

# **Vliv teploty na mechanické chování sendvičových konstrukcí s polymerním jádrem**

David Ondroušek

---

Bakalářská práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: David Ondroušek  
Osobní číslo: T13101  
Studijní program: B3909 Procesní inženýrství  
Studijní obor: Technologická zařízení  
Forma studia: prezenční

Téma práce: Vliv teploty na mechanické chování sendvičových konstrukcí s polymerním jádrem.

Zásady pro vypracování:

1. a) Vypracujte literární rešerši o problematice kompozitních sendvičových struktur:
2. Základní definice, způsoby zatěžování
3. Materiály sendvičových struktur (zaměření na polymerní jádra)
4. Technologie výroby
5. Způsoby testování sendvičových struktur
6. b) Experimentální část:
7. Popis použitých materiálů
8. Výroba a příprava zkušebních vzorků
9. Mechanické testování vzorků
10. Diskuze výsledků a závěry

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Ehrenstein, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009.
2. Lorna J. Gibson, Michael F. Ashby: Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge; Cambridge University Press, 1999.
3. Zenkert, D., Nordic Industrial Fund: The Handbook of Sandwich Construction. Wocestershire; EMAS Publishing, 1997.
4. Campbell, F.C.: Structural Composite Materials. Ohio; ASM International, 2010.
5. Elektronické zdroje dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Ladislav Fojtl**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**30. ledna 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**22. května 2015**

Ve Zlíně dne 9. února 2015

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

Příjmení a jméno: ONDROUŠEK DAVID

Obor: TECHNLOGICKÁ  
ZAŘÍZENÍ

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 18.5.2015

  
.....

---

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Tématem této bakalářské práce je porovnat mechanické vlastnosti a chování nosníků sendvičových konstrukcí s polymerním jádrem při pokojové, zvýšené a také snížené teplotě prostředí.

První část této bakalářské práce se zabývá obecnou charakteristikou kompozitních sendvičových materiálů a problematikou sendvičových struktur.

Experimentální část představuje použité materiály a zařízení, popisuje výrobu sendvičových panelů a z nich připravených zkušebních těles. Naměřené mechanické vlastnosti jsou zaznamenány do grafů a tabulek, přičemž jsou následně jednotlivé typy sendvičových konstrukcí vzájemně porovnávány. Dále jsou popsány jednotlivé mechanismy porušení a určena míra poklesu vlastností právě vlivem změny teploty.

Klíčová slova: sendvičová konstrukce, polymerní jádro, kompozitní materiál, prepreg, teplota, ohybové vlastnosti.

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is to compare polymer core sandwich structure beams' mechanical properties and behavior at different temperatures.

The first part of this bachelor thesis deals with the general characteristics of composite sandwich materials and describes problematic of sandwich structures.

The following experimental part describes the test specimen manufacturing process. It focuses on used materials and further describes the production of test plates and from the prepared testing specimens. As individual types of sandwich structures are compared, the mechanical properties measurements are recorded in graphs and charts. Based on measuring the different failure mechanisms are described and the rate of decline in mechanical properties is identified.

Keywords: sandwich construction, polymer core, composite material, prepreg, temperature, bending properties.

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ladislavu Fojtlovi za poskytnuté rady a podmínky, které mi pomohly v řešení problematiky bakalářské práce.

Dále děkuji panu Ing. Vladimíru Rusnákovi za praktické rady a pomoc. Firmě FORM s.r.o. děkuji za poskytnuté prostory a materiál potřebný pro výrobu sendvičových panelů.

Mé poděkování taktéž patří rodině a přítelkyni za podporu při studiu.

Tato bakalářská práce byla řešena z finanční podpory interního grantu UTB s číslem IGA/FT/2015/001.

*Co chceš, můžeš.*

*(Tomáš Baťa)*

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE</b> .....	<b>12</b>
1.1 SLOŽENÍ SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE .....	12
1.1.1 Vnější vrstvy .....	13
1.1.2 Jádrové materiály .....	15
1.2 DEFINICE PARAMETRŮ.....	17
1.2.1 Tuhost a pevnost v ohybu .....	17
1.2.2 Tepelná odolnost a odolnost proti ohni.....	18
1.3 APLIKACE SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	18
<b>2 POLYMERNÍ JÁDROVÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>21</b>
2.1 PĚNOVÁ POLYMERNÍ JÁDRA .....	21
2.1.1 Vlastnosti polymerních pěn.....	21
2.1.2 Výroba polymerních pěn.....	22
2.1.3 Použití polymerních pěn .....	23
2.1.4 Příklady vybraných polymerních pěn .....	24
2.2 VOŠTINOVÁ POLYPROPYLENOVÁ JÁDRA.....	28
<b>3 TECHNOLOGIE VÝROBY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ</b> .....	<b>30</b>
3.1 ZÁKLADNÍ METODY VÝROBY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR .....	30
3.1.1 Vyhřívané lisování .....	30
3.1.2 Lisování prepregu pomocí vakua .....	31
3.1.3 Vytvrzování v autoklávu .....	32
<b>4 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR</b> .....	<b>34</b>
4.1 ZKOUŠKA OHYBEM.....	34
4.1.1 Zkouška jednoosým ohybem.....	35
4.1.2 Tříbodová zkouška ohybem .....	35
4.1.3 Čtyřbodová zkouška ohybem.....	36
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>38</b>
<b>5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>39</b>
<b>6 POPIS POUŽITÝCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>40</b>
6.1 PREPREG GURIT PHG 840-300-42 .....	40
6.2 JÁDROVÉ MATERIÁLY.....	42
<b>7 VÝROBA SENDVIČOVÝCH PANELŮ</b> .....	<b>46</b>
7.1 POMOCNÉ KOMPONENTY .....	47
7.1.1 Separční fólie.....	48
7.1.2 Odsávací rohož.....	48
7.1.3 Těsnicí páska .....	49
7.1.4 Vakuová fólie .....	49
7.1.5 Vzduchotechnika.....	50



7.2	PŘÍPRAVA KOMPONENTŮ NA VÝROBU .....	50
7.3	POSTUP VÝROBY SENDVIČOVÝCH PANELŮ .....	51
7.4	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....	57
<b>8</b>	<b>POPIS STATISTICKÝCH VELIČIN.....</b>	<b>58</b>
<b>9</b>	<b>STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ VZORKŮ .....</b>	<b>59</b>
9.1	ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM .....	59
9.2	DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	74
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>81</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>87</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>90</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>91</b>

## ÚVOD

Ve 2. polovině 20. století byl průkopníkem ve vývoji nových kompozitních materiálů kosmický a letecký průmysl. Během poměrně krátké doby prošly nové materiály dynamickým vývojem, kdy své uplatnění našly především v dopravním, chemickém či stavebním průmyslu.

V současné době se objevuje požadavek na snížení provozních nákladů a snížení hmotnosti a to nejen v dopravní technice, čemuž vyhovují moderní materiály.

Použitím kompozitních materiálů se snižuje jak ekologická zátěž, tak i provozní náklady a náklady na údržbu. Tyto materiály mají dobrou odolnost vůči korozi a dlouhou životnost.

Sendvičové materiály se uplatňují mimo jiné při konstrukci železničních vagonů, tramvají či autobusů, kde tvoří různé krycí panely a nahradily dřívější dřevěné a plechové obklady. Ze sendvičových materiálů jsou vyrobeny například díly střech, nosné části, obklady podlah a stěn. Výhodami těchto materiálů jsou vysoká tuhost, nízká hmotnost, odolnost proti šíření trhlin, dobrá tepelná a zvuková izolační vlastnost a jiné.

Vhodnou kombinací materiálu jádra a vnější vrstvy lze jejich konečné vlastnosti přizpůsobit téměř všem požadavkům.

V technické praxi má použití sendvičových materiálů své místo a věřím, že jejich využití bude i nadále velmi rychle vzrůstat.

Výzkum této bakalářské práce je zaměřen na sendvičové konstrukce s polymerním jádrem, zejména pak na vliv různé teploty na ohybové vlastnosti těchto konstrukcí.

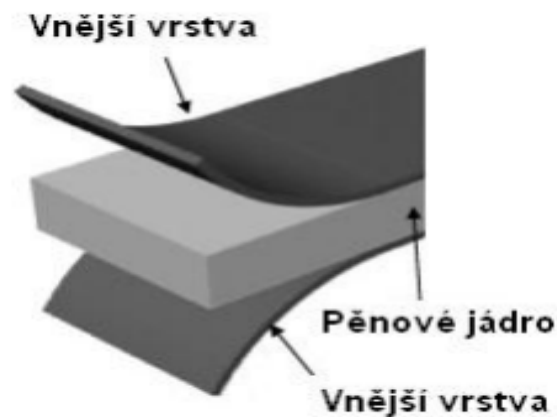
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

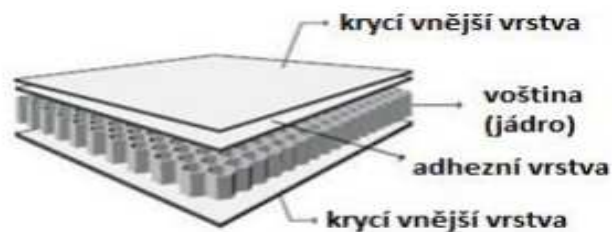
## 1.1 Složení sendvičové konstrukce

Sendvičové konstrukce tzv. sendviče (Obr. 1) jsou druh kompozitu, který se skládá ze dvou vnějších vrstev (potahy), které překrývají prostřední vrstvu (jádro) z lehkého materiálu. Vnější vrstvy jsou tenké, tuhé a mají vysokou pevnost. Jádro je tlustší, zpravidla méně pevný materiál o nízké hustotě a vyznačuje se nízkou hmotností, což představuje hlavní výhodu sendvičového materiálu oproti běžně používaným materiálům. [1]

Hlavní funkcí jádra je přenos smykového zatížení z jedné vnější vrstvy na druhou. Hlavní funkcí vnější vrstvy je zajistit lepší mechanické vlastnosti, zejména tuhost a pevnost. Sendviče mají na rozdíl od běžných laminátů mnohem vyšší pevnost, tuhost a izolační vlastnosti a přitom nižší hmotnost a vyšší odolnost proti rázu. [2]



Obr. 1. Sendvič s pěnovým jádrem.[37]



Obr. 2. Voštinová sendvičová struktura. [2]

### 1.1.1 Vnější vrstvy

Jako vnější vrstvy sendvičových konstrukcí se používají materiály pevné a relativně tenké, které musí zároveň splňovat požadavky na výrobu s ohledem na profilování a ohýbání. Musí být odolné proti povětrnostem a těsnosti vůči páře, odolávat zatížení, korozi a ohni. Pro krycí vnější vrstvy se mohou používat například hliník, ocel, laminát či dřevo.[4]

- **Ocelové, hliníkové plechy**

Tenké ocelové, za studena válcované plechy s ochranou proti korozi se používají jako obkladový materiál jádra sendviče. Jako ochrana proti korozi se často používá žárové zinkování. [4]

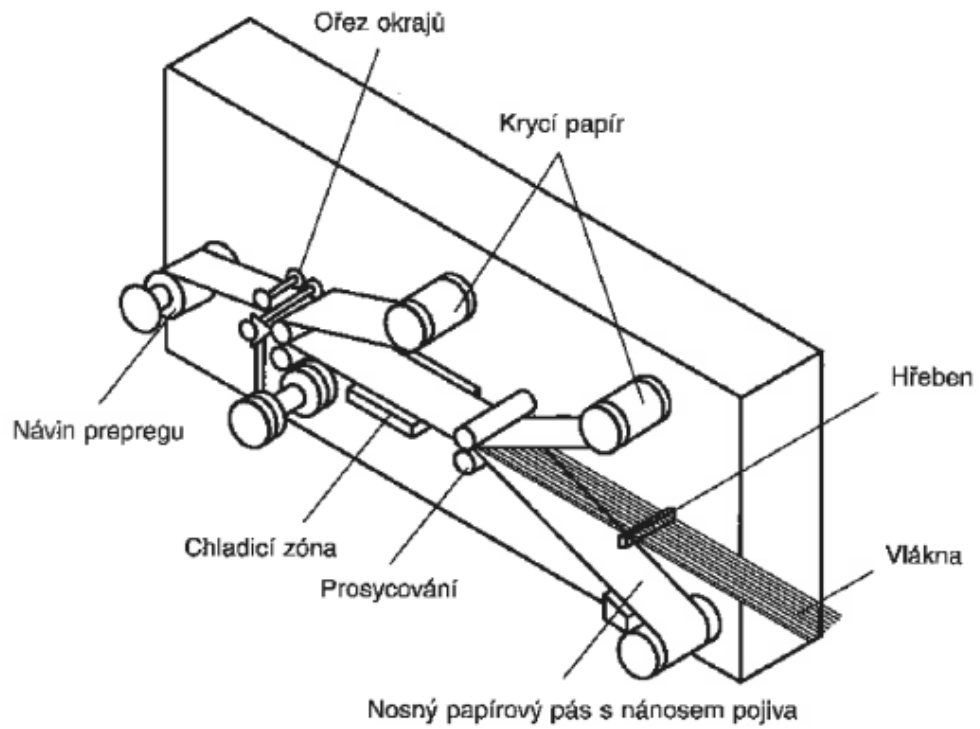
V místech se speciálními požadavky na odolnost proti korozi jako je výroba nebo skladování potravin se využívají sendvičové panely s obklady z hliníku. Tloušťka hliníkového plechu je obvykle 0,7-1,2mm. [4]

- **Předimpregnované materiály (prepregy)**

Prepregy jsou polotovary k výrobě vláknových kompozitů, jejichž hlavní složkou je výztuž impregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi (např. epoxidová pryskyřice a fenolová pryskyřice). Prepregy obsahují tkaniny, rovingy popř. rohože impregnované reaktoplastickou (polovytvrzenou) nebo termoplastickou matricí. Prepregové listy se případně vrství do požadované tloušťky, dotvarují ve formách a vytvrdí se působením tepla a tlaku. [3]

K výhodám prepregů patří velmi nízká hmotnost, vysoká tuhost, trvanlivost, volnost při návrhu, snížení nákladů výroby a hlavně přesně definovaný podíl matrice, respektive tkaniny. Hlavní výhodou prepregů je, že se nemusí k jejich spojení s jádrem používat adhezivní vrstva (je nahrazena pryskyřicí). [3]

Využití prepregů je výhodnější z toho důvodu, že je oddělen složitý proces prosycování výztuže pojivem od další technologie zpracování. Výroba prepregů se provádí na speciálních zařízeních, kde jsou přesně stanoveny a kontrolovány technologické podmínky výroby. Obr. 3 je schéma výroby jednosměrně vyztuženého prepregu. Z cívky se odvíjejí prameny vláken, která se vedou do stavitelného hřebenu, kde jsou rovnoběžně vyrovnány. Tato vlákna se dále ukládají na nosný papírový pás se silikonovou vrstvou a nánosem pryskyřice. Pás je veden na válec kalandru, kde dochází tlakem k prosycení výztuže pojivem. Následuje chladicí zóna, kde dojde k zastavení vytvrzovací reakce. Nakonec dojde k ořezání okrajů a návínou prepregu.[3,24,25]



Obr. 3. Výroba jednosměrně orientovaného prepregu. [16]



Obr. 4. Prepreg vyrobený z uhlíkových vláken. [20]

- **Lamináty**

Pro vnější vrstvy se používají již hotové panely z laminátů vystužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Na vnější vrstvu kompozitu (např. laminát ze skelných vláken) se nanáší pryskyřice, na kterou se pokládá a přitlačí jádro sendviče. Po několika sekundách se pryskyřice rozpustí a následuje napojení horní vnější vrstvy. Aby se dosáhlo optimálního spojení jednotlivých vrstev, prochází kompozit zařízením s vakuovým vakem, hydraulickým lisem nebo autoklávem. Sériově se vyrábí kompozity s tloušťkou mezi 1 a cca. 100 mm, hmotnost může být až pod 40 g/m<sup>2</sup>. [1]

Dále se používají kompaktní desky z vysokotlakých laminátů (z angl. High Pressure Laminate – HPL). Jde o vysokotlaký laminát pro různé vnitřní i vnější aplikace. Desky mají vynikající mechanickou pevnost a odolnost vůči povětrnostním vlivům. Pro jejich výrobu se používá vrstvený papír impregnovaný pryskyřicemi, který je za žáru a vysokého tlaku slisován v homogenní pevnou desku. K tomuto lisování dochází nejčastěji v etážových lisech. [5]

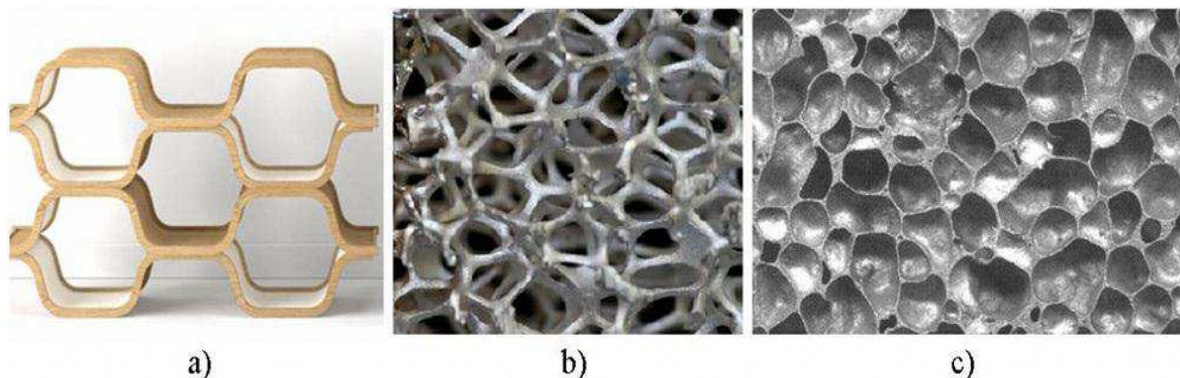
### **1.1.2 Jádrové materiály**

Jádro sendvičové konstrukce musí mít vhodné vlastnosti s ohledem na mechanickou pevnost a tuhost. S přihlédnutím ke způsobu využití také na hořlavost, vodivost a v některých případech i na akustické vlastnosti. Balzové dřevo a překližky byly po mnoho let hodně používány ve výstavbě lodí. I když tyto materiály poskytují vynikající kompresní a tuhostní vlastnosti za poměrně nízkou cenu, je jejich hlavní nevýhodou hmotnost, náchylnost k absorpci vody a následné degradaci (hniloba). [7]

Pěnové jádra mohou být mnohem lehčí, odolné proti plísním, neabsorbují vodu a mají lepší odolnost proti únavě materiálu než balzové dřevo. Lamináty vyrobené z pěnového jádra vydrží déle a váží méně než dřevo. Voštinové materiály jako je např. Nomex (aramid papír a fenolové pryskyřice) a hliníkové voštiny jsou jádra používané v leteckém průmyslu díky jejich vysoké pevnosti, vysoké teplotní stabilitě a nízké hmotnosti. I když tyto vlastnosti dobře fungují pro letecké aplikace, mají určité nedostatky v lodním průmyslu. Voštiny mají relativně malý prostor pro spojování. Otevřená buněčná struktura z voštiny je náchylná k proniknutí vody a degradaci materiálu. [7]

Voštiny jsou inspirovány tvarem včelích plástů. Průřez buňky je mnohoúhelník (obvykle šestiúhelník) nebo do oblouků tvarovaný profil, který je po celé délce buňky stejný. Tvar

buňky je tím pádem určen jen jednou rovinou, proto se také nazývají dvourozměrné buněčné tělesa.[8]



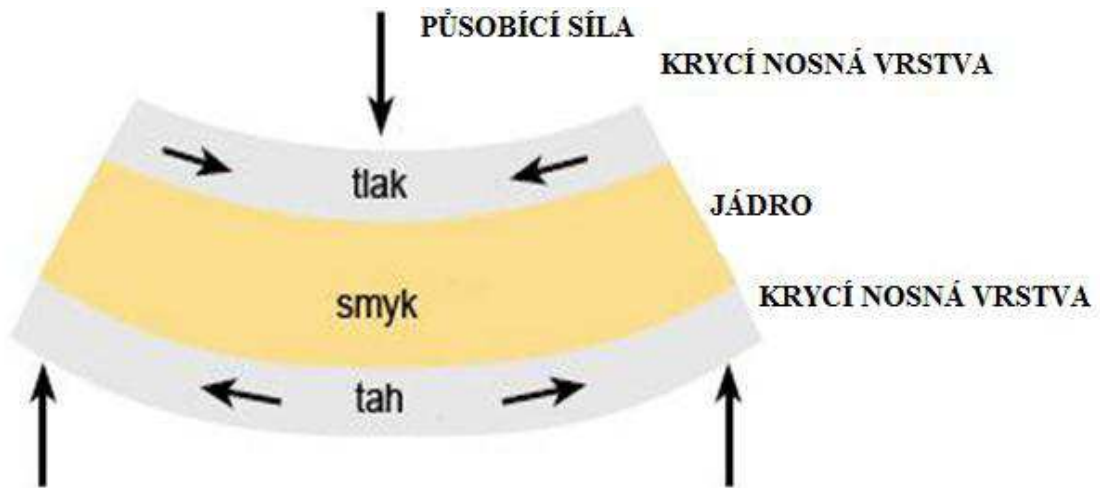
*Obr. 5. Ukázka typů struktury buněčných těles: a) voština, b) pěna s otevřenými buňkami, c) pěna s uzavřenými buňkami.[35]*

Na rozdíl od voštiny jsou buňky pěn tvořeny sítí hran a stěn v prostoru, které vytvářejí již zmíněné dutiny. Tyto dutiny jsou buď od sebe odizolovány pevnými tenkými stěnami materiálu nebo jsou mezi sebou průchodné a to v případě, že buňka je tvořena pouze hranami. V prvním případě mluvíme o pěnách s uzavřenými buňkami (Obr. 5c), v druhém případě o pěnách s otevřenými buňkami (Obr. 5b). Otevřené nebo uzavřené propojení buněk je podmíněno zpěňováním materiálem a samotnou technikou výroby pěny. Vyskytují se také pěnové materiály s kombinací otevřených i uzavřených buněk. Pěny se také nazývají trojrozměrné buněčné tělesa. [8]



## 1.2 Definice parametrů

Efektivní struktura sendviče je taková, která je tvořena dvěma tuhými a pevnými potahy zatěžovanými tahovými a tlakovými silami a jádrem o relativně nízké hustotě přenášejícím smykové síly mezi potahy.[7]



Obr. 6. Namáhání sendvičového nosníku při ohybu.[20]

Sendvičové konstrukce se uplatňují převážně v letecké a dopravní technice, kde se využívá jejich hlavních předností, a to vysoké ohybové pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti. Sendviče však lze nalézt i v ostatních průmyslových odvětvích. Ohybová tuhost a pevnost nejsou jejich jedinými přínosy. [7]

Mezi další výhody patří únavová odolnost, odolnost proti šíření trhlin, odolnost proti rázům, tepelná odolnost a odolnost proti ohni, tlumení a akustická izolace. Tyto vlastnosti jsou určeny převážně materiálem jádra. [7]

### 1.2.1 Tuhost a pevnost v ohybu

Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná druhé mocnině její tloušťky. Výhodou je, že se zvětšováním tloušťky sendviče dochází k velmi malému nárůstu jeho hmotnosti - zvětšuje se pouze tloušťka lehkého jádra. Pevnost v ohybu také roste se vzdáleností potahů, ale při dimenzování sendviče je nutné zároveň posuzovat smykovou pevnost jádra. Obecně lze říci, že pevnost jádra ve smyku roste s jeho hustotou.[7]

O pevnosti sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky rozhoduje především pevnost jádra v tlaku, ale i tuhost a tloušťka potahů. Pevnost v tlaku jádra roste s jeho hustotou.

Z porovnání pevností pěnových a voštinových jader vyplývá, že voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnová jádra při stejné hustotě. Ovšem při volbě vhodného jádra sendviče je nezbytné zohlednit všechny faktory. [7]

### **1.2.2 Tepelná odolnost a odolnost proti ohni**

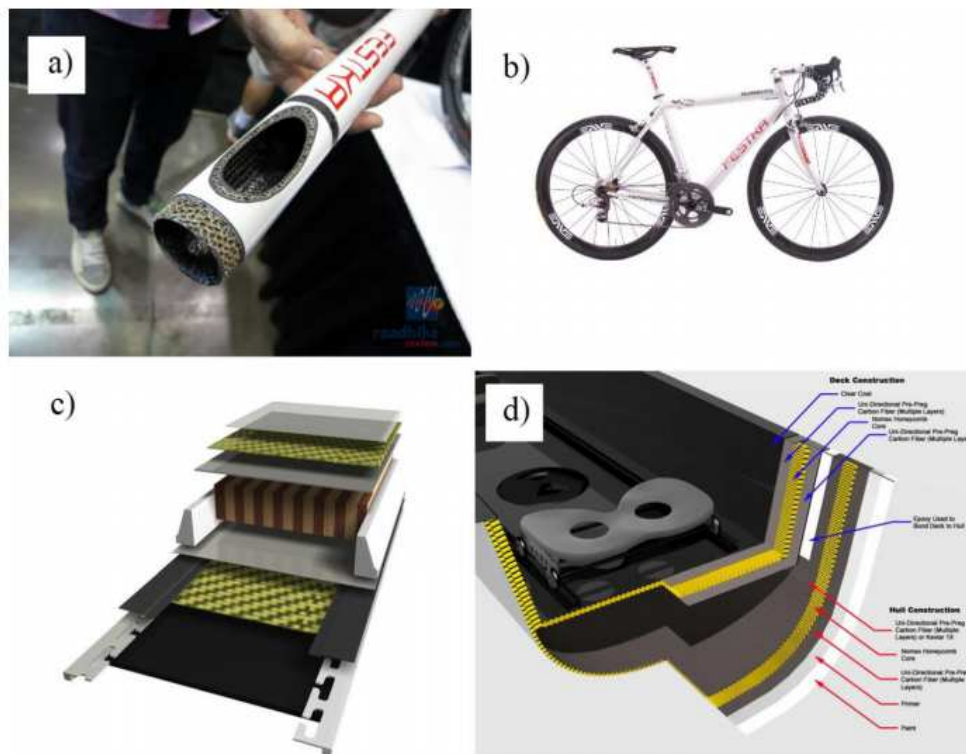
Stejně jako na ostatní strojírenské výrobky i na sendvičové konstrukce jsou kladeny požadavky na tepelnou odolnost. Zde se však musí brát v úvahu tepelná odolnost všech složek sendviče, tj. potahů, jádra i spojovacího lepidla. U tepelné odolnosti také hraje velký vliv tepelná vodivost použitých materiálů. Při vysoké tepelné vodivosti použitých materiálů je ohřev sendviče nižší než při nízké tepelné vodivosti (při ohřevu sendviče pouze na jedné straně). Této vlastnosti se využívá při stavbě kosmických raket, kde se právě z tohoto důvodu používají hliníkové voštiny.[7]

Při návrhu sendvičů pro dopravní techniku je nutné respektovat požadavky oborových konstrukčních předpisů na odolnost proti ohni. Všechny použité materiály musí mít atest, že splňují příslušné předpisy na odolnost proti ohni. [7]

### **1.3 Aplikace sendvičových konstrukcí**

V mnoha oblastech průmyslu nacházejí uplatnění sendvičové konstrukce. Hlavně tam, kde je výhodné snížit hmotnost, vyztužit konstrukci nebo využít vhodné vlastnosti, které běžně používané materiály nemají. Hlavní uplatnění nachází v leteckých a kosmických aplikacích. Dále v lodním a stavebním průmyslu, železniční nebo automobilové dopravě. [7]

Ve stavebnictví slouží jako tepelná a zvuková izolace. Speciální uplatnění má i ve sportovním odvětví, kde se používají například u konstrukce lyží a snowboardů. Pěnové materiály se aplikují do ráfků kol ke snížení váhy a zlepšení boční tuhosti kola. Voštinová jádra se začala používat také v rámech kol, kde snižují vibrace.[7]



Obr. 7. Příklady sendvičových struktur ve sportu: a) trubka rámu kol Festka b) kolo Festka, c) konstrukce lyže, d) veslařská závodní loď.[38], [39], [40], [41]

Příkladem využití sendvičových konstrukcí je také letecký průmysl, kdy je například kryt hlavního podvozku letounu Aero Ae-270 sendvič tvořený kompozitními potahy s uhlíkovými vlákny a pěnovým jádrem. Použití pěny si vynutil složitý tvar dílu s několika prolisy. Při výrobě je nejprve obrobena pěnové jádro na CNC stroji a jsou vlepny duralové vložky v místech závěsů. Pak je pěnové jádro obaleno několika vrstvami uhlíkového prepregu. Díl je vytvrzen v jedné operaci v autoklávu. [7]



Obr. 8. a) Letoun Aero Ae-270 [42], Obr. 8b Detail podvozku letadla. [43]

Voštinová jádra z hliníkové voštiny byla použita pro sendvičové panely pro nízkopodlažní tramvaj Astra, kde byla požadována vysoká tuhost při nízké hmotnosti. V tomto případě byla zvolena klasická koncepce duralových potahů přilepených k hliníkové voštině fóliovým lepidlem. Panel kryje výsuvnou plošinu, která tvoří bezbariérový vstup do tramvaje a tím umožňuje nájezd invalidního vozíku přímo z nástupiště. [7]



*Obr. 9. Tramvaj Astra. [44]*

Další využití sendvičů je ve zdravotnictví při výrobě polohovatelných lůžek, která umožňují rentgenovat pacienta přímo na lůžku. Lůžko je tvořeno rámem, ke kterému jsou přišroubovány sendvičové desky. Hlavním požadavkem byl nízký koeficient útlumu pro rentgenové záření při dostatečné ohybové tuhosti a pevnosti a zároveň při nízké hmotnosti. Tyto nároky splňují pouze kompozitní potahy s uhlíkovými vlákny. Jako jádro byla zvolena pěna, protože má homogenní strukturu a relativně nízký koeficient útlumu pro rentgenové záření. Výsledkem je dostatečně tuhá a pevná sendvičová deska, která umožňuje rentgenovat pacienta menšími dávkami RTG záření při zachování kvality snímků. [7]

Následující hlavní kapitola (Kap. 2) obsahuje informace pouze k polymerním jádrovým materiálům z důvodu zaměření výzkumu v této bakalářské práci.

## 2 POLYMERNÍ JÁDROVÉ MATERIÁLY

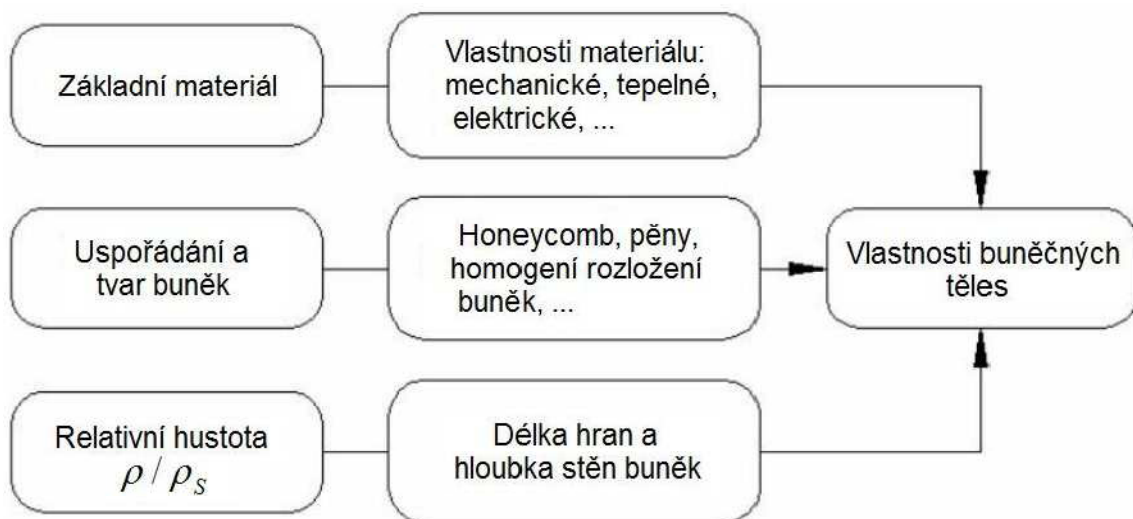
Jádra z polymerních materiálů se mohou vyskytovat v mnoha formách, nejčastěji jsou však v průmyslu používané polymerní pěny s různým typem a velikostí vnitřních buněk a také jádra ve formě voštin.

### 2.1 Pěnová polymerní jádra

Pěnové materiály vznikají tím, že jsou v polymeru uměle vytvořeny mikro dutiny naplněné plynem. Tyto mikro dutiny jsou zpravidla přibližně kulovité, při malém množství (uzavřené buňky) a mohou obsahovat v podstatě libovolný plyn, většinou to bývá obyčejný vzduch, dále pak vodík, dusík nebo vodní pára. Při větším množství se spojují dohromady a vznikají do většího prostoru (otevřené buňky). [10]

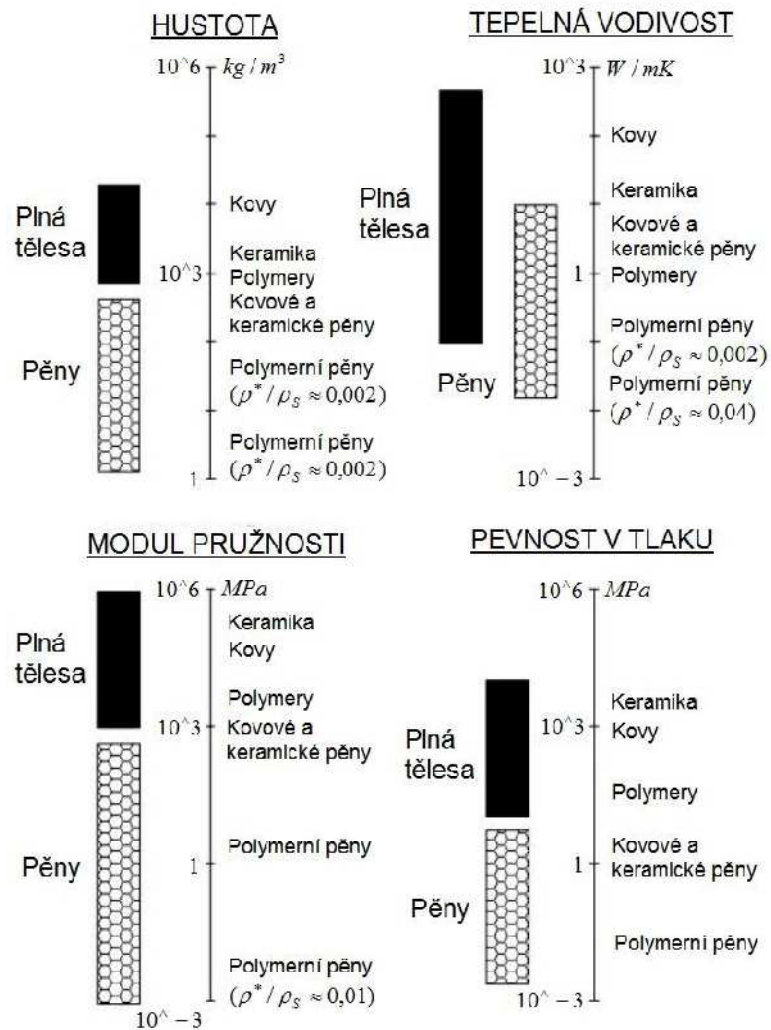
#### 2.1.1 Vlastnosti polymerních pěn

Vlastnosti buněčných pěnových těles jsou výsledkem kombinace vlastností buněčné struktury a vlastností materiálu použitého na jeho výrobu. Tyto dva faktory spolu s relativní hustotou buněčných těles jsou určujícími parametry pro jejich fyzikální a mechanické vlastnosti (Obr. 10).[8]



Obr. 10. Faktory ovlivňující vlastnosti buněčných těles.[8]

Na (Obr. 11) je znázorněno srovnání čtyř vlastností: hustota, tepelná vodivost, Youngův modul pružnosti a pevnost v tlaku plyných a buněčných materiálů.[8]



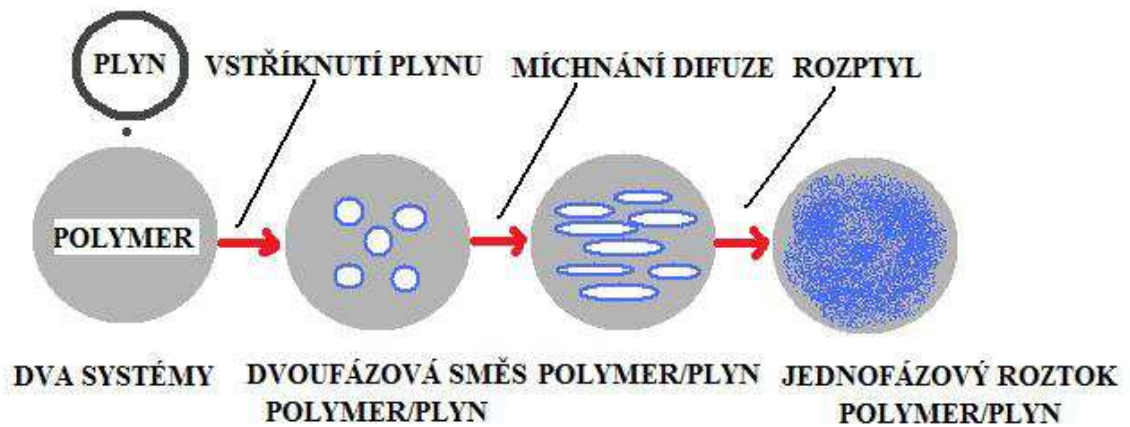
Obr. 11. Vlastnosti pěnových a plných materiálů. [8]

### 2.1.2 Výroba polymerních pěn

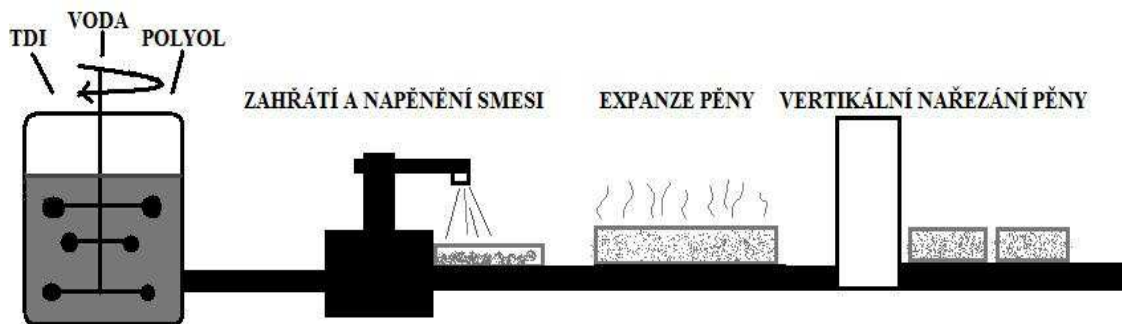
Polymery jsou zpěňované přidáním plynných bublin do tekutého monomeru nebo horkého polymeru. Tyto bubliny se nechají expandovat, stabilizovat a pak se těleso ochladí, aby ztuhlo. Bubliny se přidávají mechanickým mícháním nebo přimícháním zpěňovacího materiálu (zpěňovadla) do polymeru. Zpěňovadlo může být na bázi fyzikální nebo chemické. [8]

Fyzikální zpěňovadla jsou inertní plyny nebo uhlík, vodík a dusík. Tyto plyny se zavádějí do horkého polymeru pod vysokým tlakem a jejich růst v materiálu je řízen redukcí tlaku. Jinou alternativou je přimíchání do polymeru tekutiny s nízkým bodem varu (např. chlorfluoruhlodíky nebo dichlormethan). Tyto se ohřevem odpaří, čímž uvolňují plynné bubliny. Chemické zpěňovadla jsou přísady, které se teplem rozkládají, nebo které vzájemnou chemickou reakcí uvolňují plyny. Polymerové pěny s nízkou hustotou lze také vyrábět přimícháním polymerového gelu do tekutiny, která se následně nechá odpařit. Nej-

více používanými polymerními pěny jsou pěny polyuretanové (PUR), polystyrenové (PS), polypropylenové (PP) a polyetylenové (PE). [8]



Obr. 12. Výroba polymerních pěn zpěňováním plynem.



Obr. 13. Výroba polymerní pěny přidáním zpěňovadla.

### 2.1.3 Použití polymerních pěn

Enormní rozsah vlastností nabízí širokou oblast využití materiálů s buněčnou strukturou tam, kde by se klasické materiály těžko uplatnily. Nízká hustota a tím i hmotnost dovoluje vytvářet lehké a tuhé komponenty jako například vyplněné profily a velké přenosné konstrukce v automobilovém, leteckém a stavebním průmyslu. Pro nízkou tepelnou vodivost jsou pěnové materiály levným a spolehlivým tepelným izolátorem. Pěny se také využívají jako výplňový materiál pro jejich nízkou tuhost, např. polyuretanové pěny se standardně používají jako výplň sedadel (Obr. 14b).[8]



a)



b)

Obr. 14.a) Absorbér s pěnovou výplní, 14 b) Pěnová výplň autosedačky. [8]

Mezi hlavní oblasti použití buněčných materiálů patří (v závislosti na vlastnostech zpěňování materiálu):

- samonosné lehké panely pro dopravní a stavební konstrukce,
- jádra pro sendvičové struktury nebo přímo sendviče s izotropními vlastnostmi,
- konstrukční a obkladový materiál v obchodních domech, hotelech a jiných veřejných prostorách s tepelně a zvukově izolačním účinkem, nezatěžující životně prostředí,
- alternativa k dřevu kvůli nehořlavosti (kovové pěny), rozměrové stabilitě, odolnosti vůči parazitům a plísním, snadné recyklovatelnosti apod.,
- lehké součásti strojů s vysokou tuhostí a dobrými tlumíciemi vlastnostmi,
- trvalé jádra odlitků,
- vyztužování dutých profilů v nejvíce namáhaných průřezech,
- deformační části automobilů na ochranu pasažérů před nárazem (Obr. 14a),
- bezpečnostní deformační zóny pro zdvihadací a manipulační systémy [8]

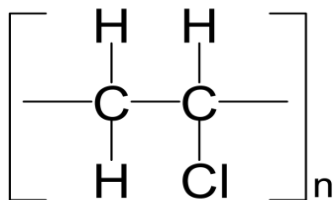
#### 2.1.4 Příklady vybraných polymerních pěn

##### Polyvinylchloridové pěny (PVC)

PVC pěny s uzavřenými buňkami jsou jedny z nejčastěji používaných materiálů pro výrobu jader sendvičových konstrukcí. PVC pěny nabízí vyváženou kombinaci statických a dynamických vlastností a také dobrou odolnost vůči absorpci vody, jsou také odolné vůči mnoha chemikáliím. Další klíčovou vlastností je velké rozpětí teplot, ve kterých je možno tyto pěny používat, typicky se používají od  $-240^{\circ}\text{C}$  do  $80^{\circ}\text{C}$ . Přestože jsou PVC pěny vy-



soce hořlavé, lze použít retardérů hoření pro snížení hořlavosti. Další výhodnou vlastností je odolnost vůči styrenu, což znamená, že může být bezpečně použito v kombinaci s polyesterovými pryskyřicemi. Na Obr. 16. je zobrazena deska z PVC pěny. [20]



Obr. 15. Strukturní jednotka polyvinylchloridu. [47]

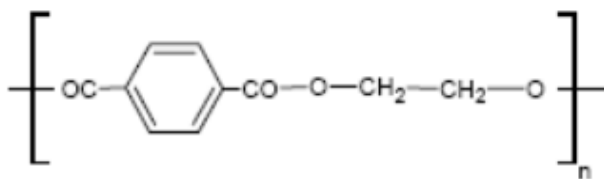


Obr. 16. Deska z PVC. [14]

Existují dva hlavní druhy PVC pěn: zesíťované a nezesíťované. Nezesíťované jsou tužší a pružnější a lze je jednodušeji tvarovat za tepla. Nicméně mají horší mechanické vlastnosti než zesíťované pěny stejné hustoty, také jsou méně odolné vůči styrenu a vyšším teplotám. Zesíťované PVC pěny jsou tvrdší a křehčí, lze z nich vyrobit tužší panel, který bude méně náchylný ke změkčení za vyšších teplot. [20]

### **Polyethyltereftalátové pěny (PET)**

Polyethyltereftalát je velice známý materiál, u spotřebitelů spíše v podobě PET lahví. Ale to je jen jedna z oblastí aplikací pro tento lehký, recyklovatelný termoplast. PET pěnová deska má zajímavý poměr hustoty a stability. Tato pěna je lehká, stabilní a flexibilní, nabízí velkou pevnost a je odolná vůči vyšším teplotám. [12]



Obr. 17. Strukturní jednotka polyetylentereftalátu. [47]



Obr. 18. Desky z PET pěny. [15]

### **Polyuretanové pěny (PUR)**

PUR pěny mají pouze průměrné mechanické vlastnosti. Povrch této pěny má na rozhraní pryskyřice/jádro po delší době tendenci ke zhoršení přilnavosti což vede k delaminaci. Jejich aplikace jsou tedy omezeny na produkci rámců a žeber pro vyztužení dílů. Nicméně je lze využít pro méně namáhané sendvičové panely, které jsou posléze využity pro tepelnou izolaci. Tato pěna je schopna pracovat za zvýšených teplot (150°C) a dobře zvukově izoluje. Na Obr. 19 je znázorněna ukázka PUR pěny. [20]



Obr. 19. Deska z PUR pěny. [13]

### Styrén akrylonitril (SAN)

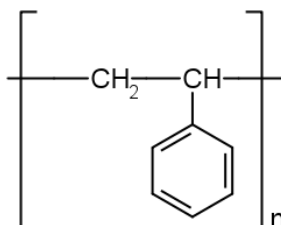
Tyto pěny mají podobné vlastnosti jako zesíťované PVC pěny. Jejich statické vlastnosti jsou vesměs podobné, ale mají mnohem vyšší tuhost. Tím pádem jsou schopny absorbovat nárazy, které by zničily konvenční a dokonce i vyztužené PVC pěny. Oproti vyztuženým PVC, jež využívají přísady ke zlepšení jeho vlastností má SAN takto dobré vlastnosti vrozené a nedochází k jejich degradaci s věkem. San pěny postupně nahrazují zesíťované PVC pěny v mnoha oblastech použití protože mají podobné vlastnosti, ale mají vyšší tepelnou odolnost a lepší statické vlastnosti, ale jsou stále teplem tvarovatelné, což napomáhá výrobě zakřivených součástí. [20]



Obr. 20. Deska ze SAN pěny.[16]

### Polystyrenové pěny (PS)

Tyto pěny se nejvíce používají při výrobě malých námořních plavidel a surfů. Mají nízkou hustotu ( $40 \text{ kg/m}^3$ ), jsou levné a lehce zpracovatelné. V aplikacích, kde potřebujeme dobré mechanické vlastnosti, jsou však nepoužitelné. Nelze je použít v kombinaci s polyesterovými pryskyřicemi, protože styren v nich obsažený by je rozpustil. [20]



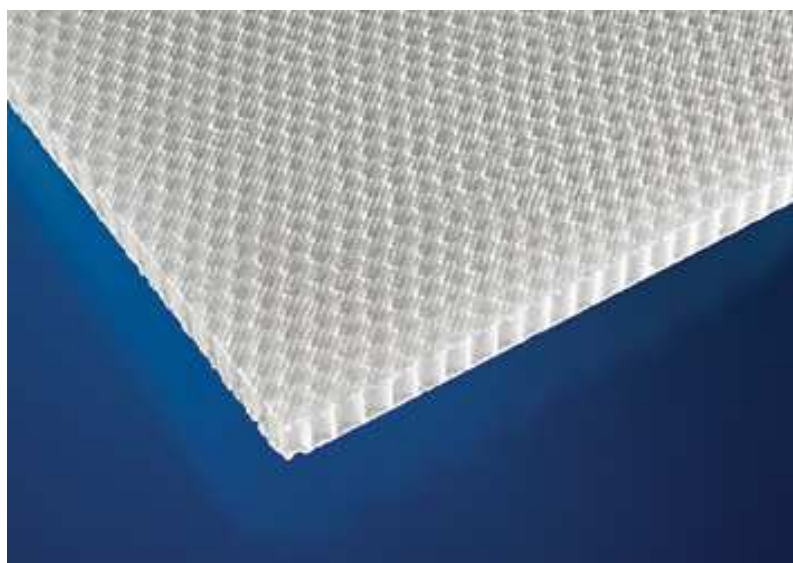
Obr. 21. Strukturní jednotka polystyrenu. [47]



*Obr. 22.Desky z PS [55]*

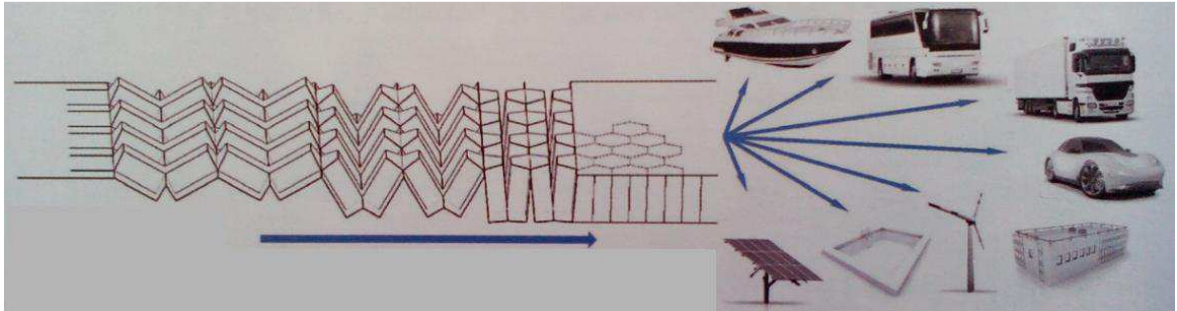
## **2.2 Voštinová polypropylenová jádra**

Polypropylenové voštiny jsou silný, ale lehký materiál, který poskytuje efektivní a optimální mechanické vlastnosti v sendvičových konstrukcích. Polypropylenové sendvičové voštiny se vyznačují zejména velkou odolností vůči působení vlhkosti a chemikálií, proto nabízejí dlouhou trvanlivost a tvarovou stálost. Další z výhod tohoto materiálu je 100% recyklovatelnost. [54]

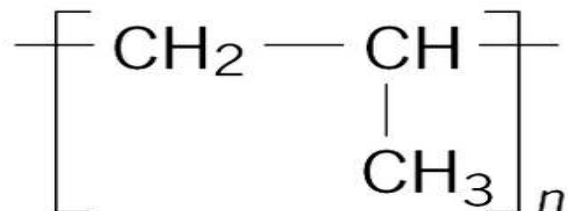


*Obr. 23.Voštinová polypropylenová deska. [56]*

Tuto voštinu lze kombinovat s mnoha materiály, jako jsou například kovy, plasty, dřevo, sklo. Například patentový postup výroby firmou EconCore umožňuje výrobu PP voštinových desek v neomezené délce. Tyto výrobky (Obr. 24) jsou vyrobeny z jediné PP fólie pomocí kontinuálního tvarování za tepla, skládání a procesu lepení. [54]



Obr. 24. Výroba polypropylenové voštiny postupným skládáním s příklady aplikací. [54]



Obr. 25. Strukturní jednotka polypropylenu. [47]

### 3 TECHNOLOGIE VÝROBY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Pokud chceme ovlivnit výsledné vlastnosti kompozitního sendvičového výrobku, jako je tuhost, pevnost, tepelná odolnost, houževnatost či náklady na výrobu a cenu, je výhodné využít specifických vlastností různých materiálů a zvolit vhodnou technologii výroby. [20]

#### 3.1 Základní metody výroby sendvičových struktur

Sendvičové komponenty mohou být vyrobeny pomocí několik základních metod, kdy pro potřeby této práce jsou popsány pouze vybrané:

Vyhřívané lisování – používá se pro výrobu desek a jednoduchých panelů

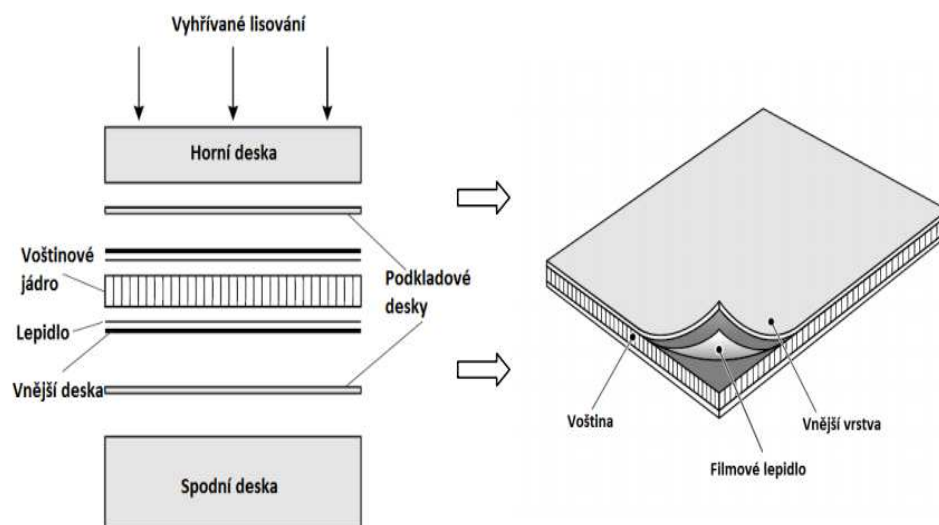
Vytvrzování v peci – používá se pro zakřivené a komplexní formy panelů

Formování v uzavřené formě – používá se pro formování hotových tvarových panelů. [53]

Mezi další technologie používané v praxi slouží například metoda ručního kladení, RTM a podobně.

##### 3.1.1 Vyhřívané lisování

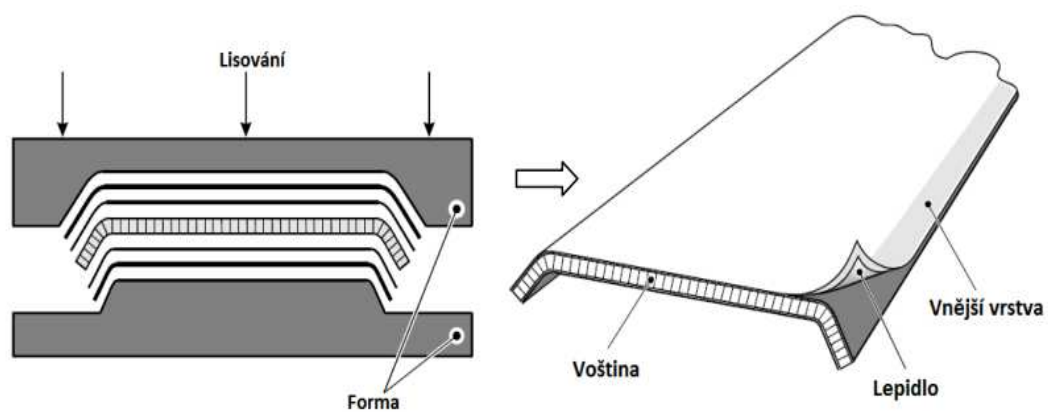
Vyhřívané lisování je výroba sendvičových struktur, kdy se mezi podkladové desky vloží vnější desky z prepregu nebo kovu, na ně dvě vrstvy fóliového lepidla a doprostřed voštinové jádro. K zalisování dochází na vyhřívaném lisu. Schéma vyhřívaného lisování je zobrazeno na Obr. 26. [53]



Obr. 26. Technologie vyhřívaného lisování a výsledný výrobek. [53]

Pro výrobky, kde potřebujeme dosáhnout dobré povrchové úpravy a vysoké přesnosti je nejvhodnější použít metodu výroby formováním v uzavřené formě (Obr. 27).

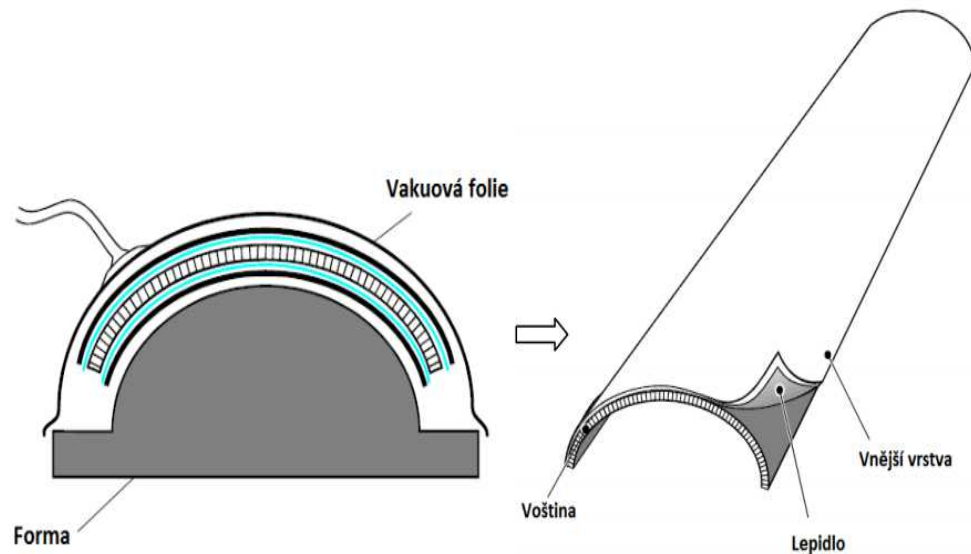
Tato metoda výroby sendvičových struktur patří také mezi vyhřívané lisování. Abychom dosáhli teploty a tlaku, lze použít několik způsobů, kdy nejčastějším způsobem je vyhřívání forem s vnějším mechanickým tlakem. Formování při pokojové teplotě, kdy forma není vyhřívána se používá, pokud je sendvičová konstrukce příliš velká nebo pokud nemáme k dispozici topné zařízení. [53]



Obr. 27. Formování v uzavřené formě a výsledný výrobek. [53]

### 3.1.2 Lisování prepregu pomocí vakua

Před vložením do vakuové pece je připravena sendvičová struktura, která se skládá z jednotlivých materiálů. Na formu, která má tvar budoucí sendvičové konstrukce se naskládají jednotlivé vrstvy a jako poslední konstrukční vrstva se položí odsávací tkanina. Nakonec se sestava překryje vakuovou fólií. Takto pokrytá forma pružnou fólií je umístěna do vyhřívané pece (Obr. 28). Na tuto technologii výroby sendvičových konstrukcí je vhodné použít jako vnější vrstvy prepregové nebo kovové desky a jako vnitřní vrstvy pěnová nebo voštinová jádra. [53]



Obr. 28. Schéma vytvrzování v peci a výsledný výrobek.[53]

### 3.1.3 Vytvrzování v autoklávu

Nejsložitější a nejnákladnější technologie sériové výroby velkorozměrných konstrukcí je vytvrzování v autoklávu. Jako výchozí materiál slouží vždy prepreg, který vyžaduje vytvrzování za zvýšených teplot. Složení jednotlivých vrstev je stejná jako při vytvrzování v peci, kdy je forma pokrytá pružnou fólií a umístěná do vyhřívaného autoklávu. Nejdříve se provede evakuace podtlakem cca 0,08 MPa, poté se tlak autoklávu zvýší na cca 0,6 MPa. [19]

Autokláv je zahřán na požadovanou teplotu (většinou v rozmezí 120°C až 200 °C) a poté nastává vytvrzování pryskyřice. Aby byly jednotlivé vrstvy prepregu k sobě lépe přitlačeny, dochází v autoklávu ke vzniku přetlaku v desetinách MPa a díky tomu je zaručený minimální obsah pryskyřice. [20]





*Obr. 29. Autokláv. [57]*

## 4 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Mechanické vlastnosti jsou finální vlastností daného materiálu, které podmiňují jeho vhodnost pro určenou funkci a použití v praxi. Poznání a zlepšování mechanických vlastností konstrukčních materiálů je motivované jejich optimálním využitím při výrobě strojů a zatížení. [49]

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

- Zkoušky statické: a) za normálních teplot, b) za zvýšených nebo snížených teplot
- Zkoušky dynamické: a) rázové, b) cyklické [50]

Měření mechanických vlastností je důležité k získávání dat pro konstruktéry a používají se jako důkaz kvality materiálu. Mechanické vlastnosti mohou být také kritériem pro výstupní kontrolu nebo pro přejímku materiálů. Dále se používají v materiálovém výzkumu, který usiluje o pochopení a strukturální vysvětlení chování konkrétních mechanických vlastností. [50]

### 4.1 Zkouška ohybem

Tento zkušební proces slouží ke zjištění mechanických vlastností. Největší význam tohoto procesu je u zkoušek materiálů s křehkým průběhem (jako jsou materiály např. litin). U materiálů, jež jsou houževnaté, nedochází vždy k celkovému porušení, ale můžeme sledovat deformace v závislosti na působící síle. Tuto zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 14125 či americká norma ASTM C393. [51], [52]

- **Podstata a průběh zkoušky:**

Zkušební těleso podepřené jako nosník dvěma podpěrami je konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. [52]

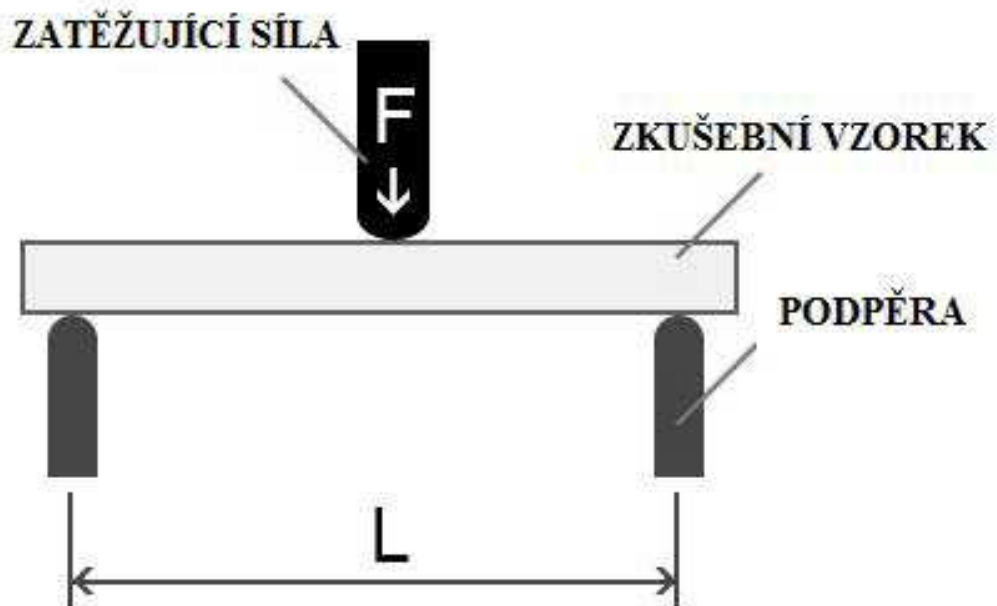
Napětí v průřezu je rozděleno nerovnoměrně, tj. od nulové hodnoty v neutrální ose roste do maxima v povrchových vláknech. Postupně, jak roste zatížení, měříme průhyb zkušebního tělesa až do okamžiku, kdy se tyč přelomí, nebo se trvale prohne. V průběhu procesu je měřena síla působící na těleso. [52]

Ohybová zkouška také umožňuje stanovit modul pružnosti u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek. [26]

Při ohybu je napětí v principu rozloženo tak, že v dolních vrstvách je tahové a směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v horní polovině průřezu (pod působícím nosníkem) na tlakové. Rozlišujeme tříbodovou a čtyřbodovou zkoušku ohybem. [26]

#### 4.1.1 Zkouška jednoosým ohybem

Nejběžnějším typem jednoosé ohybové zkoušky jsou tříbodový a čtyřbodový ohyb, které jsou znázorněny na Obr. 30. Plochý vzorek se podepře na obou koncích a následně zatíží v místě středu vzorku (tříbodový ohyb), nebo ve dvou symetricky rozložených místech (čtyřbodový ohyb). [32]



Obr. 30. Schéma ohybové zkoušky.

#### 4.1.2 Tříbodová zkouška ohybem

Zkušební těleso je při této zkoušce podepřeno jako nosník dvěma podpěrami (viz. Obr. 30) a konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. [26]

Výsledkem zkoušky jsou také ohybové křivky síla (napětí) – průhyb (deformace v % či v mm), ze kterých se vyhodnocují potřebné charakteristické hodnoty. V průběhu zkoušky se dále zaznamenává síla (napětí) působící na těleso a velikost odpovídajícího průhybu zkušební tělesa. [26]

Pevnost v ohybu je maximální napětí v ohybu, které vzorek vydrží během zkoušky. Napětí v ohybu  $\sigma_f$  je napětí vnějšího povrchu vzorku uprostřed rozpětí podpěr, vyjádří se pomocí vztahu :

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} [MPa], \quad (1)$$

kde  $F$  [N] je zatěžující síla,  $l$  [mm] rozteč podpěr,  $b$  [mm] je šířka vzorku a  $h$  [mm] tloušťka vzorku. [26]

Modul pružnosti ohybu  $E_{ef}$ , získaný z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení, přičemž záleží na geometrii vzorku, se vyjádří pomocí vztahu:

$$E_{ef} = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot X \cdot b \cdot h^3} [MPa], \quad (2)$$

kde  $X$  [m] je průhyb vzorku. [26]

#### 4.1.3 Čtyřbodová zkouška ohybem

Zkušební těleso daného průřezu je podepřeno na dvou oporách (viz. Obr. 31). Těleso se uprostřed zatěhuje od nulové hodnoty čtyřbodovým ohybem (symetricky vzhledem ke středu tělesa). Při zatěžování zkušební tělesa se opět snímá závislost síly na průhybu vzorku. Průhyb se měří jako změna polohy středu tělesa vzhledem k nejbližším opěrám. Čtyřbodové uspořádání zkoušky má vyšší vypovídající hodnotu pevnosti ohybu - těleso se poruší ve střední třetině mezi oběma silami od zatížení. Protože jsou v této části nosníku při uvedeném zatížení posouvající síly rovny nule, dojde k porušení v oblasti namáhání čistým ohybem. U třibodového uspořádání zkoušky se vždy jedná o kombinaci ohybu a smyku. Proto je čtyřbodové uspořádání zkoušky vhodnější. [28]

Působí-li dvě síly  $P$  ve stejné vzdálenosti a od podpěr, pak pro čtyřbodový systém platí:

$$M_{max} = P_{max} \cdot a [N \cdot mm] \quad (3)$$

Pevnost v ohybu se vypočítá:

$$\sigma_f = \frac{6 \cdot P_{max} \cdot a}{b \cdot h^2} [MPa], \quad (4)$$

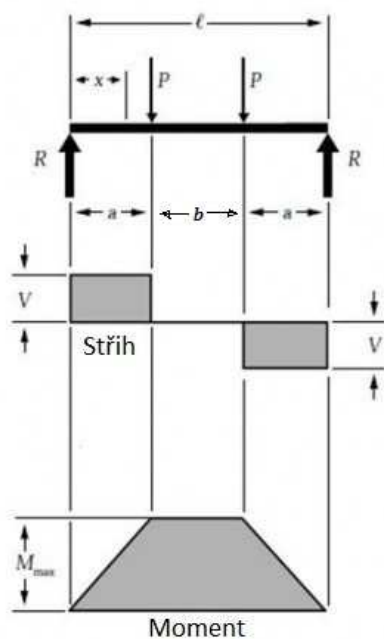
kde  $a$  je vzdálenost zatěžující síly od podpěr [mm]. [29]

Vztah pro výpočet modulu pružnosti při čtyřbodovém systému:

$$E_{ef} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot a}{b \cdot h^3 \cdot y} \cdot (3 \cdot (2a + b)^2 - 4 \cdot a^2) [MPa] \quad (5)$$

Pak průhyb  $y$  se vypočítá ze vztahu:[29]

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot a}{b \cdot h^3 \cdot E_y} \cdot (3 \cdot (2a + b)^2 - 4 \cdot a^2) [mm] \quad (6)$$



Obr. 31. Schéma zkoušky na čtyřbodový ohyb. [33]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem praktické části této bakalářské práce je navrhnout, vyrobit a otestovat sendvičové kompozitní konstrukce s polymerním jádrem. Dále také ověřit a porovnat mechanické vlastnosti a chování nosníků sendvičových konstrukcí s polymerním jádrem při různých teplotách okolního prostředí. Vyrobené vzorky budou testovány v třibodovém ohybu při pokojové, zvýšené i snížené teplotě. Posloupnost praktické části je následovná:

- Návrh vhodných materiálů
  - Jádro – polymerní pěny s různou hustotou a polymerní voština, tyto materiály jsou detailně popsány v kapitolách 6.1 a 6.2
  - Prepreg – předimpregnované materiály vhodné pro technologii vytvrzování ve vytvrzovací peci
- Výroba kompozitních materiálů a příprava zkušebních vzorků
  - Výroba sendvičových struktur s polymerním pěnovým jádrem technologií lisování prepregů pomocí vakua a následného vytvrzení v peci za podmínek určených dle materiálových listů
  - Výroba sendvičových struktur s polypropylenovým (PP) voštinovým jádrem technologií vakuového vytvrzování v peci za podmínek určených dle materiálových listů
- Testování vyrobených sendvičových struktur třibodovým ohybem
  - 3-bodový ohyb – stanovení ohybového chování dle normy ASTM C393
- Vyhodnocení a diskuze výsledků

## 6 POPIS POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Při volbě vhodného materiálu byl kladen důraz na to aby se jednalo o materiály běžně používané v praxi, spadající svým použitím do oblasti dopravního průmyslu. Dále bylo nutné, aby zvolené materiály byly dostupné na trhu v České republice.

### 6.1 Prepreg GURIT PHG 840-300-42

Tato předimpregnovaná tkanina se díky své dobré povrchové úpravě, skvělým mechanickým vlastnostem a dlouhé životnosti používá nejčastěji v dopravním průmyslu, zejména v železniční dopravě například jako interiérové části vlakových vagonů (podlahové a stropní panely). Bližší specifikace vlastností tohoto prepregu jsou uvedeny v tabulkách (Tab. 1, 2, 3). Tento prepreg je nutno skladovat při snížené teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$ . Při nevhodném skladování by mohlo dojít k aktivaci pryskyřice a procesu vytvrzování. Konkrétní technické údaje a specifikace materiálu jsou uvedeny v tabulce (Tab. 1).



Obr. 32. Prepreg GURIT PHG840-300-42.



Tab. 1. Vlastnosti prepregu GURIT PHG840-300-42. [Příloha PI]

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

Tab. 2. Doby vytvrzování prepregu GURIT PHG840-300-42. [Příloha PI]

	<b>Cyklus</b>
<b>Teplota</b>	120/130/140/160 °C
<b>Čas vytvrzení</b>	90/60/30/10 min
<b>Tlak</b>	0,7 – 0,4 MPa

Tab. 3. Mechanické vlastnosti prepregu GURIT PHG840-300-42.[Příloha PI]

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

## 6.2 Jádrové materiály

S ohledem na požadované vlastnosti sendvičové konstrukce byly zvoleny dva odlišné typy polymerních pěn a jedna polymerní voština.

- **Pěna AIREX T90.100**

Jedná se o PET recyklovatelnou polymerní pěnu s výbornou odolností vůči ohni a kouři. Je snadno tepelně tvarovatelná. Má velkou chemickou odolnost, dále je odolná proti UV záření a je hydrofobní. Její mechanické vlastnosti jsou zobrazeny v Tab. 4. Pěna má bílou barvu a její buňky uvnitř struktury jsou zavřené.



Obr. 33. Pěna AIREX T90.100.

Tab. 4. Vlastnosti pěny AIREX T90.100. [Příloha PII]

	Norma	Jednotky	AIREX T90.100
<b>Hustota</b>	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>	110
<b>Pevnost v tlaku</b>	ISO 844	N/mm <sup>2</sup>	1,4
<b>Modul pružnosti v tlaku</b>	DIN 53421	N/mm <sup>2</sup>	85
<b>Pevnost v tahu</b>	ASTM C297	N/mm <sup>2</sup>	2,2
<b>Modul pružnosti v tahu</b>	ASTM C297	N/mm <sup>2</sup>	120
<b>Pevnost ve smyku</b>	ISO 1922	N/mm <sup>2</sup>	0,8
<b>Tepelná vodivost</b>	ISO 8301	W/m.K	0,033

- **Pěna HEREX C70.55**

Jedná se o PVC pěny s uzavřenými póry, které jsou jedny z nejběžněji používaných jádrových materiálů pro výrobu sendvičových konstrukcí. Jsou hydrofobní a odolné vůči mnoha chemikáliím. Pěna má nažloutlou barvu, která po vytvrzení mírně ztmavne až zhnědne.



Obr. 34. Pěna HEREX C70.55.

Tab. 5. Vlastnosti pěny HEREX C70.55.[Příloha PIII]

	Norma	Jednotky	HEREX C70.55
<b>Hustota</b>	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>	60
<b>Pevnost v tlaku</b>	ISO 844	N/mm <sup>2</sup>	0,9
<b>Modul pružnosti v tlaku</b>	DIN 53421	N/mm <sup>2</sup>	69
<b>Pevnost v tahu</b>	ISO 527 1-2	N/mm <sup>2</sup>	1,3
<b>Modul pružnosti v tahu</b>	ISO 527 1-2	N/mm <sup>2</sup>	45
<b>Pevnost ve smyku</b>	ISO 1922	N/mm <sup>2</sup>	0,85
<b>Tepelná vodivost</b>	ISO 8301	W/m.K	0,031

- **Polypropylenová voština NIDAPLAST**

Polypropylenová voština NIDAPLAST je jádrový materiál, který nabízí výborné vlastnosti, velmi dobré mechanické parametry a kvalitní zpracování. Nízká hustota této polypropylenové voštiny, flexibilita a vynikající přizpůsobivost, umožňují snadné začlenění do výrobních procesů. Mezi specifické vlastnosti voštiny patří nízká absorpce vody, odolnost vůči působením vyšších teplot a vysoký stupeň tlumení hluku a vibrací. Jednou z největších výhod oproti pěnovým jádrovým materiálům je možnost tvarování voštiny dle potřeb.



Obr. 35. Polypropylenová voština NIDAPLAST.[Příloha PIII]

*Tab. 6. Vlastnosti polypropylenové voštiny NIDAPLAST. [Příloha PIV]*

	<b>Norma</b>	<b>Jednotky</b>	<b>NIDAPLAST</b>
<b>Hustota</b>	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>	65
<b>Pevnost v tlaku</b>	ISO 844	N/mm <sup>2</sup>	1,2
<b>Modul pružnosti v tlaku</b>	DIN 53421	N/mm <sup>2</sup>	30
<b>Pevnost v tahu</b>	ASTM C297	N/mm <sup>2</sup>	0,5
<b>Pevnost ve smyku</b>	ISO 1922	N/mm <sup>2</sup>	0,4
<b>Tepelná vodivost</b>	ISO 8301	W/m.K	0,067

## 7 VÝROBA SENDVIČOVÝCH PANELŮ

Hlavním cílem praktické části byla výroba sendvičových struktur s různými druhy polymerních jader a stanovení jejich mechanických vlastností. Pro všechny vzorky byla zvolena technologie lisování prepregů pomocí vakua a následného vytvrzení v peci. Celý proces výroby sendvičových panelů proběhl ve firmě FORM s.r.o. v Horním Lidči.

Tab. 7. Vlastnosti vyrobených kompozitních panelů.[Příloha PI-IV]

Jádrový materiál	Počet vrstev prepregu	Hustota	Označení
AIREX T90.100_5mm_PET	2/J/2	110 kg/m <sup>3</sup>	A
AIREX T90.100_5/5mm_PET	2/J/1/J/2	110 kg/m <sup>3</sup>	B
AIREX T90.100_10mm_PET	2/J/2	110 kg/m <sup>3</sup>	C
HEREX C70.55_5mm_PVC	2/J/2	60 kg/m <sup>3</sup>	D
HEREX C70.55_5/5mm_PVC	2/J/1/J/2	60 kg/m <sup>3</sup>	E
HEREX C70.55_10mm_PVC	2/J/2	60 kg/m <sup>3</sup>	G
NIDAPLAST_5mm_PP	2/J/2	65kg/m <sup>3</sup>	H
NIDAPLAST_5/5mm_PP	2/J/1/J/2	65kg/m <sup>3</sup>	J
NIDAPLAST_10mm_PP	2/J/2	65kg/m <sup>3</sup>	K

## 7.1 Pomocné komponenty

Při výrobě vzorků vakuovým vytvrzováním v peci jsou používány pomocné materiály, které jsou nezbytné při výrobě, ale nezůstávají součástí vzniklého produktu a tudíž se odstraňují jako odpad.

Jednotlivé pomocné materiály, které byly použity, jsou popsány níže.

- separační fólie
- odsávací rohož
- těsnící páska
- vakuová fólie
- vzduchotechnika (kompresor, tlakové hadice, ventily, konektor, tlakoměr)



Obr. 36. Pomocné materiály a komponenty.

### 7.1.1 Separáční fólie

Tato fólie zabránuje promíchání různých vrstev s odlišnými funkcemi, mezi kterými je uložena. Zamezuje styku prepregu s odsávací tkaninou. Bez pou it  této fólie by bylo ne-mo n  odd lit odsávací tkaninu od vytvrzeného laminátu. Tato fólie také chrání povrch kompozitu před zne i t n m a d v  povrchu dílu vhodn  tvar pro následující lepen  a nástřik.



Obr. 37. Separ t  fólie.

### 7.1.2 Odsávací roho 

Tato roho  je vyroben  ze syntetických vláken a je kladena p r mo na separátů fólii a umo n uje ods t p ebyte n  množství pryskyřice z prepregu.



Obr. 38. Odsávací roho .



### 7.1.3 Těsnící páska

Tato oboustranná páska slouží k vytvoření nepropustného spoje mezi formou a vakuovou fólií. Velkou výhodou této pásky je její pevnost a zároveň snadná snímatelnost z kovových i nekovových povrchů forem.



*Obr. 39. Těsnící páska.*

### 7.1.4 Vakuová fólie

Tato pružná plastová fólie je jedním z nejdůležitějších pomocných materiálů, jelikož umožňuje vytvořit vakuum na horní části formy.

Při použití pro vytvrzování v peci musí mít dobré mechanické vlastnosti a také musí být chemicky a tepelně odolná. Tato fólie se vyrábí z PA, PE, PTFE.



*Obr. 40. Vakuová fólie.*

### 7.1.5 Vzduchotechnika

Při výrobě sendvičových panelů se bez vakuové techniky neobejdeme, protože je nedílnou součástí procesu výroby.

- kompresor
- tlakové hadice
- ventily
- konektor
- tlakoměr

Veškeré příslušenství vzduchotechniky slouží k vytvoření a kontroly vakua.



Obr. 41. Ventil, tlakoměr.

## 7.2 Příprava komponentů na výrobu

V prvním kroku bylo potřeba připravit veškeré potřebné materiály jako prepreg, separační fólii, odsávací rohož, těsnicí pásku a vakuovou fólii do potřebných výrobních rozměrů.

Jádrové materiály, které byly použity při výrobě sendvičových konstrukcí, byly nařezány z 2,5 m<sup>2</sup> desek na požadované rozměry (dle velikosti forem). Pomocí řezacího plotru Zünd M-1600 byl nařezán prepreg na požadovaný rozměr. Při volbě rozměrů prepregu bylo třeba počítat s minimálně 10% přesahem prepregu přes jádrový materiál.

Další pomocné materiály jako separační fólie, odsávací rohož, těsnící páska a vakuová fólie byly nastříhány ručně.



*Obr. 42. Řezací plotr Zünd M-1600 [59]*

### **7.3 Postup výroby sendvičových panelů**

Při výrobě sendvičových panelů byla zvolena jejich výroba technologií vytvrzováním v peci za působení vakua, kdy tato technologie se běžně používá pro panely v dopravním průmyslu a proto byla použita i pro výrobu sendvičových panelů v této práci.

Výroba vzorků začala důkladným naseparováním formy separačním činidlem Tr mold release. Forma pro výrobu sendvičových panelů byla vyrobena z laminátu. Po ošetření formy započal proces skladby jednotlivých technologických materiálů připravených v požadovaných rozměrech.



*Obr. 43. Kladení prepregu.*

Po položení prvních dvou vrstev prepregu následuje položení připraveného polymerního jádra a překrytí dalšími dvěma vrstvami prepregu.



*Obr. 44. Postupné kladení jednotlivých vrstev prepregu.*

Všechny vrstvy prepregů byly postupně vyrovnávány a kontrolovány, aby nevznikaly případné nerovnosti, jako jsou bubliny nebo překlady, které by se projevíly na kvalitě panelů po vytvrzení v peci.



*Obr. 45. Sendvičový panel před překrytím odsávací fólií.*

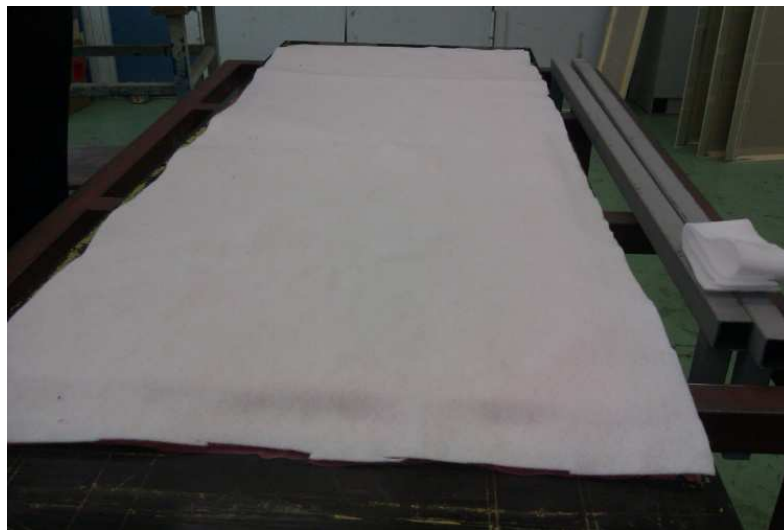
Po umístění a vyhlazení všech vrstev prepregů byla položena pomocná vrstva ze separační fólie, která slouží k oddělení vrstvy prepregu od odsávací rohože.

Separáční fólie musí být umístěna přes celou plochu panelu, aby bylo zamezeno styku prepregu s dalšími vrstvami.



*Obr. 46. Separáční fólie.*

Jednou z posledních vrstev je odsávací rohož, která slouží k odsátí přebytečného množství pryskyřice z prepregů, která by prošla přes separační fólii. Při kladení odsávací rohože je třeba dbát na přesné umístění a počítat s přesahem minimálně 10%. Odsávací rohož slouží také jako podpora pro umístění konektoru k vytvoření vakua. Pokud by nebyl konektor podložen kouskem složené odsávací rohože, mohlo by dojít k nežádoucímu otlacení konektoru do vytvrzeného panelu. Tento otlak by mohl být vzhledovou vadou a mohl by způsobit i lokální deformace při namáhání.



*Obr. 47. Odsávací rohož.*

Poslední pokládanou vrstvou je vakuová fólie, která zakrývá všechny pomocné materiály.

Při kladení vakuové fólie musíme dát velký důraz na její vhodně zvolenou velikost, která by měla být cca. o 30 % větší než odsávací rohož.

Fólie musí být umístěna tak, aby byla volná, nenapnutá kvůli plnému pokrytí rohů a členitých částí výrobku i formy. Připravená fólie byla umístěna na formu pomocí utěšňovací pásky.

Při umisťování fólie je potřeba dodržovat dostatečnou vzdálenost od všech pomocných materiálů, aby nedošlo k nežádoucímu slepení některých vrstev. Při upevňování byla fólie postupně utěšňována, aby byl vytvořen podtlak. Při vytvoření vakua byla zjišťována místa, kudy uniká vzduch. Tato místa byla eliminována pevným přitlačením utěšňovací pásky k fólii a formě. Takto utěšněná forma byla zkontrolována pomocí měřiče podtlaku, kdy hodnota podtlaku by se měla pohybovat okolo 0,8 Baru. Po odstranění tlakové hadice by se neměl tlak měnit.



*Obr. 48. Zavakuovaný panel.*

Po zavakuování panelu následovalo vytvrzování v peci.



*Obr. 49. Umístění zaformovaného panelu v peci.*

Proces vytvrzení probíhá ve vytvrzovací peci AIRTECH zcela automaticky po dobu 3 hodin dle zvoleného programu. První hodinu pec dosáhne určené konstantní teploty 130°C a po dobu dalších dvou hodin probíhá vytvrzování při této teplotě. Po dokončení vytvrzovacího programu následuje vyjmutí z pece a následné odformování hotového sendvičového panelu.

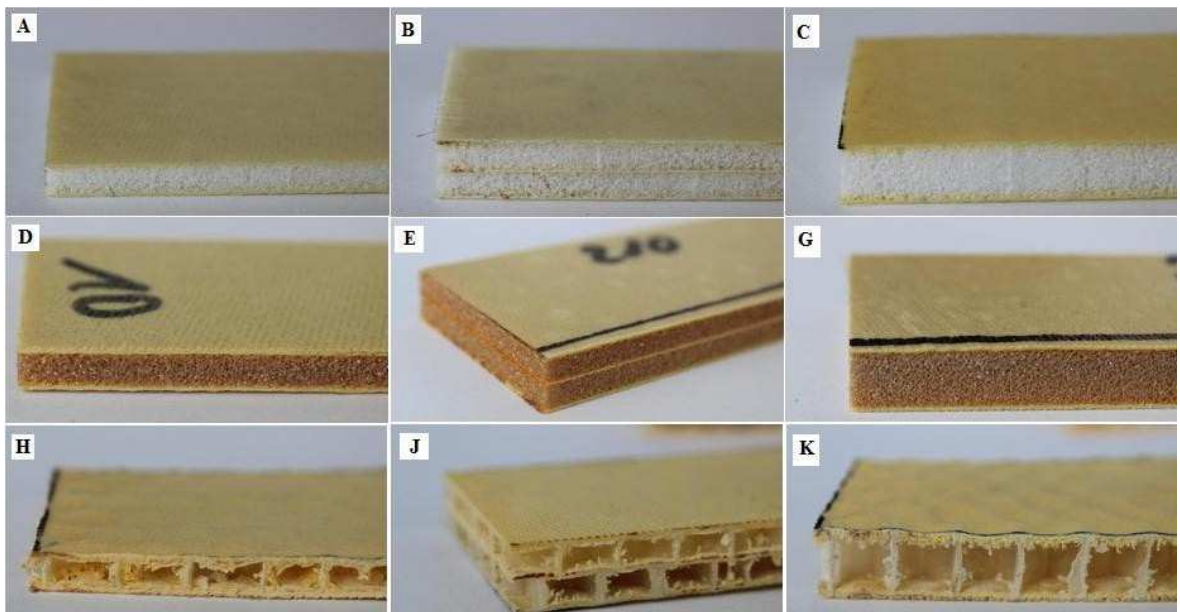


*Obr. 50. Vytvrzovací pec AIRTECH.*



#### 7.4 Výroba zkušebních vzorků

Dokončený sendvičový panel byl po odformování orýsován na požadované rozměry. Velikost všech testovaných těles byla zvolena 210 mm x 45 mm. Pomocí stolní kotoučové pily byly tyto vzorky nařezány. Při řezání byl použit kotouč, který byl pro tento typ materiálu nejvhodnější. Při řezání vzorků bylo třeba použít ochranných pomůcek (brýle, rukavice, štít, respirátor, ochranný oděv) z důvodů velké prašnosti a možného kontaktu s nebezpečnými látkami.



Obr. 51. Vyrobené vzorky sendvičových kompozitů v řezu.



Obr. 52. Nařezané zkušební vzorky.

## 8 POPIS STATISTICKÝCH VELIČIN

Následující statistické veličiny byly použity k vyhodnocení a popisu experimentálně naměřených dat:

- **$\bar{x}$  - aritmetický průměr** - vznikne součtem hodnot statistického souboru dělených jejich počtem [58]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- **$s_x^2$  - rozptyl** - je součet kvadratických odchylek od průměru, dělených rozsahem statistického souboru [58]

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

- **$s_x$  - směrodatná odchylka** - druhá odmocnina z rozptylu [58]

$$s_x = \sqrt{s_x^2}$$

- **MIN** – minimální hodnota
- **MAX** – maximální hodnota
- **Medián** - medián je prostřední hodnota v uspořádaném statistickém souboru a to prostřední v pořadí hodnot uspořádaných podle velikosti, při sudém počtu hodnot je medián průměr dvou prostředních hodnot [58]

## 9 STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ VZORKŮ

### 9.1 Zkouška tříbodovým ohybem

Zkouška ohybem proběhla v Laboratorním centru Fakulty technologické Univerzity Tomáši Bati ve Zlíně na stroji Zwick 1456 s použitím programu testXpert v7.11 a to při snížené teplotě ( $-20^{\circ}\text{C}$ ), při pokojové teplotě ( $20^{\circ}\text{C}$ ) a zvýšené teplotě ( $60^{\circ}\text{C}$ ). Obrovskou výhodou softwaru testXpert v7.11 je, že výpočet ohybových parametrů z naměřených hodnot provádí automaticky.

Technické specifikace stroje Zwick 1456:

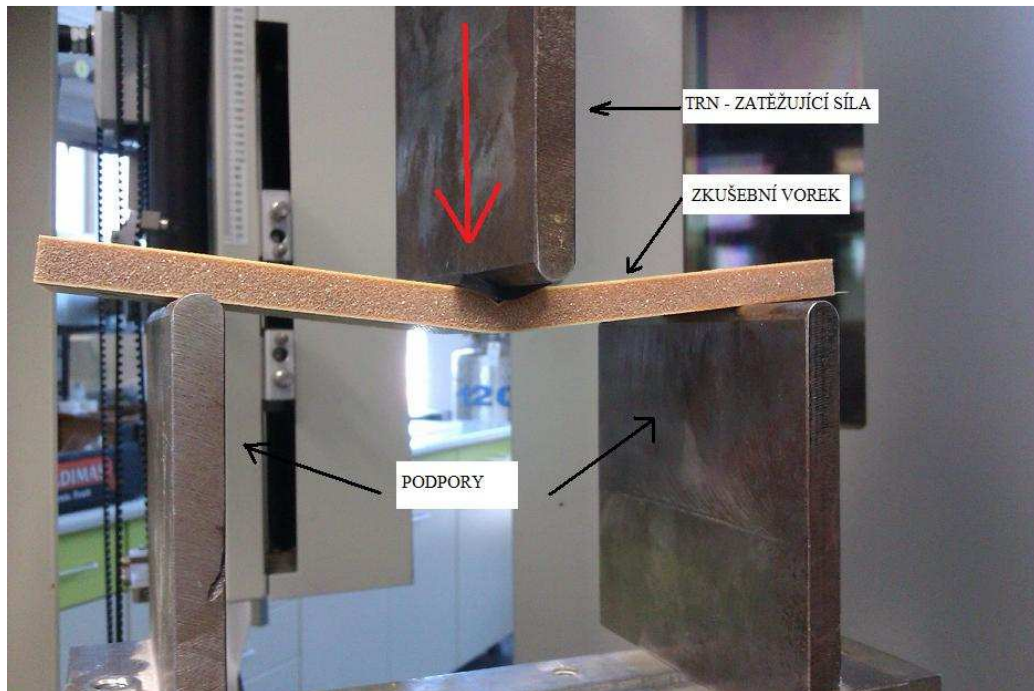
- maximální síla je 20 kN
- teplotní komora má rozsah teplot od  $-80^{\circ}\text{C}$  až do  $+200^{\circ}\text{C}$
- maximální posuv 800 mm/min

Celá zkouška byla provedena podle normy ASTM C393 tříbodovým ohybem.

Vzdálenost mezi podpěrami byla 150 mm, rychlost posuvu příčnicku byla při měření efektivního modulu pružnosti rovna 5 mm/min, kdy následně po změření test probíhal při 10 mm/min.



Obr. 53. Zkušební stroj Zwick1456 a měřící teplotní komora Zwick W91255.



Obr. 54. Způsob uchycení zkušebního vzorku.

Pomocí testovacího stroje Zwick 1456 a programu TestExpert byly provedeny zkoušky všech vyrobených vzorků, které jsou popsány v kapitole 7 v tabulce (Tab. 7). Síla  $F$  působila kolmo na vzorek v jeho středu. Uprostřed vzorku docházelo k prohnutí a následné deformaci jak znázorňuje obrázek (Obr. 54). Naším cílem při ohybové zkoušce bylo zjistit, jak se chová daný vzorek při působení stejné síly, ale za různých teplot okolí.

Z výsledků byla použita pouze následující data:

- $E_{ef}$  [MPa] efektivní modul pružnosti v ohybu
- $\sigma_f$  [MPa] mezní pevnost v ohybu

Pro vyhodnocení měření byly použity následující statistické ukazatele:

- $\bar{x}$  - aritmetický průměr
- $s$  - směrodatná odchylka
- MIN - minimální hodnota
- MAX - maximální hodnota
- Medián - medián

Bližší popis a vysvětlení jednotlivých statistických veličin viz. kapitola 5.1.

Následující tabulky (Tab. 8-17) obsahují vyhodnocená data z naměřených vzorků pro jednotlivé materiály, které byly použity pro grafické znázornění a porovnání.

Z vyhodnocených dat pro materiál A vyplývá, že efektivní modul pružnosti  $E_{ef}$  dosahuje nejvyšších hodnot při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a to  $(6471 \pm 317)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(5128 \pm 227)$  MPa. Pevnost v ohybu materiálu A je nejvyšší při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$   $(65,0 \pm 3,2)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(44,2 \pm 1,8)$  MPa.

Tab. 8. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál A.

AIREX T90.100_5mm_PET						
n=10	$-20^{\circ}\text{C}$		$20^{\circ}\text{C}$		$60^{\circ}\text{C}$	
	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]
$\bar{x}$	6471	65,0	6535	66,2	5128	44,2
s	317	3,2	261	3,2	227	1,8
MAX	6960	70	7000	71	5380	46
MIN	5960	60	6120	61	4560	39
Medián	6470	65	6525	67	5180	45

Z vyhodnocených dat pro materiál B vyplývá, že efektivní modul pružnosti  $E_{ef}$  dosahuje nejvyšších hodnot při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a to  $(1863 \pm 119)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(1466 \pm 25)$  MPa. Pevnost v ohybu materiálu B je nejvyšší při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$   $(24,1 \pm 1,6)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(15,9 \pm 0,6)$  MPa.

Tab. 9. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál B.

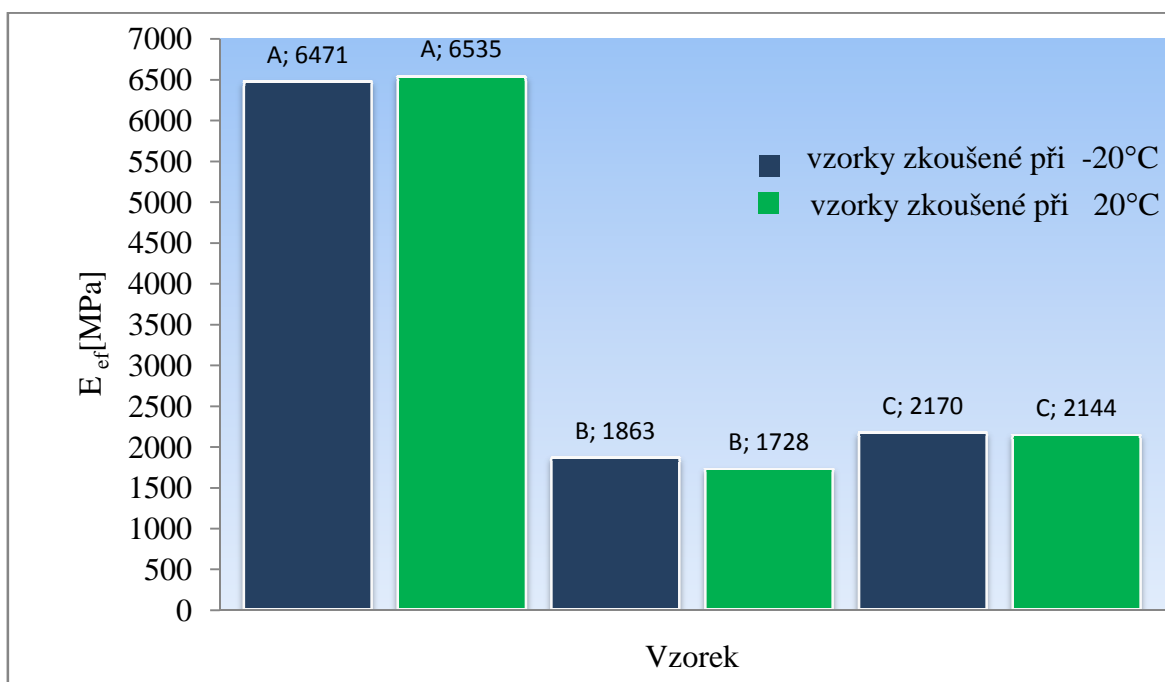
AIREX T90.100_5/5mm_PET						
n=10	$-20^{\circ}\text{C}$		$20^{\circ}\text{C}$		$60^{\circ}\text{C}$	
	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]
$\bar{x}$	1863	24,1	1728	21,4	1466	15,9
s	119	1,6	54	1,1	25	0,6
MAX	1940	28	1810	25	1490	17
MIN	1510	23	1640	21	1400	15
Medián	1900	24	1740	21	1475	16

Z vyhodnocených dat pro materiál C vyplývá, že efektivní modul pružnosti  $E_{ef}$  dosahuje nejvyšších hodnot při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a to  $(2170 \pm 36)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(1770 \pm 20)$  MPa. Pevnost v ohybu materiálu C je nejvyšší při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$   $(23,2 \pm 0,8)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(18,0 \pm 0,6)$  MPa.

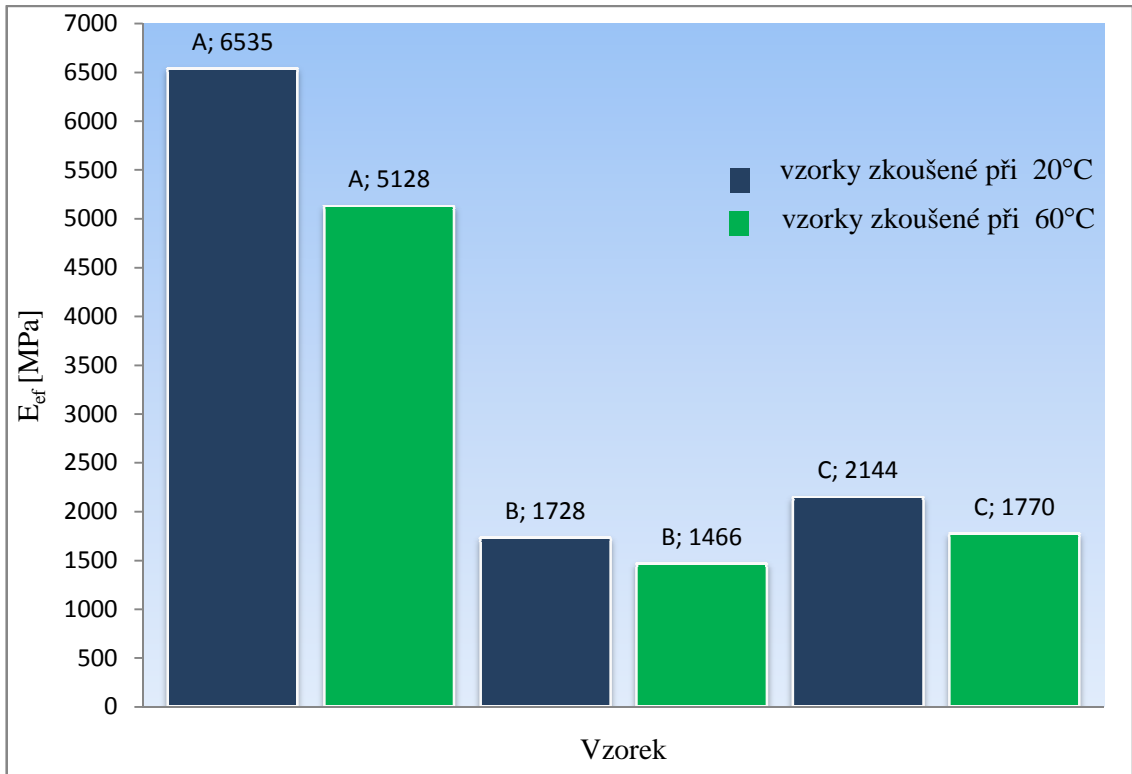
Tab. 10. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál C.

AIREX T90.100_10mm_PET						
n=10	$-20^{\circ}\text{C}$		$20^{\circ}\text{C}$		$60^{\circ}\text{C}$	
	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]
$\bar{x}$	2170	23,2	2144	22,0	1770	18,0
s	36	0,8	75	0,9	20	0,6
MAX	2220	25	2260	23	1800	19
MIN	2110	22	2000	21	1730	17
Medián	2175	23	2165	22	1770	18

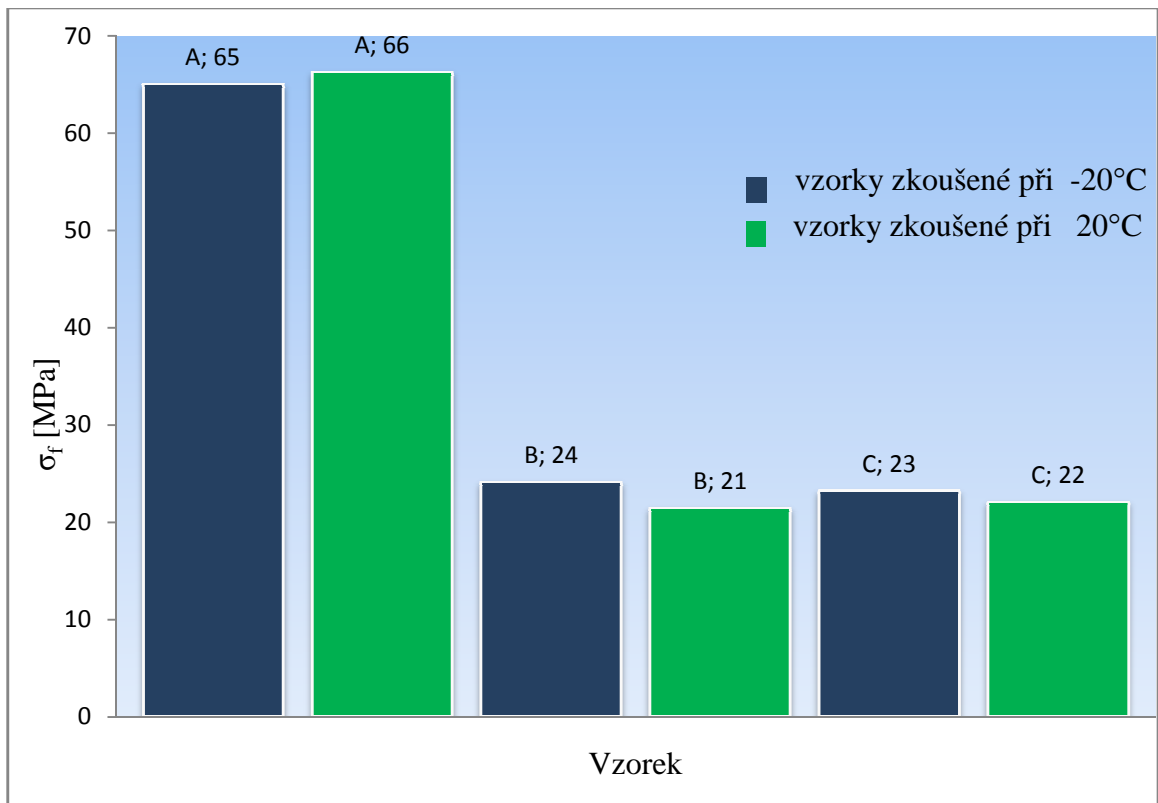
V následujících grafech (Obr. 55-58) jsou uvedena jednotlivá naměřená data pro testované vzorky při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a postupně jsou data porovnávána vzhledem ke snížené, respektive zvýšené okolní teplotě.



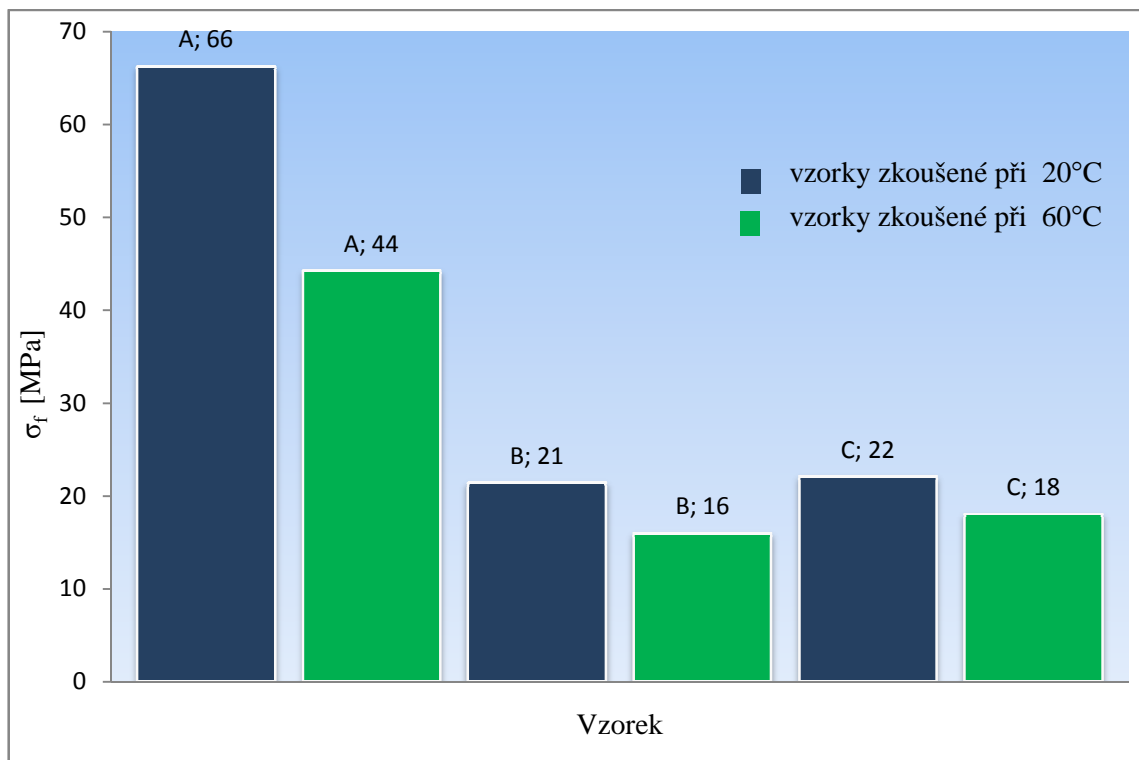
Obr. 55. Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti  $E_{ef}$  vzorků A, B, C při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 56. Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti  $E_{ef}$  vzorků A, B, C při teplotě 20°C a 60°C.



Obr. 57. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  vzorků A, B, C při teplotě -20°C a 20°C.



Obr. 58. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  vzorků A, B, C při teplotě 20°C a 60°C.

#### • Diskuze výsledků vzorků A, B, C

Z výše uvedených grafů (Obr. 55- 58) pro vzorky A, B, C vyplývá:

Při srovnání průměrných hodnot modulů pružnosti při teplotě -20°C a 20°C (Obr. 55) vycházely vyšší hodnoty při pokojové teplotě a to pro vzorek A o 1%, vzorek B o 7% a vzorek C o 1% než při snížené teplotě.

Při porovnání průměrných hodnot modulů pružnosti při teplotě 20°C a 60°C (Obr. 56) vycházely moduly pružnosti vyšší při pokojové teplotě a to pro vzorek A o 22%, vzorek B o 15% a vzorek C o 17% než při zvýšené teplotě.

Porovnáním průměrných hodnot meze pevnosti v ohybu při teplotě -20°C a 20°C (Obr. 57) vycházely vyšší hodnoty při pokojové teplotě pro vzorek A o 2 %, kdežto při snížené teplotě pro vzorky B o 13% a C o 4%.

Dále z tohoto grafu vyplývá, že při porovnání průměrných hodnot meze pevnosti v ohybu při teplotě 20°C a 60°C (Obr. 58) vycházely vyšší hodnoty všech tří vzorků při pokojové teplotě, a to pro vzorek A o 34 %, B o 24% a vzorek C o 18% více než při zvýšené teplotě.



Z vyhodnocených dat pro materiál D vyplývá, že modul pružnosti  $E_{ef}$  dosahuje nejvyšších hodnot při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a to  $(6377 \pm 181)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(4888 \pm 114)$  MPa. Pevnost v ohybu materiálu D je nejvyšší při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$   $(52,5 \pm 1,4)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(37,4 \pm 0,7)$  MPa.

Tab. 11. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál D.

HEREX C70.55_5mm_PVC						
n=10	$-20^{\circ}\text{C}$		$20^{\circ}\text{C}$		$60^{\circ}\text{C}$	
	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]
$\bar{x}$	6377	52,5	5971	49,3	4888	37,4
s	181	1,4	83	0,7	114	0,7
MAX	6610	55	6150	51	5060	38
MIN	6080	50	5830	49	4640	36
Medián	6410	52	5950	49	4895	38

Z vyhodnocených dat pro materiál E vyplývá, že modul pružnosti  $E_{ef}$  dosahuje nejvyšších hodnot při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a to  $(2179 \pm 127)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(1585 \pm 66)$  MPa. Pevnost v ohybu materiálu E je nejvyšší při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$   $(19,9 \pm 1,6)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(14,4 \pm 0,6)$  MPa.

Tab. 12. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál E.

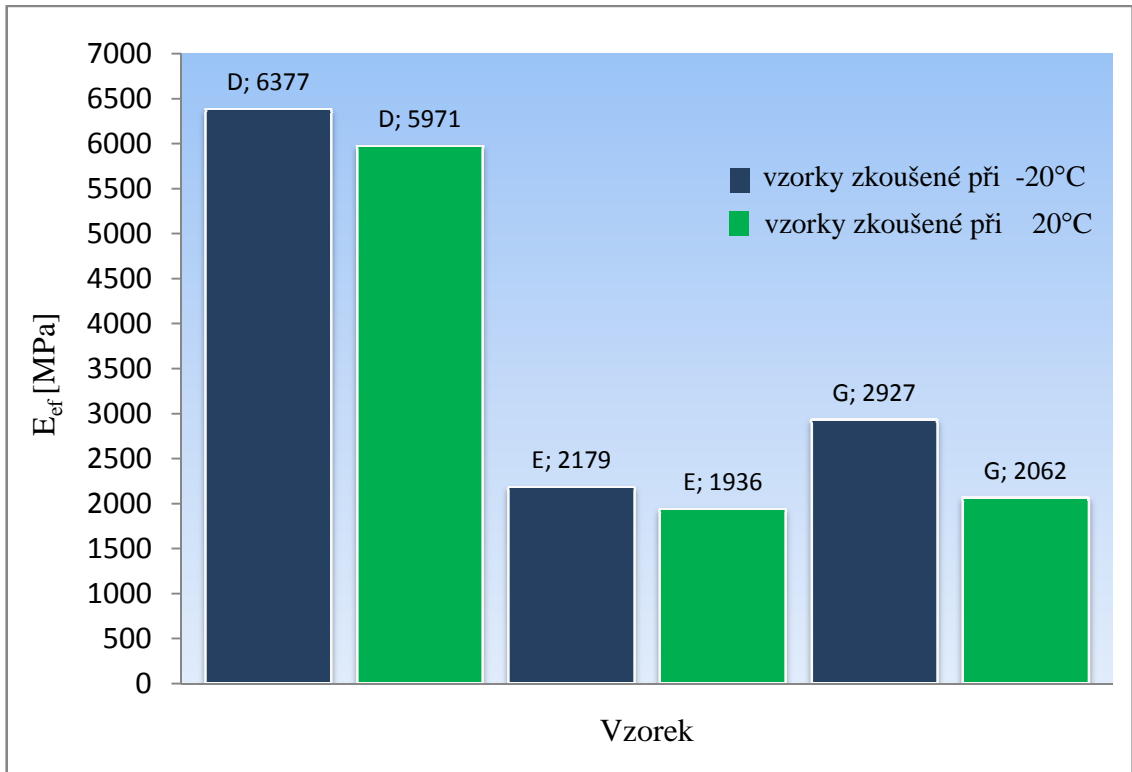
HEREX C70.55_5/5mm_PVC						
n=10	$-20^{\circ}\text{C}$		$20^{\circ}\text{C}$		$60^{\circ}\text{C}$	
	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]
$\bar{x}$	2179	19,9	1936	18,2	1585	14,4
s	127	1,6	31	0,4	66	0,6
MAX	2440	21	1980	19	1640	15
MIN	1980	16	1860	17	1400	13
Medián	2195	20	1945	18	1610	15

Z vyhodnocených dat pro materiál G vyplývá, že modul pružnosti  $E_{ef}$  dosahuje nejvyšších hodnot při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a to  $(2188 \pm 93)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(1672 \pm 49)$  MPa. Pevnost v ohybu materiálu G je nejvyšší při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$   $(22,1 \pm 0,6)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(15,9 \pm 0,4)$  MPa.

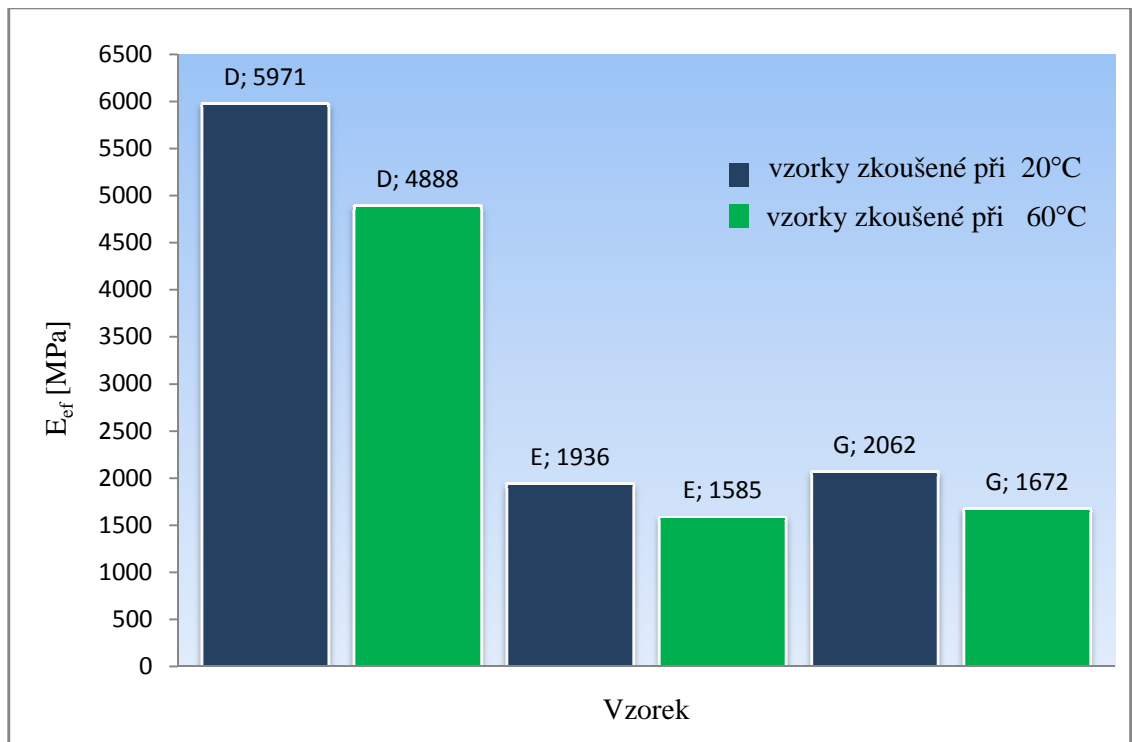
Tab. 13. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál G.

HEREX C70.55_10mm_PVC						
n=10	$-20^{\circ}\text{C}$		$20^{\circ}\text{C}$		$60^{\circ}\text{C}$	
	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]
$\bar{x}$	2188	22,1	2062	20,8	1672	15,9
s	93	0,6	34	0,4	49	0,4
MAX	2330	23	2120	22	1740	16
MIN	1990	21	1990	20	1550	15
Medián	2185	22	2065	21	1680	16

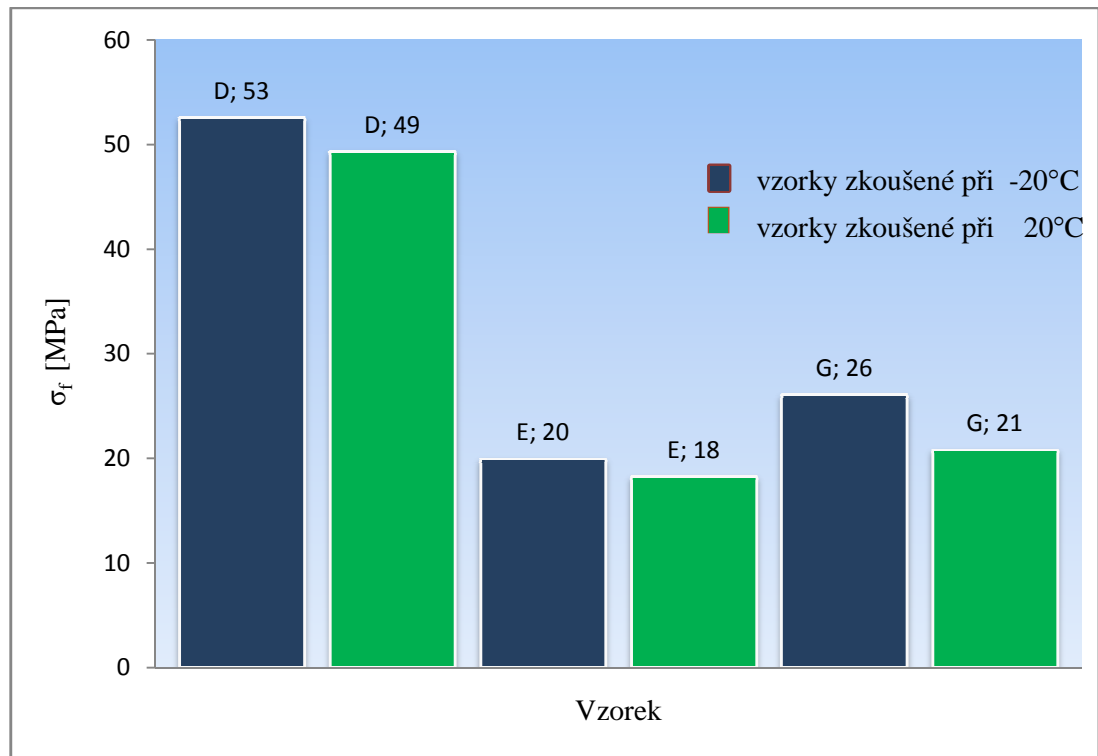
V následujících grafech (Obr. 59-63) jsou uvedeny jednotlivá naměřená data pro testované vzorky při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a postupně jsou data porovnávána vzhledem ke snížené, respektive zvýšené okolní teplotě.



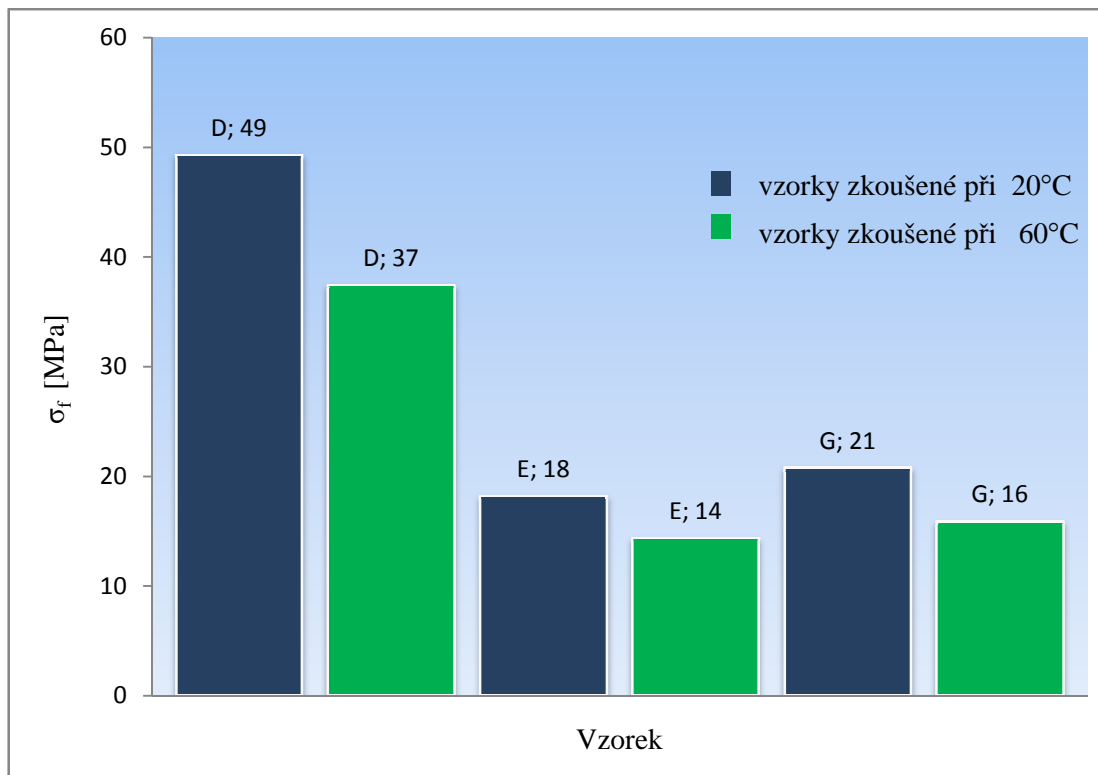
Obr. 59. Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti  $E_{ef}$  vzorků D, E, G při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 60. Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti  $E_{ef}$  vzorků D, E, G při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 61. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  vzorků D, E, G při teplotě  $-20^\circ\text{C}$  a  $20^\circ\text{C}$ .



Obr. 62. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  vzorků D, E, G při teplotě  $20^\circ\text{C}$  a  $60^\circ\text{C}$ .

- **Diskuze výsledků vzorků D, E, G**

Z výše uvedených grafů (Obr. 59- 62) pro vzorky D, E, G je patrné:

Srovnáním průměrných hodnot modulů pružnosti při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  (Obr. 59) vycházely moduly pružnosti vyšší při snížené teplotě a to pro vzorek D o 6%, vzorek E o 11% a vzorek G o 30%.

Dále porovnáním průměrných hodnot modulů pružnosti při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$  (Obr. 60) vycházely hodnoty vyšší při snížené teplotě a to pro vzorek D o 18%, vzorek E o 18 % a vzorek G o 19 % než při zvýšené teplotě.

Při porovnání průměrných hodnot meze pevnosti v ohybu při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  (Obr. 61) vycházely vyšší hodnoty při snížené teplotě pro vzorek D o 8 % pro vzorek E o 10 % a G o 19 %.

Z vyhodnocených dat pro materiál H vyplývá, že modul pružnosti  $E_{ef}$  dosahuje nejvyšších hodnot při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a to  $(5817 \pm 246)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(2640 \pm 319)$  MPa. Pevnost v ohybu materiálu H je nejvyšší při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$   $(59,8 \pm 6,5)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(26,8 \pm 4,8)$  MPa.

Tab. 14. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál H.

NIDAPLAST_5mm_PP						
n=10	$-20^{\circ}\text{C}$		$20^{\circ}\text{C}$		$60^{\circ}\text{C}$	
	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]
$\bar{x}$	5817	59,8	4352	45,5	2640	26,8
s	246	6,5	280	5,5	319	4,8
MAX	6400	70	4810	54	3220	36
MIN	5470	51	3870	38	2320	23
Medián	5795	62	4340	44	2465	24

Z vyhodnocených dat pro materiál J vyplývá, že modul pružnosti  $E_{ef}$  dosahuje nejvyšších hodnot při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a to  $(2403 \pm 138)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(813 \pm 69)$  MPa. Pevnost v ohybu materiálu J je nejvyšší při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$   $(28,7 \pm 4,1)$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$   $(11,1 \pm 1,2)$  MPa.

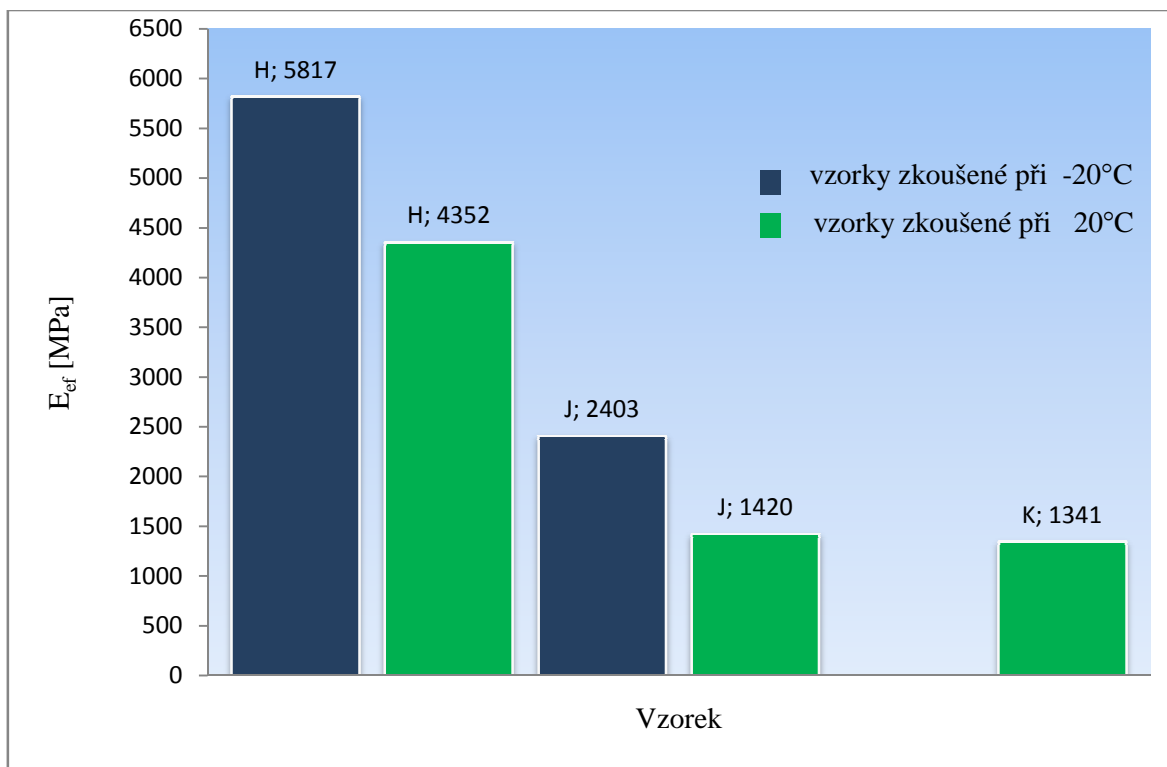
Tab. 15. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál J.

NIDAPLAST_5/5mm_PP						
n=10	$-20^{\circ}\text{C}$		$20^{\circ}\text{C}$		$60^{\circ}\text{C}$	
	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]
$\bar{x}$	2403	28,7	1420	22,1	813	11,1
s	138	4,1	75	2,0	69	1,2
MAX	2610	35	1580	25	880	13
MIN	2090	19	1270	20	655	9
Medián	2415	28	1415	21	845	11

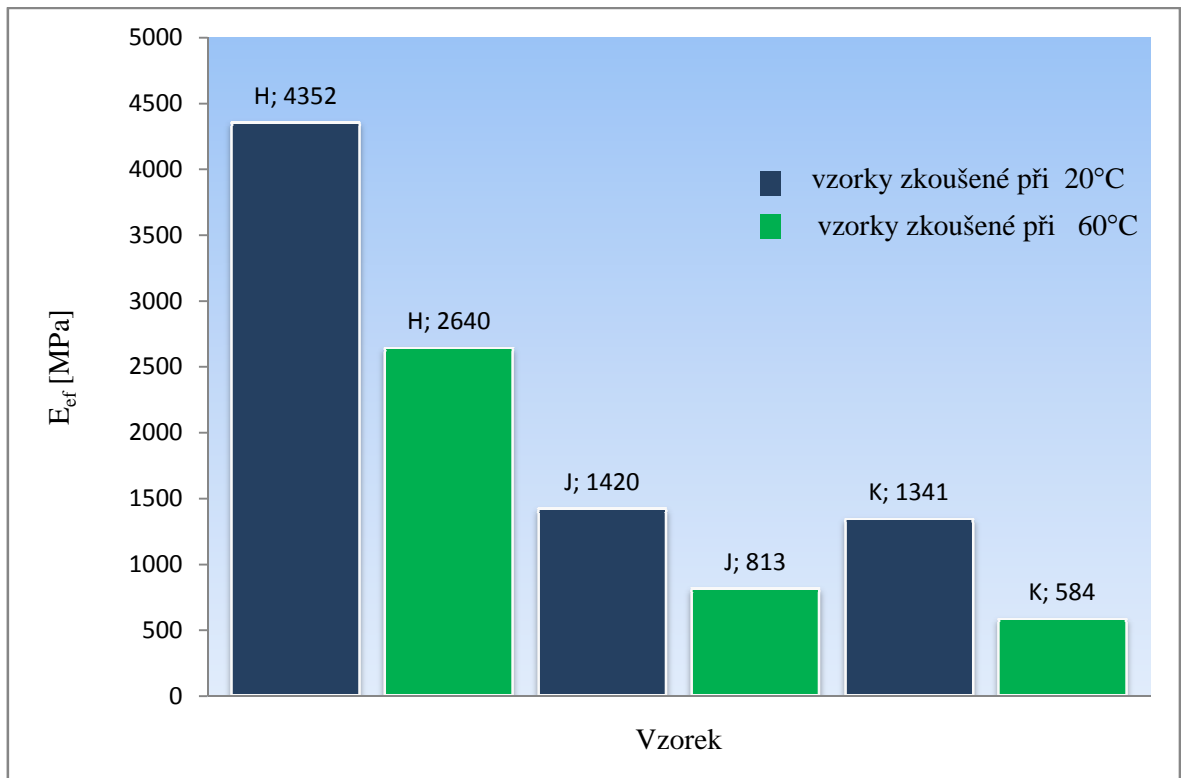
Z důvodu náročnosti výroby a nedostatku materiálu nebyl naměřen materiál K při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$ . Při porovnání hodnot při pokojové teplotě a teplotě zvýšené vyplývá, že modul pružnosti  $E_{ef}$  dosahuje nejvyšších hodnot při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a to  $1341 \pm 134$  MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$  ( $584 \pm 83$ ) MPa. Pevnost v ohybu materiálu K je nejvyšší při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  ( $15,6 \pm 0,8$ ) MPa a nejnižší při  $60^{\circ}\text{C}$  ( $8,2 \pm 0,9$ ) MPa.

Tab. 16. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál K.

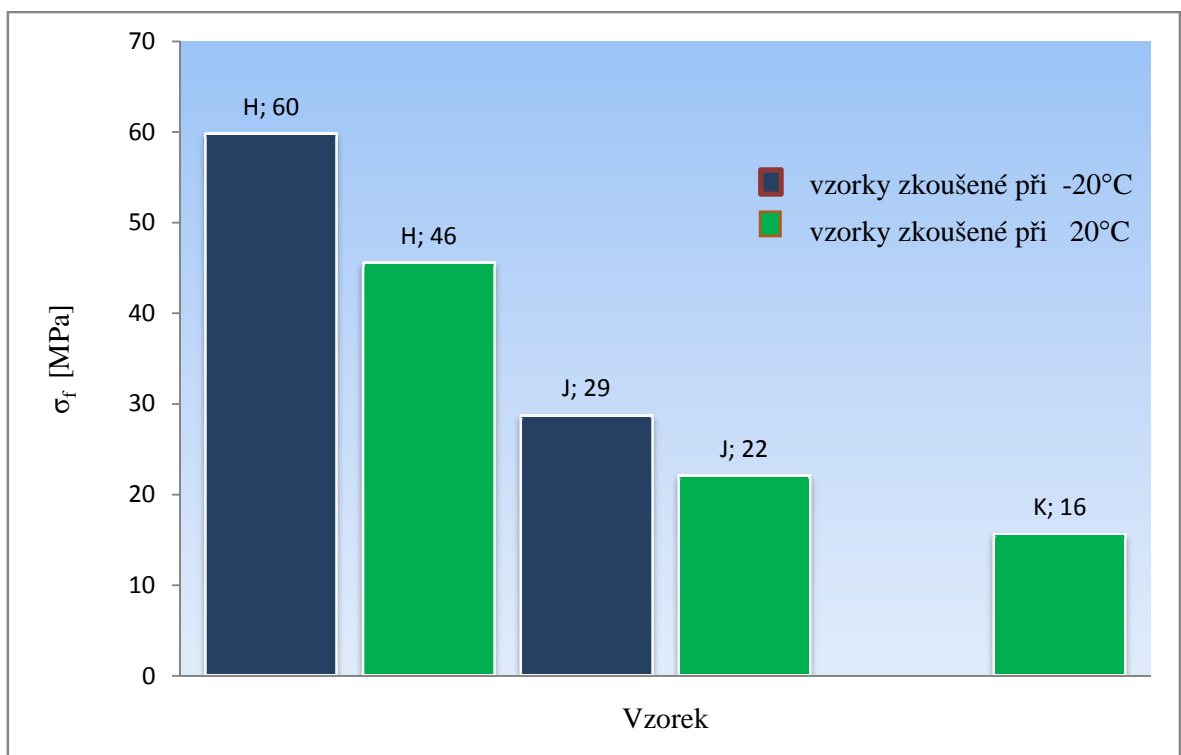
NIDAPLAST_10mm_PP						
n=10	$-20^{\circ}\text{C}$		$20^{\circ}\text{C}$		$60^{\circ}\text{C}$	
	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]
$\bar{x}$	-	-	1341	15,6	584	8,2
s	-	-	134	0,8	83	0,9
MAX	-	-	1580	17	690	9
MIN	-	-	1100	15	478	7
Medián	-	-	1395	15	568	8



Obr. 63. Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti  $E_{ef}$  vzorků H, J, K při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ .

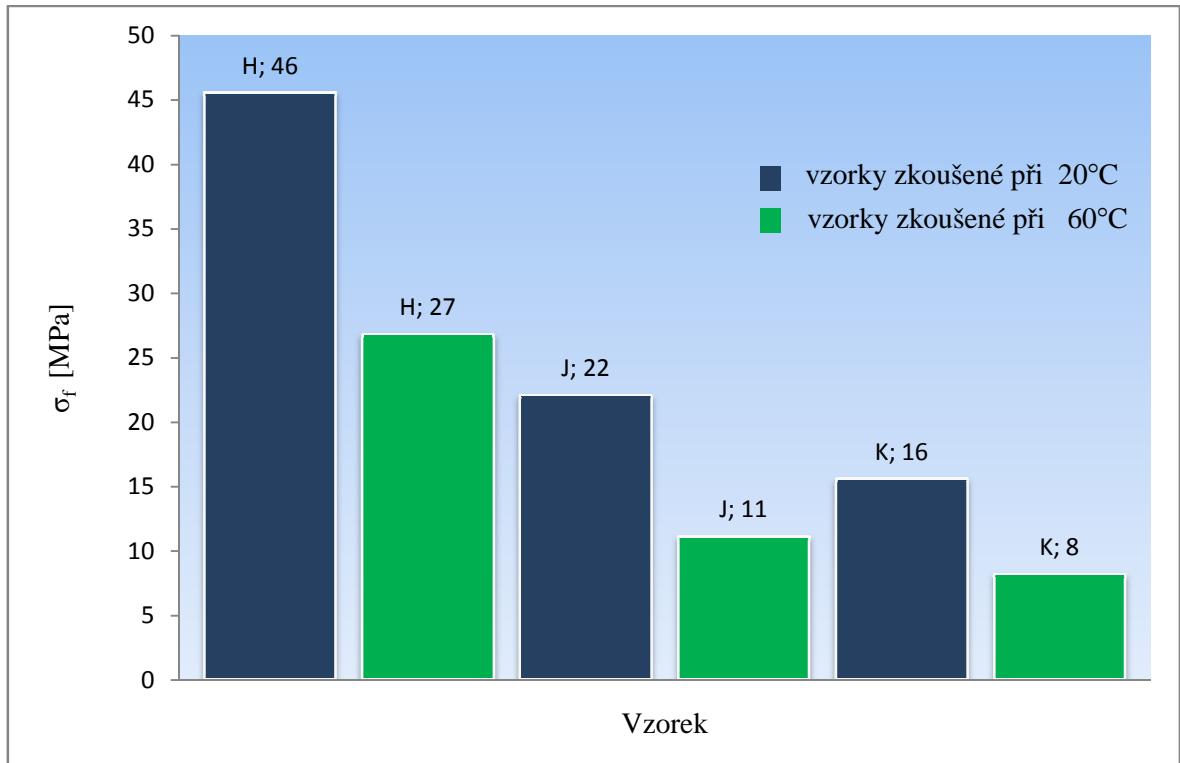


Obr. 64. Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti  $E_{ef}$  vzorků H, J, K při teplotě 20°C a 60°C.



Obr. 65. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  vzorků H, J, K při teplotě -20°C a 20°C.





Obr. 66. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  vzorků H, J, K při teplotě 20°C a 60°C.

- **Diskuze výsledků vzorků H, J, K**

Z výše uvedených grafů (Obr. 63- 66) pro vzorky H, J, K vyplývá:

Při srovnání průměrných hodnot modulů pružnosti při teplotě -20°C a 20°C (Obr. 63) vycházely moduly pružnosti vyšší při snížené teplotě a to pro vzorek H o 25 %, vzorek J o 41 %.

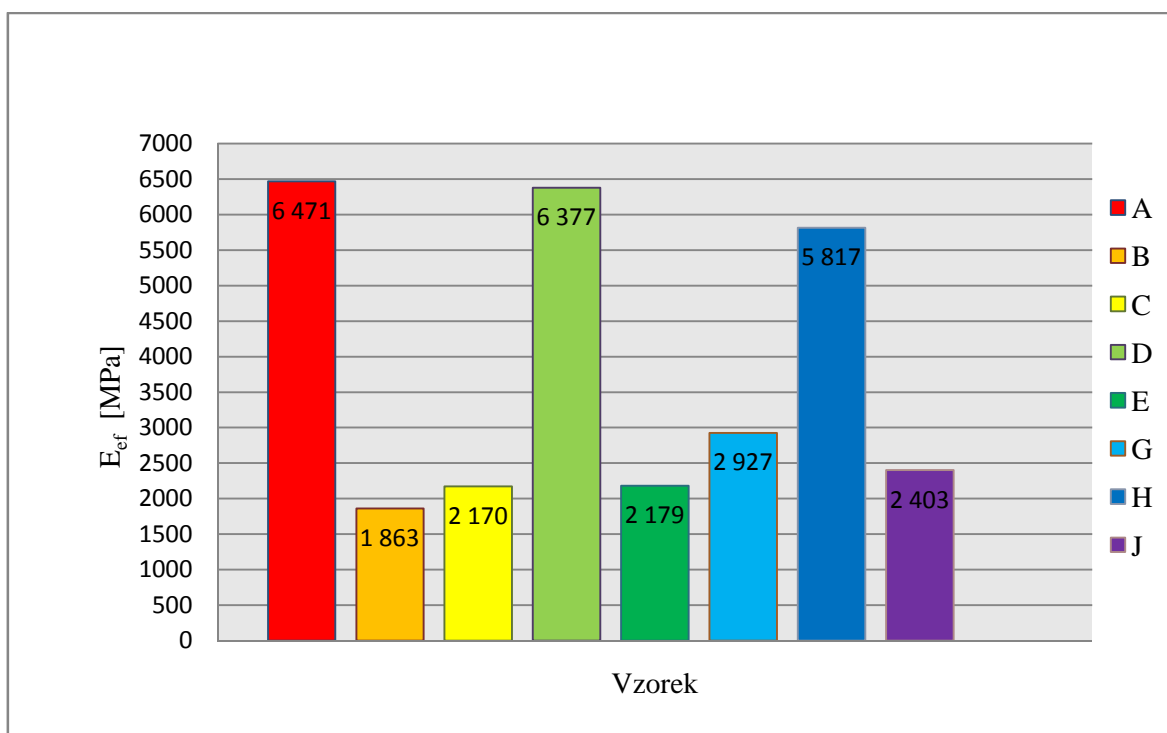
Jak je patrné z průměrných hodnot modulů pružnosti při teplotě 20°C a 60°C (Obr. 64) vycházely vyšší hodnoty při pokojové teplotě a to pro vzorek H o 39%, vzorek J o 43 % a vzorek K o 56 % než při zvýšené teplotě.

Dále z tohoto grafu vyplývá, že při porovnání průměrných hodnot pevnosti v ohybu při teplotě -20°C a 20°C (Obr. 65) vycházely vyšší hodnoty při snížené teplotě pro vzorek H o 23 % a pro vzorek J o 24%.

Porovnáním průměrných hodnot pevnosti v ohybu při teplotě 20°C a 60°C (Obr. 66) vycházely vyšší hodnoty pevnosti v ohybu všech tří vzorků při pokojové teplotě, a to pro vzorek H o 41 %, J o 50 % a vzorek K o 50 % více než při zvýšené teplotě.

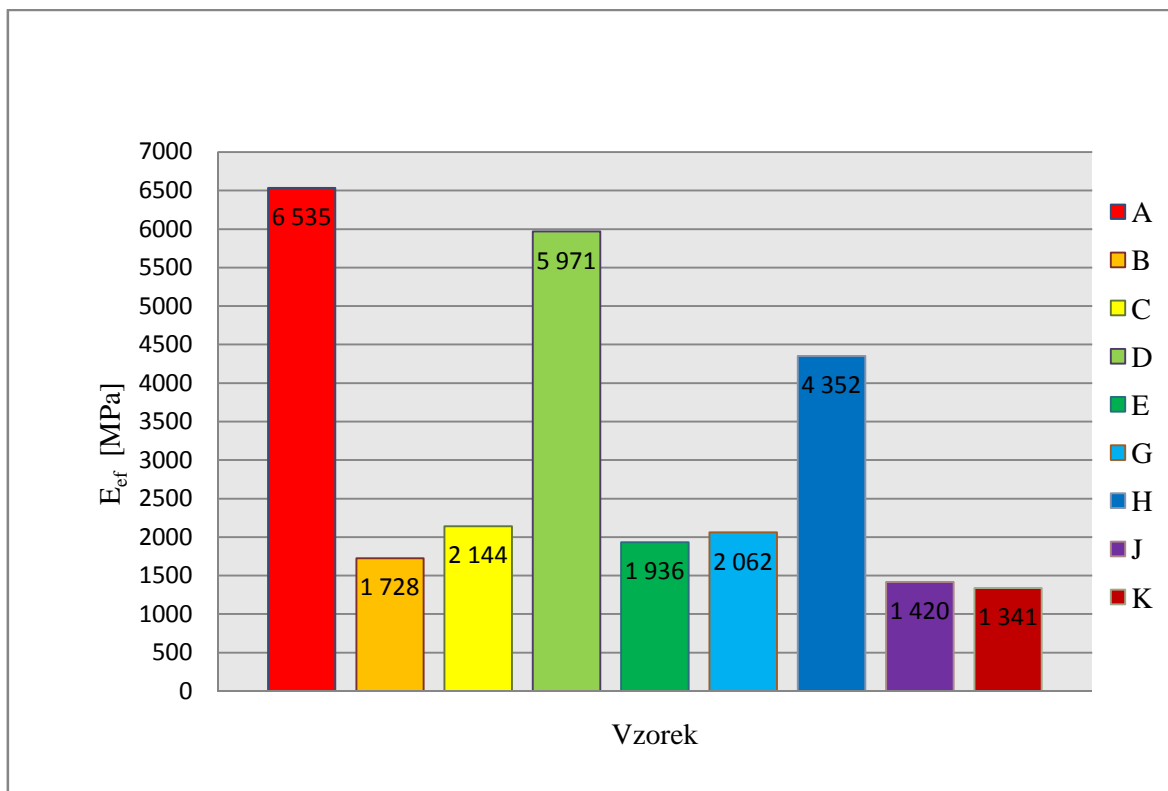
## 9.2 Diskuze výsledků

Z grafu (Obr. 67) vyplývá, že při srovnání vzorků A, D, H o stejné tloušťce 5 mm a teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  má nejvyšší modul pružnosti vzorek A, menší pak vzorek D (o 1%) a nejmenší hodnotu modulu pružnosti pak vzorek H (o 10%). Dále při srovnání vzorků B, E, J o stejné tloušťce 5/5 mm a teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  má nejvyšší modul pružnosti vzorek J, menší pak vzorek E (o 9%) a nejmenší pak vzorek B (o 22%). Dále při srovnání vzorků C a G o stejné tloušťce 10 mm a teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$ , pak má nejvyšší hodnotu modulu pružnosti vzorek G a modul pružnosti u vzorku C je o 26 % menší.



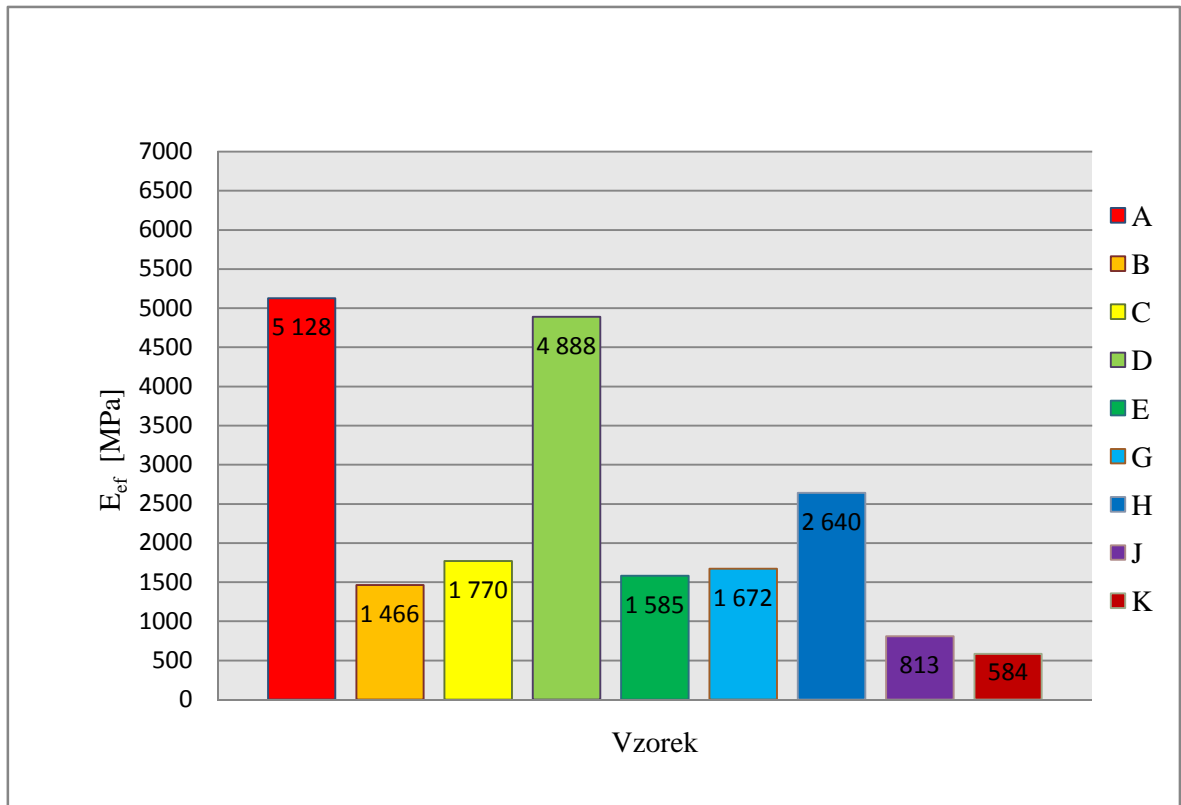
Obr. 67. Průměrné hodnoty modulů pružnosti  $E_{ef}$  jednotlivých vzorků při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Z tohoto grafu (Obr. 68) vyplývá, že při srovnání vzorků A, D, H o stejné tloušťce 5 mm a teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  má nejvyšší modul pružnosti vzorek A, menší pak vzorek D (o 8 %) a nejmenší hodnotu modulu pružnosti pak vzorek H (o 33 %). Dále při srovnání vzorků B, E, J o stejné tloušťce 5/5 mm a teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  má nejvyšší modul pružnosti vzorek E, menší pak vzorek B (o 11 %) a nejmenší hodnotu modulu pružnosti pak vzorek J (o 27 %). Dále při srovnání vzorků C, G, K o stejné tloušťce 10 mm a teplotě  $20^{\circ}\text{C}$ , pak má nejvyšší hodnotu modulu pružnosti vzorek C a modul pružnosti u vzorku G je o 4 % menší a nejmenší hodnotu modulu pružnosti pak vzorek K (o 37 %).



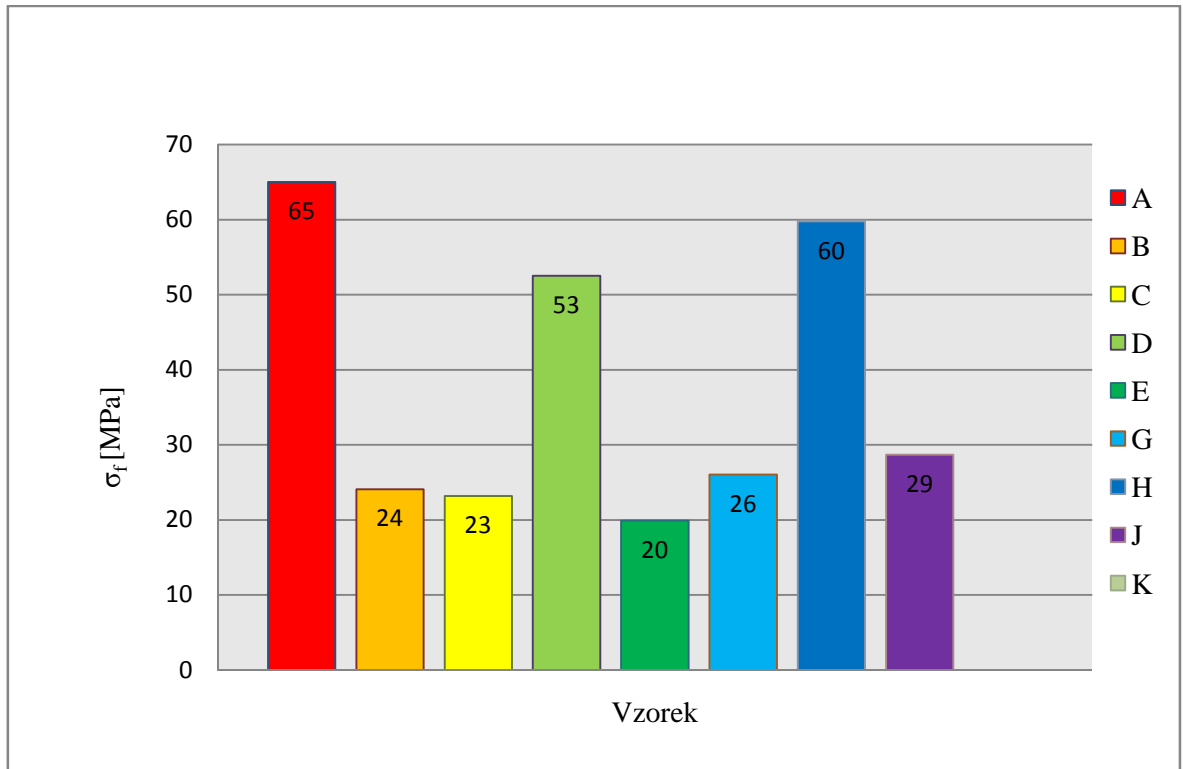
Obr. 68. Průměrné hodnoty modulů pružnosti  $E_{ef}$  jednotlivých vzorků při teplotě 20°C.

Z grafu (Obr. 69) vyplývá, že při srovnání vzorků A, D, H o stejné tloušťce 5 mm a teplotě 60°C má nejvyšší modul pružnosti vzorek A, menší pak vzorek D (o 5 %) a nejmenší hodnotu modulu pružnosti pak vzorek H (o 49 %). Dále při srovnání vzorků B, E, J o stejné tloušťce 5/5 mm a teplotě 60°C má nejvyšší modul pružnosti vzorek E, menší pak vzorek B (o 8 %) a nejmenší hodnotu modulu pružnosti pak vzorek J (o 49 %). Dále při srovnání vzorků C, G, K o stejné tloušťce 10 mm a teplotě 60°C, pak má nejvyšší hodnotu modulu pružnosti vzorek C a modul pružnosti u vzorku G je o 6 % menší a nejmenší hodnotu modulu pružnosti pak má vzorek K (o 67 %).



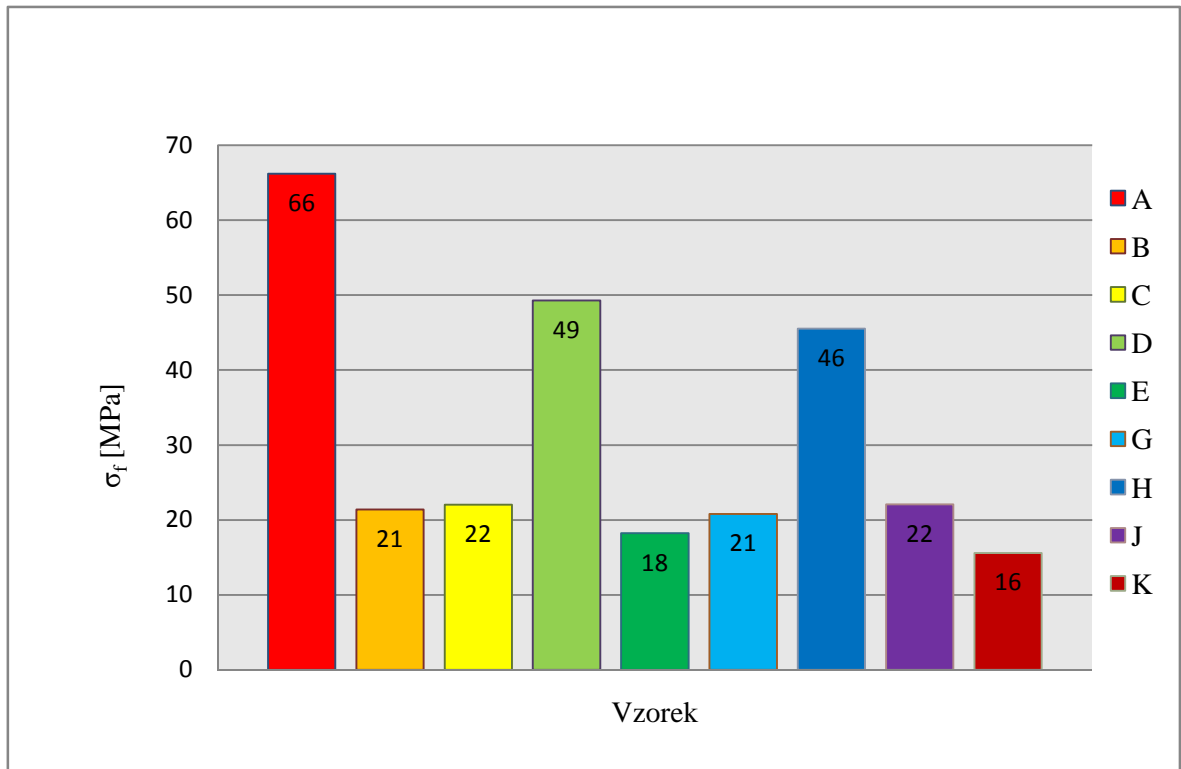
Obr. 69. Průměrné hodnoty modulů pružnosti  $E_{ef}$  jednotlivých vzorků při teplotě 60°C.

Z tohoto grafu (Obr. 70) vyplývá, že při srovnání vzorků A, D, H o stejné tloušťce 5 mm a teplotě -20°C má nejvyšší pevnost v ohybu vzorek A, menší pak vzorek H (o 8 %) a nejmenší hodnotu pevnosti v ohybu pak vzorek D (o 18 %). Dále při srovnání vzorků B, E, J o stejné tloušťce 5/5 mm a teplotě -20°C má nejvyšší pevnost v ohybu vzorek J, menší pak vzorek B (o 17 %) a nejmenší pak vzorek E (o 31 %). Dále při srovnání vzorků C a G o stejné tloušťce 10 mm a teplotě -20°C, pak má nejvyšší hodnotu pevnosti v ohybu vzorek G a pevnost v ohybu u vzorku C je o 12 % menší.



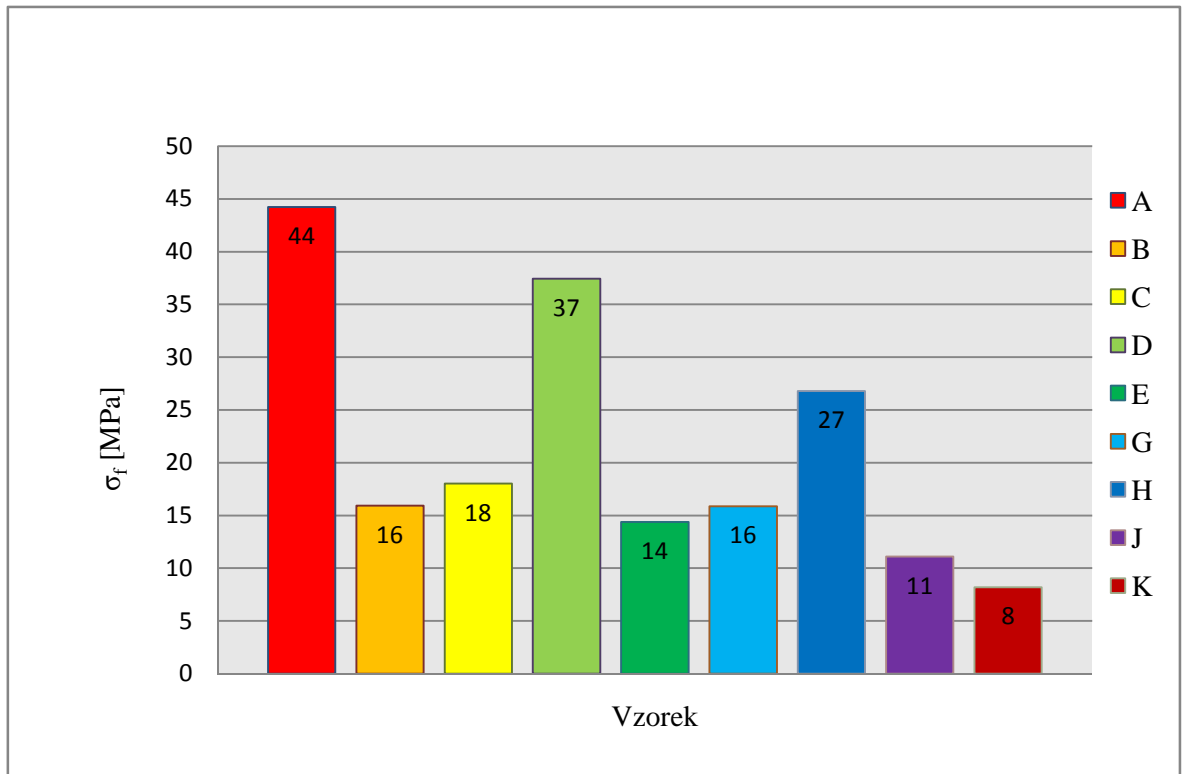
Obr. 70. Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  jednotlivých vzorků při teplotě  $-20^\circ\text{C}$ .

Z grafu (Obr. 71) vyplývá, že při srovnání vzorků A, D, H o stejné tloušťce 5 mm a teplotě  $20^\circ\text{C}$  má nejvyšší pevnost v ohybu vzorek A, menší pak vzorek D (o 26 %) a nejmenší hodnotu pevnosti v ohybu pak vzorek H (o 30 %). Dále při srovnání vzorků B, E, J o stejné tloušťce 5/5 mm a teplotě  $20^\circ\text{C}$  má nejvyšší pevnost v ohybu vzorek J, menší pak vzorek B (o 5 %) a nejmenší pak vzorek E (o 18 %). Dále při srovnání vzorků C, G, K o stejné tloušťce 10 mm a teplotě  $20^\circ\text{C}$ , pak má nejvyšší hodnotu pevnosti v ohybu vzorek C a pevnost v ohybu u vzorku G je o 5 % menší a nejmenší pak vzorek K (o 27 %).



Obr. 71. Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  jednotlivých vzorků při teplotě 20°C.

Z grafu (Obr. 72) vyplývá, že při srovnání vzorků A, D, H o stejné tloušťce 5 mm a teplotě 60°C má nejvyšší pevnost v ohybu vzorek A, menší pak vzorek D (o 16 %) a nejmenší hodnotu pevnosti v ohybu pak vzorek H (o 39 %). Dále při srovnání vzorků B, E, J o stejné tloušťce 5/5 mm a teplotě 60°C má nejvyšší pevnost v ohybu vzorek B, menší pak vzorek E (o 13 %) a nejmenší pak vzorek J (o 31 %). Dále při srovnání vzorků C, G, K o stejné tloušťce 10 mm a teplotě 60°C, pak má nejvyšší hodnotu pevnosti v ohybu vzorek C a pevnost v ohybu u vzorku G je o 11 % menší a nejmenší pak vzorek K (o 56 %).



Obr. 72. Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  jednotlivých vzorků při teplotě 60°C.

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat mechanické vlastnosti a chování sendvičových nosníků s polymerním jádrem při různých teplotách prostředí.

V první části této bakalářské práce jsem se zabýval obecnou charakteristikou kompozitních sendvičových materiálů a problematikou sendvičových struktur.

V praktické části této bakalářské práce byl navrhnut, vyroben a otestován sendvičový kompozitní materiál s třemi druhy polymerních jader, při třech různých tloušťkách. Dále také byly ověřeny a porovnány mechanické vlastnosti a chování nosníků sendvičových konstrukcí s polymerním jádrem při různých teplotách okolního prostředí. Vyrobené vzorky byly testovány v tříbodovém ohybu při pokojové, zvýšené i snížené teplotě. Celkem tedy proběhlo otestování 260 kusů vzorků.

Z naměřených hodnot (Tab. 67-72) vyplývá, že s rostoucí teplotou okolního prostředí dochází ke snižování efektivního modulu pružnosti i pevnosti v ohybu prakticky u všech vyhodnocených vzorků.

Při zkoušce ohybem bylo zjištěno, že největší moduly pružnosti měly vzorky o tloušťce 5 mm, avšak při namáhání vykazovaly největší hodnoty deformace.

Při zvýšené teplotě vykazovaly nejmenší pokles vlastností vzorky s PET jádrem, největší pokles byl u PP voštinového jádra. Z těchto výsledků vyplývá, že při zvýšené teplotě je výhodnější použít kompozitní materiál s PET jádrem.

Při snížené teplotě došlo k největšímu zlepšení vlastností u vzorků s PP voštinovým jádrem a naopak nejmenší zlepšení těchto vlastností bylo u vzorků s PET jádrem. A proto při snížené teplotě bych doporučil použít kompozitní materiál s PP voštinovým jádrem.

Při pokojové teplotě se ukázal jako nejvhodnější jádrový materiál PET.

Bylo dokázáno jak značný vliv má teplota na mechanické vlastnosti polymerních kompozitů z hlediska tuhosti a pevnosti. Proto je potřeba dbát zvýšené pozornosti při výběru a aplikaci těchto kompozitních materiálů a přihlídnout k teplotám, kterým budou v praxi vystaveny.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] PETERS, Edited by S.T. Handbook of composites. 2nd ed. London: Chapman, 1998. ISBN 04-125-4020-7.
- [2] HAVEL COMPOSITES. Technologie [online]. [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie.html>
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] J. M. DAVIES. Lightweight sandwich construction. John Wiley & Sons, 2001.
- [5] Mechanické vlastnosti plošných kompozitů: Tříbodý ohyb. [online]. 2012. vyd. [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/22-2012/pdf/086-089.pdf>
- [6] FOAM CORE MATERIALS IN THE MARINE INDUSTRY. [online]. 2004 [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://www.diabgroup.com>
- [7] MM Průmyslové spektrum: Sendvičové konstrukce, [online]. 2001 [cit. 2014-01-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/archiv.html>
- [8] GOGA Vladimír. Bunkové telesá [online]. 2010 [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/>
- [9] VINSON, Jack R. The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials. Vyd. 1. Lancaster, Pa.: Technomic Pub. Co., c1999, xvi, 378 p. Kniha strojírenské technologie. ISBN 15-667-6699-0.
- [10] DAŇOUREK, K. Kompozitní materiály: Druhy a jejich užití. Liberec, 2007. Publikace. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Technologická.
- [11] Strojní fakulta VŠB-TU Ostrava [online]. [cit. 2014-10-19]. Dostupné z: [http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/339/.content/files/Slide13\\_Polymer.pdf](http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/339/.content/files/Slide13_Polymer.pdf)
- [12] Armacell-core-foams. PET Foams [online]. [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://www.armacell-core-foams.com/>
- [13] RUSNÁKOVÁ, Soňa: Přednášky z předmětu zpracovatelské inženýrství kompozitů T5ZIK; FT UTB. 2011
- [14] PVC-CORE [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.pvc-core.com/en/category.html?Id=1>

- [15] CompositesWorld[online]. [cit.2015-03-20]. Dostupné z:  
<http://www.compositesworld.com/news/jec-europe-2012-exhibition-previews>
- [16] AirexBaltekBanova[online]. [cit.2015-03-20]. Dostupné z:  
<http://www.3accorematerials.com/de/produkte/airex/airexreg-c51.html>
- [17] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008,94 s.
- [18] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1.vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [19] FABRIGER, Daniel .  
Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur vakuovou infuzí pod pružnou folii[online]. Zlín, 2011 [cit. 2014-10-20]. 124 s. Dostupné z: [http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/15882/fabriger\\_2011\\_dp.pdf?sequence=1](http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/15882/fabriger_2011_dp.pdf?sequence=1). Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [20] Guide to Composites[online]. [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv5webpdf.pdf>
- [21] Spray Lay-up - Fibre chopped in hand-held gun, fed into spray of catalysed resin-directed at mould. [online]. [cit. 2014-11-10]. Dostupné z:  
<http://www.netcomposites.com/guide/spray-lay-up/51>
- [22] Composite Manufacturing Process - Resin Transfer Moulding. [online]. [cit.2015-3-22]. Dostupné z: <http://www.jjmechanic.com/process/rtm.htm>
- [23] Advanced materials for aircraft interiors : CompositesWorld. [online]. [cit. 2014-10-03]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/advanced-materials-for-aircraft-interiors>
- [24] Technologie [online]. [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [25] DORWORTH, Louis C, Ginger L GARDINER a Greg M MELLEMA. Essentials of advanced composite fabrication and repair. Newcastle, Wash.: Aviation Supplies, c2012, xii, 291 p. ISBN 15-602-7752-1.
- [26] TECHNICKÁ MĚŘIDLA A POČÍTAČOVÉ SYSTÉMY: Charpy kladiva do 50 J. [online]. [cit. 2014-10-13]. Dostupné z: <http://www.tempos.cz/zkusebnistroje/charpyho-kladiva/charpy-kladiva-do-50-j>

- [27] Pevnostbetonu v tahuzaohybu: zkouška. [online]. [cit. 2014-10-21]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tahu-za-ohybu-zkouska>
- [28] SCHÄTZ, M.; VONDRÁČEK, P. Zkoušení polymerů, 2 vyd.; VSCHT: Praha, 1988. 264 s.ISBN 15-667-6699-0
- [29] Mechanické vlastnosti polymeru: zkouška tahem [online]. 2011. vyd. [cit. 2014-10-19]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/NEkM/NeM%20Kro/Mechanicka%20vlastnosti%20polymeru.ppt](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NeM%20Kro/Mechanicka%20vlastnosti%20polymeru.ppt)
- [30] ANIZOTROPIE VLASTNOSTÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ S POLYMERNÍ MATRICÍ: Kompozity s textilnívýztuží. [online]. [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/projekty/frvs139/P3.pdf>
- [31] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. Vláknové kompozity. 1.vyd. Praha: SNTL, 1987, 294 s.
- [32] TESTRESOURCES: Composites | 3 and 4 Point FlexuralBend Test Equipment. [online]. [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: <http://www.testresources.net/material-type/composites-test-equipment/4-3-point-flexural-bend-testing-composites-astm-d6272/>
- [33] Formulace základní úlohy teorie pružnosti. [online]. [cit. 2014-11-10]. Dostupné z:[http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/kontinuum/3\\_2](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/3_2)
- [34] Jetphotos. [online]. 2009 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://jetphotos.net/showphotos.php?aircraft=Aero%20Ae-270%20Ibis>
- [35] Posterus. Bunkovételesá [online]. 2008 [cit. 2014-11-20].Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7861>
- [36] Polypropylen kopolymer [online],[cit. 2014-01-30].Dostupné z :<http://www.img-managment.cz/editor/filestore/File/desky%20vytlac/PP%20kopolymer%20CJ.pdf>
- [37] Advancedpregmaterials [online]. [cit. 2015-04-12].Dostupné z:[http://www.aeroconsultants.ch/page.php?id=341&language=en&titel=Advanced\\_Preg\\_Materials](http://www.aeroconsultants.ch/page.php?id=341&language=en&titel=Advanced_Preg_Materials)
- [38] Rámová trubka kola Festka [online]. [cit 2015-04-12]. Dostupné z: [http://rcdn.roadbikereview.com/wp-content/uploads/2012/03/img\\_0284063.jpg](http://rcdn.roadbikereview.com/wp-content/uploads/2012/03/img_0284063.jpg)

- [39] Kolo Festka [online]. [cit 2015-04-12]. Dostupné z:  
<http://www.roadbikeaction.com/contentimages/Zap%20News/2012/Handmade%20Show/HMFestka3.jpg>
- [40] Konstrukce lyže firmy SCOTT [online]. [cit 2015-04-12]. Dostupné z:  
[http://dfp2hfrf3mn0u.cloudfront.net/TEC/TECH\\_WS\\_skis\\_ssctit\\_38367\\_jpg\\_mainBanner\\_1.jpg](http://dfp2hfrf3mn0u.cloudfront.net/TEC/TECH_WS_skis_ssctit_38367_jpg_mainBanner_1.jpg)
- [41] Shell construction. MARTINOLI. [online]. [cit. 2015-04-12]. Obrázek ve tvaru JPEG. Dostupné z: <http://www.martinoli.it/img/sezione1.jpg>
- [42] Letadlo OK-ALE, Aero-270 [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z:  
<http://www.flugzeug-bild.de/bild/Kleinflugzeuge~Sportflugzeuge~Aero+AT-/24478/private-ok-ale-aero-ae-270-06082010-lhke.html>
- [43] Letecký informační server. [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z:  
<http://www.letectvi.cz/src/letectvi/img/news/prumysl/2006/12/ibis.jpg>
- [44] Galerie tramvaje Škody. [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z:  
<http://plzensky.denik.cz/galerie/tramavaje.html?mm=189133>
- [45] Steps in productionofcorematerial. [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z:  
<http://5dcomposite.com/manufacturing-process.html>
- [46] Howfoam ruber is made. [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z:  
<http://www.madehow.com/Volume-5/Foam-Rubber.html>
- [47] STOKLASA, K: Makromolekulární chemie II. Skripta UTB Zlín – Fakulta technologická, 2005.
- [48] ZENKERT, D. NordicIndustrialFund: The Handbook ofSandwichConstruction. Worchestershire; EMAS Publishing, 1997. ISBN 0-947817-96-4.
- [49] ZENKERT, D. SandwichConstructions. Londýn: Emas, 2000, 439 s. ISBN 0-947817-96-4
- [50] MECHANICKÉ VLASTNOSTI, [online]. [cit.2015-03-22]. Dostupný z  
[www:http://www.ateam.zcu.cz/mechanicke\\_vlastnosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf).
- [51] HRDINA J., Nauka o materiálu TQNM, Cvičení č.2
- [52] ČSN EN ISO 178 (64 0607) článek 4, Stanovení ohybových vlastností.

- [53] Hexcel. Hexcel: Technology manuals [online]. 2013 [cit. 2015-03-06]. Dostupné z: [http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Honeycomb\\_Sandwich\\_Design\\_Technology.pdf](http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf)
- [54] Pflug, J., Czarnecki, T. : Continuous honeycomb production technology, JEC Composites Magazine 2014, 87, 130.
- [55] Den Braven-zateplovací systémy. [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.denbraven.sk/zateplovacie-systemy/1019-fasadny-polystyren-eps-70-11-sk495.html?lang=sk>
- [56] Plastcore-honeycomb score . [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.plascore.com/products/honeycomb-cores/thermoplastic/pp-polypropylene-honeycomb/>
- [57] Svaz českého leteckého průmyslu. [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.sclp.cz/la-composite-vedla-po-certifikacich-do-provozu-novy-autoklav/>
- [58] Přírodovědecká fakulta UJEP v Ústí nad Labem.[online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~inastoup/lib/exe/fetch.php?media=statistika1.pdf>
- [59] Form s.r.o. .[online]. [cit. 2015-05-18]  
Dostupné z: <http://www.form-composite.com/vyrobni-cinnost>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PUR	Polyuretan
PP	Polypropylen
PE	Polyetylén
PVC	Polyvinylchlorid
PUR	Polyuretan
SAN	Styrén akrylonitril
PS	Plystyren
RTM	Vysokotlaké vstřikování do formy
$E_{ef}$	Modul pružnosti v ohybu
$\sigma_f$	Napětí
F	Síla
b	Šířka vzorku
h	Tloušťka vzorku
l	Rozteč podpěr
X	Průhyb vzorku
a	Vzdálenost zatěžující síly od podpěr
n	Počet vzorků
MIN	Minimální hodnota
MAX	Maximální hodnota
ME	Medián
s	Směrodatná odchylka
$\bar{x}$	Aritmetický průměr
J	Jádro

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Sendvič s pěnovým jádrem.</i> [37].....	12
<i>Obr. 2.Voštinová sendvičová struktura.</i> [2].....	12
<i>Obr. 3.Výroba jednosměrně orientovaného prepregu.</i> [16] .....	14
<i>Obr. 4. Prepreg vyrobený z uhlíkových vláken.</i> [20] .....	14
<i>Obr. 5. Ukázka typů struktury buněčných těles: a) voština, b) pěna s otevřenými buňkami, c) pěna s uzavřenými buňkami.</i> [35].....	16
<i>Obr. 6.Namáhaní sendvičového nosníku při ohybu.</i> [20] .....	17
<i>Obr. 7. Příklady sendvičových struktur ve sportu: a) trubka rámu kol Festka b) kolo Festka, c) konstrukce lyže, d) veslařská závodní loď.</i> [38], [39], [40], [41].....	19
<i>Obr. 8. a) Letoun Aero Ae-270 [42], Obr. 8b Detail podvozku letadla.</i> [43] .....	19
<i>Obr. 9.Tramvaj Astra.</i> [44] .....	20
<i>Obr. 10.Faktory ovlivňující vlastnosti buněčných těles.</i> [8] .....	21
<i>Obr. 11. Vlastnosti pěnových a plných materiálů.</i> [8] .....	22
<i>Obr. 12.Výroba polymerních pěn zpěňováním plynem.</i> .....	23
<i>Obr. 13.Výroba polymerní pěny přidáním zpěňovačů.</i> .....	23
<i>Obr. 14.a) Absorbér s pěnovou výplní, 14 b) Pěnová výplň autosedačky.</i> [8] .....	24
<i>Obr. 15.Strukturní jednotka polyvinylchloridu.</i> [47] .....	25
<i>Obr. 16. Deska z PVC.</i> [14] .....	25
<i>Obr. 17. Strukturní jednotka polyetylentereftalátu.</i> [47] .....	26
<i>Obr. 18. Desky z PET pěny.</i> [15] .....	26
<i>Obr. 19. Deska z PUR pěny.</i> [13] .....	26
<i>Obr. 20. Deska ze SAN pěny.</i> [16] .....	27
<i>Obr. 21. Strukturní jednotka polystyrenu.</i> [47].....	27
<i>Obr. 22.Desky z PS</i> [55].....	28
<i>Obr. 23.Voštinová polypropylenová deska.</i> [56] .....	28
<i>Obr. 24.Výroba polypropylenové voštiny postupným skládáním s příklady aplikací.</i> [54] .....	29
<i>Obr. 25. Strukturní jednotka polypropylenu.</i> [47] .....	29
<i>Obr. 26.Technologie vyhřívání lisování a výsledný výrobek.</i> [53].....	30
<i>Obr. 27.Formování v uzavřené formě a výsledný výrobek.</i> [53].....	31
<i>Obr. 28. Schéma vytvrzování v peci a výsledný výrobek.</i> [53].....	32
<i>Obr. 29. Autokláv.</i> [57] .....	33

<i>Obr. 30. Schéma ohybové zkoušky.</i> .....	35
<i>Obr. 31. Schéma zkoušky na čtyřbodový ohyb. [33]</i> .....	37
<i>Obr. 32. Prepreg GURIT PHG840-300-42.</i> .....	40
<i>Obr. 33. Pěna AIREX T90.100.</i> .....	42
<i>Obr. 34. Pěna HEREX C70.55.</i> .....	43
<i>Obr. 35. Polypropylenová voština NIDAPLAST. [Příloha PIII]</i> .....	44
<i>Obr. 36. Pomocné materiály a komponenty.</i> .....	47
<i>Obr. 37. Separáční fólie.</i> .....	48
<i>Obr. 38. Odsávací rohoŹ.</i> .....	48
<i>Obr. 39. Těsnící páska.</i> .....	49
<i>Obr. 40. Vakuov� fólie.</i> .....	49
<i>Obr. 41. Ventil, tlakoměr.</i> .....	50
<i>Obr. 42. Řezací plotr Z�nd M-1600 [59]</i> .....	51
<i>Obr. 43. Kladen� prepregu.</i> .....	52
<i>Obr. 44. Postupn� kladen� jednotlivých vrstev prepregu.</i> .....	52
<i>Obr. 45. Sendvičov� panel před překrytím odsávací fólií.</i> .....	53
<i>Obr. 46. Separáční fólie.</i> .....	53
<i>Obr. 47. Odsávací rohoŹ.</i> .....	54
<i>Obr. 48. Zavakuovan� panel.</i> .....	55
<i>Obr. 49. Um�stěn� zaformovan�ho panelu v peci.</i> .....	55
<i>Obr. 50. Vytvrzovací pec AIRTECH.</i> .....	56
<i>Obr. 51. Vyroben� vzorky sendvičových kompozitů v řezu.</i> .....	57
<i>Obr. 52. Nařezan� zkuŹebn� vzorky.</i> .....	57
<i>Obr. 53. ZkuŹebn� stroj Zwick1456 a měřicí teplotn� komora Zwick W91255.</i> .....	59
<i>Obr. 54. Způsob uchycení zkuŹebn�ho vzorku.</i> .....	60
<i>Obr. 55. Porovnání průměrů hodnot modulů pruŹnosti <math>E_{ef}</math> vzorků A, B, C při teplotě -20�C a 20�C.</i> .....	62
<i>Obr. 56. Porovnání průměrů hodnot modulů pruŹnosti <math>E_{ef}</math> vzorků A, B, C při teplotě 20�C a 60�C.</i> .....	63
<i>Obr. 57. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu <math>\sigma_f</math> vzorků A, B, C při teplotě -20�C a 20�C.</i> .....	63
<i>Obr. 58. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu <math>\sigma_f</math> vzorků A, B, C při teplotě 20�C a 60�C.</i> .....	64



<i>Obr. 59. Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti <math>E_{ef}</math> vzorků D, E, G při teplotě <math>-20^{\circ}\text{C}</math> a <math>20^{\circ}\text{C}</math>.</i>	67
<i>Obr. 60. Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti <math>E_{ef}</math> vzorků D, E, G při teplotě <math>20^{\circ}\text{C}</math> a <math>60^{\circ}\text{C}</math>.</i>	67
<i>Obr. 61. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu <math>\sigma_f</math> vzorků D, E, G při teplotě <math>-20^{\circ}\text{C}</math> a <math>20^{\circ}\text{C}</math>.</i>	68
<i>Obr. 62. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu <math>\sigma_f</math> vzorků D, E, G při teplotě <math>20^{\circ}\text{C}</math> a <math>60^{\circ}\text{C}</math>.</i>	68
<i>Obr. 63. Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti <math>E_{ef}</math> vzorků H, J, K při teplotě <math>-20^{\circ}\text{C}</math> a <math>20^{\circ}\text{C}</math>.</i>	71
<i>Obr. 64. Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti <math>E_{ef}</math> vzorků H, J, K při teplotě <math>20^{\circ}\text{C}</math> a <math>60^{\circ}\text{C}</math>.</i>	72
<i>Obr. 65. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu <math>\sigma_f</math> vzorků H, J, K při teplotě <math>-20^{\circ}\text{C}</math> a <math>20^{\circ}\text{C}</math>.</i>	72
<i>Obr. 66. Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu <math>\sigma_f</math> vzorků H, J, K při teplotě <math>20^{\circ}\text{C}</math> a <math>60^{\circ}\text{C}</math>.</i>	73
<i>Obr. 67. Průměrné hodnoty modulů pružnosti <math>E_{ef}</math> jednotlivých vzorků při teplotě <math>-20^{\circ}\text{C}</math>.</i>	74
<i>Obr. 68. Průměrné hodnoty modulů pružnosti <math>E_{ef}</math> jednotlivých vzorků při teplotě <math>20^{\circ}\text{C}</math>.</i>	75
<i>Obr. 69. Průměrné hodnoty modulů pružnosti <math>E_{ef}</math> jednotlivých vzorků při teplotě <math>60^{\circ}\text{C}</math>.</i>	76
<i>Obr. 70. Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu <math>\sigma_f</math> jednotlivých vzorků při teplotě <math>-20^{\circ}\text{C}</math>.</i>	77
<i>Obr. 71. Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu <math>\sigma_f</math> jednotlivých vzorků při teplotě <math>20^{\circ}\text{C}</math>.</i>	78
<i>Obr. 72. Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu <math>\sigma_f</math> jednotlivých vzorků při teplotě <math>60^{\circ}\text{C}</math>.</i>	79

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Vlastnosti prepregu GURIT PHG840-300-42. [Příloha PI]</i> .....	41
<i>Tab. 2. Doby vytvrzování prepregu GURIT PHG840-300-42. [Příloha PI]</i> .....	41
<i>Tab. 3. Mechanické vlastnosti prepregu GURIT PHG840-300-42. [Příloha PI]</i> .....	42
<i>Tab. 4. Vlastnosti pěny AIREX T90.100. [Příloha PII]</i> .....	43
<i>Tab. 5. Vlastnosti pěny HEREX C70.55. [Příloha PIII]</i> .....	44
<i>Tab. 6. Vlastnosti polypropylenové voštiny NIDAPLAST. [Příloha PIV]</i> .....	45
<i>Tab. 7. Vlastnosti vyrobených kompozitních panelů. [Příloha PI-IV]</i> .....	46
<i>Tab. 8. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál A.</i> .....	61
<i>Tab. 9. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál B.</i> .....	61
<i>Tab. 10. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál C.</i> .....	62
<i>Tab. 11. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál D.</i> .....	65
<i>Tab. 12. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál E.</i> .....	65
<i>Tab. 13. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál G.</i> .....	66
<i>Tab. 14. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál H.</i> .....	70
<i>Tab. 15. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál J.</i> .....	70
<i>Tab. 16. Vypočtené hodnoty z naměřených vzorků pro materiál K.</i> .....	71

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha PI Materiálové listy prepregu GURIT PHG840-300-42
- Příloha PII Materiálové listy AIREX T90.100
- Příloha PIII Materiálové listy HEREX C70.55
- Příloha PIV Materiálové listy NIDAPLAST
- Příloha PV Naměřené hodnoty při zkoušce ohybem

## PŘÍLOHA PI: PREPREG GURIT PH840-300-42



### PH840-300-42

- Fiber reinforced thermosetting prepregged materials for railway parts (e.g. fairings, window, ceiling and floor panels).
- Woven fabric of E-glass filament yarn, 300 g/m<sup>2</sup>, 8H satin, prepregged with 42% phenolic resin PH840.
- Long shelf and shop life
- Excellent FST behaviour
- Excellent mechanical behaviour
- Good surface finish
- Autoclave-free processes possible
- Short curing time 10 min at 160°C

## Description

PHB40-300-42 is a halogenfree modified phenolic system, designed for laminate with bright colour and good surface quality. This prepreg material has been developed for industrial and rail applications, with high specific mechanical properties and excellent FST (low heat-release and smoke-density) behaviour.

The resin matrix PHB10 can be cured at a temperature range between 120 C and 160 C. Monolithic and sandwich structures can be easily manufactured with this prepreg. The curing can be performed by press, vacuum and autoclave moulding with a pressure of at least 0,07 N/mm<sup>2</sup>.

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

Cured laminates fulfil the flame-retardant Rail specifications:

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

The prepreg material is suitable for:

- Rail industries
- Machine industries
- Marine and automotive applications

## Prepreg Properties

	Test method	Value
Resin		Phenolic
Prepreg Weight	EN 2329	525 ±30 g/m <sup>2</sup>
Volatile	EN 2330 (160°C/10min)	< 6,0 %
Resin Flow	EN 2332 (3 plies, 135°C, 8min, 4 bar)	< 10 %
Tackiness		T0, T1, T2
Fibre Material		E-glass
Fabric Weight	EN 2331	290 g/m <sup>2</sup> ±5 %
Weave Style		0°/90°
Service Temperature (Cured State)		-55°C to +80°C
Resin Content	EN 2331	42,0 ±3%

## Delivery Form and Storage

Prepreg sizes	Roll length / Roll width	50 / 1,0 m
Storage Life (from delivery date)	Days at RT / Month at -18°C	

## Curing Conditions

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

## Mechanical Properties (Typical Values)

	Temp. [°C]	Standard	Results	
Flexural Strength (warp)	RT	ISO 178	450	MPa
	80		300	
Flexural Modulus (warp)	RT	ISO 178	22	GPa
	80		19	
Tensile Strength (warp)	RT	ISO 527-4		MPa
	80			
Tensile Modulus (warp)	RT	ISO 527-4		GPa
Compressive Strength (warp)	RT	EN 2850	-	MPa
	80		-	
Compressive Modulus (warp)	RT	EN 2850	-	GPa
Interlaminar Tensile Shear Strength (warp)	RT	ASTM 1.0019/118	18	MPa
	80		16	
Climbing Drum Peel <sup>1</sup>	RT	EN 2543-3	110	N/75 mm
	80		-	
Bending Load (4-P.) <sup>1</sup>	RT	ASTM 1.0018 Fig.2	850	N
	80		-	
Tg (TMA)		TMA	> 80	°C

<sup>1</sup>Smach structure

## Burning Behavior

		Test method	Max. mean values	
Flammability vertical, 60s flaming	burn length after flame time after flame time of drips	ASTM 2.0002A	60	mm s s
			5	
			-	
Max. specific optical smoke density within 4 min	flaming mode	ASTM 2.0007A	5	Da
Heat release		ASTM 2.0006	25	$\frac{kW}{m^2}$
Heat release rate		ASTM 2.0006	25	$\frac{kW}{min \cdot m^2}$

# PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÁ LIST PĚNY AIREX T90.100

**AIREX**BALTEK**BANOVA**

## DATA SHEET

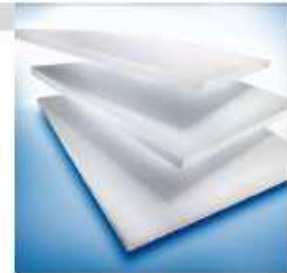
02.2012 (replaces 09.2011)

### AIREX® T90

#### Easy Processing Structural FST Foam

##### CHARACTERISTIC

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



##### APPLICATIONS

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

##### PROCESSING

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

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

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

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

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

[www.3ACorematerials.com](http://www.3ACorematerials.com)



Europe | Middle East | India | Africa

Airex AG  
5643 Sins, Switzerland  
T +41 41 789 86 00 | F +41 41 789 86 80  
[corematerials@3AComposites.com](mailto:corematerials@3AComposites.com)

North America | South America

Baltek Inc.  
High Point, NC 27261, USA  
T +1 336 398 1900 | F +1 336 398 1901  
[corematerials.america@3AComposites.com](mailto:corematerials.america@3AComposites.com)

Asia | Australia | New Zealand

3A Composites (China) Ltd.  
201201 Shanghai, China  
T +86 21 585 86 006 | F +86 21 338 27 298  
[corematerials.asia@3AComposites.com](mailto:corematerials.asia@3AComposites.com)

# AIREX BALTEK BANOVA

Typical properties for AIREX® T90		Unit (metrical)	Value <sup>1)</sup>	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>	Average <i>Typ. range</i>	85 60 - 70	110 105 - 115	145 140 - 150	210 200 - 220
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm <sup>2</sup>	Average <i>Minimum</i>	0.80 0.7	1.4 1.2	2.2 2.0	3.5 3.2
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	N/mm <sup>2</sup>	Average <i>Minimum</i>	50 35	85 75	115 100	170 145
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm <sup>2</sup>	Average <i>Minimum</i>	1.5 1.2	2.2 1.6	2.7 2.2	3.0 2.4
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm <sup>2</sup>	Average <i>Minimum</i>	85 70	120 90	170 140	225 180
Shear strength	ISO 1922	N/mm <sup>2</sup>	Average <i>Minimum</i>	0.46 0.4	0.8 0.7	1.2 1.1	1.85 1.5
Shear modulus	ISO 1922	N/mm <sup>2</sup>	Average <i>Minimum</i>	12 10.5	20 18	30 26	50 44
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average <i>Minimum</i>	12 8	10 5	8 4	5 3
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.033	0.033	0.036	0.041
Standard sheet	Width <sup>2)</sup>	mm ± 5		610	610	610	610
	Length <sup>2)</sup>	mm ± 5		1220	1220	1220	1220
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 100	5 to 100	5 to 100	5 to 100

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

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

<sup>2)</sup> Alternative width 1220 mm, alternative length 2440 mm

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

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



# AIREX BALTEK BANOVA

Typical properties for AIREX® T90		Unit (metrical)	Value <sup>1)</sup>	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	lb/ft <sup>3</sup>	Average <i>Typ. range</i>	4.1 3.7 - 4.4	6.8 6.6 - 7.2	9.1 8.7 - 9.4	13 12.5 - 13.7
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	psi	Average <i>Minimum</i>	116 102	203 174	319 290	508 464
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	psi	Average <i>Minimum</i>	7'250 5'075	12'330 10'875	16'680 14'500	24'650 21'025
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	psi	Average <i>Minimum</i>	218 174	319 232	392 319	435 350
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C297	psi	Average <i>Minimum</i>	12'325 10'150	17'400 13'050	24'650 20'300	32'630 26'100
Shear strength	ISO 1922	psi	Average <i>Minimum</i>	67 58	116 102	174 160	268 215
Shear modulus	ISO 1922	psi	Average <i>Minimum</i>	1'740 1'520	2'900 2'610	4'350 3'770	7'250 6'380
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average <i>Minimum</i>	12 8	10 5	8 4	5 3
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.033	0.033	0.036	0.041
Standard sheet	Width <sup>2)</sup>	mm ± 5		610	610	610	610
	Length <sup>2)</sup>	mm ± 5		1220	1220	1220	1220
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 100	5 to 100	5 to 100	5 to 100

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

<sup>1)</sup> Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm (3/4") except compressive modulus 40 mm (1 1/2")

<sup>2)</sup> Alternative width 1220 mm, alternative length 2440 mm

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

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

## PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÁ LIST PĚNY HEREX C70.55



AIREX® C70 material data sheet EN 2010 V02  
Material data sheet / Issue 08/2010 / Replaces issue 09/2009

AIREX® C70  
Universal structural foam

### Description

A unique closed cell, cross-linked polymer foam that combines high stiffness and strength to weight ratios with superior toughness. It is non-friable, contains no CFC's, has negligible water absorption, and provides an excellent resistance to chemicals. A fine cell structure offers an excellent bonding surface that is compatible with most resins and manufacturing processes. It is ideally suited as a core material for a wide variety of light-weight sandwich structures subjected to both static and dynamic loads in service.

### Applications

#### Marine

Hulls, decks, bulkheads, superstructures, interiors

#### Road and Rail

Roof panels, interiors, floors, doors, partition walls, side skirts

#### Wind Energy

Rotor blades, nacelles, turbine generator housings

#### Air

General aviation (sport aircraft) parts, galley carts

#### Recreation

Surfboards, snowboards, wakeboards

#### Industrial

Tooling, tanks, ductwork, containers, covers

### Charakteristik

- high strength and stiffness to weight ratios
- good impact strength
- low resin absorption
- high fatigue resistance
- good fire performance (self-extinguishing)
- sound and thermal insulation
- non biodegradable
- good styrene resistance

### Processing

- contact molding (hand/spray)
- vacuum infusion
- resin injection (RTM)
- adhesive bonding
- pre-preg processing
- thermoforming

Data sheet AIREX® C70

TAKE LESS WEIGHT.



AIREX® C70 material data sheet EN 2010 V02

Material data sheet / Issue 08/2010 / Replaces issue 09/2009

**AIREX® C70**  
Universal structural foam

Properties	Certificate	Unit	Value <sup>1)</sup>	AIREX® C70.55	AIREX® C70.75
<b>Density</b>	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>	Average typ. range	60 54 - 69	80 72 - 92
<b>Compressive strength perpendicular to the plane</b>	ISO 844	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	0.90 0.75	1.45 1.10
<b>Compressive modulus perpendicular to the plane</b>	DIN 53421	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	69 55	104 80
<b>Tensile strengt in the plane</b>	ISO 527 1-2	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	1.3 1.0	2.0 1.6
<b>Tensile modulus in the plane</b>	ISO 527 1-2	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	45 35	66 50
<b>Shear strength</b>	ISO 1922	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	0.85 0.70	1.2 1.0
<b>Shear modulus</b>	ASTM C393	N/mm <sup>2</sup>	Average Minimum	22 18	30 24
<b>Shear elongation at break</b>	ISO 1922	%	Average Minimum	16 10	18 10
<b>Thermal conductivity at room temperature</b>	ISO 8301	W/m.K	Average	0.031	0.033
<b>Standard sheet</b>					
Width		mm ± 5		1150	1020
Length		mm ± 5		2450 <sup>2)</sup>	2180
Thickness		mm ± 0.5		5 to 70	3 to 68
<b>Block</b>					
Thickness		mm ± 2		78	72
<b>Scrim-cloth (sc)</b>					
Width		mm ± 10		600 or 1200	510 or 1020
Length		mm ± 10		1140	1080
Thickness		mm ± 0.5		5 to 70	3 to 68
<b>Colour</b>				yellow	green

Data sheet AIREX® C70

Finishing options, other dimensions and closer tolerances upon request.

<sup>1)</sup> Minimum values for DNV definition, specimen thickness 20 mm except tensile properties (10mm) and pressure module (40mm). <sup>2)</sup> Half size plate sheets for thickness ≤ 8mm

The data provided gives approximate values for the nominal density and DNV minimum values according DNV type approval certificate.

The information contained herein is believed to be correct and to correspond to the latest state of scientific and technical knowledge. However, no warranty is made, either expressed or implied, regarding its accuracy or the results to be obtained from the use of such information. No statement is intended or should be construed as a recommendation to infringe any existing patent.

**TAKE LESS WEIGHT.**

**Additional technical data of AIREX C70**

			C70.33	C70.40	C70.48	C70.55	C70.75	C70.90	C70.130	C70.160	C70.200	C70.250
Nominal density	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>	33	40	48	60	80	100	130	160	200	250
Tensile strength perp. to sheet (round samples)	ASTM C297	MPa	0.45	0.75	1.1	1.6	2.3	3.0	4.0	4.9	5.8	6.6
Tensile modulus perp. to sheet (round samples)	ASTM C297	MPa	55	67	78	95	123	150	195	240	300	380
Poisson's ratio	-	-	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Coefficient of linear thermal expansion	ASTM D696	1/K	4.50E-05	4.50E-05	4.50E-05	4.50E-05	4.50E-05	4.50E-05	4.50E-05	4.50E-05	4.50E-05	4.50E-05
Salt water absorption 28 d 40 °C	DNV / ISO 2896	kg/m <sup>2</sup>	0.18	0.16	0.15	0.13	0.06	0.04	0.03		0.025	0.02
Compressive strength after salt water abs.	ISO 844	%	92	92	93	93	95	96	97		97	98
Water absorption 7 d at 23°	DIN 53 428	kg/m <sup>2</sup>		0.07			0.045				0.015	
Moisture absorption 7 d at 23°/100%rh	DIN 53 428	kg/m <sup>2</sup>		0.006			0.005				0.004	
Water absorption 7 d at 70°	DIN 53 428	kg/m <sup>2</sup>		0.22			0.16				0.1	
Moisture absorption 7 d at 70°/100%rh	DIN 53 428	kg/m <sup>2</sup>		0.035			0.017				0.01	
Dielectric constant ε'	10 GHz	-										
Dissipation factor ε''	10 GHz	-										
Hydrostatic Yield Point	ASTM D 2736-78	bar		3.1	3.9	5.6	8.7	13	20		30	42
Maximum processing temperature for prepreg processing		°C	-	80	80	90	90	90	90	90	90	90
Thermoforming temperature		°C	115-130	115-130	115-130	115-130	115-130	115-130	120-135	120-135	120-135	120-135

*The information contained herein is to the best of our knowledge, believed to be correct and to correspond to the latest state of scientific and technical knowledge and experience. However, no warranty is made, either expressed or implied, regarding its accuracy or the results to be obtained from the use of such information.*

AIREX is a registered trademark of ALCAN composites

ATL composites Pty Ltd  
 Tel (+61) 7 5563 1222  
 Fax (+61) 7 5563 1585  
 info@atlcomposites.com  
 www.atlcomposites.com

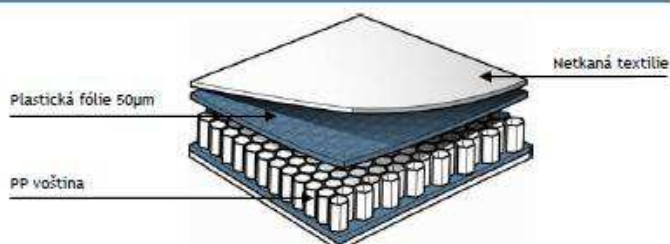
# PŘÍLOHA P IV: MATERIÁLOVÁ LIST PĚNY NIDAPLAST



TECHNICKÝ LIST



## NIDAPLAST® 8



POPIS VÝROBKU		
Rozměry	standardní: 1200 x 2500 mm	
Tloušťka	od 5 mm / do 90 mm *	
Rozměr buněk	8 mm	
Hustota PP voštiny	65 kg/m <sup>3</sup>	
Objemová hustota 20 mm tloušťky	80 kg/m <sup>3</sup>	
Potahy	Materiál	Tloušťka / Hmotnost
Plastická fólie	PP	50 µm
Netkaná textilie	Polyester	45 g/m <sup>2</sup>
Výrobní technologie	Ruční kladení, stříkání, lepení	

\* Tolerance - nominální tloušťka: ± 0,5 mm

MECHANICKÉ VLASTNOSTI		
Vlastnosti	Testovací metoda	Naměřené hodnoty
Pevnost v tlaku, 20°C	ISO 844	1,2 MPa
Modul pružnosti v tlaku, 20°C	ISO 844	30 MPa
Tahová pevnost v kolmém směru, 20°C	ASTM C297	0,5 MPa
Pevnost ve smyku, 20°C	ISO 1922	0,4 MPa
Modul pružnosti ve smyku, 20°C	ISO 1922	5 MPa
Odolnost vůči vodě, % zachování smykové pevnosti, 20°C	ASTM C393	~ 100 % **
Tepelný odpor voštinového jádra (tl. 20 mm)		R=0,3 m <sup>2</sup> ·°C/W (při λ ≈ 0,067 W/(m·°C))
Tepelný odpor voštinového jádra (tl. 90 mm)		R=0,6 m <sup>2</sup> ·°C/W (při λ ≈ 0,14 W/(m·°C))
Ohnivzdornost	Standardní kvalita nehořlavosti. Lze dosáhnout třídy M1/F0 u zhotovených sendvičových panelů. Záleží na složení vnějších vrstev.	
Chemická odolnost	Vynikající odolnost vůči vodě a většině kyselin, alkáliím a roztokům soli.	
Odolnost vůči U.V. záření	Odolnost vůči U.V. je zajištěna vnější vrstvou sendvičového panelu	

\* Uvedená data platí pro tloušťku 20 mm



SKOLIL KOMPOZIT spol. s r.o.  
 5. května 419, 551 02 Jaroměř – Josefov  
 Tel.: 491 813 888 • Mob.: 602 660 155 • e-mail: netolicky@skolilkompozit.cz

**PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI ZKOUŠCE OHYBEM**

	-20 °C		20 °C		60 °C	
	E [MPa]	$\sigma$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma$ [MPa]
AIREX T90.100_5mm_PET	6490	62,9	6890	67,8	5350	44,7
	6960	67	6270	61	5160	45,3
	6200	64,1	6120	61,2	4960	43,9
	6820	69,1	6510	67	4560	39,2
	6620	66,8	6540	65,9	5270	45,8
	5960	60,3	6300	66,7	5380	45
	6170	60,5	6450	63,7	5260	43,8
	6210	66,4	6560	68,5	5030	44,7
	6830	70	7000	71,1	5200	45,7
	6450	63,1	6710	69,3	5110	44,2
AIREX T90.100_5/5mm_PET	1860	25,5	1760	21,3	1490	17
	1910	24,1	1740	20,7	1480	16,1
	1940	22,9	1750	20,6	1400	15,6
	1900	23,5	1640	20,9	1450	15,1
	1900	23,9	1790	20,6	1480	15,7
	1910	23,7	1640	24,6	1470	16
	1920	23,6	1710	21,4	1460	15,4
	1510	28,4	1700	21,1	1480	15,9
	1900	22,7	1740	21	1460	15,5
	1880	22,5	1810	21,9	1490	16,9
AIREX T90.100_10mm_PET	2110	22,4	2020	22,2	1760	19,2
	2200	23	2000	21,1	1800	19,1
	2200	23,8	2160	22,5	1770	17,4
	2150	23,7	2140	21,1	1800	18,1
	2220	22,6	2130	21	1750	17,5
	2140	24,5	2170	22,9	1770	17,3
	2150	23,6	2200	23,2	1760	18,2
	2200	21,5	2260	22,8	1780	17,5
	2130	23,9	2190	20,9	1780	18,1
	2200	23,1	2170	22,7	1730	17,9

	-20 °C		20 °C		60 °C	
	E [MPa]	$\sigma$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma$ [MPa]
HEREX C70.55_5mm_PVC	6560	53,8	6150	49,4	4890	37,8
	6400	53,5	5830	48,5	4640	36,1
	6190	51,3	5950	48,9	4900	36,9
	6450	52,6	6030	50,9	4940	38,3
	6410	52,3	6050	49,8	4840	37,9
	6410	51,5	5940	48,9	4770	37,6
	6100	50,4	5950	48,6	4880	37
	6610	54	5960	48,9	4950	37,6
	6560	54,7	5950	50	5010	36,8
	6080	51,2	5900	49	5060	38,4
HEREX C70.55_5/5mm_PVC	2230	20,4	1930	18,6	1560	14,6
	2030	15,6	1940	17,7	1640	14,3
	2440	21,4	1950	18,3	1620	14,6
	2100	19,7	1910	18,4	1610	14,1
	2100	19,5	1950	17,3	1590	14,4
	2160	20,5	1950	18,4	1580	14,5
	2280	21,4	1930	18	1400	12,8
	2240	20,6	1980	19	1610	15
	1980	18,7	1960	18,2	1630	14,6
	2230	21,1	1860	18,3	1610	14,8
HEREX C70.55_10mm_PVC	2330	23,1	2060	21	1710	16
	2150	22,1	1990	21	1740	15,1
	1990	22,4	2030	21,7	1680	15,1
	2320	22,8	2070	20,4	1640	16,1
	2200	21,5	2060	20,3	1690	16,2
	2150	21,2	2120	20,6	1710	16
	2170	21,2	2100	20,6	1550	16,2
	2130	22,2	2050	21,2	1670	16
	2230	22,2	2070	20,3	1650	15,9
	2210	22,1	2070	20,8	1680	16,1

	-20 °C		20 °C		60 °C	
	E [MPa]	$\sigma$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma$ [MPa]
NIDAPLAST_5mm_PP	6000	54,3	4430	51,2	2790	23,8
	5750	69,7	4250	50,7	2500	24,4
	5470	50,5	4000	39,5	2330	23
	5800	66,4	3870	38,1	2320	23,7
	5790	64,6	4560	51,6	3220	35,6
	5750	52,3	4200	42,7	2890	32,8
	6400	51,9	4340	44,4	2390	22,8
	5900	62,4	4810	53,8	3110	33,6
	5510	62,1	4720	39,2	2430	25
	5800	63,5	4340	44,2	2420	23,3
NIDAPLAST_5/5mm_PP	2420	28,2	1470	24,1	827	10,6
	2410	28,2	1270	19,9	846	11,8
	2270	27,2	1370	19,5	773	9,88
	2340	28,9	1420	24,5	655	8,96
	2610	35,3	1400	24,9	846	12,3
	2500	27,6	1410	20,3	880	12,7
	2400	27,8	1390	20,5	873	11,5
	2500	30,2	1580	22,4	859	12,6
	2490	34,3	1420	24,1	844	10,8
	2090	19,4	1470	20,5	727	10
NIDAPLAST_10mm_PP	-	-	1390	16,5	671	9,5
	-	-	1410	15,2	478	7,2
	-	-	1580	16,5	690	9,2
	-	-	1400	15,2	566	7,9
	-	-	1410	16,9	480	7,2
	-	-	1280	14,6	543	7,3
	-	-	1150	16,0	690	9,4
	-	-	1280	15,0	664	8,7
	-	-	1100	15,1	493	7,6
	-	-	1410	15,1	569	8,1