskyřice

Tyto materiály vykazují vysokou pevnost a tuhost, avšak často trpí křehkostí a jejich tažnost se pohybuje v řádu procent. Zvýšení houževnatosti lze dosáhnout přidáním modifikačních přísad. Mají stabilnější molekulární strukturu oproti lineární struktuře

termoplastických pryskyřic. Proto mohou ve srovnání s termoplasty dobře fungovat při vyšším zatížení a teplotách. [2,6,10]

Vzhledem k tomu, že termoplasty nepodléhají chemickým reakcím během vytvrzování, zpracování těchto materiálů je jednodušší a rychlejší. Výhodou termoplastů je houževnatost a dobrá odolnost vůči mikrotrhlinám. Jsou taky výhodné z hlediska recyklovatelnosti, protože je lze opakovaně tavit. Termoplasty jsou však nestabilní při vysokých teplotách spolu s nižšími mechanickými vlastnostmi a odolností proti chemickým vlivům na rozdíl od termosetů. Tyto vlastnosti také brání použití termoplastů v technických oborech s vysokou nosností. Mezi nejpoužívanější termoplasty patří:

- Polyetylen (PE)
- Polypropylen (PP)
- Polyfenylsulfid (PPS)
- Polyéteréterketon (PEEK) [6,10]

V následující tabulce jsou zobrazeny mechanické vlastnosti vybraných polymerních matic.

*Tabulka 2 Mechanické vlastnosti polymerních matic [8,11]*

Druh matrice		Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Termosety	Epoxidy	1,1-1,4	3-6	35-100
	Polyestery	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85
	Fenoly	1,21	6,5	45
Termoplasty	PP	0,9	0,9-2	25-40
	PA	1,42	2,8-3,4	76-83
	HDPE	0,95	0,5-1,3	15-40

### 1.1.2 Prepregy

Prepreg je forma polotovaru, skládající se obvykle z jedné vrstvy vláken, která je předimpregnována maticí. Nejčastěji se navíjí na válcích a dodává se ve dvou variantách:

- Jednosměrný prepreg (vlákna pouze v jednom směru)
- Tkaninový prepreg

Za posledních 70 let prepregy významně ovlivnily technologický vývoj vysoce výkonných součástí vyztužených vláknem. Dnes jsou tyto materiály celosvětově rozšířené a používají se

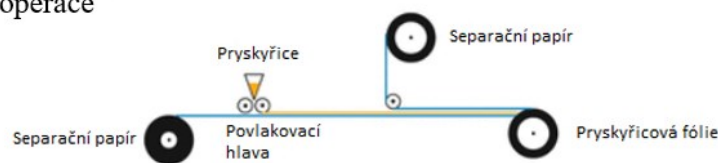
pro výrobu kompozitních dílů v leteckém průmyslu, pro vysokorychlostní vlaky, automobily, lodě a mnoho dalších aplikací. Například více než polovina celosvětové produkce uhlíkových vláken se používá k výrobě prepregů. [5]

Výhodou prepregů je snadná manipulace s vláknovou výztuží a její lepší nasycení matricí. Nevýhodou může být vyšší cena a poměrně velký odpad. Další nevýhodou je omezená skladovatelnost prepregů s termosetickou pryskyřicí. Ty musejí být skladovány při teplotě  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aby se zpomalila jejich síťovací reakce. Při vhodném chlazení lze dosáhnout skladovatelnosti v rozmezí 6 až 18 měsíců. V poslední době jsou komerčně dostupné prepregy se skladovací stabilitou až 60 dní při pokojové teplotě pro všeobecné průmyslové a automobilové aplikace. Prepregy na bázi termoplastických matricových systémů nepodléhají škodlivému stárnutí a lze je skladovat po neomezenou dobu. [4,5,12]

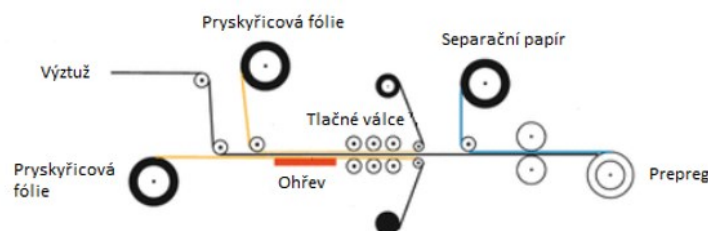
Při výrobě prepregů se vlákna smáčejí matricí. Častěji používanými matricemi jsou termosetické pryskyřice. Mezi nejčastěji používané metody výroby patří tavení za tepla (hot melt proces) a impregnace pomocí rozpouštědla (solvent impregnation).

Metoda tavení za tepla je složena ze dvou operací, které lze vidět na Obrázku 3. Nejdříve se namíchaná pryskyřice extruduje a nanáší pomocí vyhřívaných kalandrovacích válců na separační papír. Poté se materiál navine na jádra a chladí pro zpomalení síťovací reakce. Takto připravená pryskyřicová fólie se přenesle na druhou operaci. Zde je výztuž tažena mezi dvě pryskyřicové fólie vyrobené v první operaci. Následně probíhá impregnace výztuže teplem z topných těles a tlakem tlačných válců. Materiál se ochladí a separační papír se nahradí novým. Na konci linky se prepreg ořízne na požadovanou šířku a navine na cívku. [4,5]

#### 1. operace



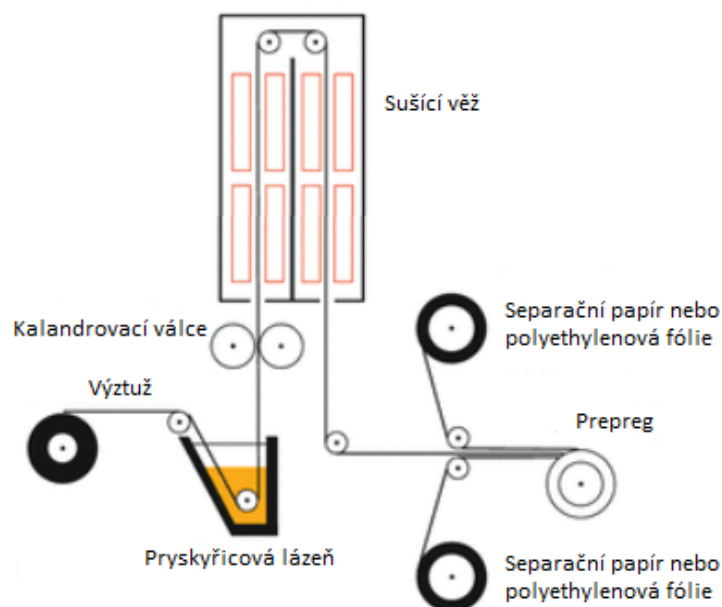
#### 2. operace



Obrázek 3 Výroba metodou tavení zatepla [5]



U metody impregnace pomocí rozpouštědla (viz Obrázek 4) se odvíjí role výztuže a máčí se v pryskyřicové lázni s rozpouštědlem. Nadbytečná pryskyřice se odstraní pomocí stěrky. Kalandrovací válce stlačují impregnovanou výztuž a určují tak tloušťku prepregu a obsah matrice. V sušící věži se následně odstraňuje těkavý materiál a probíhá kontrola tloušťky. Hotový prepreg se chladícími válci ochladí, opatří separační fólií a navine na cívku. Výhodou této metody je lepší prosycení výztuže a vyšší lepivost prepregu. Nevýhodou je však nemožnost použití pro jednosměrná vlákna a eventuální uvolňování těkavých látek zbytkového rozpouštědla. [4,5]



Obrázek 4 Výroba metodou impregnace pomocí rozpouštědla [5]

### 1.1.3 Ostatní

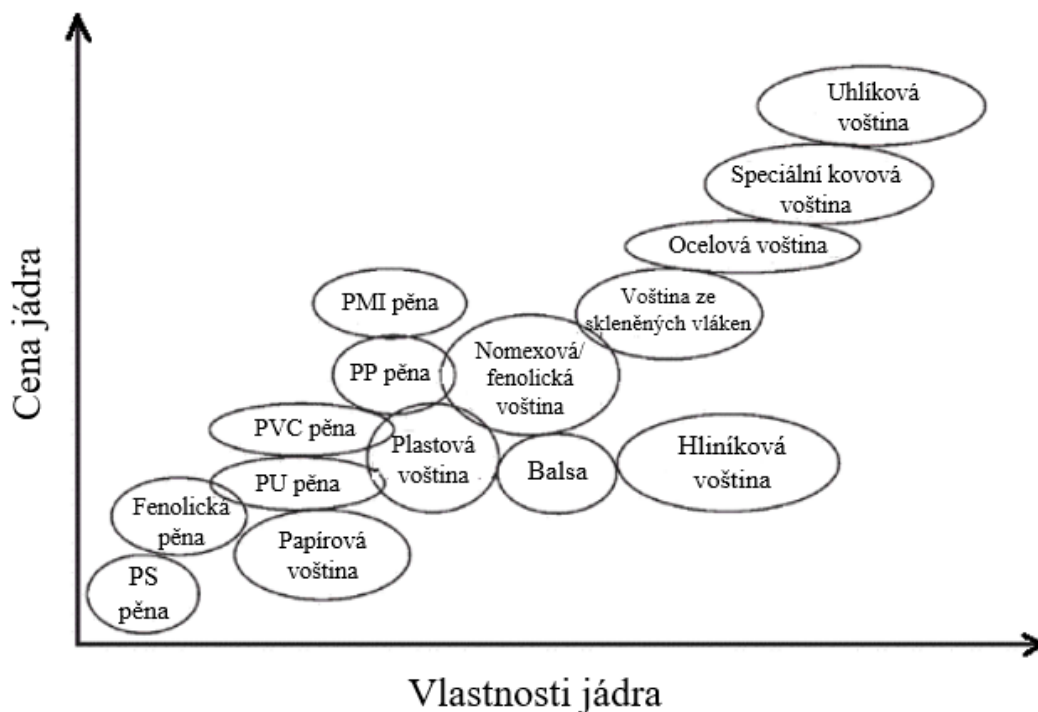
Dalšími používanými materiály pro krycí pláště je dřevo nebo dřevěné lamináty, jako jsou překližky nebo OSB desky. Výhodou dřevěných materiálů je váha a cena, ale jejich mechanické vlastnosti nedosahují takových hodnot jako u ostatních krycích plášťů. Hlavní nevýhodou je náchylnost k biologické rozložitelnosti mikroorganismy a rozměrová nestabilita při vystavení vlhkosti. Největší trh s kompozity na bázi dřeva představují aplikace v obytných a komerčních budovách. [13,14]

## 1.2 Jádrové materiály

Jádrem může být většinou jakýkoli materiál, pokud splňuje několik požadavků. Mělo by mít nízkou hustotu, mnohem nižší modul pružnosti než plášť, ale musí mít dostatečnou pevnost a modul pružnosti ve smyku a tlaku, aby splnilo svou úlohu. [1]

Jádro sendvičové konstrukce slouží především k oddělení, podepření a stabilizaci čelních plášťů tak, aby bylo dosaženo požadované tuhosti v ohybu. Téměř ve všech případech nese jádro hlavní zatížení mimo rovinu nebo příčné smykové zatížení sendvičové konstrukce. Další funkce, jako je tepelná a zvuková izolace, jsou rovněž do značné míry závislé na vlastnostech materiálu jádra. [3]

Materiály jádra zahrnují kovové a nekovové voštinové jádro, pěny s otevřenými a uzavřenými buňkami a balzové dřevo. Srovnání nákladů a vlastností materiálů jádra je uvedeno na Obrázku 5. Voštinová jádra jsou dražší než jádra pěnová, ale nabízejí lepší vlastnosti. To vysvětluje, proč se v mnoha komerčních aplikacích používají pěnová jádra, s nimiž se také lépe pracuje, zatímco v leteckých aplikacích se používají voštiny s lepšími vlastnostmi. [4]

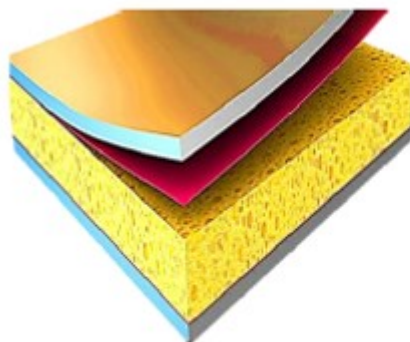


Obrázek 5 Porovnání jádrových materiálů z pohledu vlastností a ceny [4]

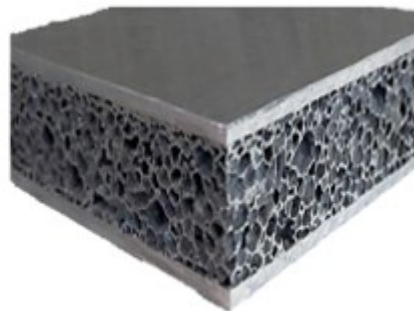
### 1.2.1 Polymerní pěny

Polymerní pěny představují širokou škálu materiálů, které jsou založeny na směsi pevné a plynné fáze. Jsou napěňována, expandována nebo zpracovávána jinými způsoby, aby se snížila hustota plastu. Byly vyvinuty k překonání hlavních nevýhod přírodních (dřevěných nebo papírových) materiálů, zejména nežádoucího kolísání hustoty a absorpce vlhkosti. [1,3]

Pro pěnová jádra je vyžadováno mnoho jedinečných vlastností. Především by pěna měla být dostatečně tuhá, což nám ukazuje hodnota modulu pružnosti ve smyku. Měla by mít dostatečně vysokou povrchovou energii, aby byla smáčivá (kompatibilní) se všemi lepidly a pryskyřicemi. Kritickou vlastností je také obsah uzavřených buněk, který by měl být obecně vyšší než 80 %, jinak by mohla pryskyřice při laminování pronikat do jádra. Pěnové jádro musí být také odolné proti únavě. Mezi další vlastnosti, které je třeba zvážit, patří požární odolnost, odolnost proti vodě, kouřové a toxické vlastnosti. [1,15]



Jádro z polymerní pěny



Jádro z kovové pěny

Obrázek 6 Struktura polymerního a kovového jádra [15]

#### 1.2.1.1 Polyvinylchloridová pěna

Z různých konstrukčních pěnových jader se nejčastěji používá polyvinylchloridová (PVC) pěna. Hustota se může pohybovat v rozmezí 30-700 kg/m<sup>3</sup>. Má lineární nebo zesíťovanou strukturu, která má uzavřené buňky. Obecně mají nízkou propustnost a absorpci vody nebo vlhkosti. Jsou ohnivzdorné, při spalování se však uvolňuje vysoká hladina chlóru. Zesíťované pěny jsou poměrně tuhé, pevné a dobře fungují při teplotách do 120 °C. Lineární pěny jsou pružnější a snáze se tepelně tvarují kolem složitých křivek. Mají však nižší mechanické vlastnosti a odolnost vůči teplotě. Obě varianty nabízejí dobré vlastnosti

směrem k únavové odolnosti. Používají se v aplikacích větrné energie a pro námořní a letecké konstrukční součásti. [1,4,16]

### ***1.2.1.2 Polyetylentereftalátová pěna***

Polyetylentereftalátová (PET) pěna je prvním typem termoplastického konstrukčního pěnového jádra, které se vyrábí kontinuálním vytlačováním. Jde také o druhou objemově nejpoužívanější pěnu v současném průmyslu sendvičových kompozitů. PET pěna má různé výhody, které z ní činí preferovanou volbu pro náhradu PVC a PUR pěny v nosných konstrukcích, jako je recyklovatelnost a netoxický výrobní proces. V případě požáru nevznikají žádné toxické plyny. Jádro z PET pěny je cenově výhodná pěna s uzavřenými buňkami, speciálně vyvinutá pro zajištění vysokých mechanických vlastností. Mezi další výhody patří přenášení statických a dynamických zatížení, vynikající odolnost proti únavě, vynikající chemická stabilita a odolnost proti UV záření a minimální nasákavost. Vzhledem k tomu, že PET pěna má teplotu tání přibližně 250 °C, lze ji zpracovávat při relativně vysoké teplotě. [1,17]

### ***1.2.1.3 Polyuretanová pěna***

Polyuretanové (PUR) pěny mohou být pružné nebo tuhé. Pevné PUR pěny se používají jako strukturální pěnová jádra po mnoho let v námořním průmyslu. Vyrábějí v hustotách od 30 do 500 kg/m<sup>3</sup> v závislosti na složení a mohou si uchovat značnou pevnost a houževnatost až do 135 °C. Mají dobré izolační vlastnosti. Mechanické vlastnosti jsou však nižší než u jiných polymerových pěn při stejné hustotě. [1,4,16]

### ***1.2.1.4 Ostatní typy polymerních pěn***

Mezi další typy polymerních pěn patří například polystyrenová (PS) pěna, která má nízkou hustotu, obvykle 10-50 kg/m<sup>3</sup>. Vykazuje dobré tlumící a akustické izolační vlastnosti, ale má slabou odolnost vůči rozpouštědlům a nízkou požární odolnost. Dále styrenakrylonitrilové (SAN) pěny, které kombinují dobré statické mechanické vlastnosti s vysokou tažností, což má za následek dobrou rázovou houževnatost a odolnost proti únavě. V podstatě přináší lepší vlastnosti než síťované PVC. Lze je zpracovávat při teplotách do 85 °C. Polymetakrylimidové (PMI) pěny vykazují nejvyšší mechanické vlastnosti ze všech polymerních pěnových jader při srovnatelné hustotě, a zároveň mají vysokou tepelnou stabilitu. Teplota tepelné deformace se pohybuje v rozmezí 177 °C až 235 °C, což je nejvyšší hodnota u všech výrobků s pěnovým jádrem. Posledním zástupcem jsou

polyethersulfonové pěny (PES), která mají vynikající tepelnou stabilitu a mechanické vlastnosti při teplotách až 200 °C. Nabízí vynikající požární, kouřové a toxické vlastnosti.[1,4,16]

*Tabulka 3 Mechanické vlastnosti vybraných polymerních pěn [1]*

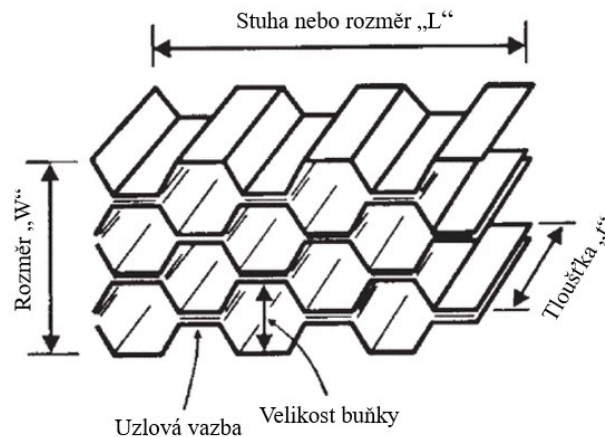
	PVC	PET	PUR	PMI	SAN	PES
<b>Hustota [kg/m<sup>3</sup>]</b>	100	110	100	110	115	130
<b>Pevnost v tlaku [MPa]</b>	2,21	1,4	1,2	3	1,98	1,7
<b>Modul pružnosti v tlaku [MPa]</b>	136	85	40	-	143	60
<b>Pevnost v tahu [MPa]</b>	3,52	2,2	2	3,5	2,11	3,3
<b>Modul pružnosti v tahu [MPa]</b>	132	120	-	-	151	-
<b>Pevnost ve smyku [MPa]</b>	1,63	0,8	0,9	2,4	1,47	1,7
<b>Modul pružnosti ve smyku [MPa]</b>	36	20	16,4	50	52	30

### 1.2.2 Kovové pěny

Jádra z kovové pěny byla také vyvinuta pro lepší absorpční vlastnosti sendvičových konstrukcí. Kovovou pěnu lze potenciálně získat téměř z jakéhokoli kovu nebo slitiny. Hliník, nikl a zinek jsou nejčastěji používány v aktuálních aplikacích. Zejména hliník vykazuje několik výhod, neboť se snadno tvaruje, hodí se pro konstrukční řešení a je především lehký. Mají dobrou tuhost, vynikající vlastnosti pohlcování energie a vysoké tlumení vibrací. Sendvičové konstrukce s kovovým jádrem a kompozitními čelními deskami se vyznačují vysokou odolností proti výbuchu a nárazu. Kovové pěny jsou obecně výrazně stabilnější a teplotně odolnější než polymerní pěny. Nevýhodou kovových sendvičových panelů je však vysoká hustota oproti polymerním pěnám a složitost zpracování. O kovové pěny se v posledních letech zvyšuje zájem a očekává se i vyšší výroba v několika průmyslových odvětvích, zejména v automobilovém, leteckém a biomedicinském průmyslu. [1,15,18]

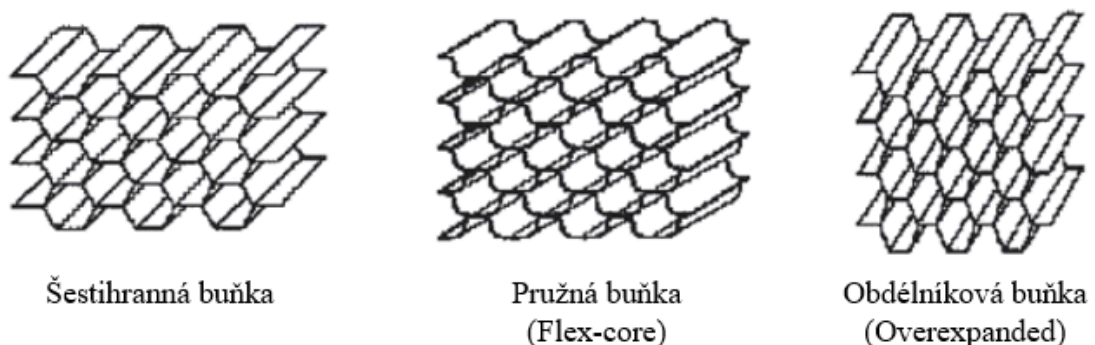
### 1.2.3 Voštinová jádra

Voštinové materiály tvoří nejpočetnější skupinu jádrových materiálů používaných v sendvičových konstrukcích. Voštiny jsou struktury se šestiúhelníkovými, válcovými a jinými buňkami. Detaily typického voštinového jádrového panelu jsou znázorněny na Obrázku 7. Směr „L“ je směr pásy jádra a je silnější než šířka (vazba uzlů) nebo směr „W“. [4,19]



Obrázek 7 Terminologie voštinového jádra [4]

Ačkoli je k dispozici celá řada konfigurací buněk, tři nejrozšířenější (Obrázek 8) jsou šestihranné, pružné (Flex-core) a obdélníkové (overexpanded) buňky. Šestihranné buňky jsou zdaleka nejčastěji používanou konfigurací jádra. Jsou konstrukčně velmi účinné a mohou být dokonce zesíleny přidáním podélné výztuže (zesílená šestihranná buňka) ve směru „L“. Hlavní nevýhodou šestihranného uspořádání je jeho omezená tvarovatelnost. Proto byla vyvinuta pružná buňka, která poskytuje mnohem lepší tvarovatelnost na složitých konturách bez prohýbání stěn buněk. Obdélníková buňka má lepší tvarovatelnost než šestihranná, i když ne tak dobrou jako pružná. Tato konfigurace je ve skutečnosti šestihranné jádro, které bylo ve směru „W“ roztaženo, čímž vznikla obdélníková konfigurace, která usnadňuje tváření ve směru „L“. U některých jader, zejména nekovových, lze tváření usnadnit také použitím tepla (tváření za tepla). [3,4]



Obrázek 8 Typy buněk voštinových jader [4]

Voštiny mohou být vyrobeny z kovových a nekovových materiálů. Z kovových se nejčastěji používá hliník. Z nekovových jsou to kompozitní materiály vyztužené aramidovými, uhlíkovými a skleněnými vlákny. Dále pak aramidový papír (Nomex) a

plasty. Voštiny nabízejí vynikající pevnost a tuhost v porovnání s jinými sendvičovými jádry. Hliníková voština má nejlepší kombinaci pevnosti a tuhosti, následovaná nekovovými voštinami. Nevýhodou je jejich vysoká cena. Taktéž může být obtížné je vyrobit do složitých sestav. Nesnadná může být i jejich případná oprava po provozu. Používají se pro konstrukční prvky v leteckém, kosmickém, automobilovém průmyslu a pro stavbu lodí. [4,16,19]

#### 1.2.4 Dřevěná jádra

Dřevo je díky své buněčné struktuře a vysokému poměru pevnosti a hmotnosti vhodné pro použití jako sendvičové jádro. Nejrozšířenějším dřevem dodávaným pro použití jako materiál sendvičového jádra je balsa. Balsa je tropické dřevo pocházející z Jižní Ameriky, které se dnes pěstuje v mnoha zemích a je nejlehčím komerčně dostupným dřevem používaným v sendvičových konstrukcích. Jeho hustota je nízká (obvykle mezi  $50 \text{ kg/m}^3$  a  $350 \text{ kg/m}^3$ ). V současné době se balsové dřevo používá s vlákny kolmo k čelním deskám. Je to proto, že pevnost v tlaku je v tomto směru mnohem lepší a pevnost ve smyku je dostatečná. Panely s jádry z balsového dřeva se nesmí používat ve vlhkých prostorách, pokud není výjimečně dobré utěsnění, protože balsa absorbuje velké množství vody, což způsobuje nebezpečné zvýšení hmotnosti a korozi plášťů z hliníkové slitiny. Balsa se velmi dobře hodí jako obnovitelný a udržitelný lesní produkt. Je to velmi rychle rostoucí strom a může být sklizen již za 3 roky. Používá se v celé řadě výrobků včetně, vlaků, autobusů, automobilů, nádrží a lopatek větrných turbín. Pro speciální účely lze jako jádro použít i jiné dřeviny (smrk, topol), které jsou těžší než balsové dřevo. [1,2,3,20]



Obrázek 9 Položení balsového jádra do trupu lodi před infuzí pryskyřice [20]

Očekává se, že aplikace balsového dřeva, ale i jiných dřevin budou narůstat, protože přírodní a biologicky odbouratelné materiály mají stále větší význam pro ekologickou udržitelnost při navrhování technických materiálů. [20]

### 1.3 Výroba pěnových jader

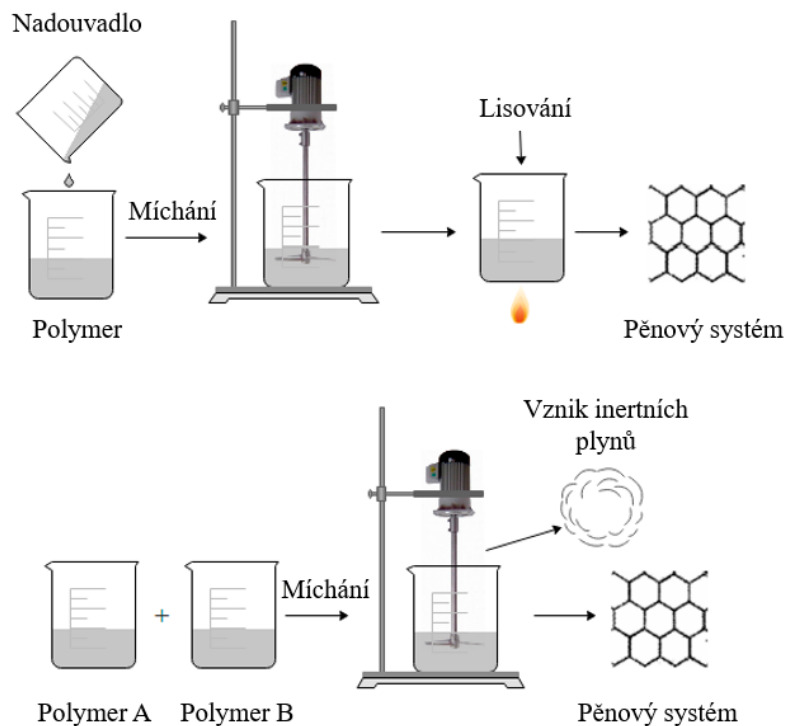
Jedním z hlavních požadavků na to, aby proces napěňování probíhal efektivně, spočívá buď v roztavení nebo změkčení polymerní matrice, aby se umožnila difúze plynů v její struktuře. V tomto smyslu existuje několik metod, kterými lze provádět pěnění, které lze rozdělit na pěnění mechanické, fyzikální a chemické.

Mechanické pěnění je poměrně jednoduchá metoda, která spočívá ve smíchání polymerní pryskyřice se vzduchem, který se do pryskyřice dostává mechanickým mícháním. Není nutné přidávat nadouvadla. Jedná se o ekologický přístup díky absenci chemikálií a plynů, které se během procesu uvolňují. Další výhodou je relativně velká účinnost a nízké náklady. Přesto je k řádnému provedení procesu zapotřebí specifické vybavení. Tento výrobní postup lze běžně použít pro polypropylen, epoxidové, močovinoformaldehydové a fenolové pryskyřice.

fyzikální pěnění je založeno na přidání těkavého rozpouštědla nebo plynu do polymerní směsi. Poté se na systém působí teplem a tlakem, aby se podpořilo fyzikální pěnění. Taková metoda je poměrně snadná, protože ji lze provádět pomocí plynů CO<sub>2</sub> a N<sub>2</sub>. Díky těmto podmínkám je tato metoda ekologicky šetrnější a zabraňuje tvorbě zbytků po napěnění. Má také malý vliv na vlastnosti pěněných plastů. Tato metoda však vyžaduje vysoké technické požadavky.

Chemické pěnění lze provádět dvěma způsoby. První spočívá v přidání chemického nadouvadla, které se může rozkládat při vysokých teplotách, do polymerní taveniny. Následně dochází k chemicko-teplenému rozkladu nadouvadla na několik produktů, z nichž minimálně jeden je plyn, který se podílí na napěňování. Poté lze proces pěnění regulovat řízením teploty a tlaku. Druhý způsob spočívá ve smíchání dvou polymerů, které při reakci uvolňují v polymerní směsi plyn, jenž podporuje proces pěnění. Proces chemického napěňování se běžně používá například pro PU, PP, PE, PVC a polyamidy 6. [21,22]

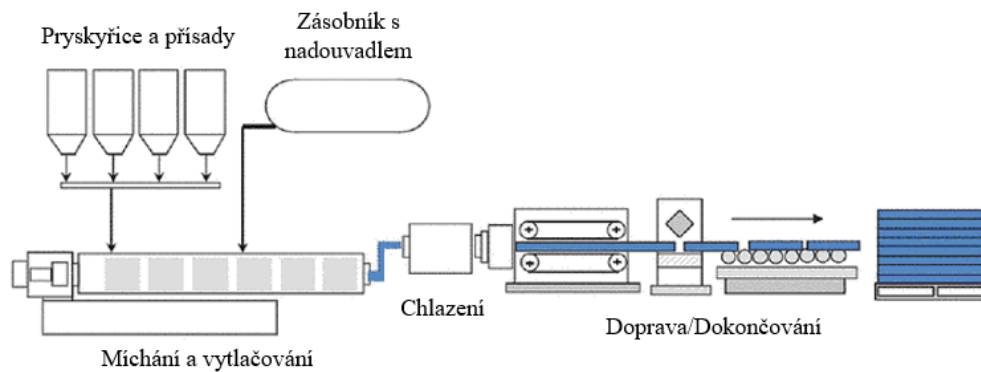




Obrázek 10 Schématické znázornění metod chemického pění [22]

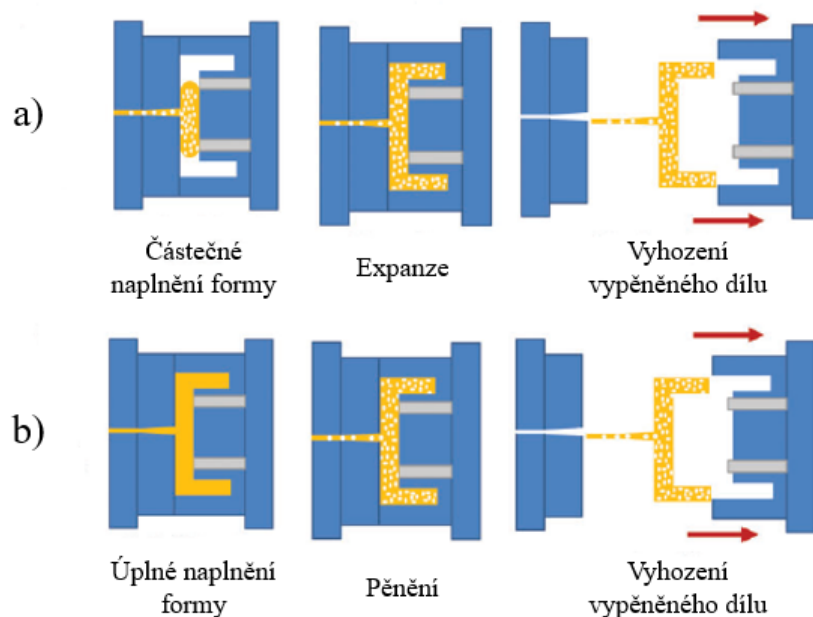
### 1.3.1 Metody zpracování

Mezi metody zpracování patří nejčastěji používané vytlačování a vstřikování, ale používá se i řada dalších zpracovatelských metod, jako je lisování, odtlakování, volné napěňování, nebo jednoduché přidávání předexpandovaných kuliček. U vytlačování je vytlačovací stroj vybaven systémem vstřikování nadouvadla a na konci vytlačovacího šneku bývá často instalováno statické míchadlo, které zvyšuje disperzi plynu v polymerní tavenině. Vytlačováním se nejčastěji vyrábějí pěnová jádra ve formě panelů. [23]



Obrázek 11 Schéma vytlačovací linky [23]

U vstřikování existují dvě metody, a to nízkotlaké vstřikování a vysokotlaké vstřikování. Při nízkotlakém vstřikování je dutina formy částečně (téměř z 55-95 %) vyplněna krátkým výstřikem polymerní taveniny s obsahem plynu nebo nadouvadla (viz Obrázek 12a ). K pění dochází během plnění formy. Pórovitost vytvořené pěny je určena poměrem velikosti výstřiku k objemu dutiny formy. Naopak u vysokotlakého vstřikování je dutina formy zcela vyplněna plným výstřikem polymerní taveniny s obsahem plynu (viz Obrázek 12b). Hlavní tvorba buněk probíhá během tuhnutí polymerní taveniny a je vyvolána poklesem tlaku spojeným se smršťováním taveniny.



Obrázek 12 Schémata procesu nízkotlakého vstřikování (a), vysokotlakého vstřikování (b) [24]

Nízkotlaké vstřikování může produkovat pěny s vysokým podílem pórovitosti díky omezení velikosti výstřiků. Pěny vyrobené touto metodou se však vyznačují špatnou strukturou buněk, jako jsou vzájemně propojené buňky, vysoce deformované buňky a nehomogenní velikost buněk. Naproti tomu vysokotlaké vstřikování může produkovat pěny s velmi jednotnou strukturou buněk, protože krok pění a krok plnění formy jsou odděleny. [23,24]

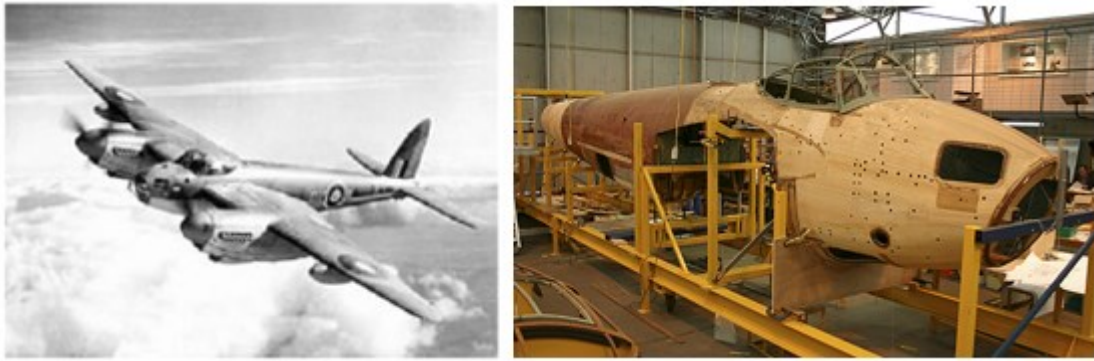
## 2 APLIKACE SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Kvůli vysoké pevnosti k hmotnosti a poměru tuhosti k hmotnosti jsou sendvičové materiály jedním z hlavních systémů pro letecký průmysl. Ve vrtulníkovém průmyslu se navíc používají pro výrobu listů hlavního a ocasního rotoru. Stejně jako v letectví je i v kosmonautice hmotnost velmi důležitým parametrem, a proto jsou zde sendvičové materiály taky oblíbené. Používají se v mnoha dopravních prostředcích jako vnější panely karoserie, náběžné hrany, kryty radarů, dronech, anténách a kosmických stanicích. Sendvičové materiály se hojně využívají i námořním průmyslu. Mezi ně patří trupy, paluby, nádrže, dveře a další. Rovněž se používají v široké škále konstrukcí a výrobků, jako jsou sportovní potřeby, budovy a dočasné přístřešky. [1,19]

### 2.1 Historie

První patent na voštinové jádro byl podán v roce 1905 v Německu. Prvním materiálem pro pěnová jádra byla tuhá polyvinylchloridová (PVC) pěna, uvedená na trh v Německu ve 30.-40. letech 20. století. Koncem 40. let 20. století také dva mladí veteráni druhé světové války založili společnost Hexcel Corporation, která v průběhu desetiletí sehrála nejdůležitější roli v růstu sendvičové konstrukce. Společnost Hexcel začala s voštinovým jádrem a dodnes vyrábí velkou část světových materiálů pro voštinová jádra. Od 50. let 20. století se jako jádro sendvičových kompozitů používala tuhá polyuretanová pěna při stavbě dražších lodí. Na začátku 90. let 20. století byla do konstrukce lodí zavedena styren-akrylonitrilová (SAN) pěna.

Sendvičová konstrukce se v moderním průmyslu používá od druhé světové války, kdy byla v Anglii poprvé použita společností de Havilland v bombardéru Mosquito, který používal sendvičovou konstrukci z překližky s balsovým jádrem z důvodu nedostatku hliníku během války. Mosquito bylo velmi úspěšné letadlo a v letech 1940 až 1946 jich bylo vyrobeno více než 8000 a je jedním z nejdůležitějších předchůdců moderních letadel s kompozitními konstrukcemi. [1,2,25]

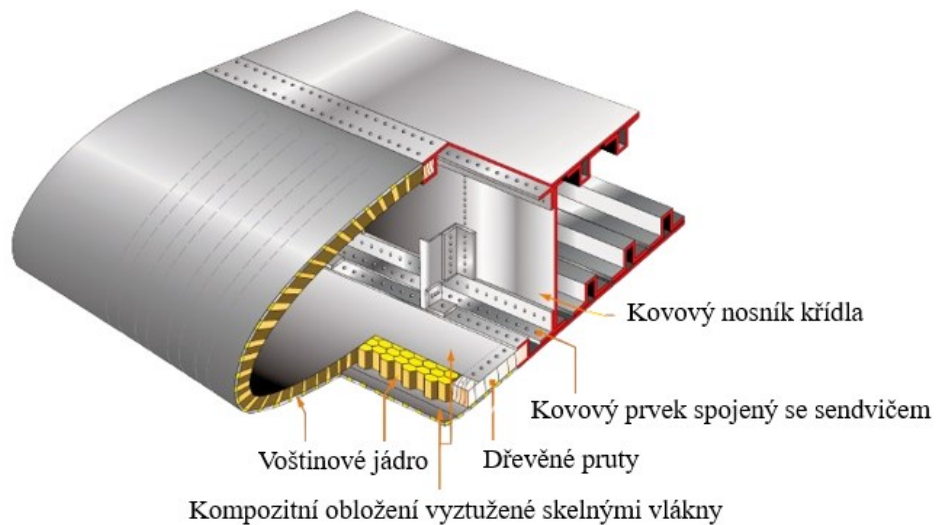


Obrázek 13 Letadlo Mosquito (vlevo) a jeho sendvičový trup (vpravo) [25,26]

V sedmdesátých letech 20. století se ve Švédsku začaly vyvíjet obrovské aktivity týkající se použití kompozitních sendvičových konstrukcí pro trupy námořních lodí. Podařilo se prokázat, že správně navržený kompozitní sendvičový trup může být konstrukčně stejně pevný jako ocelový trup. Výsledkem bylo, že od určitého data v 80. letech 20. století byly všechny trupy lodí švédského královského námořnictva vyrobeny ze sendvičové konstrukce. [1]

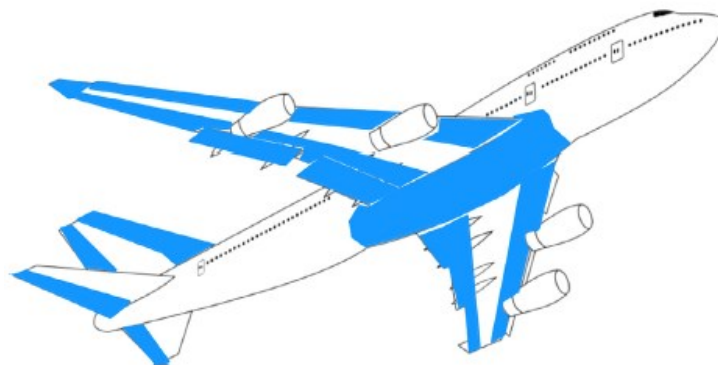
## 2.2 Letectví

V moderním leteckém průmyslu se sendvičové kompozitní konstrukce uplatňují, ale osvědčili se pouze vybrané konstrukce. Úspěch zaznamenaly zejména voštinová jádra vyrobená z hliníku a Nomexu. Používají pro konstrukce náběžných a odtokových hran křídel, klapky, spoilery, kryty, trupy a prvky uvnitř letadla (podlahy, stropy, boční panely). Pro krycí pláště se využívá především hliník a uhlíkové, kevlarové nebo skleněné lamináty. Sendvičové konstrukce s pěnovými jádry se používají pro výrobu trupu a křídel malých soukromých letadel. Stálý nárůst používání sendvičových dílů s voštinovým a pěnovým jádrem a široké škály kompozitních materiálů je charakteristický pro letecké konstrukce od 70. let 20. století do současnosti. [1,19,27]



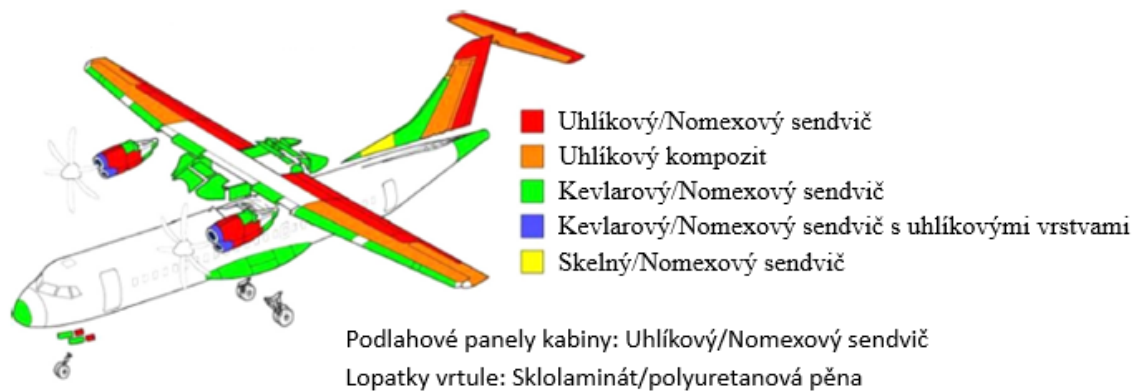
Obrázek 14 Konstrukce náběžné hrany křídla [1]

Velká civilní letadla Boeing 747 a Airbus 380 jsou konstruována s velkým podílem sendvičových materiálů (viz Obrázek 15). Mají přibližně polovinu povrchu křídla, včetně náběžné a odtokové hrany, vyrobenou ze skelných vláken a voštinového materiálu Nomex, který je použit i na velkou břišní kapotáž. Většina klapky je vyrobena ze stejného sendviče, ale používají se také hliníkové voštiny a potahy. Skříň křídla, svislá ocasní plocha a trup jsou však stále vyrobeny z hliníkových vyztužených panelů. [1,25]



Obrázek 15 Přehled sendvičových konstrukcí letounu B747 [25]

Použití sendvičových kompozitů se i výrazně rozšířilo, díky letounu ATR 72, který byl prvním civilním letadlem s uhlíkovou primární konstrukcí (skříň křídla). Jeho součástí je také mnoho kompozitních sendvičových struktur pro sekundární konstrukce, ale s širokou škálou potahů: skleněných, kevlarových a uhlíkových, které lze vidět na Obrázku 16. [1]



Obrázek 16 Kompozitní materiály v letadle ATR 72 [25]

Sendvičová technologie a její výhody se nyní rozšířily i do lehkého letectví díky výrobci letadel Elixir Aircraft se sídlem v La Rochelle (Francie), který v roce 2020 obdržel certifikaci pro svůj dvoumístný karbonový letoun s názvem "Elixir". Tento letoun byl vyvinut využitím sendvičové technologie, která byla aplikována pomocí výrobní metody One Shot. Tato inovativní technika spočívá v návrhu a výrobě složitých prvků, například křídel, v jednom kuse a jedné operaci, eliminující tak složité konstrukční sestavy. [25]

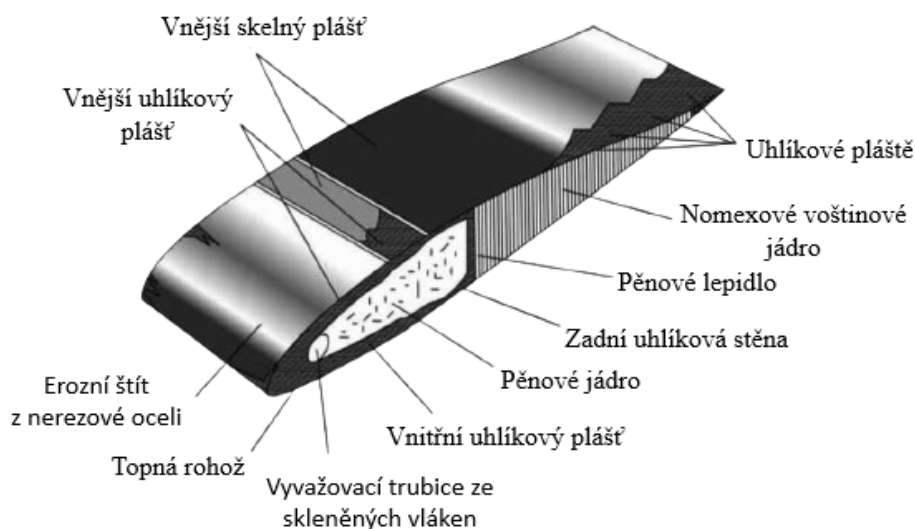


Obrázek 17 Letoun Elixir a jeho sendvičový karbonový trup [25]

V uplynulých 25 letech se společnost Scaled Composites Inc. podílela na návrhu a výrobě mnoha celokompozitových zkušebních a soutěžních letadel. Mezi tato letadla, která jsou vyrobena v sendvičové konstrukci z uhlíkového kompozitu a polymerní pěny, patří Voyager, který jako první letadlo obletěl svět bez doplňování paliva, výzkumný letoun NASA AD-1 se šikmým křídlem, demonstrační letoun T-46 a Starship. [25]

U vrtulníků byly první aplikací rotorové listy z voštinových nebo pěnových jader s pláští ze skleněných a dalších typů vláken. Začaly se používat velmi brzy, přičemž od 90. let 20. století je jejich podíl téměř stoprocentní. Jejich životnost je delší než životnost vrtulníku. Kromě toho možnost výroby optimalizovaných aerodynamických tvarů (prohnuté a

zkroucené části) lisováním umožňuje zvýšit vzletovou hmotnost a snížit spotřebu paliva. Například u vrtulníku AS330 Puma se vzletová hmotnost zvýšila o 400 kg (+ 6 %). Další výhodou těchto kompozitních listů je jejich odolnost vůči poškození. Také úspora výrobních nákladů činí více než 20 % ve srovnání s pořizovací cenou stejné lopatky z kovového materiálu. [1,25]



Obrázek 18 Pohled na rotorový list v příčném řezu [1]

Nejinovativnější kompozitní konstrukcí je jistě konstrukce bojového vrtulníku Tiger (první let 1991). Tiger byl prvním celokompozitovým vrtulníkem vyvinutým v Evropě. Na 90-95 % jeho konstrukce byly použity kompozitní materiály, přičemž velký podíl tvoří voštinové jádro z Nomexu s uhlíkovými pláty. Tato potřeba lehkosti vyplývá z provozních požadavků, zejména velké manévrovatelnosti a vysoké rychlosti stoupání. Technologie z Tiger byly použity také u dopravního vrtulníku NH 90. [25]



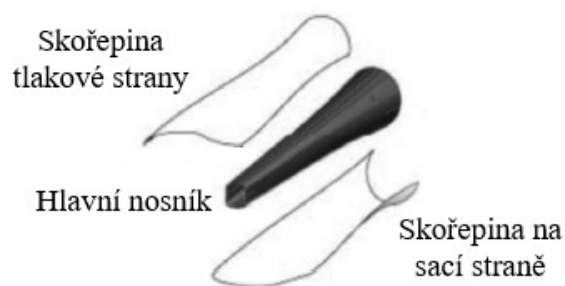
Obrázek 19 Vrtulník Tiger [28]

### 2.3 Větrná energetika

Od roku 1970 se větrné turbíny vyrábějí převážně s kompozitními lopatkami. Lopatky průměrné větrné turbíny na pevnině jsou dnes dlouhé přibližně 50-70 m, největší lopatky na moři dokonce přesahují 80-100 m. To klade velké nároky na materiály použité v kompozitních konstrukcích. Hlavní požadavky na lopatky větrných turbín lze shrnout takto:

- Vysoká pevnost, aby odolaly i extrémním větrům a gravitačnímu zatížení,
- Vysoká odolnost proti únavě a spolehlivost, aby byla zajištěna stabilní funkce po dobu více než 20 let,
- Nízká hmotnost, aby se snížilo zatížení věže a účinek gravitačních sil,
- Vysoká tuhost pro zajištění stability aerodynamicky optimálního tvaru a orientace lopatky během pracovní doby,

Lopátka se skládá ze dvou polovin (na sací a tlakové straně), spojených dohromady a vyztužených buď jedním, nebo dvěma smykovými pásy spojujícími horní a dolní část pláště lopatky, nebo skříňovým nosníkem, jak je znázorněno na Obrázku 20. [1]

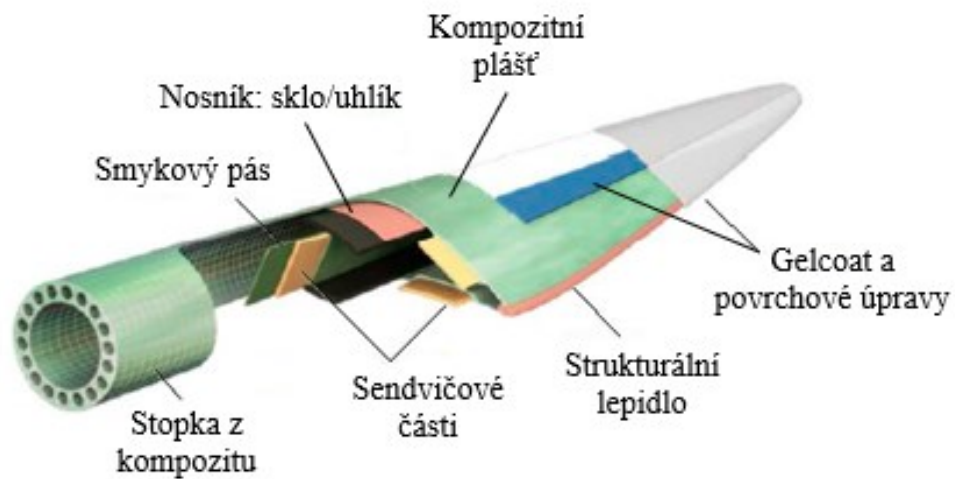


Obrázek 20 Součásti lopatek větrných turbín [1]

Na Obrázku 21 lze vidět materiálovou skladbu lopatky. V nepodepřených částech větrného pláště se používají sendvičové kompozity, které mají mnohem vyšší tuhost než monolitické kompozity. Materiály sendvičového jádra, umístěné mezi dvěma vrstvami kompozitu, jsou obvykle PET pěny, balsové dřevo nebo v některých případech PVC a SAN pěny. Hlavním účelem těchto sendvičových částí je zachovat aerodynamický tvar lopatky, který určuje, jak dobře dokáže získávat energii z větru, a zabránit prohýbání lopatky. Rozhodujícími vlastnostmi materiálu jádra jsou pevnost ve smyku a tlaku.



Současné konstrukce jsou založeny především na plastech vyztužených skleněnými vlákny, ale u velmi velkých lopatek se kvůli snížení hmotnosti stále častěji používají plasty vyztužené uhlíkovými vlákny. Používané výrobní techniky se mohou u různých výrobců velmi lišit, ale obecně je výroba lopatek větrných turbín založena buď na technologii kompozitních prepregů, nebo na vakuové infuzi. [1,29]



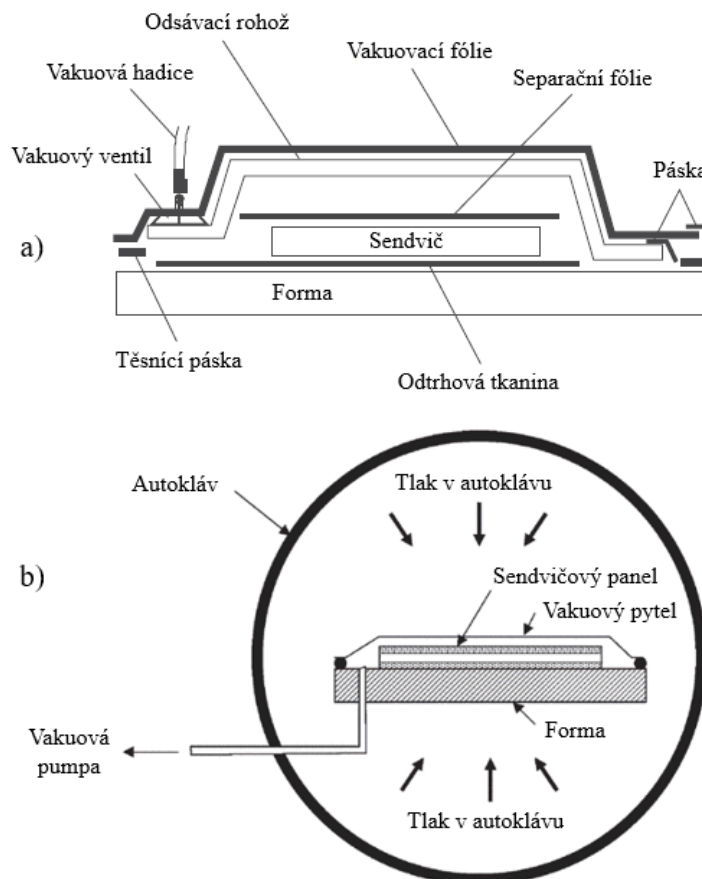
Obrázek 21 Materiály použité v typickém průřezu lopatek [29]

### 3 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

Z důvodu použití prepregů v praktické části, budou v této kapitole popsány technologie vhodné pro výrobu právě z těchto materiálů.

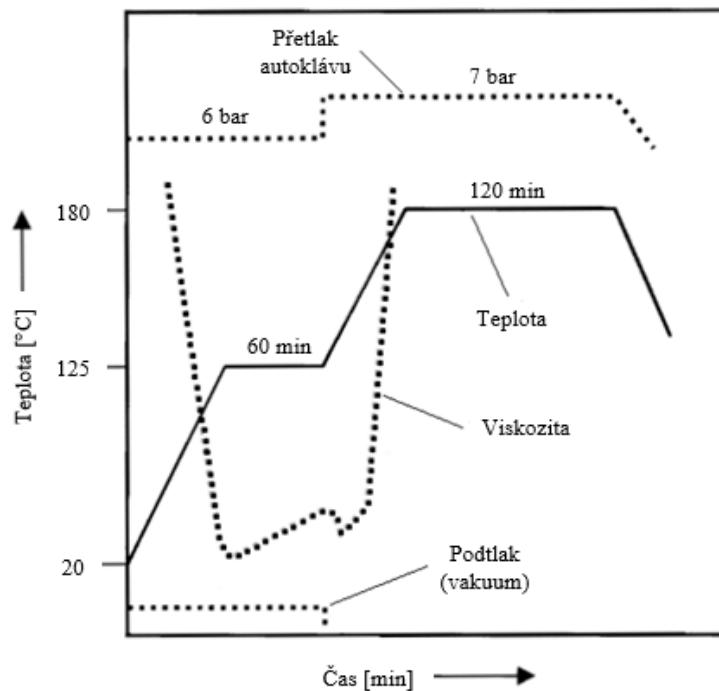
#### 3.1 Vytvrzování v autoklávu

Autokláv je zařízení, které dokáže generovat prostředí s řízeným tlakem a teplotou. V tomto procesu se prepregy a jádro pokládají ručně, nebo pomocí pokládacích strojů do formy. Poté se přidávají pomocné materiály jako jsou separační fólie, odtrhová tkanina a odsávací rohož (viz Obrázek 22a). Forma je poté zabalena do vakuovacího pytle. Ten se vakuuje a následně se umístí do autoklávu k vytvrzení. Autoklávy jsou pod tlakem inertního plynu, obvykle dusíku nebo oxidu uhličitého. Plyn je cirkulován velkým ventilátorem v zadní části a ohřívá díl. Tlak plynu působí na díl izostaticky, a proto lze v autoklávu vytvrzovat téměř jakýkoli tvar. Typický vytvrzovací cyklus termosetového epoxidového dílu je znázorněn na Obrázku 23.



Obrázek 22 Skladba pomocných materiálů při vakuování (a);  
schéma vytvrzování v autoklávu (b) [4,30]

Vytvrzování v autoklávu se používá pro výrobu vysoce kvalitních a složitých dílů. Provoz autoklávu je však značně drahý a časově náročný. V případě velmi silných dílů může být nutné vytvrzovací cyklus prodloužit až o několik hodin. Avšak v případě velkých dílů bývá často jedinou volbou. Zejména pro střední výrobní série v leteckém průmyslu je autoklávové zpracování obvykle nejekonomičtější volbou. [1,4,8,30]



Obrázek 23 Typický vytvrzovací cyklus autoklávu [4]

### 3.2 Lisování

Sendvičové díly lze také vytvrzovat v lisech. Lisování kompozitních materiálů se v používá již mnoho let. Hlavními výhodami tohoto procesu je velmi malý odpad materiálu, jeho potenciál pro automatizaci a schopnost formovat velké a poměrně složité díly. Lisování prepregů umožňuje dobu cyklu jen v řádu minut při splnění stejných strukturálních vlastností získaných v autoklávu, což z něj činí atraktivní proces například pro automobilový průmysl. Obrázek 24 schematicky znázorňuje různé kroky procesu lisování prepregu. Vrstvy prepregu se nařezou do požadovaného tvaru a spojí se s jádrem dohromady. Laminát je poté předtvarován pomocí speciálního předtvarovacího nástroje, který dává dílu konečný tvar. Následuje konsolidace a vytvrzení dílu pod tlakem a teplotou. Každý krok procesu lisování prepregu lze plně automatizovat, což pomáhá zkrátit celkovou dobu cyklu a zajistit spolehlivější proces snížením pracných úkolů, což má za následek nižší náklady na součást. Výhodou vyhřívaného deskového lisu je možnost

použití mnohem vyšších tlaků ke konsolidaci vrstev a minimalizaci tvorby a růstu dutin. Na druhou stranu lisovací stroje obvykle vyžadují pro každou konfiguraci dílu odpovídající kovové nástroje a jsou omezeny velikostí desky na počet dílů, které lze zpracovávat najednou. [1,4,30]



Obrázek 24 Proces lisování [1]

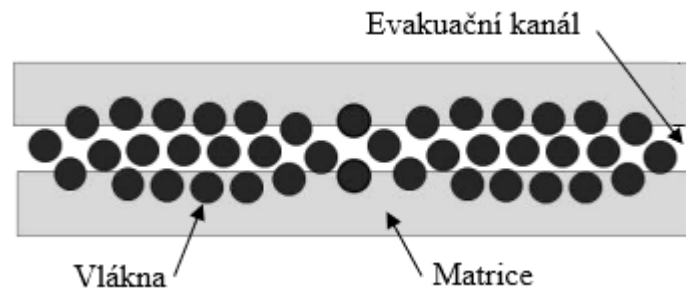
### 3.3 Vytvrzování v peci

Tato metoda spočívá v konsolidaci prepregů a jádra ve vakuových pytlích a následné vytvrzení v konvekční peci. Skladba pomocných materiálů pro vakuování je shodná jako u vytvrzování v autoklávu (viz Obrázek 22a). Vytvrzování v peci nabízí několik potencionálních výhod oproti tradičnímu vytvrzování v autoklávu, včetně nižších pořizovacích a provozních nákladů a schopnosti vyrábět velké integrované konstrukce, jejichž velikost přesahuje velikost dostupných autoklávů. Nevýhodou však je, že pece mají nižší výkon při přenosu tepla. V důsledku toho by měly být použity zkoušky zpracování pro měření rychlosti zahřívání a ochlazování skutečného dílu, jakož i umístění a velikosti jakýchkoli tepelných spádů skrz tloušťku nebo v rovině. [1,31,32]



Obrázek 25 Pec pro vytvrzování kompozitů [33]

Jelikož je maximální konsolidační tlak, který je zajištěný pouze vakuovým pytlím, jen kolem 0,1 MPa, je nedostatečný k tomu, aby zabránil vzniku a růstu dutin. Obsah dutin ve vytvrzených dílech jsou obvykle mnohem vyšší (např. pět až deset procent) než u autoklávem vytvrzených dílů (méně než jedno procento). Proto se často používají speciální OOA (Out of autoclave) prepregy, které slouží pro metody vytvrzování mimo autokláv. OOA prepregy mají částečně impregnovanou mikrostrukturu, která zahrnuje jak suché, tak na pryskyřici bohaté oblasti (Obrázek 26). Suché oblasti počáteční mikrostruktury prepregu vytvářejí propustnou vnitřní síť, která umožňuje transport plynů během počátečních nízkoteplotních fází vytvrzování. Poté, při vysoké teplotě, jsou prosyceny pryskyřicí z vnějších oblastí bohatých na pryskyřici. Tyto prepregy umožňují v ideálním případě výrobu dílů s nízkou pórovitostí. [4,31]



Obrázek 26 OOA prepreg [31]

## 4 TVAROVÁNÍ POLYMERNÍCH PĚN

Polymerní pěnová jádra lze tvarovat pomocí různých postupů a technik v závislosti na typu pěny a požadovaném výsledku. V této kapitole budou popsány nejpoužívanější metody, a to tepelné tvarování a obrábění.

### 4.1 Tepelné tvarování

Tepelným tvarováním polymerní pěny upravit do trojrozměrných složitých tvarů, které jsou často vyžadovány pro moderní sendvičové konstrukce, a to bez narušení jádra. Při tepelném tvarování se pěna nejprve vystaví zvýšené teplotě zpravidla nad teplotu skelného přechodu  $T_g$  a pod teplotu tání  $T_m$ , vytvaruje se a ochladí pod tlakem. Aby byla pěna vhodná pro tepelné tvarování, musí být alespoň část složení pěny založena na termoplastických polymerech. Maximální schopnost tepelného tvarování však závisí také na typu pěny a její tloušťce. [34]

Před samotným tvarováním je doporučováno pěnové desky vysušit. Po vysušení se pěnová deska musí zahřát na teplotu mezi  $T_g$  a  $T_m$ . Zahřívání pěny lze dosáhnout následujícími způsoby:

- Konvekci: pomocí cirkulace vzduchu v peci nebo pomocí horkovzdušných dmychadel.
- Kondukcí: pomocí horkých desek nebo v horké vodní lázni.
- Sáláním: pomocí horkého drátu, halogenových nebo infračervených ohřivačů.

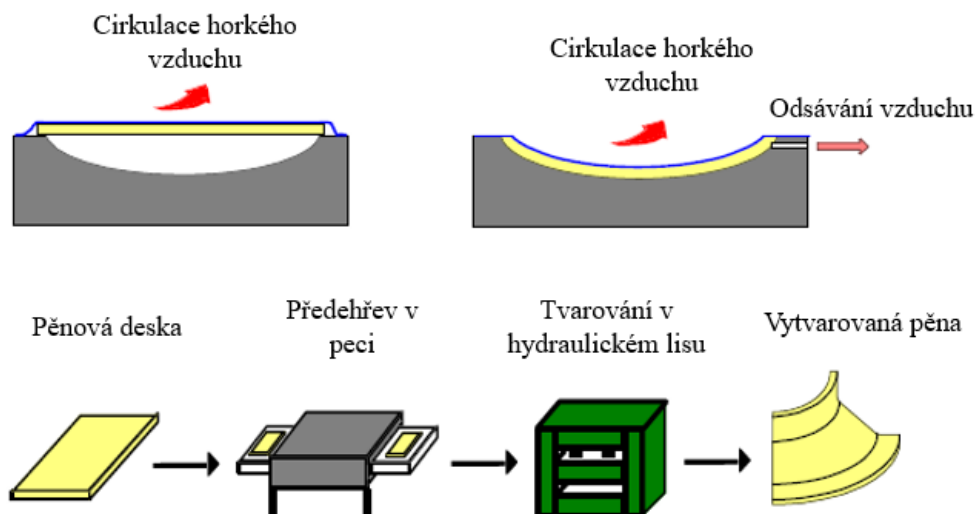
Obecně lze říci, že konvekce je nejběžnější metodou ohřevu pěn. Při ohřevu je třeba dbát na rovnoměrné zahřátí pěny. V opačném případě se mohou desky v důsledku rozdílné tepelné roztažnosti deformovat. Tyto problémy lze obvykle omezit poskytnutím delšího času pro proces zahřívání. Potřebná doba ohřevu závisí na tepelné kapacitě pěny, její tloušťce a faktorech prostředí nástroje a dílny. Všeobecně lze říci, že potřebná doba ohřevu konvekci je přibližně 0,5 – 1 minuta na 1 milimetr tloušťky pěny. [34,35]

Jakmile pěna dosáhne doporučené teploty, měla by být rychle přenesena do tvářecího zařízení. Aby se minimalizoval účinek rychlého ochlazení pěny, může být před ohřevem zabalena do izolačního materiálu. Používá se například bavlněná tkanina, skleněná tkanina nebo silikonová pryž. Pokud je třeba tepelně tvarovat pouze malé množství dílů, lze použít relativně jednoduché dřevěné nebo kompozitní formy. Pro větší série se doporučuje

používat hliníkové formy s řízenou teplotou. Regulací teploty lze zajistit opakovatelnost podmínek tepelného tváření. Nejsou-li požadované rozměrové tolerance příliš přísné, lze tepelné tváření provádět pouze s vnější nebo vnitřní formou. Po přenesení pěny na formu se aplikuje tlak nebo vakuum, aby se pěna vytvarovala do konečné geometrie. Tlak lze vyvíjet různými způsoby:

- Ručně
- Pomocí závaží, např. pytlů s pískem atd.
- Metodou vakuových vaků
- Lisováním

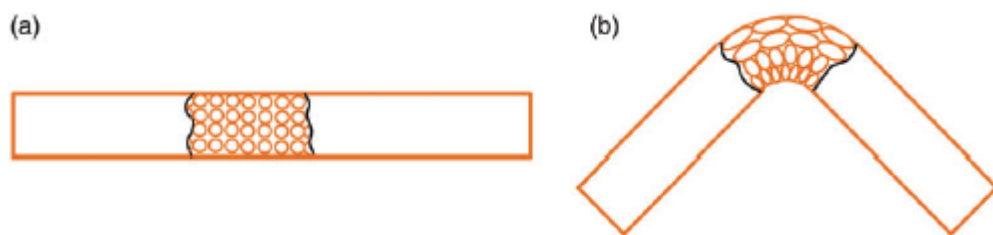
Vakuové tváření lze provádět v horkovzdušné cirkulační peci nebo v autoklávu. Doporučuje se zajistit dodatečnou cirkulaci horkého vzduchu mezi pěnovou deskou a nástrojem. Chlazení by mělo probíhat taky ve vakuu. U dílů s přísnými rozměrovými tolerancemi se doporučuje tepelné tváření v uzavřených formách. Tlak lze vyvíjet pomocí jednoduchého uzavíracího nebo upínacího mechanismu nebo mezi deskami lisu. Formu lze otevřít až poté, co jádro dosáhne teploty nižší než  $T_g$  i ve středu. Doporučuje se rovnoměrné ochlazení z obou stran, aby se zabránilo zpětnému pružení. [24,34,35]



Obrázek 27 Vakuové tváření (nahore) a tvarování lisováním (dole) [34]

- **Mikrostruktura tvarované pěny**

Deformace, ke které u pěny během tváření dochází, vede ke změně mikrostruktury. Buňky pěny na vnitřní straně rohu jsou stlačeny v tangenciálním směru, zatímco buňky na vnější straně rohu jsou nataženy v tangenciálním směru, jak je schematicky znázorněno na Obrázku 28. Z tohoto důvodu již není hustota v celé tloušťce tepelně tvarovaných pěnových ohybů rovnoměrná. Jelikož se mikrostruktura pěny během tepelného tváření mění, mění se i její mechanické vlastnosti. Bylo však provedeno jen velmi málo studií, které by zkoumaly změny mechanických vlastností pěn způsobené tepelným tvářením. [24]



Obrázek 28 Schéma buněčné morfologie (a) před tepelným tvarováním a (b) po tepelném tvarování [24]

## 4.2 Obrábění

Pěnová jádra lze obrábět na rychle běžících strojích na zpracování dřeva nebo plastů, s použitím typických nástrojů pro tento účel. Mezi běžné metody zpracování patří vrtání, frézování, řezání. Tímto způsobem lze vytvářet složité 3D geometrie jader. Pěny musejí být obráběny bez použití maziv a chladících emulzí. Pevně konstruované vysokorychlostní stroje s pevnými ložisky, jaké se používají pro obrábění lehkých slitin, umožňují vysoké rezné rychlosti při minimálních posuvech, které jsou nezbytné pro obrábění pěnových materiálů s vyšší hustotou (termoplastů). Úhel záběru by měl být malý. Vysoká rezná rychlost při minimálním posuvu a malý úhel záběru společně pomáhají minimalizovat vývin tepla, a tím zabránit změkčování nebo dokonce tavení. [31,34,36]

Obecně platí, že obrábění pěn dává z hlediska nákladů smysl, jestli je výrobní série menší než 100 dílů. Při obrábění vzniká velký odpad, což zvyšuje náklady této technologie. Oproti lisování, pokud lisovací nástroj není vyroben, mají obráběné díly kratší dodací lhůty. Obrábění se ideálně používá pro výrobu prototypů, malé série, přesné tolerance anebo komponenty s velkými a složitými objemy. [31,36]





*Obrázek 29 Obrobená polymerní pěnová jádra [36]*

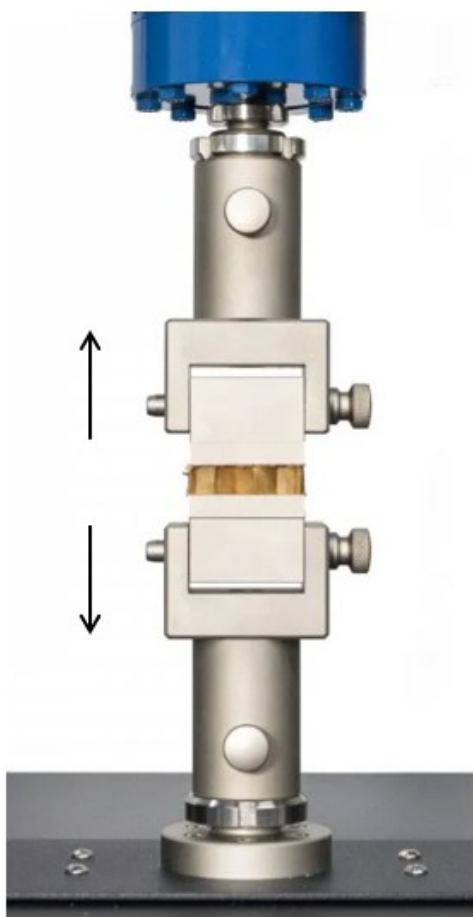
Obrábění se také používá u kompozitních sendvičů pro dokončovací operace, jako je například odstraňování přetoků, vrtání otvorů pro inserty nebo řezání panelů na dané rozměry. Při těchto operacích se používají nástroje, které je třeba vybírat podle obkladových materiálů (FRP, kovy, plasty atd.) a požadované kvality řezaného povrchu. [15,34]

## 5 STANDARDNÍ ZKUŠEBNÍ METODY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Stanovení a analýza mechanických vlastností sendvičových struktur hraje důležitou roli při výběru materiálu pro jeho konečné použití. V této kapitole budou popsány nejpoužívanější standardní zkušební metody pro stanovení mechanických vlastností.

### 5.1 Tahová zkouška na plocho (ASTM C297)

Tato zkouška se používá k získání informací o pevnosti a kvalitě spojení jádra s obkladem a k získání údajů o pevnosti v tahu na plocho pro materiál jádra. Vzorkem je tedy buď samotný materiál jádra, nebo sendvičový materiál, který je přilepen k zatěžovacím blokům pro upevnění ke zkušebnímu zařízení. Velikost vzorku závisí na homogenitě a velikosti buněčné struktury materiálu jádra. Na vzorek působí jednoosá tahová síla kolmo s rovinou jeho čel viz Obrázek 30. [37,38]



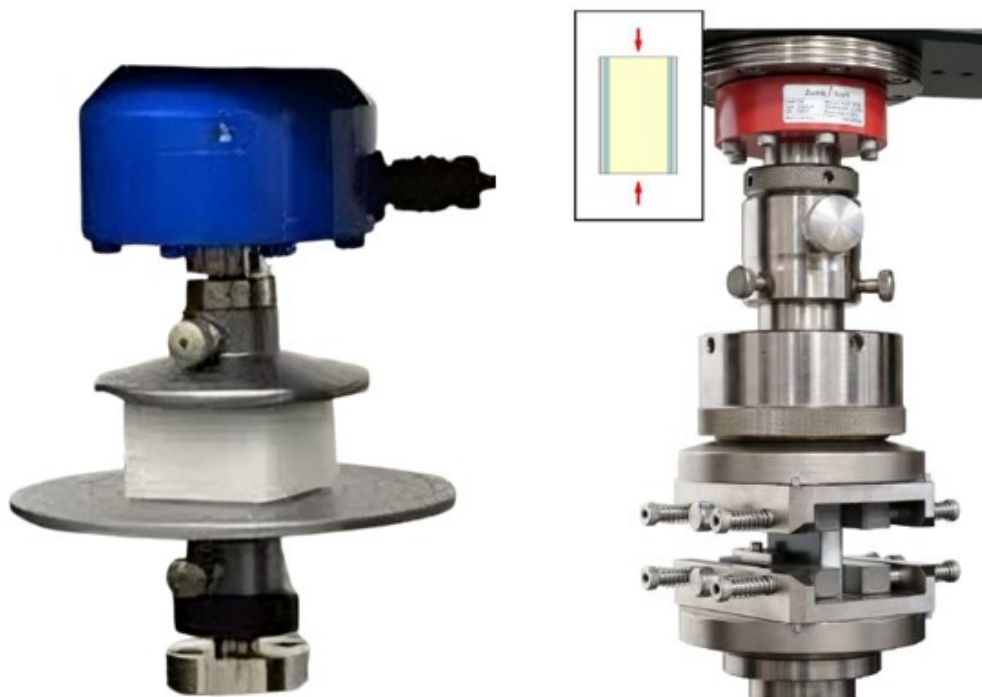
Obrázek 30 Tahová zkouška na plocho [38]

## 5.2 Tlakové zkoušky (ASTM C365 a ASTM C364)

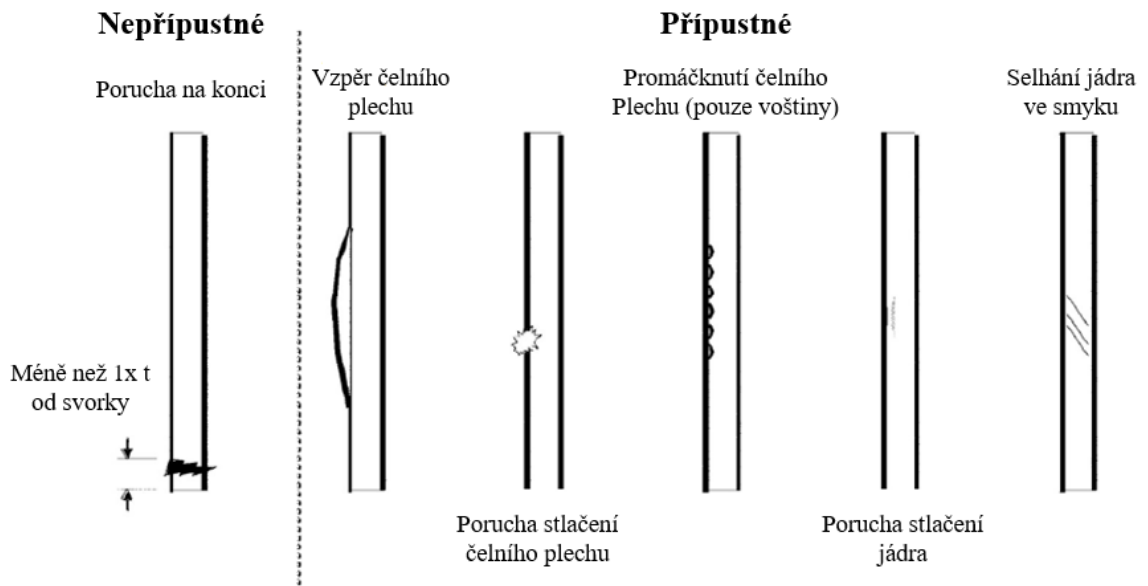
Pro stanovení pevnosti a modulu pružnosti v tlaku sendvičových materiálů se provádí zkoušky tlakem v plochem směru nebo ve směru hran. Jejich provedení lze vidět na Obrázku 31.

Zkouška v plochem směru (ASTM C365) je velmi důležitá z důvodu mnohem nižších mechanických vlastností materiálu jádra. Cílem je stanovit modul pružnosti a pevnost v tlaku sendvičových jader. Vzorek je umístěn mezi přesně vyrovnané lisovací desky a je zatěžován až do porušení. Zkouška je použitelná pro všechny typy materiálů jádra s čelním pláštěm i bez.

Zkouška ve směru hran (ASTM C364) hodnotí únosnost sendvičové konstrukce v líných listů. Zkouška je také použitelná pro všechny typy jádra. Vzorky se upínají nebo lepí do koncových podpěr. Při upínání je potřeba pečlivá příprava koncových ploch vzorků. Při výpočtech napětí a pevnosti se zohledňuje pouze plocha průřezu čelních desek. Je nutné také znát jejich tloušťku. K přípustnému selhání dochází mimo sevřené nebo zalité konce vzorku viz Obrázek 32. [37,38,39]



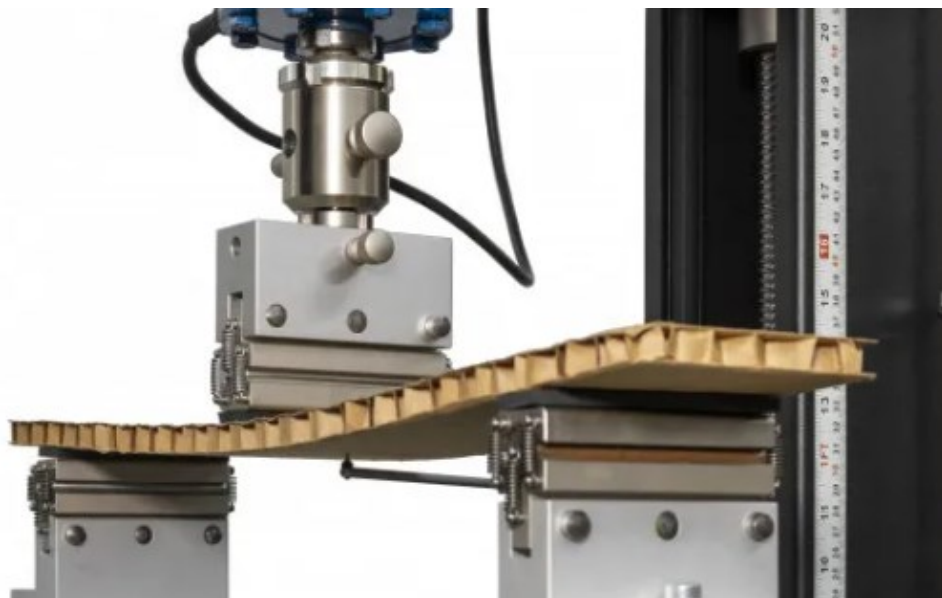
Obrázek 31 Tlaková zkouška v plochem směru (vlevo) a tlaková zkouška ve směru hran (vpravo) [37,38]



Obrázek 32 Znárodnění přípustný a nepřipustných poruch [39]

### 5.3 Zkouška v ohybu (ASTM D7249)

Standardní konfigurace zkoušky v ohybu pro sendvičové konstrukce je čtyřbodový ohyb, proto je k zatížení zkušebnímu vzorku zapotřebí čtyřbodové ohybové zařízení. Předpokládaným typem porušení je selhání čelního plechu. Slouží k získání pevnosti a tuhosti čelních desek sendvičových panelů a na získání údajů o zatížení a průhybu. [38]



Obrázek 33 Nastavení zkoušky v ohybu [38]

Další metodou je zkouška ohybem krátkého nosníku, kterou lze použít pro měření smyku jádra. U této zkoušky je tedy přípustné porušení jádra ve smyku. Zkoušky jsou vhodné pro všechny typy jader. Vzdálenosti podpěr a zatěžovacích rozpětí se pro každou normu liší. [38,39]

#### 5.4 Smyková zkouška (ASTM C273)

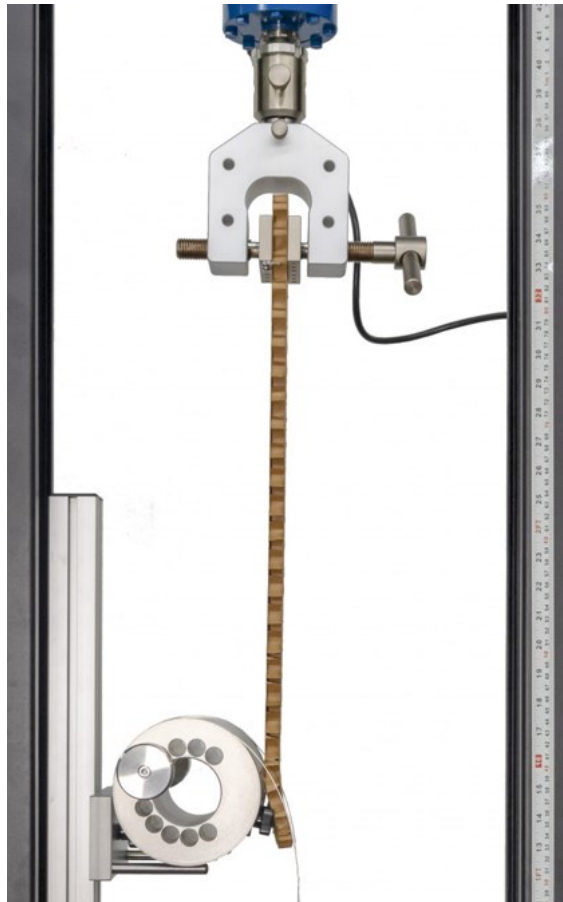
Smykové vlastnosti jsou pro konstrukci sendvičových panelů zásadní. Jádro sendviče je vystaveno především smykovému zatížení. Přestože musí být velmi lehké, musí vykazovat dostatečné smykové vlastnosti. Tato zkouška určuje smykové vlastnosti jádrových materiálů sendvičových konstrukcí spojené se smykovým narušením rovin rovnoběžných s obklady. Smyková síla působí na sendvičové jádro nebo sendvičový panel rovnoběžně s rovinou jeho čel. Síla se přenáší přes vzorek pomocí lepených zatěžovacích desek. Výsledkem posunu je smyková síla působící na sendvičové jádro. Zkoušku lze provádět v tahu i tlaku. Tato zkušební metoda zahrnuje také stanovení modulu pružnosti ve smyku spojeného s deformacemi v rovině normály k lícům. Modul pružnosti ve smyku jádra, napětí a pevnost se uvádějí ve vztahu ke jmenovité smykové ploše jádra. [38,39]



Obrázek 34 Smyková zkouška [39]

### 5.5 Odlupovací zkouška (ASTM D1781)

Tato zkouška slouží ke zjištění adheze (pevnosti) spoje mezi čelní deskou a jádrem. Nejpoužívanějším typem pro sendvičové materiály je odlupování na navíjecím bubnu (viz Obrázek 35). Buben pro odlupování zajišťuje, že na rozhraní čelní desky a jádra působí pouze "odlupovací" síly, čímž je zajištěno přesné měření odolnosti proti odlupování. [37,38]



Obrázek 35 Odlupovací zkouška na navíjecím bubnu [38]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je zvolení vhodné materiálové skladby a návrh technologického postupu prototypu dílu pro zvolenou aplikaci. Při výběru materiálové skladby je třeba zohlednit dostačující mechanické vlastnosti a další faktory.

Cíle diplomové práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Návrh materiálové skladby sendvičových panelů z předimpregnovaného materiálu s uhlíkovou tkaninou a epoxidovou pryskyřicí.
2. Výroba sendvičových panelů pro zkušební tělíska technologií ručního kladení a vytvrzení pomocí lisování.
3. Provedení a vyhodnocení zkoušky třibodovým ohybem dle ASTM C393, tahové zkoušky na plocho dle ASTM C297 a únavové zkoušky cyklickým ohybem pro jednotlivé typy zkušebních tělísek.
4. Ověření tvarovatelnosti a obrobitelnosti zvolených polymerních pěn.
5. Zvolení vhodné materiálové skladby a návrh technologického postupu prototypu dílu pro zvolenou aplikaci.
6. Závěr.



## 7 NÁVRH A VÝROBA SENDVIČOVÝCH PANELŮ

Před samotnou výrobou bylo nejdříve nutné navrhnout materiálové složení a skladbu panelů. Poté byly panely vyrobeny metodou lisování a vyřezány z nich zkušební tělíska pro mechanické testování.

### 7.1 Návrh materiálové skladby a složení

Pro výrobu všech sendvičových panelů byl vybrán uhlíkový prepreg s epoxidovou pryskyřicí pod označením GG204P IMP509. V jednom panelu byla použita vrstva skelného prepregu VV106. Jako jádro byly použity PMI pěny Cascell 30 RS, Cascell 50 RS [40] a PET pěna Airex T90.60 [41]. Rozměr panelů byl zvolen podle potřebného počtu vzorků na 545x280 mm. Další informace o skladbě a složení lze vidět v následující Tabulce 4.

Tabulka 4 Materiálová skladba a složení panelů

Panel č.	Prepreg	Jádro	Skladba	Vrstvy GG204P	Vrstvy VV106	Značení
1	GG 204P	Cascell 30 RS	[0/45/0/jádro/0/45/0]	6	0	<b>RS30</b>
2	GG 204P	Cascell 50 RS	[0/45/0/jádro/0/45/0]	6	0	<b>RS50</b>
3	GG 204P, VV106 (G)	Cascell 50 RS	[0/45/0/0G/jádro/0G/0/45/0]	6	2	<b>RS50+G</b>
4	GG 204P	Airex T90.60	[0/45/0/jádro/0/45/0]	6	0	<b>T90.60</b>

Dále byly vypočítány teoretické tloušťky sendvičových panelů, které lze zjistit podle následující rovnice:

$$T \approx 0,85 \cdot (m_s \cdot n) + t \quad (1)$$

Kde: T...tloušťka výrobku [mm]

t...tloušťka jádra [mm]

$m_s$ ...plošná hmotnost [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]

n...počet vrstev [-]

Tabulka 5 Teoretické tloušťky vytvrzených sendvičových panelů

Panel	t [mm]	Tloušťka vytvrzené vrstvy GG204P [mm]	Tloušťka vytvrzené vrstvy VV106 [mm]	Tloušťka všech vrstev [mm]	T [mm]
RS30	10	0,187	0	1,122	11,122
RS50	10	0,187	0	1,122	11,122
RS50+G	10	0,187	0,0425	1,207	11,207
T90	10	0,187	0	1,122	11,122

## 7.2 Výroba sendvičových panelů

Po navržení materiálové skladby bylo možné panely vyrobit. Výrobní proces zahrnuje několik jednotlivých kroků, které budou podrobně popsány v následujících částech.

### 7.2.1 Příprava lisovacích desek

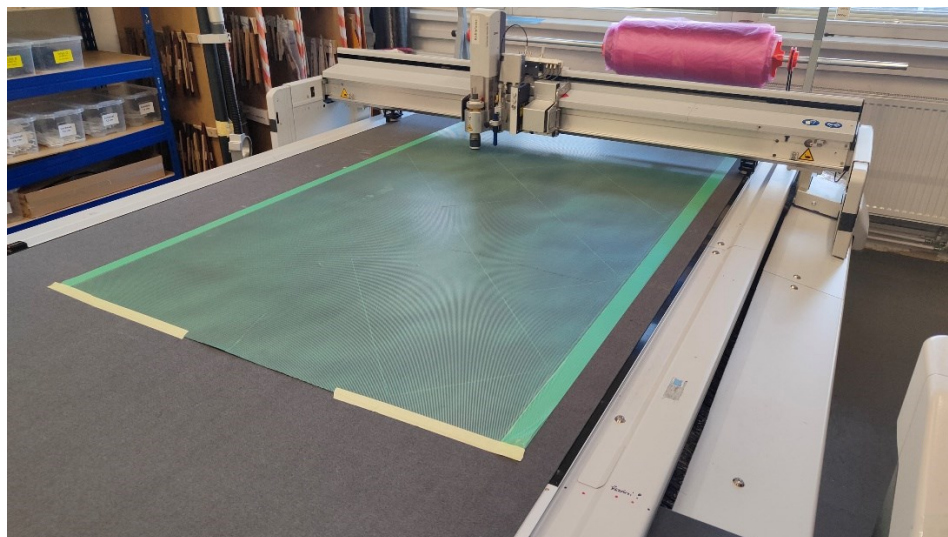
Lisovací desky, o rozměru 600x360 mm, byly vyrobeny z vysoce pevnostní hliníkové slitiny EN AW-7022, která je označována také pod obchodním názvem Certal. Desky byly dále broušeny pro dosažení rovinnosti. Na začátku výroby sendvičových panelů byly desky opatřeny plničem pórů ChemTrend 15 sealer EZ a separátorem PMR90 EZ podle technického listu.



Obrázek 36 Separace lisovacích desek

### 7.2.2 Stříhání prepregů

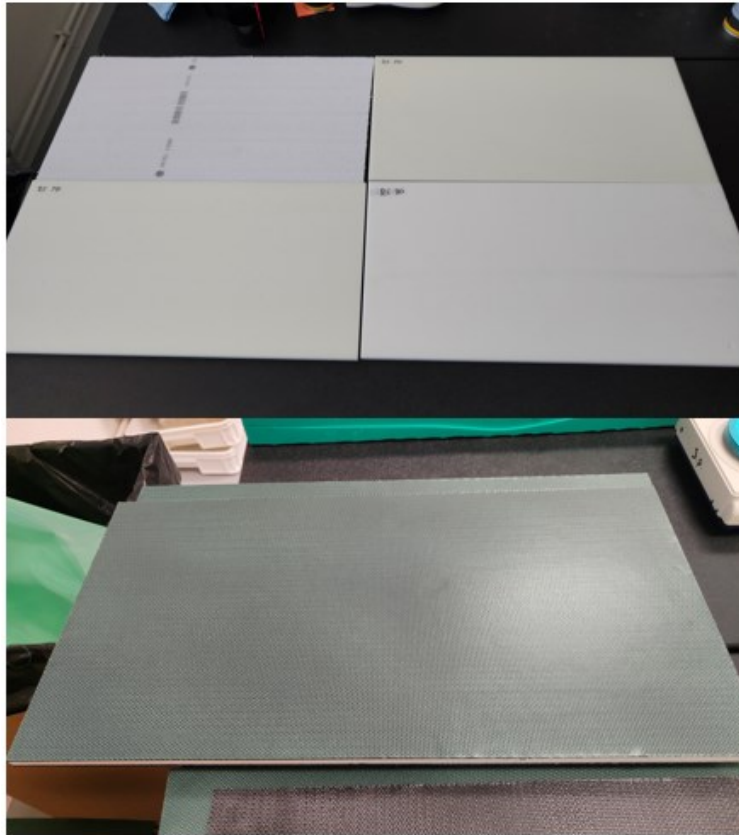
Nejprve byla ručně vystřižena potřebná délka prepregu. Ta byla znovu srolována a přenesena k řezacímu plotru. V programu byl nastaven nástřihový plán podle materiálové skladby a počtu vrstev. Poté se prepreg rozložil na pracovní pás plotru a konec se zalepil lepicí páskou. Nakonec se spustil program a vystřižené kusy prepregu se odebíraly z pásu.



*Obrázek 37 Stříhání prepregu na plotru*

### 7.2.3 Kladení prepregů

Po nastříhání prepregů bylo možné zahájit jejich kladení na pěnová jádra. Nejdříve byla pracovní plocha a jádra očištěna technickým lihem. Následně se již postupně strhávali ochranné fólie z prepregů a pokládali podle navržené materiálové skladby na jádro. Pomocí plastového válečku se vrstvy přitlačovali k sobě a odstraňovali se vzduchové bubliny. Na poslední vrstvě prepregu byla ochranná fólie ponechána pro lepší manipulaci a následný debulking. Po vyhotovení první strany byla pěna otočena a stejným způsobem nakladena i strana druhá.

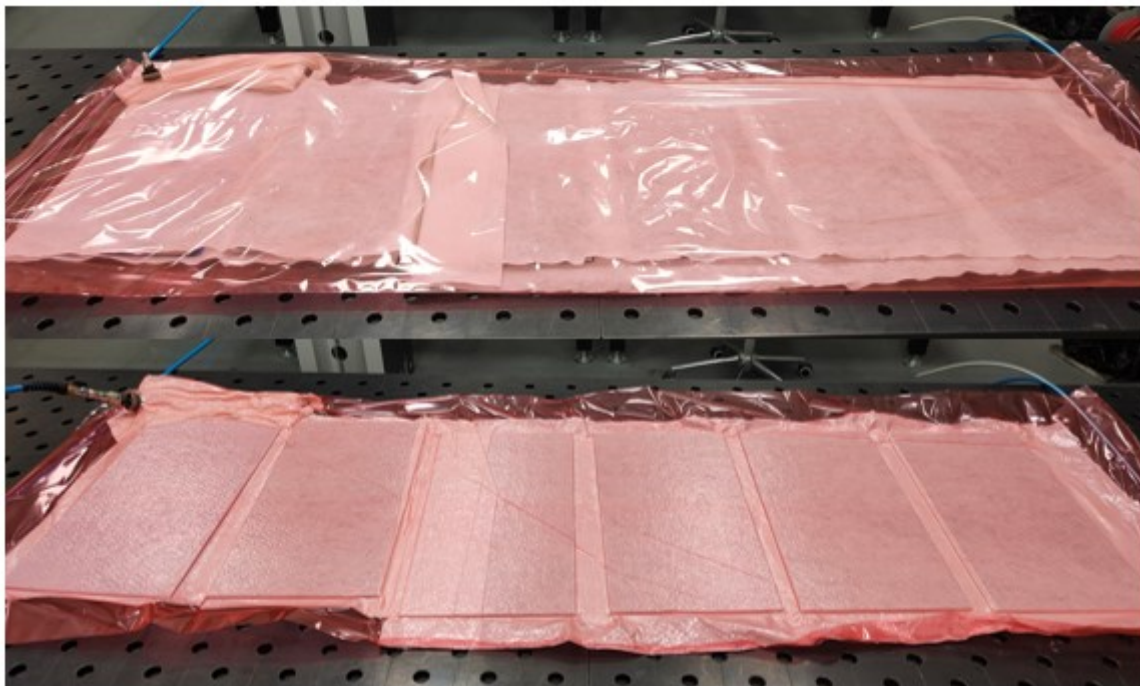


*Obrázek 38 Kladení prepregů na pěnová jádra*

#### **7.2.4 Debulking**

Dalším krokem při výrobě byl takzvaný debulking. Jedná se o proces, kdy se aplikuje vakuum na sendvičové panely. Používá se pro odstranění vzduchových kapes, které by mohly snížit pevnost výsledného sendvičového panelu. Debulking může také přispět k lepší kvalitě povrchu.

Přichystané sendvičové panely byly zabaleny do odsávací rohože a vloženy do vakuovacího pytle. Na pytel se napojil vakuovací ventil a oba konce se utěsnili „Quick lock“ těsněním. K ventilu byla připojena hadice a následně se aplikovalo vakuum po dobu 15 minut. Hodnota podtlaku se pohybovala kolem -0,94 barů. Po ukončení debulkingu se panely vybalily a byly přeneseny k lisu.



Obrázek 39 Panely před aplikací vakua (nahore) a během aplikace vakua (dole)

### 7.2.5 Vytvrzení sendvičových panelů

Vytvrzování sendvičových panelů bylo prováděno na elektrickém lise E-FORM X1 od společnosti Meccatronica. Lisovací síla byla nastavena na 10 tun a aplikována po dobu 11 minut. Teplota spodní a horní lisovací desky se seřídila na 135 °C. Další nastavení lisovacího programu lze vidět v následující Tabulce 6. Nejprve se ze sendvičových panelů odstranily ochranné fólie a následně se vložili mezi lisovací desky a spustil se program. Po dokončení programu se panely vyjmuly a nechaly vychladnout.

Tabulka 6 Nastavení lisovacího programu

<b>Horní poloha</b>	450 mm
<b>Poloha zavření</b>	77 mm
<b>Poloha tlaku</b>	73,9 mm
<b>Poloha otevření</b>	450 mm
<b>Rychlost tlaku</b>	0,1 mm/s
<b>Rychlost otevření</b>	30 mm/s



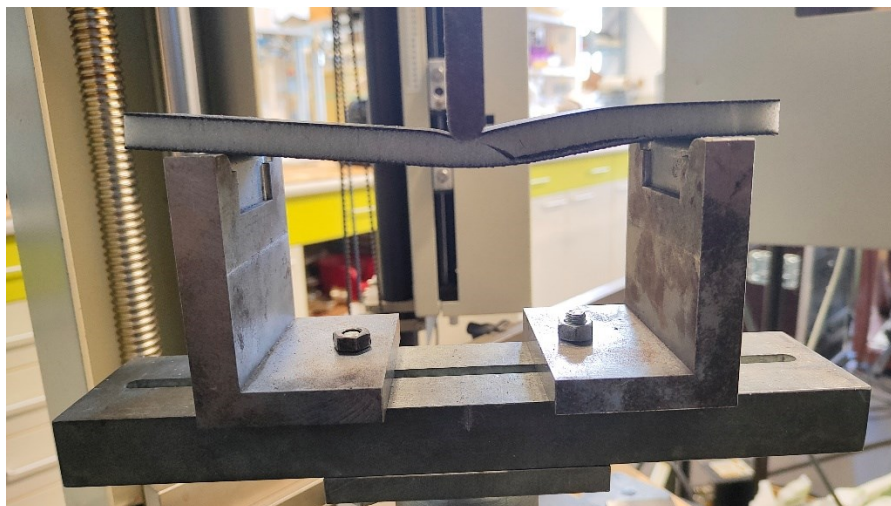
Obrázek 40 a) Elektrický lis E-FORM XI; b) Vytváření panelu lisováním; c) Vytvářený sendvičový panel po vyjmutí z lisu

## 8 ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Pro porovnání sendvičových panelů s odlišnými polymerními pěnovými jádry byly provedeny mechanické zkoušky v laboratořích Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Jednalo se o zkoušky tříbodovým ohybem, cyklickým ohybem a tahem na plocho.

### 8.1 Zkouška tříbodovým ohybem

Ze sendvičových panelů byla pomocí pásové pily vyřezána zkušební tělíska o rozměrech 210 x 48 x 11,3 mm. Testování bylo realizováno na zkušební stroji Zwick 1456 podle americké normy ASTM C393 . Rozpětí podpěr bylo nastaveno na vzdálenost 160 mm.

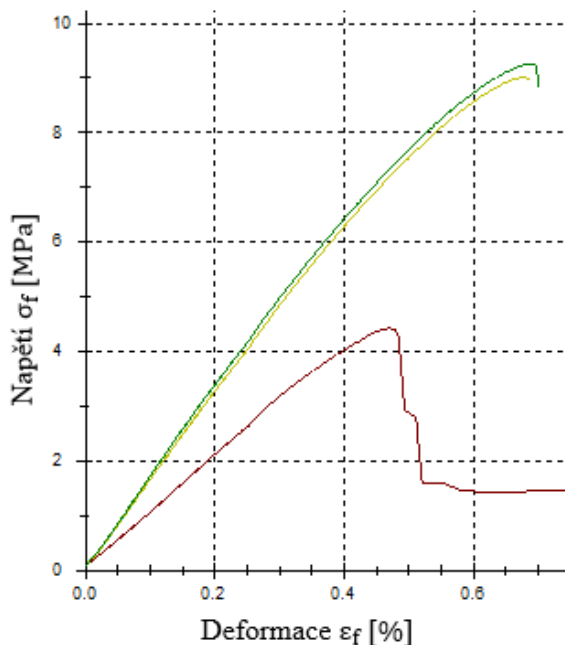


*Obrázek 41 Realizace zkoušky tříbodovým ohybem*

Zkušební tělíska je symetricky položeno na podpěry a poté je trnem ve středu aplikováno zatížení, dokud nedojde k porušení tělíska. Poté jsou vyhodnocovány a porovnávány hodnoty pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  [MPa], modulu pružnosti v ohybu  $E_f$  [MPa], případně deformace  $\varepsilon_f$  [%]

### 8.1.1 Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem

- Výsledky zkušebních tělísek RS30



Obrázek 42 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS30

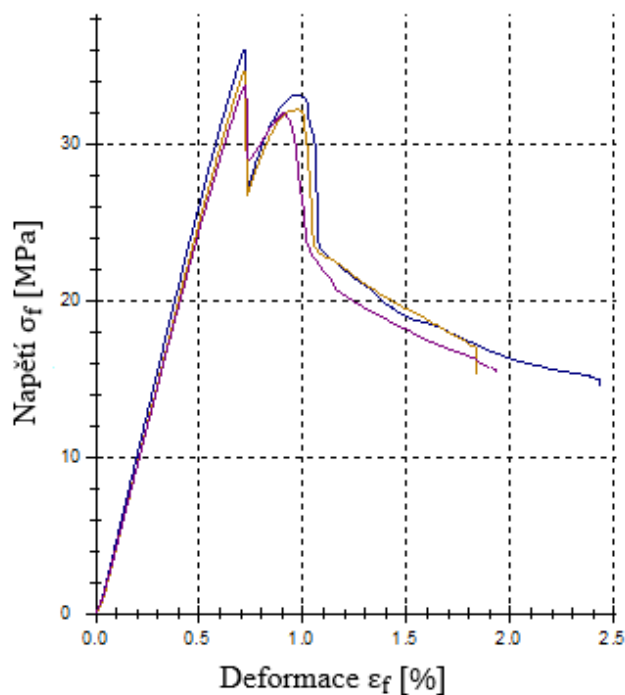
Tabulka 7 Naměřená data ze zkoušky tříbodovým ohybem tělísek RS30

n	$F_{\max}$ [N]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	W [Nmm]	$S_f$ [mm]	$\epsilon_f$ [%]
1	230	1610	9,0	336,0	2,6	0,69
2	113	1040	4,4	109,6	1,8	0,48
3	236	1660	9,2	352,5	2,6	0,69
$\bar{x}$	233	1635	9,12	344,2	2,6	0,69
s	3	25	0,12	8,3	0,0	0,00
$v$ [%]	1	2	1,29	2,4	0,0	0,00

Na Obrázku 42 lze vidět průběh měření a v Tabulce 7 naměřená data zkušebních tělísek RS30. Aritmetický průměr dat se směrodatnou odchylkou činí pro modul pružnosti v ohybu  $E_f$  1635 ± 25 MPa, pevnost v ohybu  $\sigma_f$  9,12 ± 0,12 MPa, pro vykonanou práci W 344,2 ± 8,3 Nmm a deformaci ohybem  $\epsilon_f$  0,69 %. Tělísko 2 v těchto výpočtech zahrnuto nebylo z důvodu velké odchylky od ostatních tělísek, která byla způsobena nejspíše vnitřní vadou v materiálu.



- Výsledky zkušebních tělísek RS50



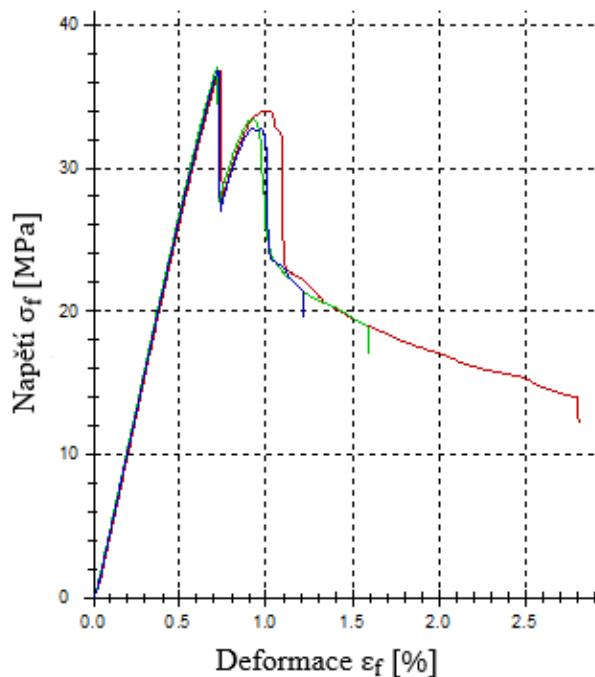
Obrázek 43 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS50

Tabulka 8 Naměřená data ze zkoušky tříbodovým ohybem tělísek RS50

n	$F_{\max}$ [N]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	W [Nmm]	$S_f$ [mm]	$\epsilon_f$ [%]
1	921	5470	36,1	1286,9	2,7	0,72
2	885	5260	34,7	1216,9	2,7	0,72
3	861	5140	33,7	1198,3	2,7	0,72
$\bar{x}$	889	5290	34,8	1234,0	2,7	0,72
s	30	165	1,2	44,3	0,0	0,00
<b>v [%]</b>	3	3	3,4	3,6	0,0	0,00

Na Obrázku 43 lze sledovat průběh měření a v Tabulce 8 naměřená data zkušebních tělísek RS50. Aritmetický průměr dat se směrodatnou odchylkou činí pro modul pružnosti v ohybu  $E_f 5290 \pm 165$  MPa, pevnost v ohybu  $\sigma_f 34,8 \pm 1,2$  MPa, pro vykonanou práci  $W 1234 \pm 44,3$  Nmm a deformaci ohybem  $\epsilon_f 0,72$  %.

- Výsledky zkušebních tělísek RS50+G



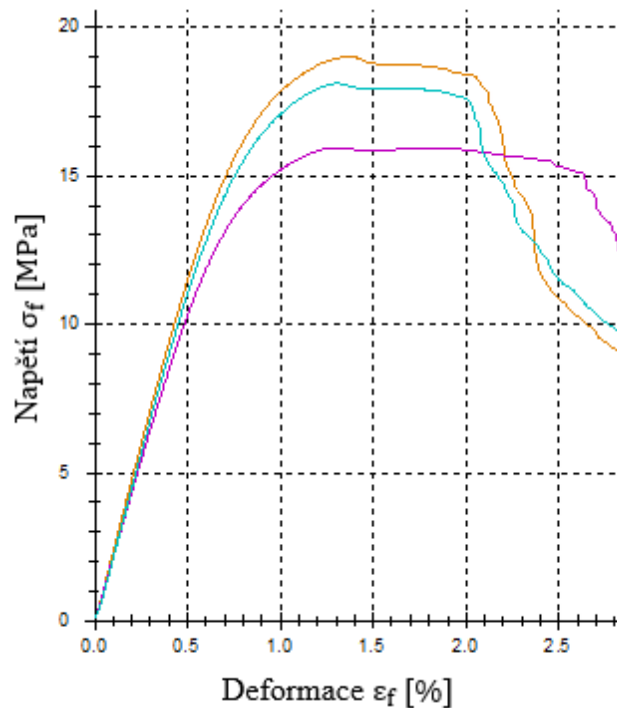
Obrázek 44 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS50+G

Tabulka 9 Naměřená data ze zkoušky tříbodovým ohybem tělísek RS50+G

n	$F_{\max}$ [N]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	W [Nmm]	$S_f$ [mm]	$\epsilon_f$ [%]
1	942	5520	36,9	1332,2	2,8	0,74
2	945	5600	37,0	1318,6	2,7	0,72
3	939	5560	36,8	1312,3	2,7	0,72
$\bar{x}$	942	5560	36,9	1321,04	2,7	0,72
s	2	20	0,1	10,0	0,0	0,01
<b>v [%]</b>	0,2	0,4	0,2	0,8	1,8	1,83

Na Obrázku 44 je možné vidět průběh měření a v Tabulce 9 naměřená data zkušebních tělísek RS50+G. Aritmetický průměr dat se směrodatnou odchylkou činí pro modul pružnosti v ohybu  $E_f$   $5560 \pm 20$  MPa, pevnost v ohybu  $\sigma_f$   $36,9 \pm 0,1$  MPa, pro vykonanou práci W  $1321,04 \pm 10$  Nmm a deformaci ohybem  $\epsilon_f$   $0,72 \pm 0,01$  %.

- Výsledky zkušebních tělísek T90.60



Obrázek 45 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci tělísek T90.60

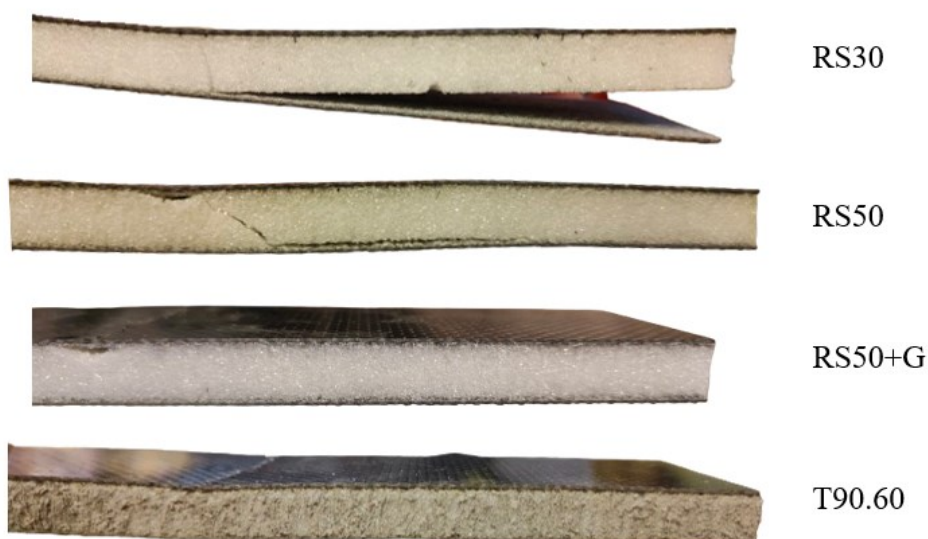
Tabulka 10 Naměřená data ze zkoušky tříbodovým ohybem tělísek T90.60

n	$F_{\max}$ [N]	$E_f$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	W [Nmm]	$S_f$ [mm]	$\epsilon_f$ [%]
1	485	2430	19,0	1694,0	5,2	1,38
2	407	2190	15,9	2062,7	6,7	1,77
3	462	2360	18,1	1482,1	4,9	1,30
$\bar{x}$	451	2327	17,7	1746,3	5,6	1,48
s	12	35	0,5	105,9	0,15	0,04
<b>v [%]</b>	2,5	1,5	2,5	6,1	2,7	2,68

Na Obrázku 45 je možné pozorovat průběh měření a v Tabulce 10 naměřená data zkušebních tělísek T90.60. Aritmetický průměr dat se směrodatnou odchylkou je pro modul pružnosti v ohybu  $E_f$   $2327 \pm 35$  MPa, pevnost v ohybu  $\sigma_f$   $17,7 \pm 0,5$  MPa, pro vykonanou práci W  $1746,3 \pm 105,9$  Nmm a deformaci ohybem  $\epsilon_f$   $1,48 \pm 0,04$  %.

### 8.1.2 Poruchy zkušebních tělísek

Na Obrázku 46 lze vidět poruchy, ke kterým docházelo během testování u jednotlivých typů zkušebních tělísek. U tělísek RS30 docházelo k porušení jádra ve smyku a k následné delaminaci celého uhlíkového krycího pláště. U tělísek RS50 je vidět, že je jádro porušeno na tlak v místě zatížení. Následně docházelo k poruše ve smyku a k částečné delaminaci. Tělíska RS50+G, kde je oproti RS50 přidána vrstva skelného prepregu, byla porušena pouze stlačením jádra a krycího materiálu. K porušení smykem ani k delaminaci nedocházelo. To je nejspíše způsobené právě skelným prepregem, který by měl při této skladbě zvyšovat adhezi mezi jádrem a krycím materiálem. Stejnou poruchu jako tělíska RS50+G vykazovala také zkušební tělíska T90.60.

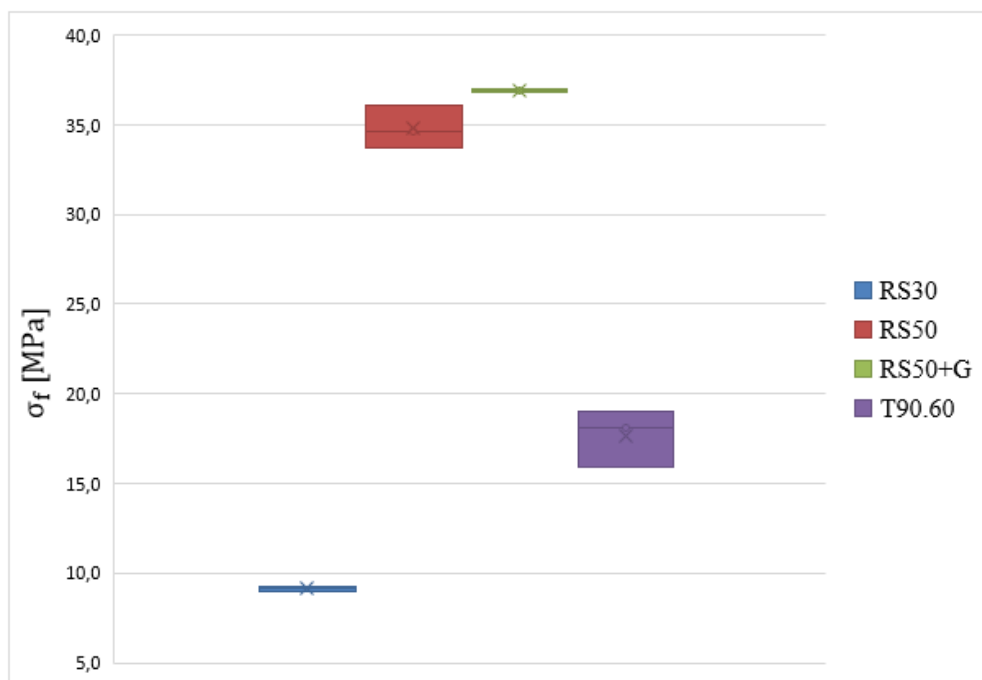


*Obrázek 46 Zobrazení poruch jednotlivých typů zkušebních tělísek*

### 8.1.3 Porovnání výsledků zkoušky třibodovým ohybem

Z Obrázku 47 a Obrázku 48 můžeme porovnat získané výsledky ze zkoušky třibodovým ohybem pro jednotlivé. Pro lepší názornost jsou výsledky graficky zobrazeny pomocí krabicových grafů, které ukazují rozložení hodnot v měřeném souboru pomocí kvartilů. Uvnitř každého obdélníku je znázorněn medián, zatímco aritmetický průměr je zobrazen křížkem.

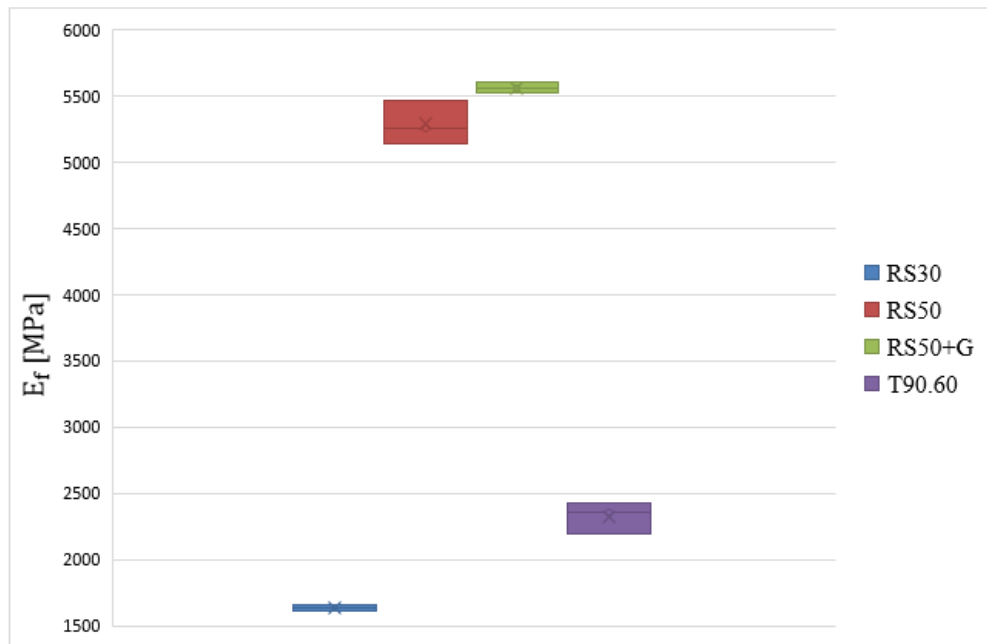
- **Pevnost v ohybu**



Obrázek 47 Krabicový graf znázorňující pevnost v ohybu zkušebních tělísek

Na Obrázku 47 lze vidět, že nejvyšší hodnoty pevnosti v ohybu vykazovala tělíska RS50 a RS50+G. Jedna vrstva skelného prepregu v tělískách RS50+G byla schopna zvýšit pevnost v ohybu oproti RS50 přibližně o 6 %. Tělíska T90.60 v pevnosti v ohybu poměrně výrazně zaostávala oproti tělískům RS50 a RS50+G. Nejmenší hodnotu pevnosti v ohybu však měla tělíska RS30. To může být, ale dáno nízkou adhezí mezi jádrem a krycím materiálem, protože u těchto vzorků docházelo při testování k velké delaminaci.

- Modul pružnosti v ohybu



Obrázek 48 Krabicový graf znázorňující modul pružnosti v ohybu zkušebních tělísek

Na Obrázku 48 lze pozorovat, že výsledky porovnání modulu pružnosti v ohybu jednotlivých typů tělísek jsou téměř identické s výsledky pevnosti v ohybu. To naznačuje, že nejvyšší modul pružnosti v ohybu měla tělíska RS50+G, následovaná tělísky RS50. Za nimi s poměrně velkým odstupem byly vzorky T90.60, zatímco nejnižší modul pružnosti v ohybu je pozorován u tělísek RS30.

## 8.2 Tahová zkouška na plocho

Z panelů byla nařezána zkušební tělíska o rozměrech 50 x 50 mm. Testování bylo taktéž prováděno na zkušebním stroji Zwick 1456 dle normy ASTM C297. Zkušební tělíska byla lepena na zatěžovací bloky dvousložkovým epoxidovým lepidlem SCOTCH-WELD DP490. Rychlost posunu hlavy stroje během měření byla nastavena na 1 mm/min. Testování probíhalo až do porušení tělesa (viz Obrázek 49) a následně byla vyhodnocována pevnost v tahu na plocho vycházející z následujícího vztahu:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{S} \quad (2)$$

Kde:  $\sigma_t$ ... pevnost v tahu na plocho [MPa]

$F_t$ ... tahová síla [N]

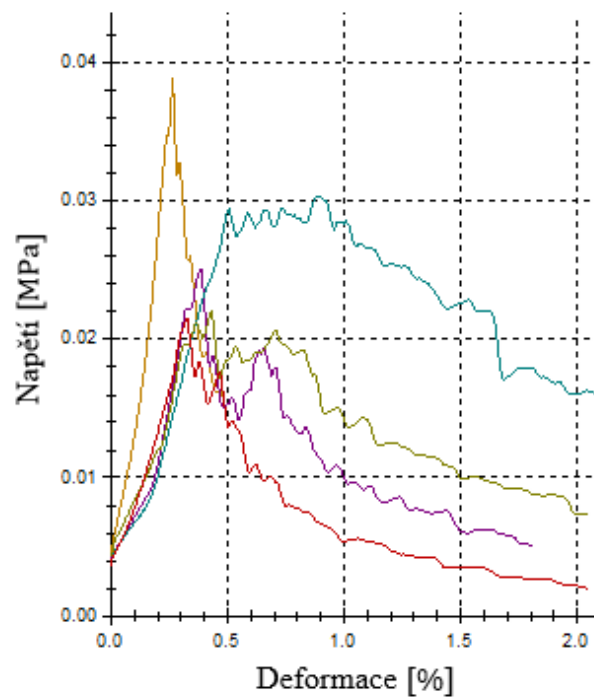
S... plocha průřezu [mm<sup>2</sup>]



Obrázek 49 Realizace tahové zkoušky na plocho a porušení zkušebního tělesa

### 8.2.1 Výsledky tahové zkoušky na plocho

- Výsledky zkušebních tělísek RS30

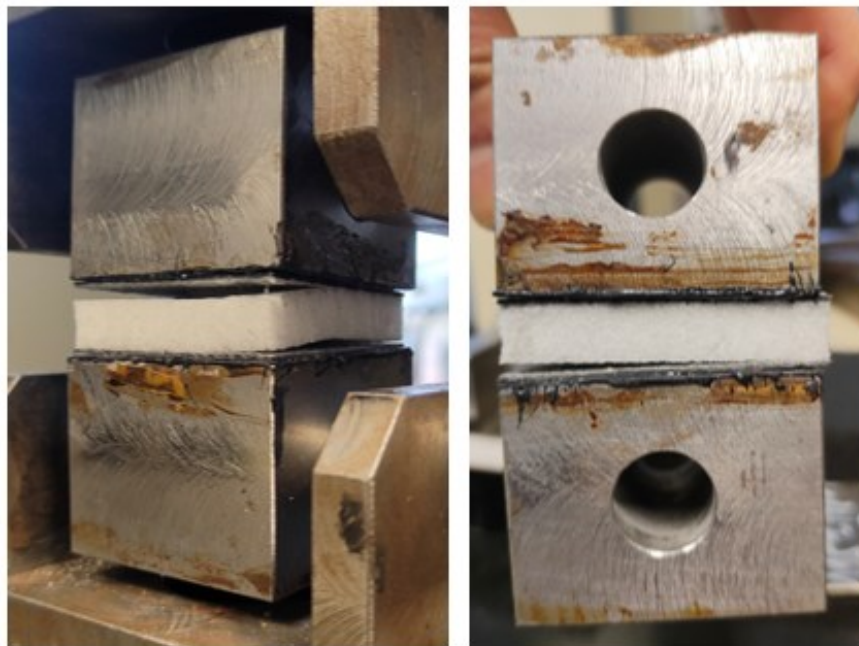


Obrázek 50 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS30

Tabulka 11 Naměřená data z tahové zkoušky na plocho pro tělíska RS30

n	F <sub>max</sub> [N]	σ <sub>t</sub> [MPa]
1	54	0,022
2	76	0,030
3	98	0,039
4	55	0,022
5	62	0,025
$\bar{x}$	69	0,028
s	16	0,007
v [%]	24	23,902

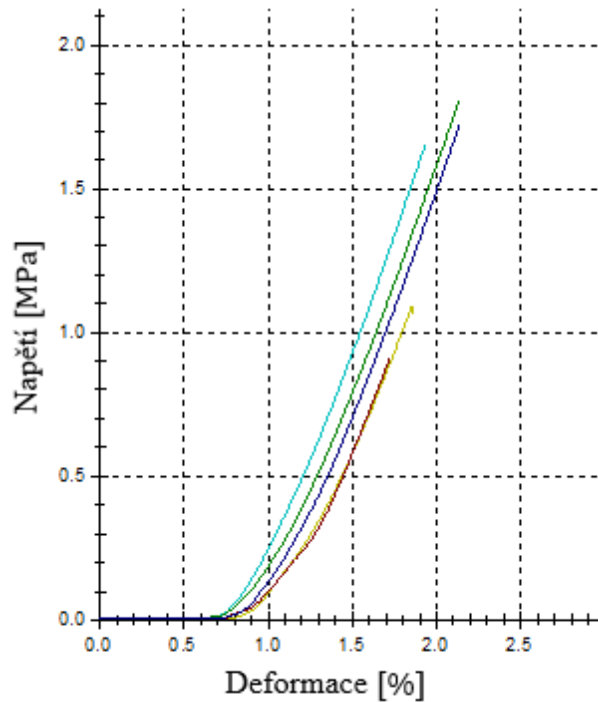
Na Obrázku 50 lze vidět průběh měření a v Tabulce 11 naměřená data z tahové zkoušky na plocho pro tělíska RS30. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou činí pro pevnost v tahu  $\sigma_t$  0,028 ± 0,007 MPa. Hodnoty jsou nízké, protože při testování nedocházelo k porušení jádra, ale k delaminaci krycího materiálu od jádra viz Obrázek 51.



Obrázek 51 Příklady delaminace zkušebních tělísek RS30



- Výsledky zkušebních tělísek RS50



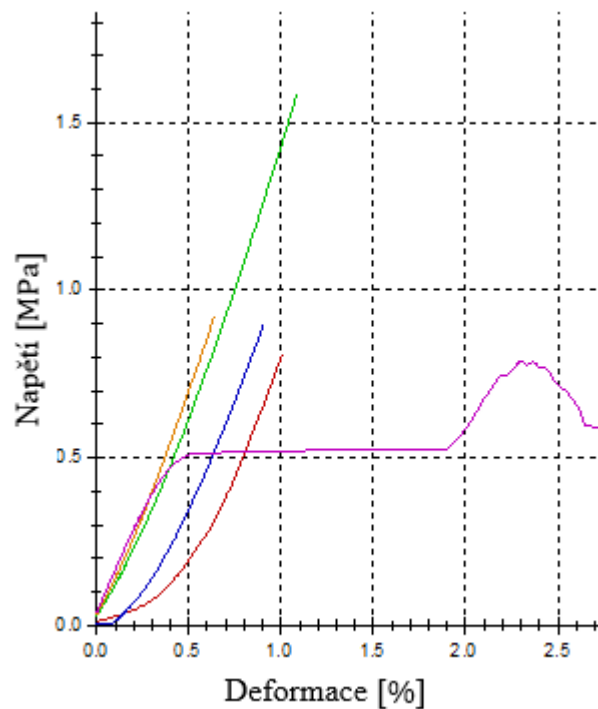
Obrázek 52 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS50

Tabulka 12 Naměřená data z tahové zkoušky na plochu pro tělíska RS50

n	$F_{\max}$ [N]	$\sigma_t$ [MPa]
1	4140	1,66
2	2650	1,06
3	2290	0,92
4	4520	1,81
5	4310	1,72
$\bar{x}$	3582	1,43
s	923	0,37
$v$ [%]	26	25,77

Na Obrázku 52 je možné pozorovat průběh měření a v Tabulce 12 naměřená data pro zkušební tělíska RS50 z tahové zkoušky na plochu. U těchto tělísek docházelo k porušení v jádře (viz Obrázek 49 vpravo), což znamená, že pevnost spoje mezi krycím materiálem a jádrem byla dostačující. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou činí pro pevnost v tahu  $\sigma_t 1,43 \pm 0,37$  MPa.

- Výsledky zkušebních tělísek RS50+G



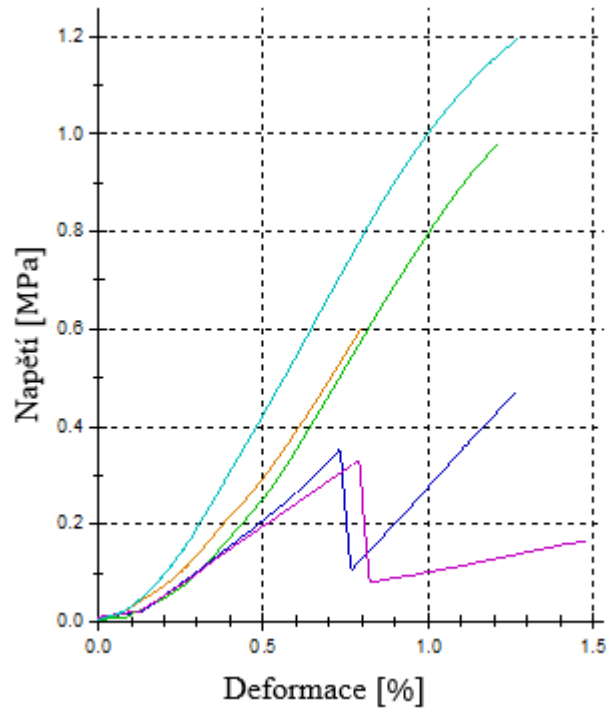
Obrázek 53 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS50+G

Tabulka 13 Naměřená data z tahové zkoušky na plocho pro tělíska RS50+G

n	$F_{\max}$ [N]	$\sigma_t$ [MPa]
1	2020	0,81
2	3960	1,58
3	2250	0,90
4	2300	0,92
5	1990	0,80
$\bar{x}$	2504	1,00
s	738	0,30
$v$ [%]	29	29,48

Na Obrázku 53 a v tabulce 13 jsou uvedena naměřená a zpracovaná data ze zkoušky tahem na plocho pro tělíska RS50+G. I zde docházelo během měření k porušení jádra. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou činí pro pevnost v tahu  $\sigma_t$   $1,00 \pm 0,30$  MPa.

- Výsledky zkušebních tělísek T90.60

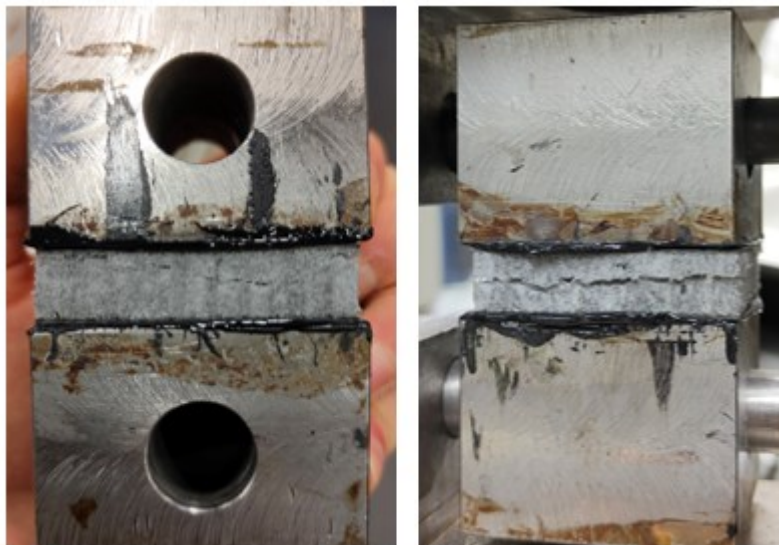


Obrázek 54 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci tělísek T90.60

Tabulka 14 Naměřená data z tahové zkoušky na plochu pro tělíska T90.60

n	$F_{\max}$ [N]	$\sigma_t$ [MPa]
1	2450	0,98
2	1180	0,47
3	1500	0,60
4	840	0,34
5	2990	1,20
$\bar{x}$	1792	0,72
s	804	0,32
<b>v [%]</b>	45	44,88

Na Obrázku 54 a v Tabulce 14 jsou uvedena naměřená a zpracovaná data ze zkoušky tahem na plochu pro zkušební tělíska T90.60. U těchto tělísek docházelo k porušení v jádře, což je patrné na Obrázku 55. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou činí pro pevnost v tahu  $\sigma_t 0,72 \pm 0,32$  MPa.

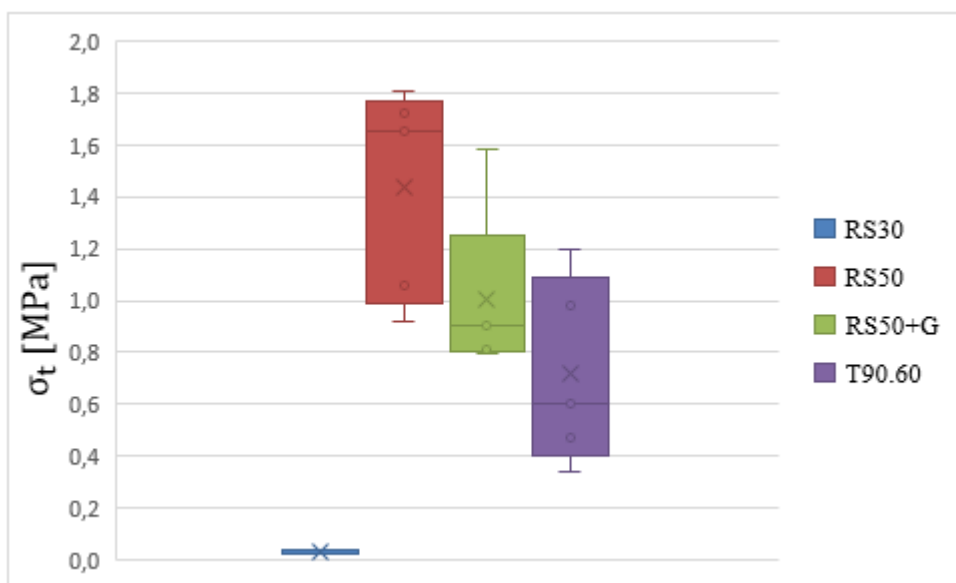


Obrázek 55 Porušení jádra zkušebních tělísek T90.60

### 8.2.2 Porovnání výsledků tahové zkoušky na plocho

Porovnání výsledků bylo taktéž provedeno za použití krabicových diagramů, které vizualizují data prostřednictvím jejich kvartilů. Dolní hranice obdélníku reprezentuje 1. kvartil a horní hranice 3. kvartil. Aritmetický průměr je zobrazen křížkem a medián je znázorněn vodorovnou čarou uvnitř obdélníku. Linie vyčnívající z obdélníku, známé jako "vousy", označují minimální a maximální hodnoty v souboru dat.

- **Pevnost v tahu na plocho**

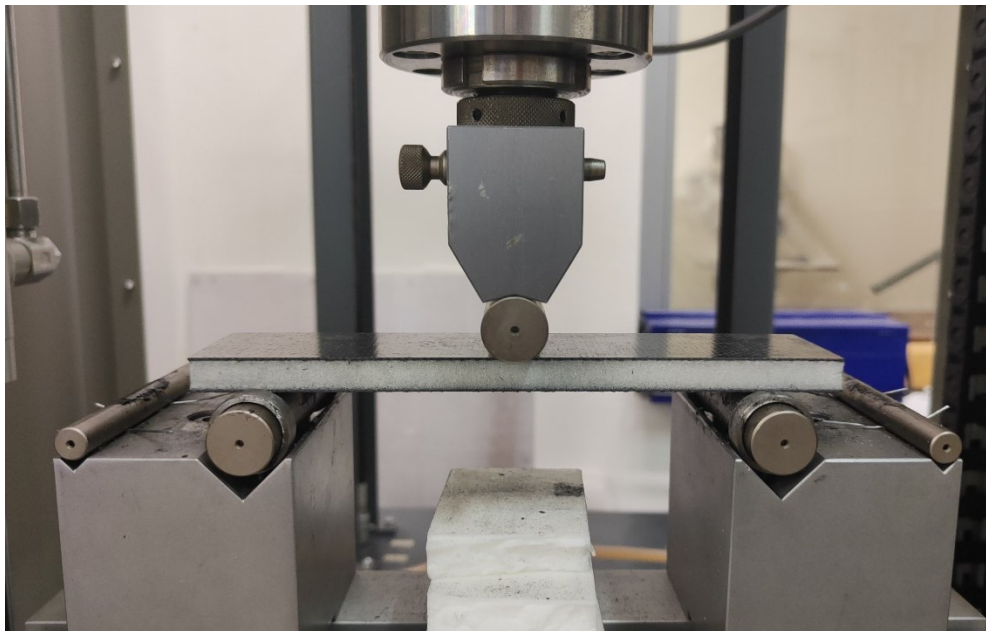


Obrázek 56 Krabicový graf znázorňující pevnost v tahu zkušebních tělísek

Z Obrázku 56 je zřejmé, že nejnižší hodnoty pevnosti v tahu vykazovala zkušební tělíska RS30. U nich však docházelo během testování k delaminaci, z důvodu nízké adheze mezi jádrem a krycím materiálem, a tak nebylo možné získat pevnost jádra v tahu. Adhezi by bylo možné zvýšit například použitím skelného prepregu nebo prepregovou adhezivní folií v první vrstvě materiálové skladby. U ostatní typů zkušebních tělísek docházelo k porušení v jádře, což značí, že zde byla pevnost spoje správná. Nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu vykazovala tělíska RS50, i když v tělískách RS50+G bylo použito stejné jádro. Tato odchylka může být způsobena odlišnou hustotou v objemu jádra. Dále v pořadí byla tělíska T90.60. To se dalo očekávat, protože PMI pěny by obecně měly vykazovat nejlepší mechanické vlastnosti ze všech polymerních pěn. Je možné také vidět, že rozsah hodnot byl poměrně velký, to může být dáno opět nehomogenitou materiálu jádra.

### 8.3 Únavová zkouška cyklickým ohybem

Testování únavových vlastností v ohybu probíhalo na stroji Zwick/Roell HC 25 Compact. Rozměr tělísek byl 210 x 48 x 11,3 mm. Rozteč podpěr byla nastavena shodně jako u zkoušky tříbodovým ohybem a to 160 mm. Testování probíhalo při frekvenci 5 Hz.



*Obrázek 57 Ustavení zkušebního tělíska před testováním únavových vlastností*

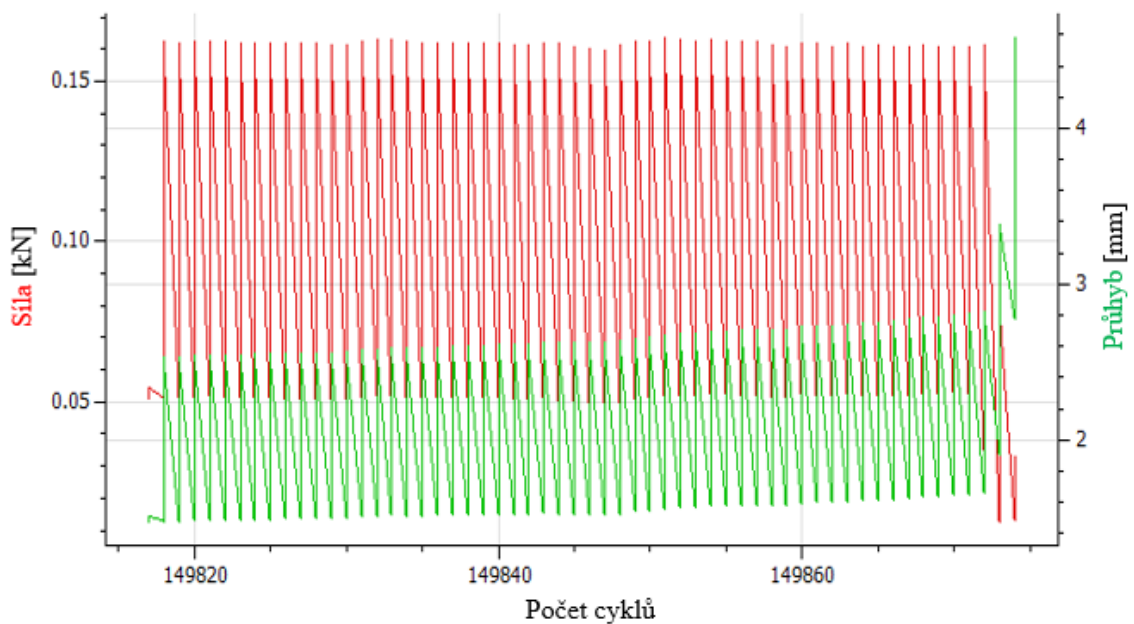
Patříčná zatížení byla stanovena z průměrných hodnot maximálních sil  $F_{\max}$  ze zkoušky tříbodovým ohybem, která lze vidět v následující Tabulce 15. Lze tedy vidět, že jednotlivé typy tělísek byly testovány na 3 různé zatížení. Tato zatížení budou dále porovnávána z hlediska počtu provedených cyklů.

Tabulka 15 Hodnoty zatěžujících sil při cyklické zkoušce

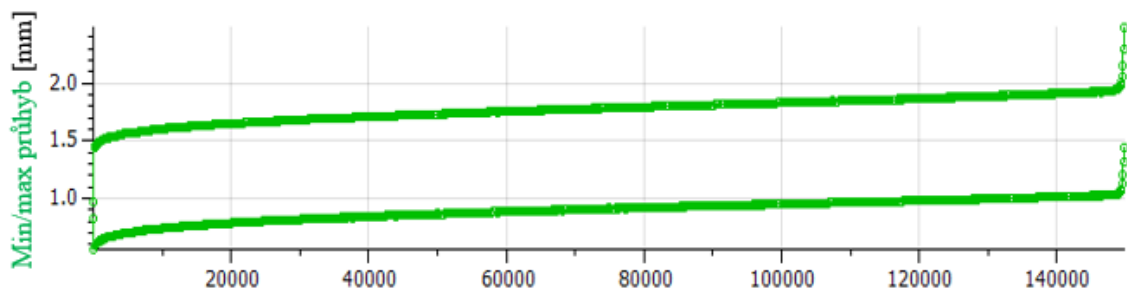
Typ tělíska	$F_{\max}$ [N]			
	70 %	75 %	85 %	90 %
RS30	163	175	198	-
RS50	622	667	756	-
RS50+G	660	707	801	-
T90.60	-	338	383	406

### 8.3.1 Výsledky únavové zkoušky cyklickým ohybem

- Zkušební tělíska RS30



Obrázek 58 Detail cyklů před porušením tělíska RS30 při zatížení  $F_{75\%}$



Obrázek 59 Záznam změny průhybu tělíska RS30 během cyklické zkoušky při  $F_{75\%}$

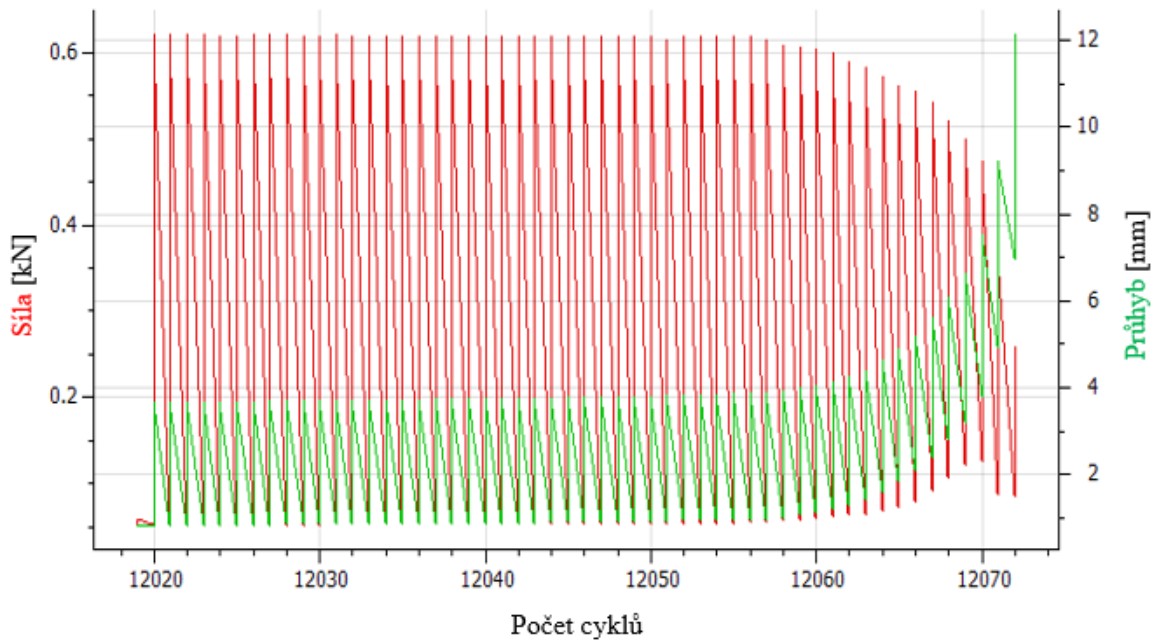
Na Obrázku 59 lze pozorovat záznam průhybu zkušebního tělíska RS30 při zatížení  $F_{75\%}$ . Velikost prohnutí výrazně narostla na začátku měření až na hodnotu přibližně 1,5 mm. Následně velikost průhybu roste pozvolna a klesá tuhost zkušebního tělíska. Jakmile se začne projevovat únava materiálu vlivem zatěžování, průhyb začne růst exponenciálně až do samotného porušení tělíska při průhybu kolem 2,4 mm. Detail posledních cyklů lze vidět na Obrázku 58.



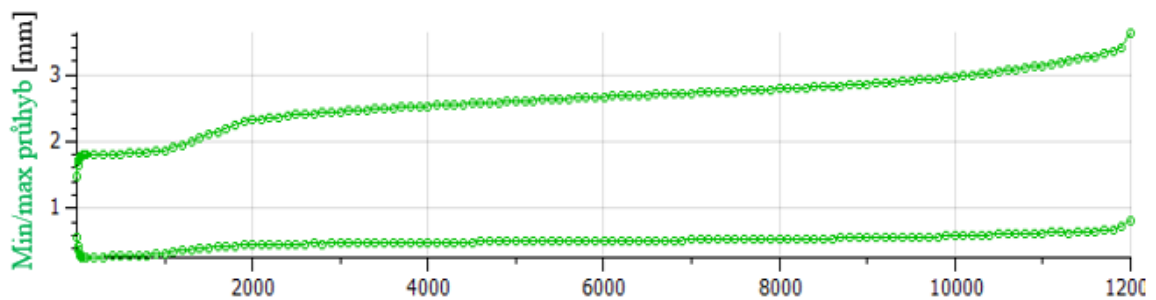
Obrázek 60 Porušení Tělíska RS30 při cyklickém ohybu

Na Obrázku 60 je patrné, že se i u zkoušky cyklickým ohybem projevovovala špatná adheze mezi jádrem a krycím materiálem tělísek RS30. Proto opět docházelo k delaminaci a k porušení jádra ve smyku.

- Zkušební tělíska RS50



Obrázek 61 Detail cyklů před porušením tělíska RS50 při zatížení  $F_{70\%}$



Obrázek 62 Záznam změny průhybu tělíska RS50 během cyklické zkoušky při  $F_{70\%}$

Ze záznamu průhybu na Obrázku 62 lze vidět, že při tisíci cyklech začalo docházet k výraznému nárůstu průhybu z hodnoty 1,9 mm na 2,2 mm a poté se nárůst ustálil. Jakmile se začala projevovat únava materiálu vlivem zatěžování, došlo k exponenciálnímu nárůstu průhybu na hodnotu 3,6 mm a tělísko se porušilo. Detail posledních cyklů je možné pozorovat na Obrázku 61.

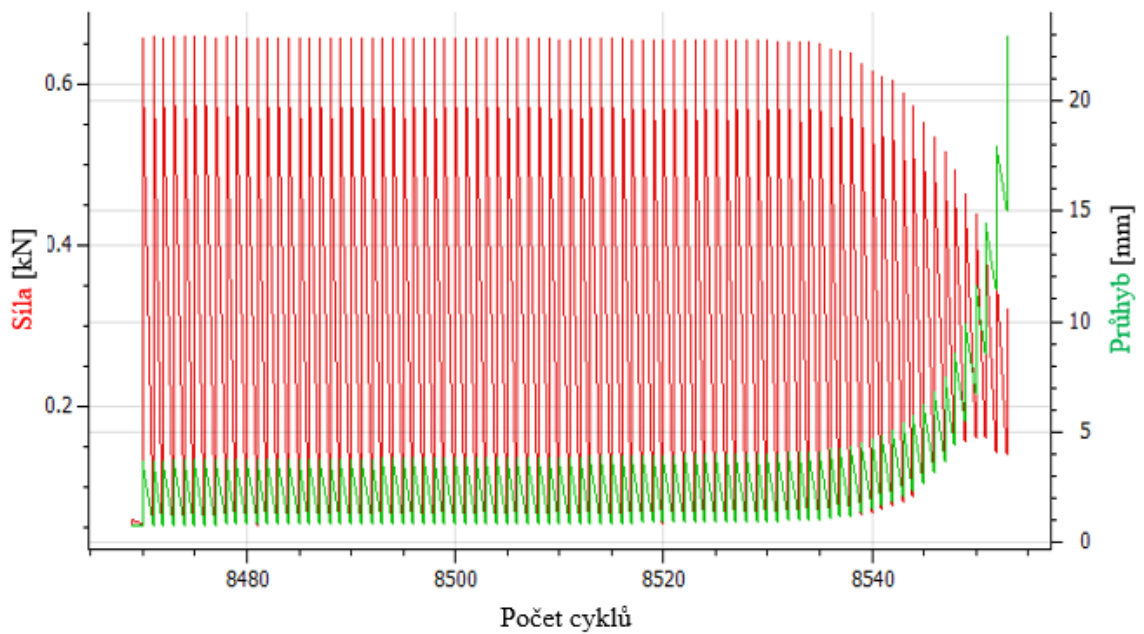
Typ porušení je patrný z Obrázku 63. S narůstající únavou zkušební tělíska došlo ke zhroucení uhlíkového krycího potahu. K únavovému lomu došlo na „tlakové“ straně tělíska.



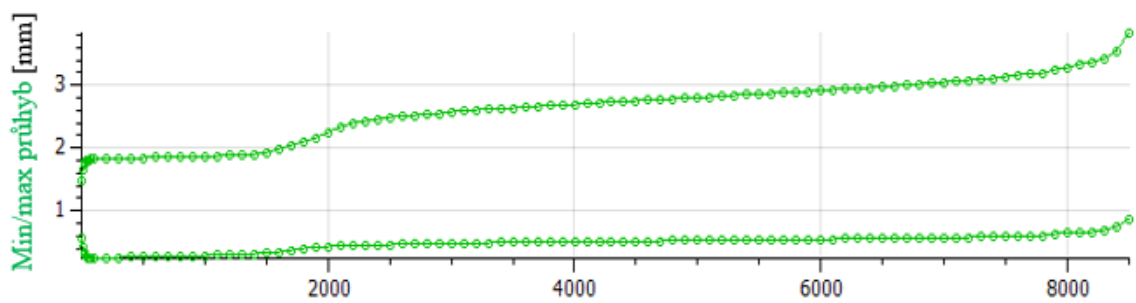


Obrázek 63 Únavový lom zkušební tělíska RS50

- Zkušební tělíska RS50+G



Obrázek 64 Detail cyklů před porušením tělíska RS50+G při zatížení  $F_{70\%}$



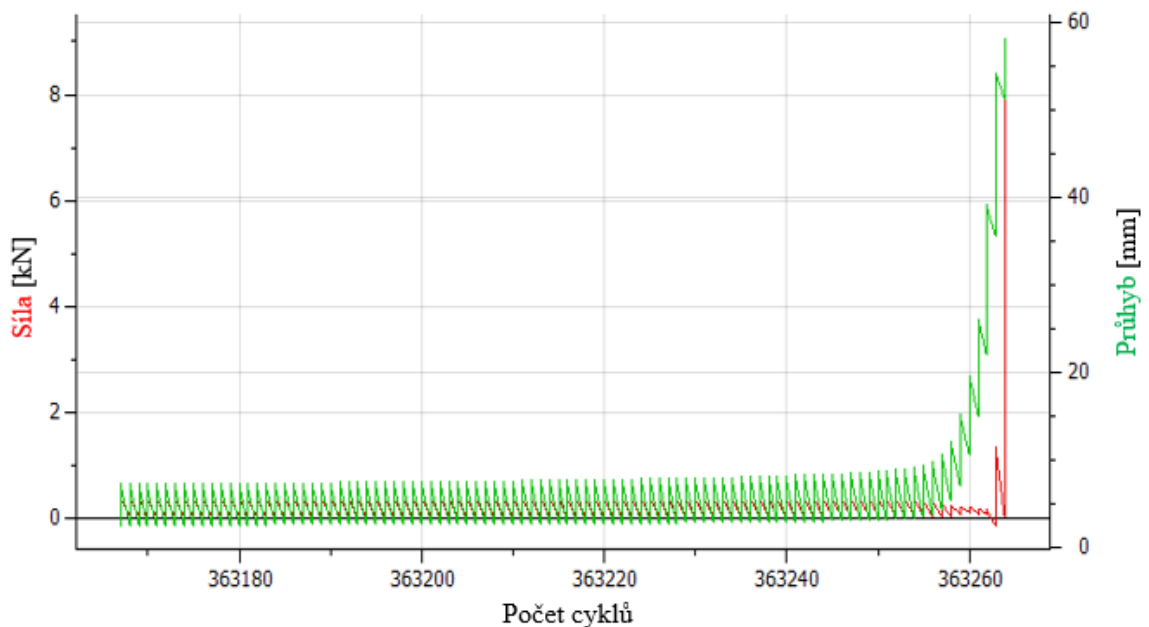
Obrázek 65 Záznam změny průhybu tělíska RS50+G během cyklické zkoušky při  $F_{70\%}$

Z Obrázku 64 a Obrázku 65 lze říci, že průběh testování a nárůst průhybu je téměř shodný jako u zkušebních tělísek RS50. U tělísek RS50+G také docházelo v průběhu testování k výraznému zvýšení průhybu. Zde to bylo mezi 1500 až 2000 cykly. Z tohoto důvodu lze říci, že vrstva skelného prepregu neměla výrazný vliv na výsledné únavové vlastnosti. Typ poruchy tělíska (viz Obrázek 66) byl taky shodný, opět docházelo k únavovému lomu uhlíkového krycího potahu na „tlakové“ straně a ke stlačení a vydrolení pěnového jádra.

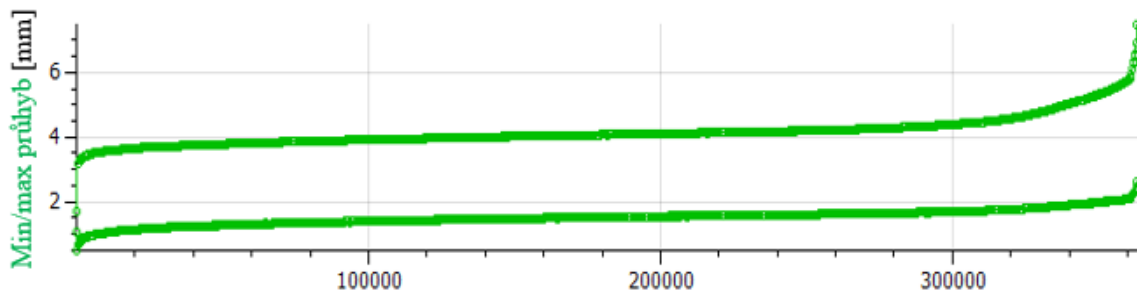


Obrázek 66 Únavový lom zkušebního tělíska RS50+G

- Zkušební tělíska T90.60



Obrázek 67 Detail cyklů před porušením tělíska při zatížení  $F_{90\%}$



Obrázek 68 Záznam změny průhybu tělíska T90.60 během cyklické zkoušky při  $F_{90\%}$

Na Obrázku 68 můžeme vidět, že po začátku testování průhyb vyrostl na hodnotu přibližně 3,5 mm a poté rostl pozvolna. Postupné cyklické zatěžování se začalo na zkušební tělíska T90.60 projevovat a únava materiálu stoupala. Jakmile bylo dosaženo 300 000 cyklů, průhyb začal exponenciálně růst až do porušení tělíska při průhybu kolem hodnoty 7 mm.



Obrázek 69 Únavový lom zkušebního tělíska T90.60

K porušení došlo na „tlakové“ straně, jak lze vidět na Obrázku 69. Poruchou byl únavový lom krycího materiálu, ke kterému však došlo při vyšším průhybu než u předchozích typů tělísek. Je to způsobené tvárnější pěnou Airex T90.60. Dále zde nedocházelo k vydrolení pěnového jádra, ale pouze ke stlačení.

Tabulka 16 Počet naměřených cyklů jednotlivých typů zkušebních tělísek

Typ	n	Počet cyklů			
		70 %	75 %	85 %	90 %
RS30	1	149873	354	133	-
	2	53954	938	81	-
RS50	1	8559	6517	866	-
	2	12072	856	484	-
RS50+G	1	8550	3587	338	-
	2	5945	3384	677	-
T90.60	1	-	502172 (bez porušení)	511925 (bez porušení)	391
	2	-	507955 (bez porušení)	33374	363263

V Tabulce 16 lze vidět naměřené počty cyklů pro jednotlivé typy tělísek a zatěžující síly. Na první pohled lze říci, že počty cyklů mají velké rozptyly, což může být způsobeno více faktory. Pro přesnější výsledky by byl potřeba vyšší počet měření, jak u zkoušky tříbodovým ohybem, pro výpočty průměrných hodnot  $F_{max}$ , tak u cyklického měření v ohybu. Dále může být rozptyl způsoben vnitřními vadami, které mohly vzniknout během výroby sendvičových desek. Lisovací desky byly leštěny manuálně, a tak rovinnost nemusela být dokonalá. Lisovací tlak by tak nebyl rovnoměrný po celé ploše. To by se dalo zamezit vytvrzováním v autoklávu, avšak zde jsou vytvrzovací cykly delší až v řádu několika hodin.

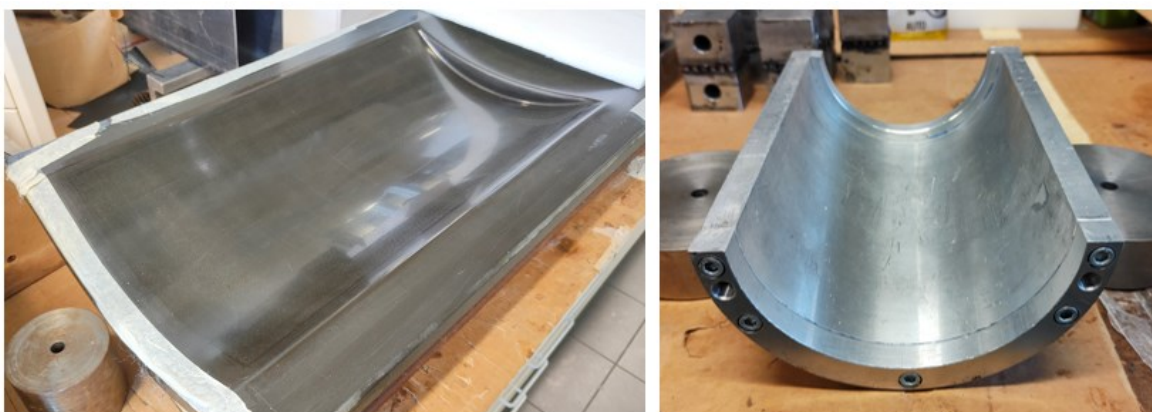
Z výsledků však lze konstatovat, že nejstabilnější výsledky vykazovala zkušební tělíska RS50+G. To je nejspíše způsobené tím, že vykazovaly téměř shodné maximální síly při zkoušce tříbodovým ohybem. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u tělísek T90.60. Zde bylo u některých vzorků zkouška pozastavena při dosažení 500 000 cyklů z důvodu časové a energetické náročnosti. Byla tu také naměřena vyšší hodnota cyklů u zatížení  $F_{90\%}$  než u zatížení  $F_{85\%}$ , což může být způsobeno právě vnitřními vadami nebo velkou odchylkou průměrné hodnoty maximální síly při zkoušce tříbodovým ohybem. Výsledky cyklů u tělísek RS30 mohou být ovlivněny delaminací. Pokud by k delaminaci nedocházelo, lze předpokládat, že by byly schopny vydržet vyšší počty cyklů. Je důležité poznamenat, že cyklické zatížení přibližně v rozmezí 70-90 % meze pevnosti představuje poměrně významnou zátěž. Obvykle v praxi výrobky nejsou dimenzovány s ohledem na tuto úroveň zatížení.

## 9 TVAROVATELNOST POLYMERNÍCH PĚN

V této části bylo cílem ověřit tvarovatelnost vybraných polymerních pěn. Schopnost tvarovatelnosti jednotlivých pěn pak měla vliv při volbě jádra v návrhu prototypového dílu v kapitole 11.

### 9.1 Formy pro tvarování

Na Obrázku 70 lze vidět používané jednodílné formy pro tvarování polymerní pěny. formy byly vybrány tak, aby měly větší rádius zakřivení, než prototyp sendvičového dílu v kapitole 11. Formy vlevo má větší rádius zakřivení a zakřivení je tak méně výrazné než u formy vpravo.



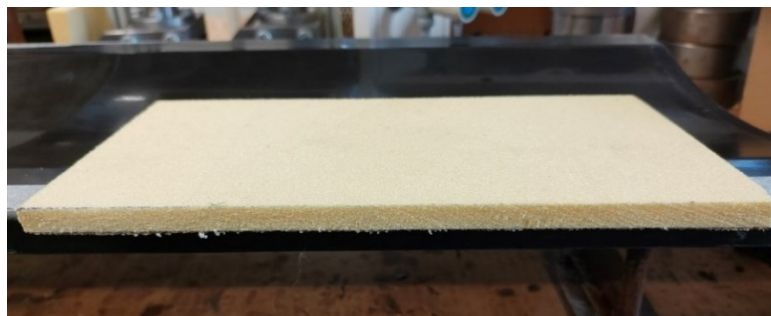
Obrázek 70 Formy použité pro tvarování

### 9.2 Postup tvarování

V této části bude popsán postup tvarování polymerních pěn. Tvarování bylo prováděno podle pokynů pro zpracování od společnosti 3A Composites [34].

#### 9.2.1 Příprava pěnových desek

Pro testování tvarovatelnosti byla použita PVC pěna Airex C70.55 [42], PET pěna Airex T90.60 a PMI pěna Cascell 50 RS. Nejdříve byly z pěnových panelů nařezány ruční pilou desky o tloušťce 10 mm viz Obrázek 71.



*Obrázek 71 Nařezaná pěnová deska C70.55*

### 9.2.2 Ohřev pěnových desek

Ohřev probíhal v temperační jednotce Zwick/Roell W91255 (viz Obrázek 72). Jedná se o teplotní komoru, která má teplotní rozmezí  $-80 - 250\text{ °C}$  s odchylkou  $\pm 3,5\text{ °C}$ .



*Obrázek 72 Temperační jednotka Zwick/Roell W91255*

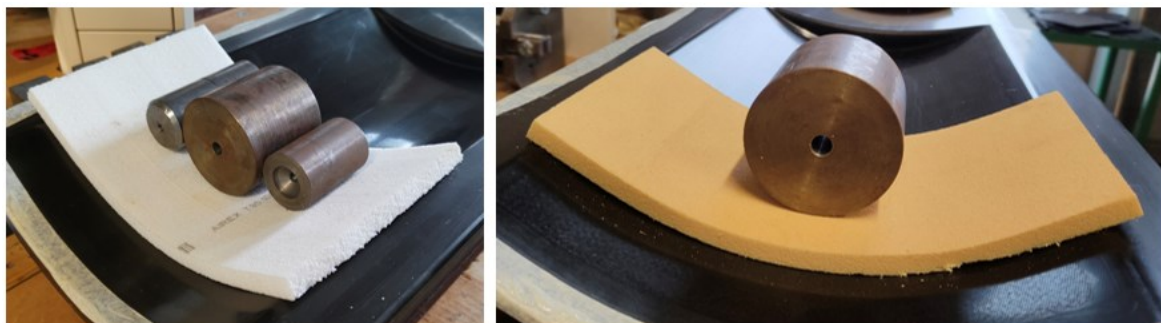
Pěnové desky bylo nutné zahřát mezi teplotu skelného přechodu  $T_g$  a teplotu tání  $T_m$ . Doporučené teploty pro tvarování za tepla u pěn Airex byly nalezeny v pokynech pro zpracování [34], které lze vidět v následující tabulce. Doba ohřevu závisí na tepelné kapacitě pěny a jeho tloušťce, ale u konvekčního způsobu je doporučován ohřev 0,5 – 1 min na 1 mm tloušťky pěny. Z tohoto důvodu byla zvolena doba ohřevu na 10 minut. U PMI pěny Cascell 50 RS nebyla bohužel v technologickém listu nalezena teplota pro ohřev, a tak byla vyhledána u jiných PMI pěn Rohacell od společnosti Evonik Industries.

Tabulka 17 Teplota a doba ohřevu

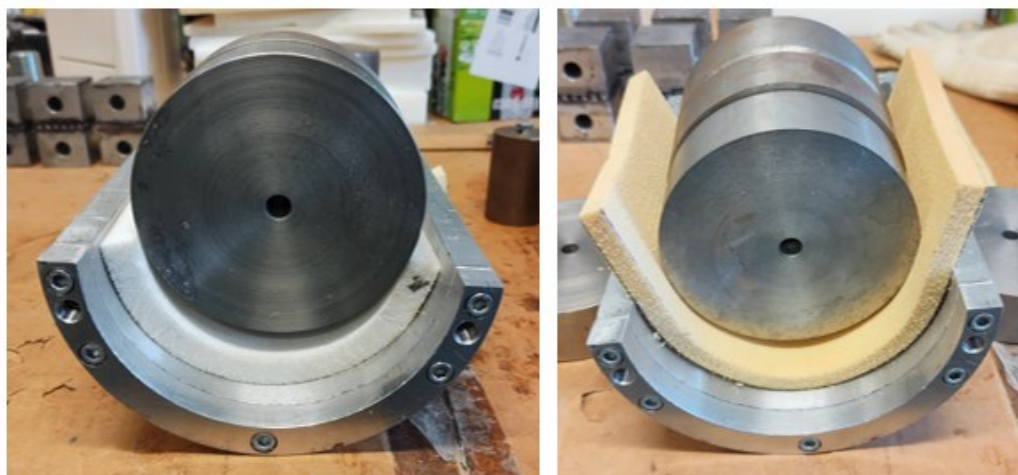
Typ pěny	Doporučená teplota pro tvarování [°C]	Zvolená teplota [°C]	Doba ohřevu [min]
T90.60	155 - 190	180	10
C70.55	115 - 130	125	
50 RS	-	205	

### 9.2.3 Tvarování

Formy pro tvarování byly umístěny blízko k temperační jednotce, aby se zabránilo velkému ochlazení při přenášení ohřáté pěny. Po dokončení ohřevu se pěna rychle přenesla na tvarovací formu a manuálně zatlačila, aby byla vytvarována podle tvaru formy. Poté byla zatížena závažím, v tomto případě železnou kulatinou. Po ochlazení pod teplotu skelného přechodu  $T_g$  bylo závaží odděleno a vytvarovanou pěnu bylo možné odebrat. Průběh tvarování na jednotlivých formách lze vidět na Obrázku 73 a Obrázku 74.



Obrázek 73 Tvarování ve formě č.1, vlevo pěna T90.60 a vpravo pěna C70.55



Obrázek 74 Tvarování ve formě č.2, vlevo pěna T90.60 a vpravo pěna C70.55

Na Obrázku 75 je možné vidět již vytvarované pěny T90.60 a C70.55. Proces tvarování byl u těchto typů pěn úspěšný. U pěny T90.60 se podařilo dosáhnout požadovaného rádiusu zakřivení a geometrických parametrů bez výrazných vad nebo deformací. U pěny C70.55 se po odlehčení zatížení během procesu tvarování mírně zvětšil původní rádius zakřivení, což naznačuje, že pěnové jádro podléhalo určitému odpružení, které je vidět na Obrázku 76. Tato změna může být způsobena elastickým chováním pěnového materiálu a uvolňováním vnitřního napětí během procesu odlehčení.

U pěny 50 RS docházelo během procesu tvarování k opakovaným porušením (prasknutím) pěny, což znemožnilo dosažení požadovaných geometrických parametrů. K tomu docházelo i při změně teploty ohřevu. Tato zkušenost naznačuje, že PMI pěna 50 RS není vhodná pro tento konkrétní proces tvarování nebo že byly použity nevhodné procesní podmínky.



Obrázek 75 Vytvarované polymerní pěny T90.60 (vlevo) a C70.55 (vpravo)



Obrázek 76 Odpružení pěny C70.55 po odlehčení zatížení

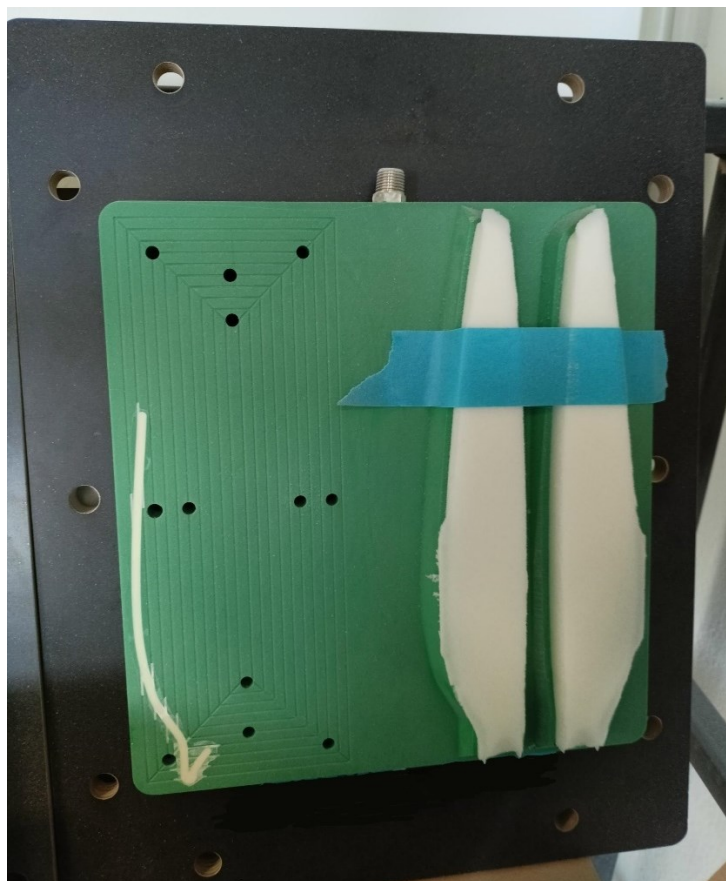


## 10 FRÉZOVÁNÍ POLYMERNÍCH PĚN

Jak již bylo řečeno v teoretické části, frézování je preferovanou metodou pro vytváření složitých tvarů v polymerních pěnách s vysokou přesností. Je v hodná zejména pro pěnová jádra s proměnlivou tloušťkou pěny. V této části bylo cílem odzkoušet proces frézování dostupných polymerních pěn při zvolených rezných podmínkách.

### 10.1 Upínací systém

Jako upínací systém byl použit postupový vakuovací přípravek určený pro výrobu pěnových jader do sendvičových vrtulí (viz Obrázek 77). Ten umožňuje vyfrézovat oboustranně pohledový díl na dvě operace. Přípravek je vyrobený z umělého dřeva SikaBlock. Ze spodní strany je vyfrézovaná kapsa a napojený vakuovací ventil. Vakuum je rozváděno otvory do vyfrézovaných drážek na horní straně přípravku. Tímto způsobem je vakuum aplikováno po téměř celé ploše pěny. Přípravek je nalepen na upínací desce.



Obrázek 77 Vakuovací přípravek

## 10.2 Frézovací nástroje a řezné podmínky

Pro frézování byly použity frézy tvrdokovové, leštěné bez povlaku, například viz Obrázek 78. Obecně je doporučováno frézovat při vysokých řezných rychlostech a při minimálním posuvu. Úhel záběru by měl být malý. Takové nastavení řezných podmínek pomáhá minimalizovat vývin tepla, a tím zabránit změkčování nebo dokonce tavení polymerní pěny, což má velký vliv na výslednou kvalitu povrchu.



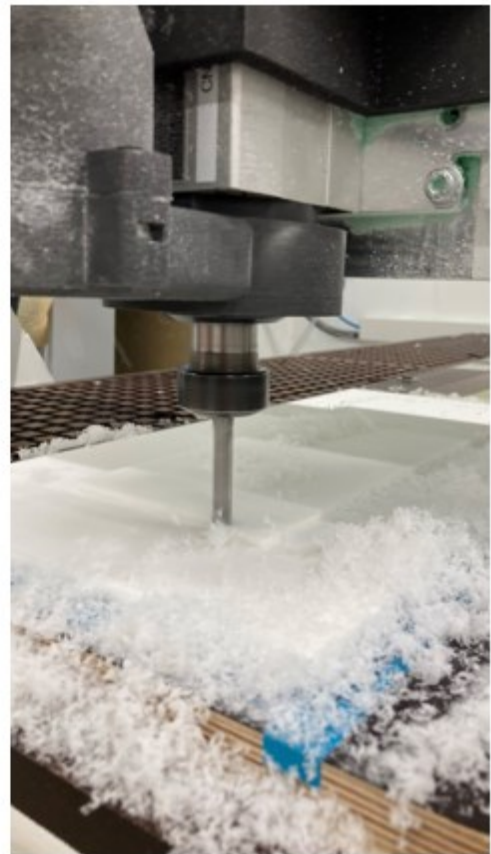
Obrázek 78 Příklad používané frézy

Zvolené řezné podmínky lze vidět zde:

- Řezná rychlost  $v_c = 250$  m/min
- Posuv na zub  $f_z = 0,33$  mm
- Hrubování max. hloubka řezu  $a_{p_{max}} = 20$  mm
- Dokončování max. hloubka řezu  $a_{p_{max}} = 3$  mm
- Hrubování šířka záběru nástroje  $a_{e_{max}} = 90\%$
- Dokončování šířka záběru nástroje  $a_{e_{max}} = 15\%$
- Frézovací metoda Zig Zag

### 10.3 Průběh frézování

Na Obrázku 79 lze vidět průběh frézování PMI pěny Cascell 50 RS. Frézování bylo prováděno na portálové CNC frézce od výrobce CNC Konečný. Během frézování vzniká prach a třísky z pěny, které mohou způsobit zdravotní problémy. Proto je vhodné mít ke stroji připojený průmyslový vysavač pro odebrání. Vzhledem k tomu, že mají PMI pěny poměrně vysokou tepelnou stabilitu, nedocházelo během frézování k žádným tepelným změnám a výsledný povrch byl kvalitní. Problém by mohl vzniknout u frézování například PVC pěn. Ty obecně nemají takovou teplotní odolnost a mohlo by docházet k teplotním vlivům a výsledný vyfrézovaný povrch by nemusel být kvalitní. To by mělo negativní vliv i při následné laminaci. V tomto případě by musely být řezné podmínky optimalizovány, aby nedocházelo k velkému zahřívání pěny.”“



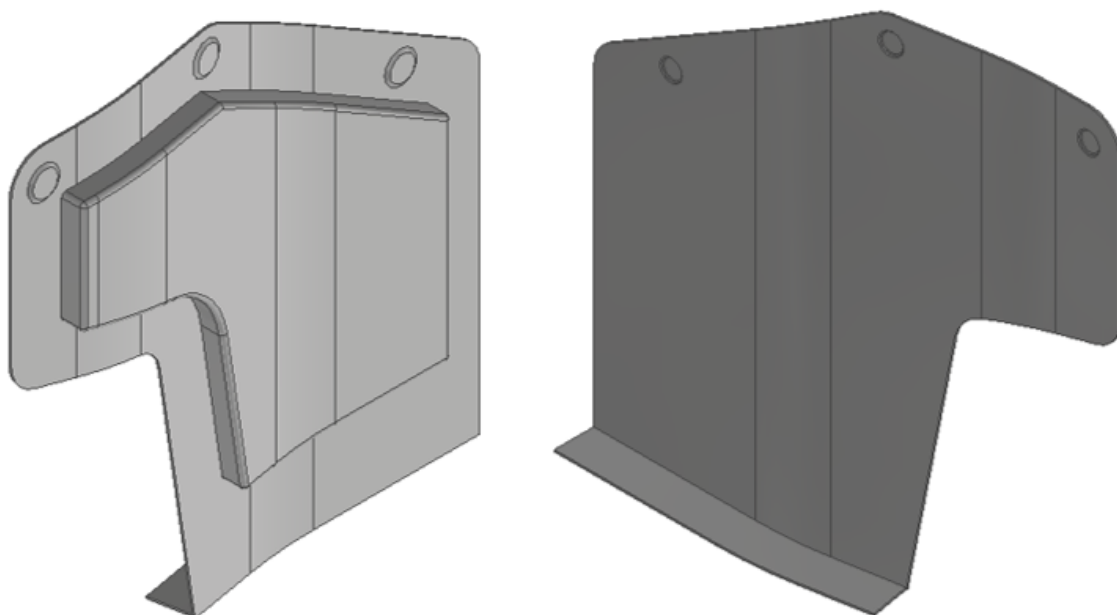
Obrázek 79 Průběh frézování PMI pěn

## 11 NÁVRH PROTOTYPOVÉHO DÍLU

Na základě získaných poznatků z testování zkušebních tělísek a ověření tvarovatelnosti, obrobitelnosti zvolených polymerních pěn byla následně vybrána vhodná materiálová skladba a navržen postup výroby prototypu sendvičového dílu pro aplikaci v letectví.

### 11.1 3D návrh dílu

Sendvičovým dílem byl zvolen kryt montážního otvoru v interiéru letadla. 3D model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor 2023. V horní části byly vytvořeny „důlky“ pro snadnější vyvrtání otvorů po vytvrzení dílu. Spodní část je vkládána do vodící lišty. Výkresovou dokumentaci je možné vidět v Příloze P III.



Obrázek 80 3D model dílu

### 11.2 Volba materiálů

Materiály a skladba byly zvoleny podle zkušebního tělíska T90.60. Jako krycí materiál byl tedy použit uhlíkový prepreg GG204P IMP509. Pěnové jádro bylo zvoleno z důvodu dobrých izolačních vlastností. Přesněji byla použita PET pěna Airex T90.60. Tato pěna má vynikající požární odolnost, nevznikají žádné zplodiny a tepelnou stabilitu v procesu až 150 °C, což znamená, že lze vzhledem k teplotě bez omezení zvolit jakoukoli metodu vytvrzování. Jelikož se nejedná o pevnostní díl, tak lze říci, že pěna společně s uhlíkovým prepregem vykazovala při zkouškách uspokojivé mechanické vlastnosti a také výbornou

adhezi, protože ani jednou nedošlo k delaminaci. Pěna Airex T90.60 je také tepelně tvarovatelná, což bylo prokázáno v kapitole 9.

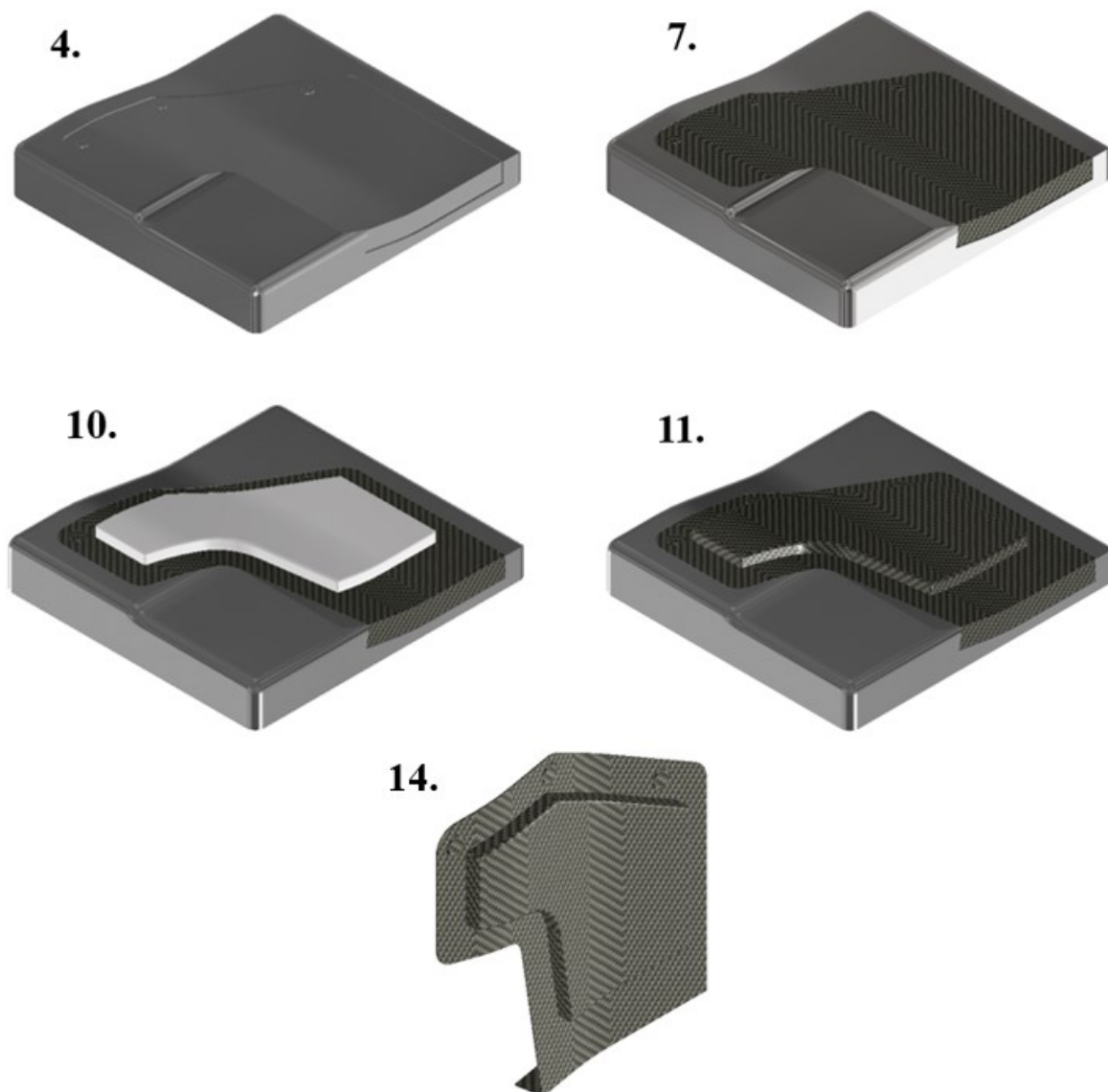
### 11.3 Návrh technologického postupu výroby

Technologický postup popisuje jednotlivé operace, jakými bude daný díl vyroben. V Tabulce 18 je znázorněn rámcový technologický postup, který obsahuje posloupnost operací a potřebné pomůcky a nástroje.

Nejdříve by bylo nutné vyřezat pěnové jádro na potřebný tvar a následně tepelně vytvarovat na dané zakřivení. Tvarování by bylo prováděno podle pokynů pro zpracování pěny Airex, které jsou dostupné online od výrobce 3A Composites [34]. Následně by se postupovalo podle rámcového technologického postupu.

Tabulka 18 Rámcový technologický postup výroby

Č. operace	Postup	Pomůcky, nástroje
1.	Vyjmutí prepregu z mrazáku 1 den před pokládáním	-
2.	Čištění formy	Bavlněný hadřík, líh
3.	Aplikace plniče mikropórů	Plnič mikropórů, papírový ubrousek
4.	Separace formy	Separátor, papírový ubrousek
5.	Kontrola správnosti separace	Lepící páska
6.	Nastříhání prepregů (podle nástřihového plánu)	Nůžky, pravítko, metr
7.	Pokládání 1. vrstvy prepregu	Přítlačný váleček, speciální pomůcky
8.	Debulking	Aplikování vakua
9.	Pokládání 2. a 3. vrstvy prepregu	Přítlačný váleček, speciální pomůcky
10.	položení vytvarovaného jádra	-
11.	Pokládání 4.-6. vrstvy prepregu	Přítlačný váleček, speciální pomůcky
12.	Zavakuování	Separáční fólie, odsávací rohož, vakuovací fólie, těsnící páska
13.	Vytvrzení v autoklávu	autokláv, vakuovací systém
14.	Odformování	Stlačený vzduch, speciální pomůcky
15.	Ořezání dílu a vyvrtání otvorů	CNC frézka, fréza a vrták na kompozity
16.	Lakování dílu	Lakovací pistol



*Obrázek 81 Názorná fotodokumentace k rámcovému technologickému postupu, 4. naseparovaná forma, 7. pokládání 1. vrstvy, 10. položení jádra, 11. položení poslední vrstvy, 14. odformovaný díl*

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout optimální sendvičovou strukturu, která by byla vhodná pro výrobu prototypového dílu určeného pro aplikaci v letectví.

Teoretická část diplomové práce se zaměřuje na průzkum sendvičových struktur a jejich klíčových komponentů. Začíná detailním rozbořem jednotlivých složek těchto struktur, včetně krycích plášťů a jader, přičemž jsou pečlivě popsány různé typy materiálů využívaných v těchto částech. Následně jsou zkoumány různé výrobní technologie sendvičových struktur a jejich aplikace v oblastech letectví a větrné energetiky. Dále je věnována pozornost procesům tvarování polymerních pěn a způsobu jejich obrábění. Na závěr jsou popsány nejpoužívanější standardní zkušební metody pro stanovení mechanických vlastností sendvičových struktur.

Praktická část se zabývala návrhem a výrobou sendvičových panelů pro jednotlivá zkušební tělíska. Při návrhu byl použit uhlíkový tkaninový prepreg s ozn. GG 204P IMP509 a v jednom případě skelný prepreg VV106. Jako jádro byla použita PMI pěna Cascell 50 RS, Cascell 30 RS a PET pěna Airex T90.60. Dále je detailně popsán postup výroby panelů od přípravy lisovacích desek až po vytvrzení metodou lisování za tepla. Po vyrobení byly z panelů vyřezána zkušební tělíska pomocí pásové pily. Následně byla zkušební tělíska podrobena mechanickou zkouškou tříbodovým ohybem a zkouškou tahem na plocho, a únavovou zkouškou cyklickým ohybem. Získaná data byla vyhodnocena a porovnána pomocí krabicových diagramů. V poslední řadě se ověřila schopnost tvarovatelnosti a obrobitelnosti vybraných polymerních pěn.

Z dosažených výsledků byla následně jako vhodná materiálová skladba ze zkušebních tělísek vybrána skladba s jádrem z pěny Airex T90.60 pro prototypový díl v letadle. Ta byla zvolena z důvodu dostatečných naměřených mechanických vlastností a poměrně vysokých cyklů při únavové zkoušce cyklickým ohybem. Pěna dále splňuje vysoké požární a kouřové požadavky, a velmi vysokou chemickou odolnost. Také byla úspěšně ověřena tvarovatelnost této pěny, a tím by bylo možné při výrobě snížit materiálový odpad a výsledné náklady oproti obrábění. Následně byl vytvořen 3D model dílu a výkresová dokumentace v programu Autodesk Inventor 2023. V posledním kroku byl zvolen vhodný rámcový technologický postup, ke kterému byla přiložena názorná fotodokumentace.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURYA**

- [1] WENGUANG, Ma a Elkin RUSSELL, 2021. *Sandwich Structural Composites - Theory and Practice*. Boca Raton: CRC Press. ISBN 9781003035374.
- [2] ARMSTRONG, Keith B., Francois MUSEUX a William F. COLE, 2020. *Care and repair of advanced composites*. 3rd ed. Warrendale: SAE International. ISBN 978-0-7680-9317-9.
- [3] 2013. *Composite Materials Handbook, Volume 6 - Structural Sandwich Composites (CMH-17)*. SAE International. ISBN 978-0-7680-7816-9.
- [4] CAMPBELL, F.C. *Structural Composite Materials* [online]. ASM International, 2010. ISBN 978-1-61344-124-4.
- [5] LENGSELD, Hauke et al., 2021. *Composite Technology - Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*. 2nd Edition. Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-825-9.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] BÖHM, G. et al., 2023. *Structural Use of Fibre Polymer Composites. Institution of Structural Engineers (ISTRUCTE)*. ISBN 978-1-906335-58-8.
- [8] GIBSON, R. F.. *Principles of Composite Material Mechanics*. Vydání 4. CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4987-2072-4.
- [9] DENG, Xinying et al., 2022. Processing and Mechanical Properties of Basalt Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites. *Polymers* [online]. **14**(6) [cit. 2024-02-04]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym14061220
- [10] LOW, It-Meng a Yu DONG, 2021. *Composite Materials - Manufacturing, Properties, and Applications*. Elsevier. ISBN 978-0-12-820512-9.
- [11] VAN QUY, HO a Song Thanh Thao NGUYEN, 2019. Experimental Analysis of Coir Fiber Sheet Reinforced Epoxy Resin Composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. **642**(1) [cit. 2024-02-05]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/642/1/012007



- [12] HAINCOVÁ, Eliška, Pavlína HÁJKOVÁ a Jan KOHOUT, 2019. Prepregs for Temperature Resistant Composites. *Materials* [online]. **12**(23) [cit. 2024-02-07]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12234012
- [13] SHI, Sheldon a John C. F. WALKER, 2006. Wood-based composites: plywood and veneer-based products. *Primary Wood Processing* [online]. Springer Netherlands, 391-426 [cit. 2024-02-08]. ISBN 978-1-4020-4392-5. Dostupné z: doi:10.1007/1-4020-4393-7\_11
- [14] PAPADOPOULOS, Antonios N., 2020. Advances in Wood Composites. *Polymers* [online]. **12**(1) [cit. 2024-02-08]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12010048
- [15] KAUSAR, Ayesha et al., 2023. State-Of-The-Art of Sandwich Composite Structures: Manufacturing—to—High Performance Applications. *Journal of Composites Science* [online]. **7**(3) [cit. 2024-02-13]. ISSN 2504-477X. Dostupné z: doi:10.3390/jcs7030102
- [16] BIRON, Michel, 2018. *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*. 3rd Edition. Elsevier. ISBN 978-0-08-102501-7.
- [17] XIE, Honglei et al., 2024. Flexural behavior evaluation of PET foam core curved sandwich beam: Experimental study and numerical simulation. *Construction and Building Materials* [online]. **414** [cit. 2024-02-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135000
- [18] D'URSO, Gianluca a Giancarlo MACCARINI, 2012. The formability of aluminum foam sandwich panels. *International Journal of Material Forming* [online]. **5**(3), 243-257 [cit. 2024-02-14]. ISSN 1960-6206. Dostupné z: doi:10.1007/s12289-011-1036-9
- [19] JĘDRAL, Arnold, 2019. Review of Testing Methods Dedicated for Sandwich Structures with Honeycomb Core. *Transactions on Aerospace Research* [online]. **2019**(2), 1-14 [cit. 2024-02-14]. ISSN 2545-2835. Dostupné z: doi:10.2478/tar-2019-0006
- [20] GALOS, Joel et al., 2022. Review of balsa core sandwich composite structures [online]. **221** [cit. 2024-02-15]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2022.111013

- [21] DE SOUZA, Felipe M., Yash DESAI a Ram K. GUPTA, 2023. Introduction to Polymeric Foams. *Polymeric Foams: Fundamentals and Types of Foams (Volume I)* [online]. Washington, DC: American Chemical Society, 1-23 [cit. 2024-02-19]. ACS Symposium Series. ISBN 9780841297173. Dostupné z: doi:10.1021/bk-2023-1439.ch001
- [22] JIN, Fan-Long et al., 2019. Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review. *Polymers* [online]. **11**(6) [cit. 2024-02-19]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym11060953
- [23] WYPYCH, George, 2022. *Handbook of Foaming and Blowing Agents*. 2nd Edition. ChemTec Publishing. ISBN 978-1-77467-000-2.
- [24] CHEN, Youming a Raj DAS, 2022. A review on manufacture of polymeric foam cores for sandwich structures of complex shape in automotive applications [online]. **24**(1), 789-819 [cit. 2024-03-11]. ISSN 1099-6362. Dostupné z: doi:10.1177/10996362211030564
- [25] CASTANIE, Bruno, Christophe BOUVET a Malo GINOT, 2020. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access* [online]. **1** [cit. 2024-02-24]. ISSN 26666820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcomc.2020.100004
- [26] De Havilland DH 98 T. Mk. III Mosquito [online]. [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.norwegianaviationmuseum.com/de-havilland-dh-98-t-mk-iii-mosquito> (Obrázek 13)
- [27] MA, Quanjin et al., 2021. A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. *Journal of Composite Materials* [online]. **55**(18), 2513-2555 [cit. 2024-02-24]. ISSN 0021-9983. Dostupné z: doi:10.1177/0021998321990734
- [28] *Eurocopter Tiger: Europe's Premier Attack Helicopter* [online], 2023. [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.fairlifts.com/helicopters/military/eurocopter-tiger-europes-premier-attack-helicopter/> (Obrázek 19)
- [29] CORTÉS, Enrique et al., 2017. On the Material Characterisation of Wind Turbine Blade Coatings: The Effect of Interphase Coating–Laminate Adhesion on Rain

- Erosion Performance. *Materials* [online]. **10**(10) [cit. 2024-02-28]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10101146
- [30] BARBERO, Ever J., 2018. Introduction to Composite Materials Design. Third edition. CRC Press. ISBN 978-1-138-19680-3.
- [31] HUBERT, Pascal et al., 2018. 2.4 Out-of-Autoclave Prepreg Processing. In: *Comprehensive Composite Materials II*. Elsevier, s. 63-94. ISBN 9780081005347. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.09900-8
- [32] HARPER, Lee a Mike CLIFFORD, 2023. Design and Manufacture of Structural Composites. Woodhead Publishing. ISBN 978-0-12-819160-6.
- [33] WISCONSIN OVEN. COMPOSITE CURING OVENS [online]. [cit. 2024-03-06]. Dostupné z: <https://www.wisoven.com/products/batch-ovens/composite-curing-ovens> (Obrázek 25)
- [34] 3ACCOREMATERIALS, 2017. *PROCESSING GUIDELINES* [online]. [cit. 2024-04-18]. Dostupné z: [https://www.3accorematerials.com/zh/uploads/documents/AIREX-Processing-Guidelines\\_02.2017\\_EN\\_1106.pdf](https://www.3accorematerials.com/zh/uploads/documents/AIREX-Processing-Guidelines_02.2017_EN_1106.pdf)
- [35] *Working with Rohacell* [online], 2021. [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: [https://products.evonik.com/assets/01/07/Working\\_with\\_ROHACELL\\_September\\_2021\\_EN\\_Asset\\_2030107.pdf](https://products.evonik.com/assets/01/07/Working_with_ROHACELL_September_2021_EN_Asset_2030107.pdf)
- [36] GENERALPLASTICS. MACHINING VS CAST MOLDING: CHOOSING THE BEST MANUFACTURING METHOD TO PROCESS POLYURETHANE FOAM [online]. [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://www.generalplastics.com/technical-papers/machining-vs-cast-molding-choosing-the-best-manufacturing-method-to-process-polyurethane-foam>
- [37] SANDESH KIRAN, S. a B. M RAJAPRAKASH, 2019. Standard Testing Methods for Natural Fiber based Hybrid Sandwich Composites [online]. *IJERT*, 574-585 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: doi:10.17577/IJERTV8IS100348
- [38] YALCIN, Deniz, 2022. Sandwich Construction Materials Mechanical Testing [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.admet.com/blog/sandwich-construction-materials-mechanical-testing/>

- [39] KÖRBER, Dr. Hannes, 2021. Standard Test Methods for Sandwich Composites [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: [https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/PDF/testXpo/2021/Lecture/Hannes\\_Koerber\\_Sandwich\\_Composites\\_EN.pdf](https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/PDF/testXpo/2021/Lecture/Hannes_Koerber_Sandwich_Composites_EN.pdf)
- [40] CASHEM. Technický list pěny Cascell RS [online]. [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.pmifoam.com/product/rs-data-sheet/cascell-rs.html>
- [41] 3A COMPOSITES. Technický list pěny Airex T90 [online]. [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.3accorematerials.com/uploads/pdf/TDS-AIREX-T90-E-03.2023.PDF>
- [42] 3A COMPOSITES. Technický list pěny Airex C70 [online]. [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.3accorematerials.com/uploads/pdf/TDS-AIREX-C70-E-08.2022-ex-Europe.pdf>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PMI	Polymetakrylimid
PET	Polyethylentereftalát
PVC	Polyvinylchlorid
$T_g$	Teplota skelného přechodu
$T_m$	Teplota tání
ASTM	Americké normy pro testování a materiály
T	Tloušťka výrobku
t	Tloušťka jádra
$m_s$	Plošná hmotnost
$\sigma_f$	Pevnost v ohybu
F	Síla
L	Rozpětí
b	Šířka zkušebního tělesa
h	Tloušťka zkušebního tělesa
$\varepsilon_f$	Deformace ohybem
$S_f$	Průhyb
$E_f$	Modul pružnosti v ohybu
W	Práce
$\sigma_t$	Pevnost v tahu na plocho
S	Plocha průřezu
$F_{max}$	Maximální síla
s	Směrodatná odchylka
$\bar{x}$	Aritmetický průměr
v	Variační koeficient

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Srovnání sendvičové konstrukce a I-nosníku [1]</i> .....	11
<i>Obrázek 2 Běžné vazby tkanin [5]</i> .....	12
<i>Obrázek 3 Výroba metodou tavení zatepla [5]</i> .....	16
<i>Obrázek 4 Výroba metodou impregnace pomocí rozpouštědla [5]</i> .....	17
<i>Obrázek 5 Porovnání jádrových materiálů z pohledu vlastností a ceny [4]</i> .....	18
<i>Obrázek 6 Struktura polymerního a kovového jádra [15]</i> .....	19
<i>Obrázek 7 Terminologie voštinového jádra [4]</i> .....	22
<i>Obrázek 8 Typy buněk voštinových jader [4]</i> .....	22
<i>Obrázek 9 Položení balsového jádra do trupu lodi před infuzí pryskyřice [20]</i> .....	23
<i>Obrázek 10 Schématické znázornění metod chemického pění [22]</i> .....	25
<i>Obrázek 11 Schéma vytlačovací linky [23]</i> .....	25
<i>Obrázek 12 Schémata procesu nízkotlakého vstřikování (a),</i> .....	26
<i>Obrázek 13 Letadlo Mosquito (vlevo) a jeho sendvičový trup (vpravo) [25,26]</i> .....	28
<i>Obrázek 14 Konstrukce náběžné hrany křídla [1]</i> .....	29
<i>Obrázek 15 Přehled sendvičových konstrukcí letounu B747 [25]</i> .....	29
<i>Obrázek 16 Kompozitní materiály v letadle ATR 72 [25]</i> .....	30
<i>Obrázek 17 Letoun Elixir a jeho sendvičový karbonový trup [25]</i> .....	30
<i>Obrázek 18 Pohled na rotorový list v příčném řezu [1]</i> .....	31
<i>Obrázek 19 Vrtulník Tiger [28]</i> .....	31
<i>Obrázek 20 Součásti lopatek větrných turbín [1]</i> .....	32
<i>Obrázek 21 Materiály použité v typickém průřezu lopatek [29]</i> .....	33
<i>Obrázek 22 Skladba pomocných materiálů při vakuování (a);</i> .....	34
<i>Obrázek 23 Typický vytvrzovací cyklus autoklávu [4]</i> .....	35
<i>Obrázek 24 Proces lisování [1]</i> .....	36
<i>Obrázek 25 Pec pro vytvrzování kompozitů [33]</i> .....	36
<i>Obrázek 26 OOA prepreg [31]</i> .....	37
<i>Obrázek 27 Vakuové tváření (nahore) a tvarování lisováním (dole) [34]</i> .....	39
<i>Obrázek 28 Schéma buněčné morfologie (a) před tepelným tvarováním a (b) po tepelném tvarování [24]</i> .....	40
<i>Obrázek 29 Obrobená polymerní pěnová jádra [36]</i> .....	41
<i>Obrázek 30 Tahová zkouška na plocho [38]</i> .....	42
<i>Obrázek 31 Tlaková zkouška v plochem směru (vlevo) a tlaková zkouška ve směru hran (vpravo) [37,38]</i> .....	43
<i>Obrázek 32 Znázornění přípustných a nepřípustných poruch [39]</i> .....	44

<i>Obrázek 33 Nastavení zkoušky v ohybu [38] .....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 34 Smyková zkouška [39] .....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 35 Odlupovací zkouška na navíjecím bubnu [38] .....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 36 Separace lisovacích desek .....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 37 Stříhání prepregu na plotru.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 38 Kladení prepregů na pěnová jádra .....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 39 Panely před aplikací vakua (nahore) a během aplikace vakua (dole).....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 40 a) Elektrický lis E-FORM XI; b) Vytvrzování panelu lisováním; c) Vytvrzený sendvičový panel po vyjmutí z lisu .....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 41 Realizace zkoušky tříbodovým ohybem .....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 42 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS30 .....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 43 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS50 .....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 44 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS50+G.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 45 Průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci tělísek T90.60 .....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 46 Zobrazení poruch jednotlivých typů zkušebních tělísek .....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 47 Krabicový graf znázorňující pevnost v ohybu zkušebních tělísek .....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 48 Krabicový graf znázorňující modul pružnosti v ohybu zkušebních tělísek.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 49 Realizace tahové zkoušky na plocho a porušení zkušebního tělesa .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 50 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS30 .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 51 Příklady delaminace zkušebních tělísek RS30 .....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 52 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS50.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 53 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci tělísek RS50+G .....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 54 Průběh tahového napětí v závislosti na deformaci tělísek T90.60 .....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 55 Porušení jádra zkušebních tělísek T90.60.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 56 Krabicový graf znázorňující pevnost v tahu zkušebních tělísek.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 57 Ustavení zkušebního tělíska před testováním únavových vlastností .....</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 58 Detail cyklů před porušením tělíska RS30 při zatížení <math>F_{75\%}</math>.....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 59 Záznam změny průhybu tělíska RS30 během cyklické zkoušky při <math>F_{75\%}</math>.....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 60 Porušení Tělíska RS30 při cyklickém ohybu .....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 61 Detail cyklů před porušením tělíska RS50 při zatížení <math>F_{70\%}</math>.....</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 62 Záznam změny průhybu tělíska RS50 během cyklické zkoušky při <math>F_{70\%}</math>.....</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 63 Únavový lom zkušebního tělíska RS50.....</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 64 Detail cyklů před porušením tělíska RS50+G při zatížení <math>F_{70\%}</math>.....</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 65 Záznam změny průhybu tělíska RS50+G během cyklické zkoušky při <math>F_{70\%}</math>.....</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 66 Únavový lom zkušebního tělíska RS50+G .....</i>	<i>74</i>

<i>Obrázek 67</i>	<i>Detail cyklů před porušením tělíska při zatížení <math>F_{90\%}</math>.....</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 68</i>	<i>Záznam změny průhybu tělíska T90.60 během cyklické zkoušky při <math>F_{90\%}</math> .....</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 69</i>	<i>Únavový lom zkušebního tělíska T90.60 .....</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 70</i>	<i>Formy použité pro tvarování.....</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 71</i>	<i>Nářezaná pěnová deska C70.55 .....</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 72</i>	<i>Temperační jednotka Zwick/Roell W91255.....</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 73</i>	<i>Tvarování ve formě č.1, vlevo pěna T90.60 a vpravo pěna C70.55.....</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 74</i>	<i>Tvarování ve formě č.2, vlevo pěna T90.60 a vpravo pěna C70.55.....</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 75</i>	<i>Vytvarované polymerní pěny T90.60 (vlevo) a C70.55 (vpravo) .....</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 76</i>	<i>Odpružení pěny C70.55 po odlehčení zatížení .....</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 77</i>	<i>Vakuovací přípravek .....</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 78</i>	<i>Příklad používané frézy .....</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 79</i>	<i>Průběh frézování PMI pěn .....</i>	<i>83</i>
<i>Obrázek 80</i>	<i>3D model dílu .....</i>	<i>84</i>
<i>Obrázek 81</i>	<i>Názorná fotodokumentace k rámcovému technologickému postupu, 4. naseparovaná forma, 7. pokládání 1. vrstvy, 10. položení jádra, 11. položení poslední vrstvy, 14. odformovaný díl.....</i>	<i>86</i>



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [9].....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 2 Mechanické vlastnosti polymerních matric [8,11].....</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 3 Mechanické vlastnosti vybraných polymerních pěn [1].....</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 4 Materiálová skladba a složení panelů .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 5 Teoretické tloušťky vytvrzených sendvičových panelů.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 6 Nastavení lisovacího programu .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 7 Naměřená data ze zkoušky třibodovým ohybem tělísek RS30 .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 8 Naměřená data ze zkoušky třibodovým ohybem tělísek RS50 .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 9 Naměřená data ze zkoušky třibodovým ohybem tělísek RS50+G .....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 10 Naměřená data ze zkoušky třibodovým ohybem tělísek T90.60.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 11 Naměřená data z tahové zkoušky na plocho pro tělíska RS30.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 12 Naměřená data z tahové zkoušky na plocho pro tělíska RS50.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 13 Naměřená data z tahové zkoušky na plocho pro tělíska RS50+G.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 14 Naměřená data z tahové zkoušky na plocho pro tělíska T90.60.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 15 Hodnoty zatěžujících sil při cyklické zkoušce .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 16 Počet naměřených cyklů jednotlivých typů zkušebních tělísek .....</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 17 Teplota a doba ohřevu .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 18 Rámcový technologický postup výroby .....</i>	<i>85</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list matrice

Příloha P II: Materiálový list tkaniny

Příloha P III: Výkres výrobku

# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE



IMPREGNATEX  
TECHNICAL DATASHEET  
IMP509

Rev 1 - 01/03/2022

## IMP509

### DESCRIPTION

Modified epoxy matrix IMP509 can be processed by autoclave curing and snap-cure press moulding.  
Both metal and composite tooling can be used for processing IMP509 preregs.  
It is a high Tg resin for aesthetic composite applications.

### BENEFITS AND FEATURES

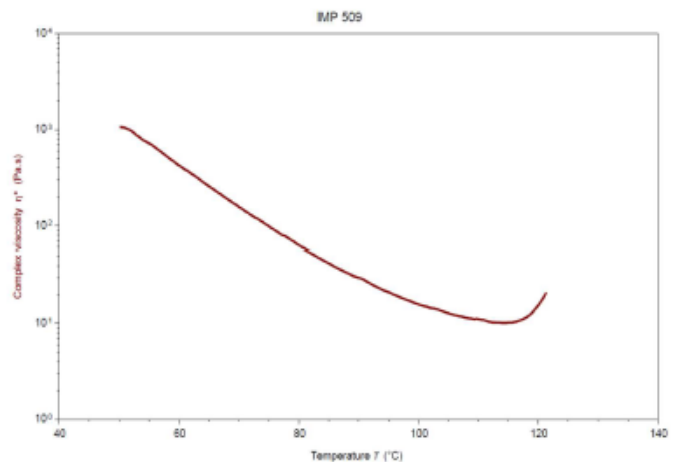
- IMP509 preregs find uses in automotive, sports & leisure, marine and industrial applications.
- Good UV resistance and environmental stability for aesthetic cosmetic components.
- Maximum DMA Tg of 145°C (ASTM D7028) from autoclave curing.

IMP509 are available with woven carbon, glass and aramid fibre reinforcements.

RESIN PROPERTIES		
TYPE		TOUGHENED EPOXY
Cured resin's density	g/cm <sup>3</sup>	1.19 to 1.22
Gel Time at 125 °C	min	2 to 3
TACK		MEDIUM
Out-life (23 °C)	weeks	4
Shelf Life (-18 °C)	months	12

### VISCOSITY PROFILE

The chart beside shows the rheological behaviour of IMP509.  
Heating rate 2 °C/min



### ANGELONI GROUP

Via Abbate Tommaso, 72/A - 30020 Quarto d'Altino (VE) Italy  
T. +39 0422 780580 - F. +39 0422 782782  
E. info@angelonigroup.com

angelonigroup.com



---

#### RECOMMENDED AUTOCLAVE CURE SCHEDULES

One of the following autoclave cure schedules should be selected:

- 1.5 Hours (90 minutes) @ 120 °C, 6 Bar pressure. Maximum DMA-Tg = 135 °C.
- 1.5 Hours (90 minutes) @ 135 °C, 6 Bar pressure. Maximum DMA-Tg = 140 °C.
- 2.0 Hours (120 minutes) @ 140 °C, 6 Bar pressure. Maximum DMA-Tg = 145 °C

---

#### PROCESSING GUIDELINES

##### 140 °C Autoclave Cure Cycle Option:

- From the beginning of the cure cycle, apply maximum vacuum pressure to the bagged component(s).
- Apply an over pressure of 6.0±1.0 Bar from the beginning of the cure cycle.
- Use monitoring thermocouples applied to the surface of the component(s) to define the actual cure cycle. Select those areas with the highest thermal inertia and the slowest to heat up.
- Use a controlled heating rate of 1.0 to 2.0 °C/min from room temperature to 140 °C.
- The tolerance on the 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 reaches 140 °C.
- The tolerance on the 120 minutes cure time is +20 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.

---

**IMP509** 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.

---

---

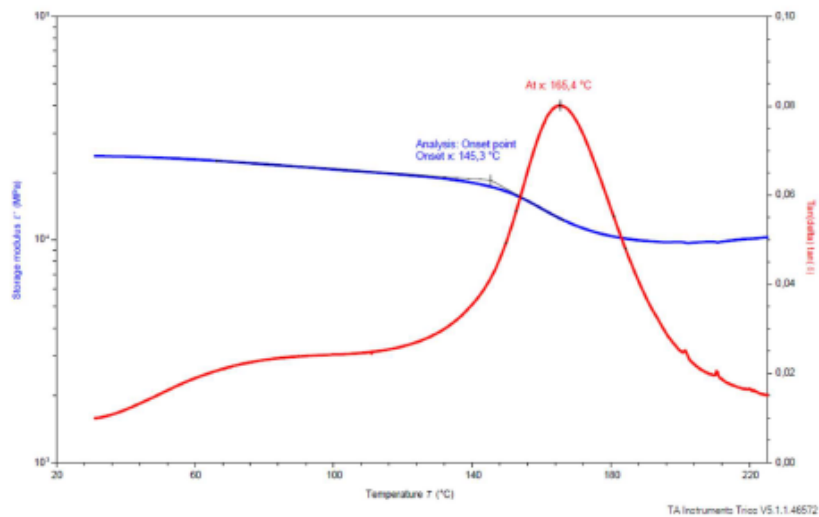
#### ANGELONI GROUP

Via Abbate Tommaso, 72/A - 30020 Quarto d'Altino (VE) Italy  
T. +39 0422 780580 - F. +39 0422 782782  
E. info@angelonigroup.com

angelonigroup.com

### THERMAL PERFORMANCE

With a 140 °C autoclave cure schedule, the glass transition temperature (T<sub>g</sub>) will reach a maximum of 145 °C (T<sub>g</sub> Onset by ASTM D7028).



DMA trace: 8 Plies GG204P-IMP509-43, Autoclave cured 120 min @ 140 °C, 6 Bar.

### RECOMMENDED PRESS MOULDING CURE SCHEDULES

One of the following press moulding schedules should be selected:

TEMPERATURE (°C)	TIME (minutes)
130	9
140	5
150	4
160	3

These cycles are appropriate for placing a prepreg preform into a pre-heated tool. These are the minimum cure times and it is advised to check whether the time is sufficient for all pressed parts. In particular for generating an adequate DMA-T<sub>g</sub>.

### ANGELONI GROUP

Via Abbate Tommaso, 72/A - 30020 Quarto d'Altino (VE) Italy  
T. +39 0422 780580 - F. +39 0422 782782  
E. info@angelonigroup.com

angelonigroup.com

### LAMINATE MECHANICAL PROPERTIES

The table below shows typical average mechanical properties that can be achieved with cured IMP509 laminates. All values are normalised to target resin content and fibre volume fraction, except In-Plane Shear and ILSS.  
Autoclave cured 2 hours @ 140 °C.

Property	Units	GG204P 204 gsm Plain Weave 3k TR30S
Nominal Resin Content	(%)	43
Nominal Fibre Volume	(%)	4,73
Nominal Cured Ply Thickness	mm	0,241
Nominal laminate density	g/cm <sup>3</sup>	1.48
Interlaminar Shear Strength (ILSS)	MPa	55,9
0° Warp Tensile Strength	MPa	618
0° Warp Tensile Modulus	GPa	55,1
0° Warp Tensile Poisson's Ratio		0.05
90° Weft Tensile Strength	MPa	608
90° Weft Tensile Modulus	GPa	52,4
0° Warp Compression Strength	MPa	444
0° Warp Compression Modulus	GPa	52,3
90° Weft Compression Strength	MPa	343
90° Weft Compression Modulus	GPa	48.7
0° Warp Flexural Strength	MPa	709
0° Warp Flexural Modulus	GPa	50,5
Ultimate In-Plane Shear Strength	MPa	102,9
IPSS @ 5% shear strain	MPa	4723
In-Plane Shear Modulus	GPa	3,25

Test Methods:

ILSS: ASTM D2344  
Flexural: ASTM D790

Tensile: ASTM D3039  
In-Plane Shear: ASTM D3518

Compression: ASTM D6641

### STORAGE

Prepreg materials should be stored as received @ - 18 °C. Shelf-life @ -18 °C: 12 months Out-life @ 23 °C: 4 weeks  
Allow the material to fully thaw before removing it from its polyethylene 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 Angeloni Group knowledge. Angeloni Group 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.

### ANGELONI GROUP

Via Abbate Tommaso, 72/A - 30020 Quarto d'Altino (VE) Italy  
T. +39 0422 780580 - F. +39 0422 782782  
E. info@angelonigroup.com

angelonigroup.com

## PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST TKANINY



# Balanced Carbon Fabric

## WOVEN FABRIC DATA SHEET

**G. Angeloni**

REFERENCE

**GG 204 P**

<b>CHARACTERISTICS</b>		<b>Nominal</b>	<b>Tolerance</b>	<b>Normative</b>
<b>Mass per unit area</b>	g/m <sup>2</sup>	<b>220</b>	± 5%	ISO 4605
<b>Weave</b>		<b>Plain</b>		ISO 2113
<b>Width</b>	mm	<b>1000/1200</b>	± 2,5%	ISO 22198
<b>Thickness</b>	mm	<b>0,16</b>	± 2,5%	ISO 5084(**)
<b>Other informations</b>		<b>Loomstate</b>		

<b>Nominal Construction</b>		<b>WARP</b>		<b>WEFT</b>	
<b>Fiber Description</b>		HR Carbon Fiber 3K 200 tex		HR Carbon Fiber 3K 200 tex	
<b>Thread Count</b>	ends/cm	<b>5,5</b>	ISO 4602	<b>5,5</b>	ISO 4602
<b>Weight Distribution</b>	g/m <sup>2</sup>	3K Carbon	<b>110</b>	3K Carbon	<b>110</b>
	%		50%		50%
<b>Selvages</b>		<b>Weaving style</b>	LENO	<b>Type of Fiber</b>	HM polyester 22 tex

(\*\*) Theoretical thickness for an epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

<b>Date of issue</b>	05/10/2012	<b>No. of Pages</b>	1
----------------------	------------	---------------------	---

Note : Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

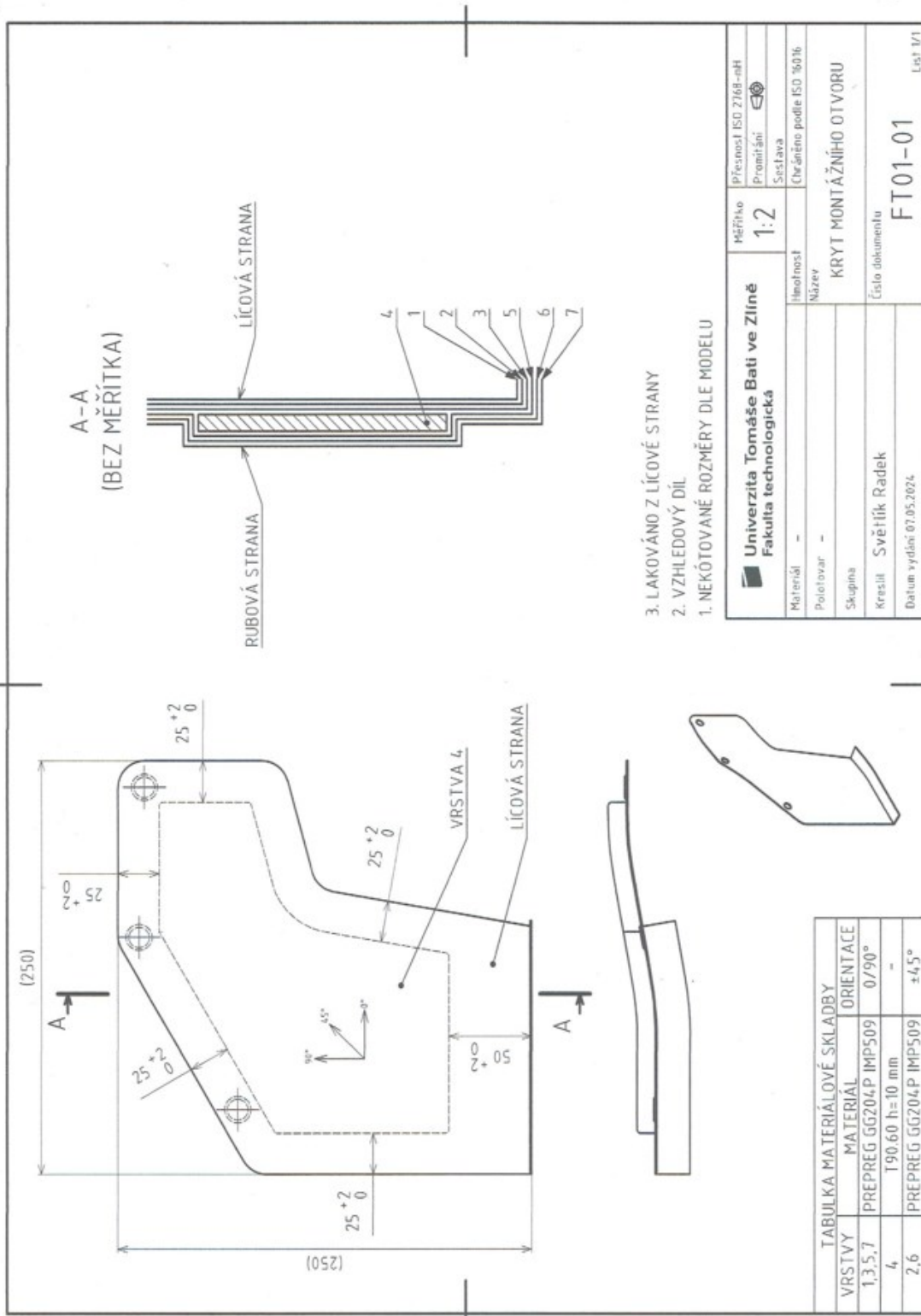
**G. Angeloni srl**

via Abate Tommaso , 72/A5 - 30020 Quarto d'Altino (VE) - ITALY

Tel. +39 0422 823801 - 780580 Fax +39 0422 782782

E-Mail : info@g-angeloni.com

# PŘÍLOHA P III: VÝKRES VÝROBKU



3. LAKOVÁNÍ Z LÍCOVÉ STRANY
2. VZHLEDOVÝ DÍL
1. NEKÓTOVANÉ ROZMĚRY DLE MODELU

<b>Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně</b> Fakulta technologická		Měřítko <b>1:2</b>	Přesnost ISO 2768-mS
Materiál		hmotnost	Promítání Sešřava
Položvar		Název	Chráněno podle ISO 9001
Skupina		KRYT MONTÁŽNÍHO OTVORU	
Kreslit Světlík Radek		Číslo dokumentu	
Datum vydání 07.05.2024		<b>FT01-01</b>	
			List 1/1

TABULKA MATERIÁLOVÉ SKLADBY	
VRSTVA	MATERIÁL ORIENTACE
1,3,5,7	PREPREG GG204.P IMP509 0/90°
4	190.60 h=10 mm -
2,6	PREPREG GG204.P IMP509 ±4,5°