

Vliv materiálového složení a tvaru na mechanické chování sendvičové konstrukce

Bc. Lukáš Pavelka

Diplomová práce
2015

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Pavelka**

Osobní číslo: **T13503**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv materiálového složení a tvaru na mechanické chování sendvičové konstrukce**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice sendvičových struktur:
2. – Základní definice sendvičových struktur, používané materiály, způsoby výroby, aplikace
3. – Technická teorie ohybu sendvičových materiálů
4. – Mechanické testy sendvičových materiálů
5. Experimentální část
6. – Návrh materiálových složení sendvičových konstrukcí
7. – Výroba zkušebních těles (panelů)
8. – Mechanické a rázové zkoušky připravených vzorků
9. Zhodnocení návrhu a naměřených dat, závěry

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **Davies, J.M.: Lightweight Sandwich Construction. London; Blackwell Science Publishing, 2001.**
2. **Vinson, J. R., The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials, CRC Press, 1999**
3. **Zenkert, D., Nordic Industrial Fund: The Handbook of Sandwich Construction. Worcestershire; EMAS Publishing, 1997.**
4. **Bitzer, T.N.: Honeycomb Technology, Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing. Dordrecht; Chapman & Hall, 1997.**
5. **Elektronické zdroje dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ladislav Fojtl

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

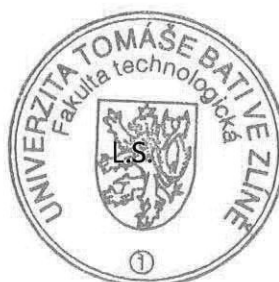
30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: Pavelka Lukáš

Obor: Výrobní inženýrství

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 13.5.2015

Pavelka

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 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 nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem materiálového složení a tvaru sendvičové konstrukce, kdy na základě právě tvaru ve formě zakřivení jsou posuzovány její vlastnosti a chování při mechanických zátěžových testech. Teoretická část zahrnuje popis používaných materiálů, věnuje se technické teorii ohybu, představuje technologii výroby a způsobů testování těchto sendvičových struktur. Praktická část práce popisuje použité materiály a zařízení, dále pak ukazuje podrobný postup výroby zakřivených panelů, následně je porovnává na základě změny mechanických vlastností v ohybu. Vhodnost, zda navržená struktura zakřiveného sendviče byla vyhovující, se vyhodnocovala pomocí ohybové zkoušky. Konkrétně jde o porovnání na základě výsledků z tříbodového a čtyřbodového ohybu. Další testy se zabývaly odolností materiálu proti průrazu, tedy rázovou zkouškou. Přesněji šlo o systém padajícího tlouku a dále následovala zkouška tahem naplocho, při které se zjišťovala tahová pevnost vrstvené struktury.

Klíčová slova: sendvičová struktura, prepreg, ohybová zkouška, systém padajícího tlouku, zkouška tahem naplocho.

ABSTRACT

This master thesis deals with design of material composition and shape of sandwich structure, where based on their shape in form of curvature are evaluated their properties during mechanical tests. The theoretical part includes description of used materials, describes technical theory of bending and introduces the technologies of production and testing methods of these structures. The practical part describes used materials and devices, further detailed production process of curved panels is showed, where subsequently due to the mechanical properties change are these panels compared. Appropriateness, whether designed structure of curved sandwich was convenient was assessed by the bending test. Specifically it concerned the comparison on the grounds of results of three-point and four-point bending test. Other tests dealt with resistance of the materials against penetration by impact test. In the other worlds, system of failing weight. Moreover, flatwise tensile test was conducted, where a tensile strength of layered structure was observed.

Keywords: sandwich structure, prepreg, bending test, drop weight tester, flatwise tensile test of sandwich construction.

PODĚKOVÁNÍ

Moc rád bych poděkoval svému vedoucímu, Ing. Ladislavu Fojtlovi za odborné vedení, ochotu a vstřícnost při výrobě vzorků, spolupráci při provádění všech měření a za cenné rady při realizaci této práce. Dále děkuji firmě Form, s.r.o. za výrobu zakřivených panelů a hlavně panu Ing. Rusnákovvi za cenné a praktické rady. Poděkování patří také mým rodičům za plnou a všestrannou podporu při studiu na vysoké škole.

Tato práce vznikla za finanční podpory interního grantu Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně s číslem IGA/FT/2015/001.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem citoval(a). V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden(a) jako spoluautor(ka).

Ve Zlíně 13.5.2015

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 PŘEDSTAVENÍ SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ.....	11
1.1 KONSTRUKCE SENDVIČOVÉ STRUKTURY	11
2 ČÁSTI A MATERIÁLY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR.....	14
2.1 VNĚJŠÍ VRSTVY (POTAHY).....	14
2.1.1 Prepregy	14
2.1.2 Kovové materiály potahů	22
2.2 TYPY JADER SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	23
2.2.1 Pěnová jádra	23
2.2.2 Voštinová jádra	28
2.2.3 Dřevěná jádra	31
2.2.4 Adhezní vrstvy (lepidla).....	31
3 TECHNOLOGIE VÝROBY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	33
3.1 VAKUOVÉ VYTVRZOVÁNÍ (VACUUM BAGGING).....	33
3.2 LISOVÁNÍ	35
3.3 VSTŘIKOVÁNÍ PĚNY (FOAM INJECTION MOULDING - FIM)	35
3.4 TECHNOLOGIE VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU A VYSOKOTEPLTNÍ PECI	36
4 TECHNICKÁ TEORIE OHYBU SENDVIČOVÝCH STRUKTUR.....	39
4.1 ZAKŘIVENÉ SENDVIČOVÉ PRUTY V OHYBU.....	42
4.1.1 Napětí a deformace	43
4.1.2 Ruční výpočet zakřivených sendvičových prutů.....	43
4.1.3 Pevnost zakřivených sendvičových prutů v ohybu	44
5 MECHANICKÉ TESTY SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ.....	45
5.1 ZKOUŠKA OHYBEM.....	45
5.1.1 Zkouška tříbodovým ohybem	46
5.1.2 Zkouška čtyřbodovým ohybem.....	47
5.2 RÁZOVÁ ZKOUŠKA – SYSTÉM PADAJÍCÍHO TLOUKU	48
5.3 TESTY ADHEZNÍCH VLASTNOSTÍ – PEEL TESTS.....	49
5.3.1 Zkouška odlupu vrstev pomocí navíjecího bubnu	50
5.3.2 Zkouška SBC a DCB odlupem	50
5.4 ZKOUŠKA TAHEM NAPLOCHO (FLATWISE TENSILE TEST).....	51
6 DALŠÍ APLIKACE SENDVIČOVÝCH MATEIÁLŮ.....	53
II PRAKTICKÁ ČÁST	55
7 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	56
8 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ.....	57
8.1 UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ STROJ ZWIC 1456	57
8.2 PADOSTROJ ZWICK ROELL HIT 230F	58
9 NAVRŽENÉ A POUŽITÉ MATERIÁLY.....	59
9.1 POTAHOVÉ VRSTVY NAVRŽENÝCH SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	59
9.1.1 Prepreg Gurit PHG 840-300-42	59

9.2	JÁDRO	60
9.2.1	Termoplastická polymerní pěna AIREX T90.100	60
9.3	VÝROBA A ZPRACOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO TESTOVÁNÍ	61
10	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ OHYBOVÝCH ZKOUŠEK	65
10.1	ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM	66
10.1.1	Přímé sendvičové panely zatížené tříbodovým ohybem.....	66
10.1.2	Zakřivené sendvičové panely zatížené tříbodovým ohybem	69
10.2	ZKOUŠKA ČTYŘBODOVÝM OHYBEM	74
10.2.1	Přímé sendvičové panely zatížené čtyřbodovým ohybem	75
10.2.2	Zakřivené sendvičové panely zatížené čtyřbodovým ohybem.....	78
11	DISKUZE VÝSLEDKŮ Z OHYBOVÝCH ZKOUŠEK.....	83
11.1	ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM	83
11.1.1	Modul pružnosti v tříbodovém ohybu.....	83
11.1.2	Mez pevnosti ve tříbodovém ohybu	85
11.2	ZKOUŠKA ČTYŘBODOVÝM OHYBEM	88
11.2.1	Modul pružnosti ve čtyřbodovém ohybu	88
11.2.2	Mez pevnosti ve čtyřbodovém ohybu	90
12	ZKOUŠKA TAHEM NAPLOCHO.....	93
13	RÁZOVÁ ZKOUŠKA – SYSTÉM PADAJÍCÍHO TLOUKU.....	95
	ZÁVĚR	97
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	98
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	103
	SEZNAM OBRÁZKŮ	106
	SEZNAM TABULEK.....	109
	SEZNAM PŘÍLOH.....	110

ÚVOD

Všechna odvětví průmyslu zabývající se zpracováním polymerů, stále nabývají v současné době vysokých vývojových rozměrů. Polymery vyvinuté v první polovině 20. století umožnily rozvoj plastikářského průmyslu, gumárenství, výroby syntetických vláken, obalů, fólií, krytů, nátěrových materiálů a dalších. Jinak tomu není ani v oblasti, která je zaměřena na technologii, zpracování či výrobu kompozitních materiálů, zkráceně kompozitů. Těchto materiálů je v současné době celá řada a jednou z nich jsou sendvičové struktury, kterými se zabývá tato diplomová práce.

V současné době se sendvičové struktury v technické praxi ve velké míře používají jako vnější opláštění (kabiny, karoserie), nebo interiérové části. Své místo uplatnění našly v dopravní technice, letectví, u vesmírných lodí, satelitů, F1 či VRC automobilů, sportovního vybavení apod. Sendvičové struktury by měly být co nejlehčí a zároveň mít vysokou tuhost, pevnost, dostatečnou sílu a odpovídající tolerance. To vyžaduje strukturálně efektivní konstrukce. Strukturální efektivita může být maximalizována použitím nejefektivnějších materiálů a zajištění optimální geometrie. Všechny tyto faktory musí být zváženy při navrhování sendvičových komponent. V neposlední řadě je nutné podotknout, že tento materiál zaujímá vysokou míru důležitosti, protože dokáže ve velké míře nahradit kovové slitiny.

V České republice je spousta firem zabývajících se sendvičovými konstrukcemi a jejich projekty se mohou pyšnit světovou úspěšností. Existují reálné projekty, kde sendviče umožnily dosáhnout až čtyřikrát delší únavovou životnost při nižší hmotnosti než stávající kovové materiály. Tyto projekty byly vytvořeny právě v českých firmách a jsou podporovány a financovány Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky.

Široké spektrum použití a další vize do budoucího rozvoje této oblasti, je jeden z hlavních důvodů, proč jsem si zvolil téma diplomové práce tohoto okruhu. Cílem práce je navrhnout vhodné materiálové složení sendvičové konstrukce zakřivených desek a určit vliv velikosti tohoto zakřivení na jejich chování, konkrétně při mechanických zátěžových testech.

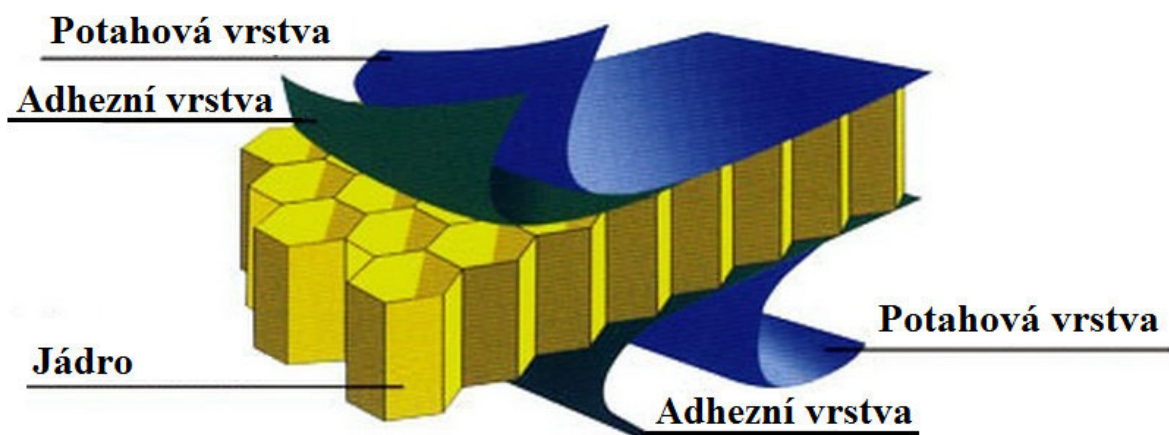
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PŘEDSTAVENÍ SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ

Sendvičové materiály jsou progresivní vrstevnaté konstrukce, které se vyznačují vysokou ohybovou pevností a tuhostí při nízké hmotnosti, ale mají i mnoho dalších výhod. Při jasně definovaných podmínkách použití je vhodně zvolena kombinace jednotlivých vrstev materiálů, ze kterých je sendvičová konstrukce složena a tím se spojí všechny její vlastnosti v jeden celek. Každá komponenta jako samotná je tedy relativně nepevná a flexibilní, ale když pracuje dohromady s ostatními vrstvami sendvičové struktury, poskytuje extrémní tuhost pevnost při malé tloušťce stěny a nízkou hmotnost, což je základní koncepcí těchto materiálů. Při navrhování sendvičových struktur je bráno v úvahu, že tyto materiály mohou být anizotropní, některá jádra mohou mít nízký smykový modul, a proto musí být smykové deformace kontrolovány. [1]

1.1 Konstrukce sendvičové struktury

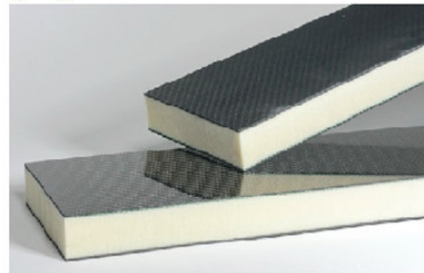
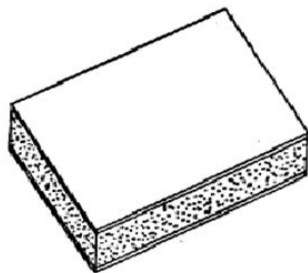
Sendvičová konstrukce může obsahovat různé kombinace materiálů. Nejčastěji se skládá z dvojice tenkých vnějších vrstev, jádra k odseparování dvojíce vrstev a k přenášení zatížení. Posledním členem struktury bývá adhezní doplňující vrstva, která spojuje jádro a vnější vrstvy v jeden celek. Je schopná přenášet smyková a axiální zatížení, zvyšuje nepatrně hmotnost a tím i moment setrvačnosti, ale zlepšuje efektivitu konstrukce, odolnost proti zatížení krutem, nebo ohybem. V případě použití prepregů adhezní vrstva odpadá. Je nahrazena pryskyřicí, kterou jsou prepreg materiály před-impregnovány. [4]



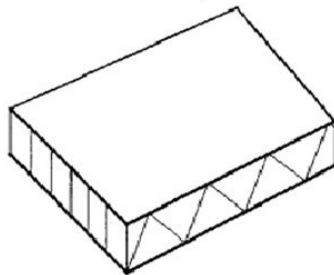
Obr. 1. Sendvičová struktura [5]

Je mnoho rozdílných typů sendvičových struktur, které mohou být vytvořeny kombinací různých potahů a jader. Vnější vrstvy (potahy) mohou být například hliníkové, dřevěné, nebo vláknové. Stejně tak jádro může být z mnoha materiálů, a to z korku, balzového dřeva, gumy, pevných plastových materiálů (polyetylen), pevných pěnových materiálů (polyuretan, polystyren), minerálních desek v kombinaci s vatou, voštinových kovových nebo papírových desek. Obr. 5. ukazuje příklady sendvičových struktur. [4]

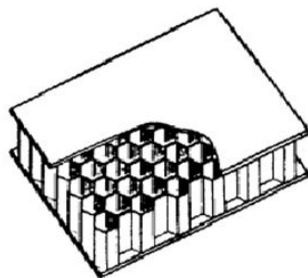
1) Sendvič s pěnovým jádrem



2) Sendvič z jádrem z minerální vaty





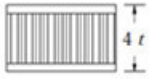
3) Sendvič z voštinovým jádrem



Obr. 2. Příklady konstrukcí sendvičových struktur [3],[5]

Tab. 1 ilustrativně ukazuje výhodu tuhosti a pevnosti sendvičových panelů v porovnání s panely z jednoho materiálu. Jak již bylo řečeno, použití dvojice vnějších tenkých pevných vrstev, mezi kterými je jádrový materiál, vznikne sendvičový panel. Tento sendvič má jen nepatrně vyšší hmotnost (103%), ale několikanásobně vyšší pevnost a tuhost. Při zdvojnásobení tloušťky jádra je výsledek ještě výraznější. [1],[4]

Tab. 1. Příklad strukturální efektivity sendvičových panelů. Vliv tloušťky jádra na vlastnosti sendviče.[1]

	Laminát	Sendvičová konstrukce	
			
Relativní tuhost	1	7.0	37
Relativní pevnost	1	3.5	9.2
Relativní hmotnost	1	1.03	1.06

Jako jádro sendvičové struktury se může použít celá řada materiálů, o kterých se pojednává v další kapitole. Možnosti různých kombinací materiálů umožňuje optimální návrh sendvičové konstrukce pro danou aplikaci. Těmito kombinacemi materiálů se spojují pozitivní vlastnosti všech použitých materiálů v jeden celek a negativní vlastnosti jsou naopak eliminovány. Například tepelné izolační vlastnosti plastových pěn, nebo minerálních vat mohou být použity jen tehdy, pokud jsou ochráněny proti vlhkosti a vodě. Naopak pevnost a tuhost tenkostěnného kovového opláštění jsou zase nejvíce efektivní na základě přítomnosti jádrového materiálu. Spojením materiálů se tedy vytvoří efektivní struktura.[1]

2 ČÁSTI A MATERIÁLY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Jak již bylo řečeno, sendvičové panely se používají jako náhrada za běžně užívané materiály. Z toho vyplývá, že jejich konstrukce musí zajišťovat efektivnější řešení pro různé kombinace požadavků, včetně mechanických vlastností, stavební fyziky, estetických vlastností a ekonomiky. Sendvičové panely jsou schopny velmi dobře plnit tyto požadavky, ale výrobci vždy musí mít na paměti řadu protichůdných vlivů. [3]

2.1 Vnější vrstvy (potahy)

Vnější vrstvy jsou tenčí než jádro, ale mnohokrát pevnější a tužší. Je to důležitá část sendvičové struktury, která plní mnoho funkcí. Záleží na aplikaci, pro kterou má být použita, ale ve všech případech přenáší hlavní zatížení, kterému bývá celá struktura vystavována. Tedy tuhost, stabilita, uspořádání a do značné míry pevnost, jsou hlavní charakteristiky potahů. Tyto vrstvy jsou vystavovány účinkům vnějšího prostředí a jsou na ně kladeny další požadavky jako například hladkost povrchu, otěruvzdornost, odolnost proti únavě, vysokým teplotám, chemikáliím, schopnost absorbovat energii od nárazu, korozivzdornost, nehořlavost, tepelnou vodivost, odolnost proti vlhkosti a v neposlední řadě také nízká cena a líbivý vzhled. [1],[3]

V následující části jsou vyjmenovány a popsány nejběžnější používané materiály potahů.

2.1.1 Prepregy

Prepregy jsou pryskyřicí před-impregnované vrstvené materiály tvořené výztužnými vlákny, nebo tkaninou. Před-impregnování znamená, že pryskyřice, která prosycuje vlákna, ještě nebyla vytvrzena do konečného stavu, což důležitý krok vpřed na rozdíl od jiných technik výroby kompozitů. Z toho tedy vyplývá, že vrstvení a skladba prepregů do požadovaných profilů probíhá až v poslední fázi výroby komponenty. Prepreg je nutno skladovat v chladu (-20°C), aby se zabránilo úplnému vytvrzení. Před-impregnacím tedy odpadá složitý proces prosycování výztuže pojivem. Finální vytvrzení kompozitních konstrukcí složených z prepregů může probíhat například v autoklávu, nebo ve vytvrzovací peci za pomoci vakua. [7],[19]

Orientace vláken v prepregu může být jednosměrné (Undirectional-UD), nebo vícesměrné – tkané (Woven). Typ uspořádání vláken je důležitý z hlediska schopnosti materiálu přená-

šet napětí v různých směrech. Druh vláken také do značné míry určuje sílu, modul pružnosti a další důležité vlastnosti kompozitů. [7],[19]

Prepregy nabízí maximální výkon materiálu zejména pro složité součásti a širokou škálu použití. Jsou vhodné pro kusovou, ale hlavně sériovou výrobu. Vyznačují se efektivní produkcí komponenty, maximální mechanickou odolností, nízkou hmotností a stálostí mechanických vlastností po celé ploše. Díky tomu je upřednostňován jako hlavní materiál pro pevnostní kompozitní konstrukce. [8]

Nevýhodou je pomalý, náročný proces výroby a cena vytvrzovacího zařízení. Dále také celková vyšší cena oproti běžným materiálům, ke kterým musí být dodávána pryskyřice. [7]

V technické praxi se můžeme setkat s celou řadou firem, jejich materiálové katalogy nabízí různé druhy prepregů. Ty rozdělují do skupin podle typu geometrie a druhu materiálu výztuže. Dále dle druhu použité matrice. Důležitá je také technologie způsobu výroby prepreg materiálů. [8]

❖ Výztuže (Tkaniny)

Podle typu geometrie se výztuže prepregů dělí na: [6]

- Jednosměrné prepregy:

Tato výztuž je vyrobena ze svazku nekonečných vláken bez zákrutu, nebo s minimálním zákrutem. Mohou být ve formě rovingů. Vyrábí se kladením vrstev, navíjením pásů, nebo pultruzí. Používají se většinou na velkoplošné dílce. Určeny jsou pro mechanicky namáhané dílce. Dodávány jsou na cívkách s vnitřním, nebo vnějším odtahem.

- Vícevrstvé prepregy:

Vznikají ukládáním jednosměrně orientovaných vrstev, které jsou vůči sobě pootočený o určitý úhel a spojeny prošitím polyesterovou nití.

- Kombinovaně orientované prepregy:

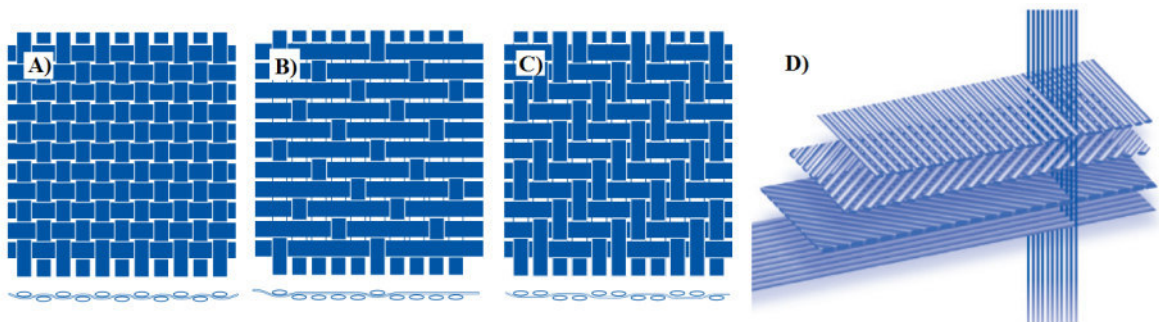
Únosnější vrstvy s tkanou výztuží se dávají na mechanicky více namáhanou stranu výrobku (při namáhání v ohybu na taženou stranu). Vrstvy s rohoží na stranu vystavenou koroznímu prostředí. Mívají větší podíl pryskyřice.

- Prepreg s prostorově vázanou výztuží:

U těchto prepregů jsou vlákna pletená, nebo tkaná.

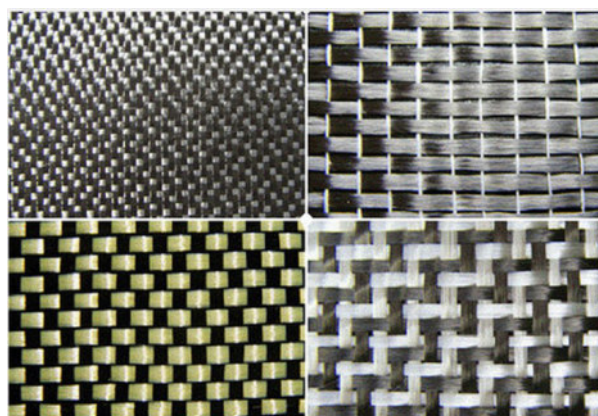
Tkaniny se vždy skládají nejméně ze dvou pramenů (rovingů), které jsou společně tkány dohromady a tvoří osnovy těchto tkanin. Tkaniny mohou být spleteny do několika vazeb.

Nejpevnější je vazba plátnová (Obr. 3A), ale zároveň je nejméně poddajná při tvarování. Kombinací dobré pevnosti, snadného tvarování a ohebnosti je vazba keprová (Obr.3B), avšak pouze při měkké povrchové úpravě vláken. Za nejméně pevnou textilní vazbu je považována vazba atlasová (Obr. 3C), která ale umožňuje vysoký objemový podíl vláken ve vrstvě kompozitu a zaručuje jejich minimální zvlnění. Kromě tkanin se používají také pleteniny (Obr. 3D). Těmito technologiemi je možno dosáhnout prostorových vazeb. [6],[7]



Obr. 3. Vazby tkanin; A) Plátno; B) Kerp; C) Atlas; D) Pletenina; [7]

Další skupinu tvoří tzv. *hybridní tkaniny* (Obr. 4). Ty vznikají kombinací spletením více druhů vláken. Důvodem používání těchto tkanin je cena. Drahé tkaniny jako aramidové, nebo uhlíkové lze ve směru, působení menšího zatížení nahradit vlákny levnějšími (například skelnými). Zkombinují-li se skleněná vlákna s termoplastickými vlákny, vznikne směsná tkanina, která je vlastně prepregem, obsahujícím termoplastickou matici v podobě vláken. [6]



Obr. 4. Hybridní vlákna [10]

Další rozdělení kompozitních materiálů je dle materiálu výztuže. Nejčastěji jsou jako výztuž použita vlákna:

- Skleněná vlákna

Textilní skelná vlákna (GF – Glass Fiber) je společný název pro tenká vlákna o ϕ 3,5 až 24 μm . Vyrábějí se tažením z trysek z roztavené skloviny ve sklářské peci. Roztavená sklovina pomalu vytéká z trysek a rychle tuhne do tvaru vláken. Počet trysek se pohybuje mezi 200 až 4000. Tyto vlákna se ještě kalibrují na daný průměr a prodlužuje se jejich délka (až na 40000násobnou délku) pomocí rotujícího navíjecího zařízení. Sdružením všech těchto téměř neviditelných elementárních vláken vzniká ohebné spřádací vlákno. [2],[19]

Nejčastěji používanou sklovinou pro výrobu skleněných vláken je tzv. E-sklovina. Skleněná vlákna (E-vlákna elektrická) jsou vynikajícím izolantem s vysokou prostupností pro záření. Dále se vyrábí tzv. C-skloviny s vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám. Další skupinou jsou AR-vlákna, která jsou odlišná od E-vláken, mají vysokou odolnost proti alkáliím a používají se jako výztuž betonu. [2]

Tab. 2. Vlastnosti skelných vláken dle druhu skloviny [2]

Sklovina	E	C	AR
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,6	2,52	2,68
Mez pevnosti v tahu [MPa]	3400	2400	3000
Modul pružnosti [MPa]	73000	70000	73000
Poměrné prodloužení při přetržení [%]	<4,8	<4,8	<4,4
Součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]	$5\cdot 10^{-6}$	$6,3\cdot 10^{-6}$	$6,5\cdot 10^{-6}$
Teplota měknutí [$^{\circ}\text{C}$]	850	750	770

Skelná vlákna mají amorfní strukturu a jsou izotropní (materiálové vlastnosti jsou v podélném i příčném směru totožné). Mohou se dodávat ve formě přízí, skaných přízí, pramenců, rohoží, krátkých vláken apod. [2]

- Aramidová vlákna

AF – Aramid fiber jsou vlákna na bázi lineárně organických polymerů. Hlavní výhodou je vysoká pevnost (kolem 200 000 MPa) a tuhost. Vlastnosti vláken tohoto druhu jsou těžko nahraditelné a jediná komerčně dostupná vlákna blízcí se svými vlastnostmi hodnotám aramidových, jsou vlákna na bázi aromatických polyamidů, která dosahují hodnot pevnosti v tahu 3600 MPa a E-modulu 125 000 MPa při průměru vlákna 12 μm . Aramidová vlákna jsou zpracovatelná se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. Hlavními oblastmi použití jsou náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, výztuž pro pneumatiky, balistické aplikace. Běžně se prodávají ve formě pramenců, přízí, tkanin a povrchových rohoží. [2],[19]

Tab. 3. Mechanické vlastnosti aramidových vláken [2]

Aramid	Hustota [g.cm ⁻³]	Průměr [μm]	E-modul v tahu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Tažnost [%]
Vysokotažný	1,45	12	80000	3600	4,0
S vysokou tuhostí	1,45	12	131000	3800	2,8
Ultratuhy	1,45	12	186000	3400	2,0

Vlákná mají řadu vynikajících vlastností, avšak také některé nevýhody. Je to nejlehčí vlákno, z čehož plyne vysoká měrná pevnost v tahu. Je silně anizotropní, tj. jeho vlastnosti měřené ve směru vlákna se liší od vlastností měřených v příčném směru. Například mez pevnosti v tahu je ve směru vláken výrazně vyšší než mez pevnosti v tlaku. Jsou citlivá na působení vody, což nepříznivě ovlivňuje přilnavost vláken s pryskyřicí. [2],[19]

- Uhlíková vlákna

(CF – Carbon Fiber) jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou tři materiály: celulóza, polyakrylonitril, smola. Vlákna mají mimořádně vysokou korozní odolnost, dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Snášejí se s tělesnými tkáněmi, tudíž je můžeme použít jako implantáty (umělé kyčelní klouby). Uhlíková vlákna mají vysokou odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání. Dynamické vlastnosti laminátu s uhlíkovými vlákny jsou lepší než u všech ostatních materiálů (např. hliníku, oceli). [2],[19]

- ❖ **Matrice prepregu**

Bývají ve formě různých pryskyřic. Systém vláken, nebo partikulární komponenty jsou vždy prosyceny touto pryskyřicí a tím po vytvrzení vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje jako kompozit. V případě před-impregnování, kdy pryskyřice ještě není zcela vytvrzená, se jedná o prepreg. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken apod. [2],[15]

U polymerních kompozitů je nejpoužívanější termosetová (reaktoplastická) a termoplastická matrice. V případě prepregů se používají pryskyřice v tekutém stavu, nebo ve formě prášků. Při porovnání, termosetová pryskyřice má nízkou viskozitu, je v tekutém stavu při normální teplotě, snadněji se zpracovává, smáčí, lépe prosycuje vlákna a má nízkou cenu. Naopak termoplastická pryskyřice potřebuje ke zpracování mnohem vyšších teplot, je houževnatá, má neomezenou dobu skladování, její viskozita je až tisícinásobná, výrobní cyklus

je rychlejší a prosycování vláken probíhá v kapalném stavu. Termoplastové pryskyřice jsou zpracovávány vstříkáním, lisováním, vytlačováním.[2],[15]

Dělení pryskyřic:

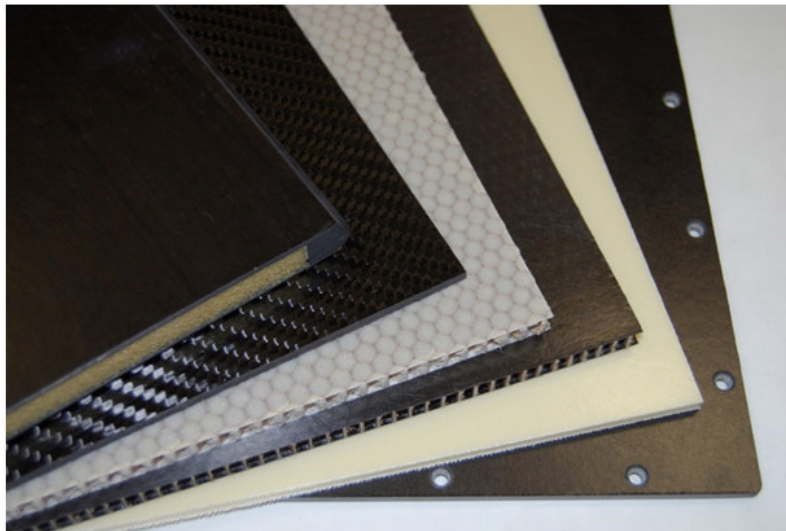
- Termosetová pryskyřice: polyesterová, epoxidová, polyamidová, fenolická
- Termoplastická pryskyřice: polyethylenová, polyamidová, polypropylenová

Pro prepregy jsou nejvíce používané pryskyřice: [7]

○Epoxidová: má excelentní mechanické vlastnosti. Je šetrná vůči životnímu prostředí, lehce zpracovatelná a má vysokou houževnatost. Používá se ve všech odvětvích průmyslu.

○Fenolická: výborná odolnost proti vysokým teplotám. Použití v interiérových komponentech letadel, lodí, vlaků.

○Polyamidová: vynikající odolnost proti vysokým teplotám, provozní teplota až do 260 °C, dobré mechanické vlastnosti a dobrá odolnost proti chemickým látkám. Použití v leteckém průmyslu a u komponent často vystaveným vysokým teplotám.



Obr. 5. Ukázka sendvičových struktur s kompozitními a prepreg potahy [16]

❖ Výroba prepregů

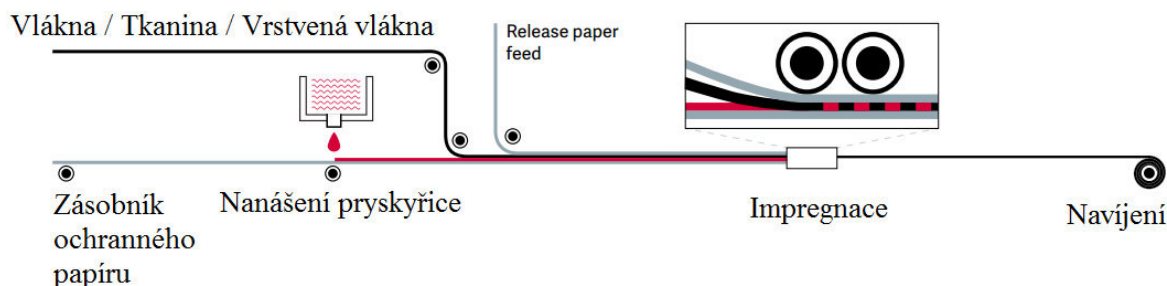
Příprava před-impregnovaných materiálů je technologicky i konstrukčně náročný proces. Vlákná i tkaniny musí vždy dosáhnout požadovaných orientací a zároveň prosycení pryskyřicí, nebo být správně proložena termoplastem. Při výrobě tkaninových prepregů je preferováno více způsobů a výroba je vícefázová.

- Impregnace prepregu

U termoplastických prepregů lze spojení kontinuálních vláken s termoplastem provést několika metodami: [6]

- Pramence vláken jsou impregnovány v hubici vytlačovacího extrudéru
- Impregnační polotovarů v roztoku polymeru
- Nanesení částic kapalné suspenze polymeru na výztuž
- Impregnace jednotlivých vláken suchým práškem polymeru. (Prášek je ve fluidním loži nanesen na vlákno a upoután elektrostatickými silami. Poté je prášek slinut, takže termoplast pokryje povrch vlákna)

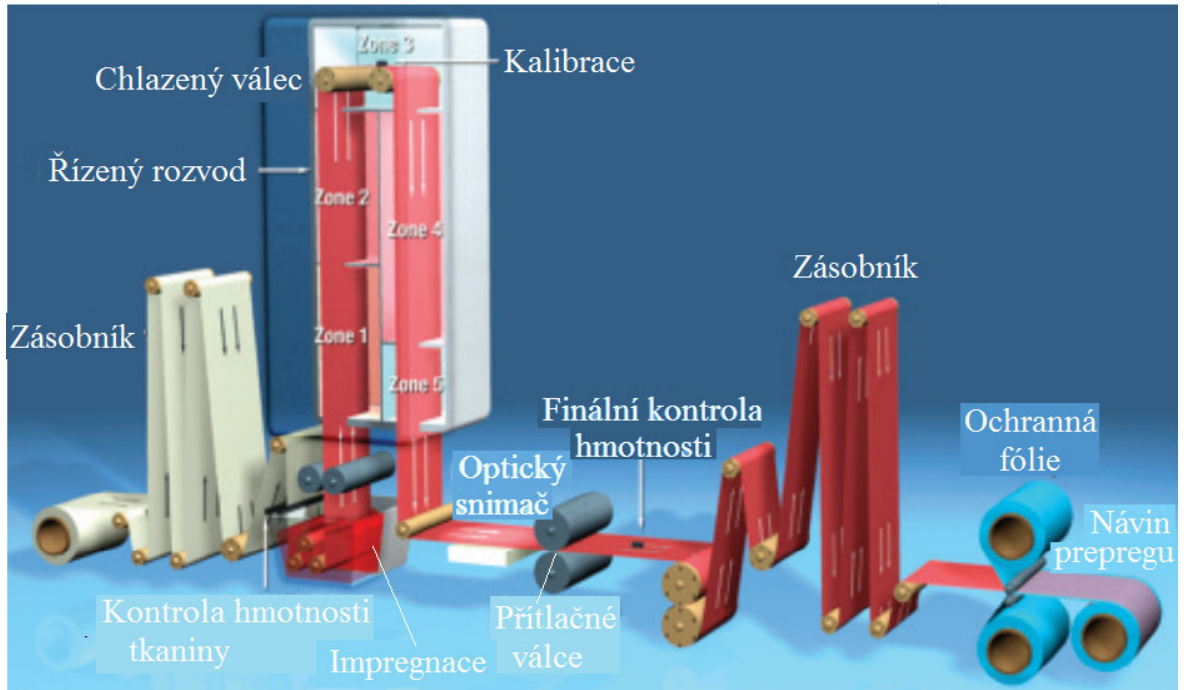
U reaktoplastických prepregů je preferován výše uvedený mokrá způsob, kdy tkanina je namáčena do roztoku pryskyřice. Ve většině prepregů je obsah pryskyřice vyšší, než je vyžadován. Nadbytečná pryskyřice v prepregu pomáhá odstranit případný vzduch, nebo těkavé látky, které mohou být obsaženy při výrobě finálního výrobku. [6]



Obr. 6. Schéma výrobního procesu prepregu [11]

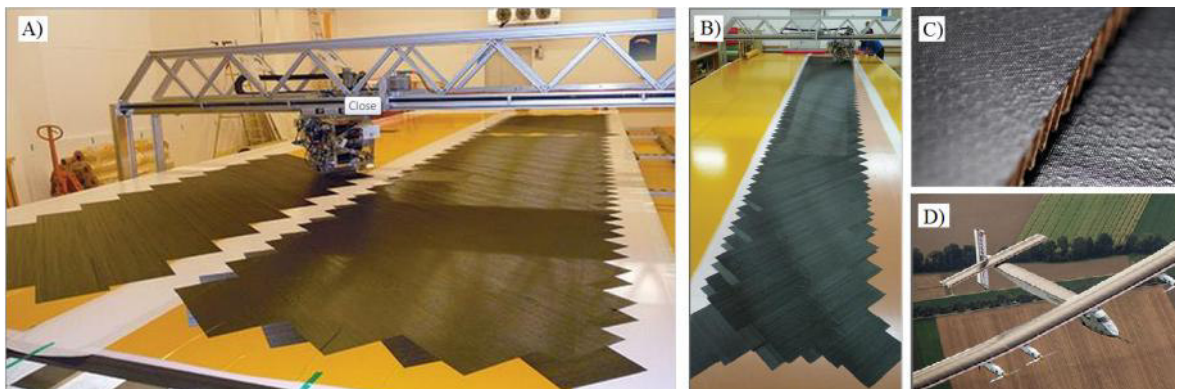
- Oboustranně impregnovaný prepreg

Při výrobě oboustranně vyztuženého prepregu (Obr. 7) se odvíjí pramence vláken z cívek. Vedou se rovnoměrně přes válce do láně s pryskyřicí, kde jsou impregnovány. Následně je pás veden přes vytápěné válce, kde pod tlakem dochází k prosycení výztuže pojivem. Prepreg prosycený pryskyřicí následně prochází přes chlazený válec, který zastaví vytvrzovací reakce. V dalších fázích je prepreg potažen ochrannou fólií a mohou být také ořezány jeho okraje. Takto vyrobené prepregy mají všechna vlákna uložena rovnoměrně a nazývají se jednosměrné prepregy, které byly zmíněny výše. [7]



Obr. 7. Výroba jednovrstvého prepregu [7]

Příklad výroby vrstveného prepregu je na Obr. 8. Jedná se o výrobu prepregové vnější vrstvy pro sendvičovou konstrukci křídel letadla s voštinovým jádrem. Speciální automatizovaný systém řízený počítačem (obr. 8A) postupně nanáší jednotlivé vrstvy prepregů. Role prepregového materiálu je umístěna ve vrstvicí hlavě stroje. Po navrstvení je celá výztuž položena na voštinové jádro a přesunuta do pece. Zde je za působení teploty a tlaku vytvořena přesná sendvičová konstrukce (obr. 8C). Ukázka, jak křídla letounu vypadají je vyobrazen na obr. 8D. [9]



Obr. 8. Výroba vrstveného prepregu pro aplikaci křídla letounu [9]

❖ Využití prepregu

V současné době je využití prepregů široce rozsáhlé zejména u velkoplošných výrobků. Adekvátní pevnost, nízká hmotnost, odolnost vůči okolnímu prostředí, estetický design jsou jedny z nejpodstatnějších faktorů, které jsou od prepregů vyžadovány. V technické praxi se s nimi denně můžeme setkat u kolejových vozidel, letadel, lodí, v energetice a také v interiérech domácností. [8]

2.1.2 Kovové materiály potahů

Kovové materiály vždy čelí problému slabé přilnavosti k jádru. V zájmu zajištění adekvátní přilnavosti jádra ke kovovým vrstvám se musí jejich povrch upravit. Například mechanickými úpravami – přebroušením, chemickými procesy, tepelnými procesy apod.

❖ Ocelové slitiny

Tenké ocelové plechy jsou běžně používané jako potahové vrstvy sendvičů. Na povrch těchto plechů se musí před použitím nanést tenká ochranná vrstva proti korozi, nebo se použije nerezová ocel. Nejčastější ochranou proti korozi je zinek, avšak na úkor jeho neestetického vzhledu. Všechny druhy ochranných povlaků jsou vyráběny za kontrolovaných podmínek na linkách. Slitiny mohou být vyrobeny s různou tvrdostí a poskytovat vysokou pevnost. Plechy vyrobeny válcováním mají vyšší mez kluzu v podélném směru, než v příčném směru, a proto je důležitá orientace plechu při výrobě sendviče. [3],[12]

❖ Slitiny hliníku

Sendvičové panely vyrobené s použitím hliníkových plechů jsou používány pro aplikace, kde je vyžadována vysoká odolnost proti korozi, nebo také v oblastech se zvýšenou mírou hygieny. Například ve skladech s potravinami. Tloušťka hliníkových vrstev bývá 0,7-1,2 mm. Vyznačují se taky svou pevností a nízkou hmotností. Pevnost v tahu mohou mít 200 – 250 MPa. Hustota a modul pružnosti je zhruba o jednu třetinu nižší, než u ocelí. Naopak koeficient tepelné roztažnosti je až dvakrát vyšší. [3],[12]

❖ Slitiny titanu

Titanové slitiny jako potahy sendvičů se používají z důvodu výjimečných vlastností a to poměru pevnosti a váhy. [12]

❖ Hořčíkové slitiny

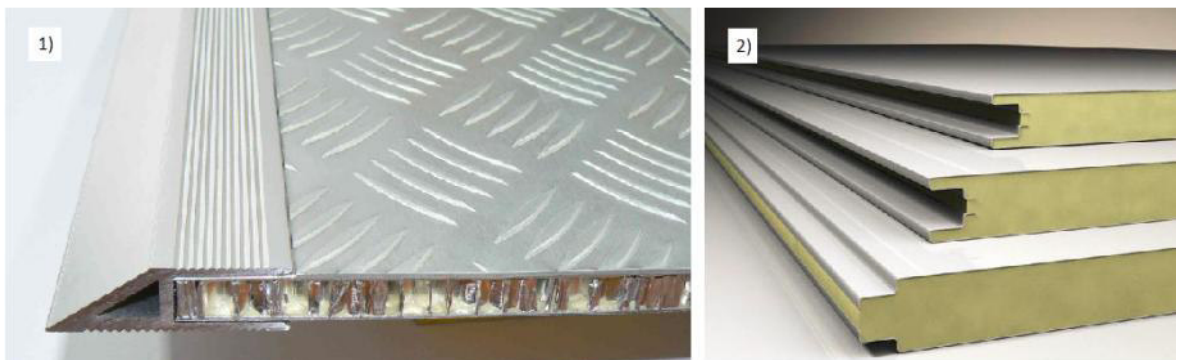
Použití těchto slitin jako vnějších vrstev je zatím pouze experimentální. Jejich největší výhodou je nízká hustota. [12]

❖ Slitiny na bázi niklu

Tyto materiály mohou být využity u sendvičových struktur, které jsou odolné proti vysokým teplotám, a to 600 až 800 °C. [12]

❖ Beryllium

Nízká hmotnost a vysoký modul pružnosti jsou hlavními přednostmi použití tohoto materiálu u sendvičových konstrukcí. Je také odolný proti vysokým teplotám. Díly mohou být spojeny svařováním, nebo pájením. Nevýhodou je, že beryllium obsahuje toxické částice, které jsou zdravotně závadné. [12]



Obr. 9. Příklady použití kovových potahů [13],[14]

(1 – hliníková sendvičová voštinová konstrukce plošiny pro vozíčkáře v autobusu;
2 – ocelový potah sendvičového stavebního materiálu)

2.2 Typy jader sendvičových struktur

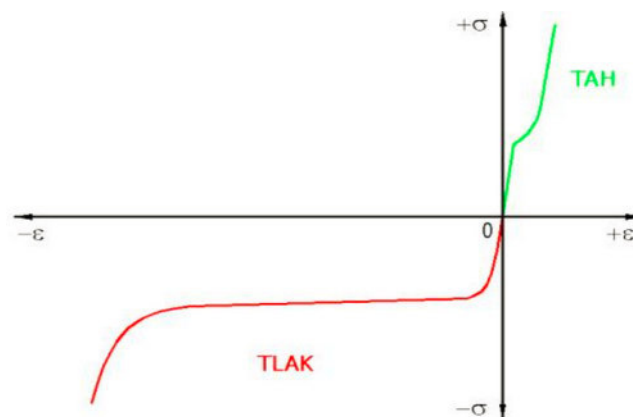
Jádra sendvičových struktur se vždy navrhují tak, aby bylo dosaženo co nejnižší hmotnosti a zároveň vysoké tuhosti celého sendviče. Hlavní požadavky kladené na materiál jádra sendviče je nízká hustota, vysoká smyková pevnost a tuhost, dobrá pevnost v tlaku a vysokým teplotám, absorbování vody, izolační a tlumící schopnosti apod. Sendvičová jádra mohou být pěny, voštiny, dřevo, balza a jiné.[3],[17]

2.2.1 Pěnová jádra

Pěny jsou nejpoužívanější jádrové materiály pro výrobu sendvičových struktur. Je to dvoufázový buněčný materiál, kde první fázi tvoří polymer a druhou plyn rozptýlený po celé látce. Buňky pěny mohou být otevřené a vzájemně propojené, nebo uzavřené a samostatné. Typ buněk určuje do značné míry vlastnosti pěny. Pěny s otevřenými buňkami mají dobrou absorpci zvuku, ale nižší pevnost než pěny s vysokou hustotou uzavřených buněk. Otevřené buňky také absorbují více vody. Absorbování vody je u sendvičových pěnových jader

nežádoucí. Ačkoliv nejsou mechanické vlastnosti pěn tak dobré, jako třeba u voštinových materiálů, i přes to se používají téměř ve všech novodobých konstrukcích vlaků, vozidel, letadel, nebo lodí. [18]

Pěny mají vynikající poměr tlakové pevnosti vzhledem k hmotnosti. Rozdíl poměru pevnosti v tahu a tlaku zobrazuje Obr. 10. Deformace v tlaku výrazně narůstají při minimální změně napětí, čímž se zvyšuje schopnost pěn absorbovat energii, tedy dobře tlumit rázy a kmitání. Tato oblast je v tahu málo výrazná. [20]



Obr. 10. Pracovní diagram pěn: tah – tlak [20]

Sendvičové struktury mohou mít jádra z pěny termoplastické, nebo pěny termosetové. Termoplastické pěny jsou lépe zpracovatelné při výrobě. Termosetové pěny vykazují lepší mechanické vlastnosti a vyšší odolnost vůči vysokým teplotám. Hustota pěnových jader se pohybuje v rozmezí 32 – 640 kg/m³. V závislosti na chemickém složení se odolnost pěn vůči vysokým teplotám pohybuje v rozsahu 70 – 200 °C. Tab. 4 ukazuje přesné hodnoty hustot a rozmezí teplot pro konkrétní pěny používané v sendvičových strukturách. Pěny jsou také vyráběny v různých tloušťkách od 2 do 50 mm. [18]

Tab. 4. Rozmezí hustot a teplot sendvičových pěnových jader [18]

Název pěny	Hustota [kg/m ³]	Maximální teplota [°C]
Polystyren (PS)	25,6 - 56	73,8
Polyurethan (PUR)	48 – 465	121 - 177
Polyvinylchlorid (PVC)	28,8 – 416,4	65,5 - 135
Polymethylmethakryl (PMMA)	32 - 300	121 – 204
Styreneacrilonitril (SAN)	480 - 1300	106 - 175
Polymethacrylimid (PMI)	32 - 110	125 - 190
Hliníková pěna	2700	660

❖ Druhy pěn – vlastnosti a použití

Současný vývoj materiálů nabízí široké spektrum pěn. Všechny mají rozdílné vlastnosti a každá je použita pro jiné, nebo podobné účely. Mají však jednu společnou vlastnost a tou je nízká hmotnost.

- PVC pěny

Polyvinylchlorid je jedním z nejvíce používaných a vyráběných plastů po celém světě na základě dvou hledisek, nízká cena a univerzálnost materiálu samotného. Poskytuje výborný poměr pevnosti a hmotnosti pro všechny kompozitní aplikace. Má zanedbatelnou absorpci vody. Je odolný vůči chemikáliím, zejména styrenu, což znamená, že může být bezpečně použit v kombinaci s většinou pryskyřic včetně epoxidových, polyesterových a vinylchloridových. Využití nachází i ve spojení s prepreg materiály. Nevýhodou je omezená tepelná kapacita, citlivost na UV záření a oxidační degradaci. Použití je u plochých i zakřivených sendvičových struktur. Název této používané pěny je například Herex. [21]

- PET pěny

Polyethylentereftalát je recyklovatelná termoplastická pěna dobře tvarovatelná za tepla. Pyšní se svými dobrými mechanickými vlastnostmi a je nehořlavá. Příkladem je pěna Airex. [21]

- PS pěny

Polystytenová pěnová jádra mají uzavřenou buněčnou strukturu, jsou lehké, levné a odolné proti vodě a vlhkosti. Nelze je použít s polyesterovými pryskyřicemi, které by je mohly rozpustit. Mají tedy nízkou chemickou odolnost. V aplikacích, kde vyžadujeme dobré mechanické vlastnosti jsou nepoužitelné. Většinou se z nich vyrábí malá námořní plavidla, nebo surfy. [18]

- PUR pěny

Polyuretanové pěny se vyznačují pouze průměrnými mechanickými vlastnostmi. Z důvodu zhoršené přilnavosti jádra s pryskyřicí, může časem dojít k delaminaci. Polyuretanové pěny mohou být termoplastické i termosetové, dodávány buď jako bloky, nebo dvousložkově, kdy jsou smíchány a zpěněny na místě aplikace. Lze je využít jako méně namáhané sendvičové panely. [18],[21]

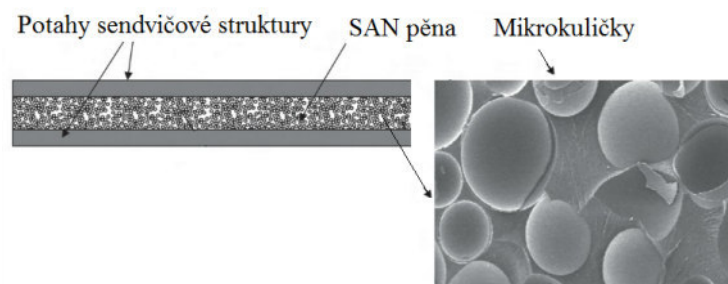
- PMMA pěny

Polymethylmethakrylátové pěny vykazují jednu z nejvyšších tuhostí a pevností ze všech pěnových jader vzhledem k její hustotě. Mají vynikající mechanické vlastnosti a vysokou tepelnou odolnost. Jsou předurčeny k použití s prepregy, protože dokážou teplotám auto-

klávu. Tyto pěny jsou velmi drahé a obvykle vyhrazeny pouze pro vysoce výkonné letecké aplikace. Příkladem jsou rotory helikoptér, nebo klapky křidel letounů.[18],[21]

- SAN pěny

Styreneacrilonitrilové pěny se skládají z matrice (např. epoxidové pryskyřice), která je vyplněna skleněnými, nebo keramickými mikro-kuličkami jako na Obr. 11. Mohou být dodávány ve formě past pro vyplňování voštin, nebo jako bloky pro jádrové aplikace. SAN pěny mají obecně mnohem vyšší hustotu než voštinová jádra (Tab. 4) Používají se jako náhrada do sendvičových struktur, kde by použití voštiny bylo nákladné a přitom nepraktické. Tyto pěny jsou teplem tvarovatelné, což je výhodné pro výrobu zakřivených součástí. Jsou také vhodné pro použití s prepregy. [18]



Obr. 11. SAN pěna [18]

- PEI pěna

Polyetherimidová pěna se vyznačuje vysokou odolností proti vysokým teplotám, tedy ohni, nízkou toxicitou a zároveň skvělými dielektrickými vlastnostmi. Další kladné vlastnosti jsou vysoká pevnost společně s nízkou hmotností, dobrou únavovou životností, rázovou odolností a odolností proti vlhkosti. Může být použita v kombinaci s prepregy do teploty 180 °C. [19]

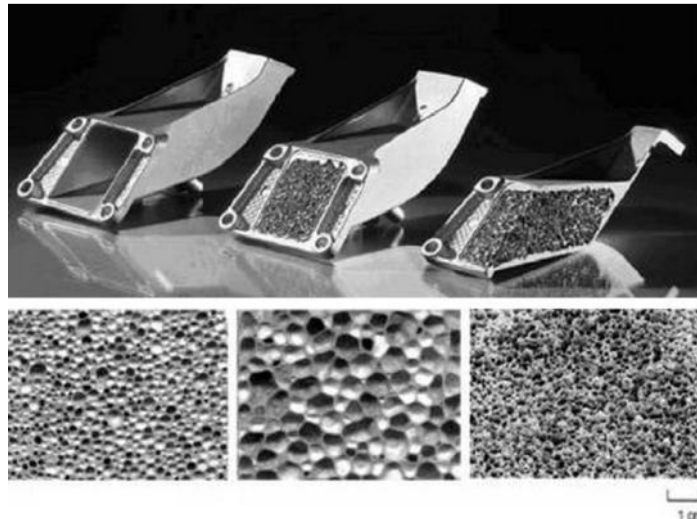
- PMI pěny

Tvrzená akrylátová pěna (Polymethacrylimid) s výbornými mechanickými vlastnostmi. Propouští rentgenové paprsky a je odolná vůči různým druhům chemikálií. Příklad velmi používaného PMI jádra je pěna Rohacell. [19]

- AL pěny

V dnešní době jsou velmi moderní kovové pěny. Jedná se o hliník a jeho slitiny hliníku používané zejména pro konstrukční díly kvůli jeho poměrně nízké hustotě a teplotě tání (Tab. 4). Hlavní nevýhodou je, že hliníková pěnová slitina představuje nelineární rozložení materiálu a jen velmi těžko jde přesně definovat její chování při různém namáhání. Výrobky z kovových pěn umožňují rozmístit materiál v celém rozsahu výrobku, zvětšit tak prů-

řez a tím i moment setrvačnosti bez zvětšení hmotnosti součástky. Tyto pěny vykazují dobrou schopnost absorpce nárazové energie, tlumení hluku a vibrací. Lez je použít jako lehké a tuhé konstrukce dopravních prostředků robotů, dopravníků, deformační zóny vozidel, strojní díly tlumící hluk a vibrace. Příklad hliníkové pěny ukazuje Obr. 12. [22]



Obr. 12. Aplikace hliníkové pěny [22]

❖ Výroba pěn

Polymerní pěny mohou být vyráběny několika způsoby, zahrnující vytlačování, lisování, nízkotlaké, nebo vysokotlaké vstřikování. Pěnová struktura se vytvoří vyfukováním, nebo použitím pěnidel, které jsou obsaženy v látce a během výroby expandují, čímž se získá porézní struktura materiálu. Téměř každý polymer se může stát pěnovým materiálem s použitím vhodných pěnidel, nadouvadla a vyfukovacích technologií.

Nadouvadla se rozdělují na fyzikální a chemická. Fyzikální nadouvadla jsou obvykle plyny smíchané s pryskyřicí a při zvýšení teploty expandují. Chemická nadouvadla jsou zpravidla ve formě prášků, které se při zvýšení teploty rozpouštějí a uvolňují plyny (např. oxid uhličitý). Existují pěny, které lze zakoupit jako kombinaci dvou složek, které po smíchání expandují přímo v místě aplikace. [18]

Pro sendvičové materiály se používají pěnové bloky. Ty mohou být v případě potřebných velkých rozměrů slepeny pastami, nebo adhezními fóliemi. Bloky se dají tepelně tvarovat technologiemi podobnými jako při výrobě nekovových voštinových jader. [18]



Obr. 13. Vstřikovací výrobní linka pro PVC i jiných pěn [23]

2.2.2 Voštinová jádra

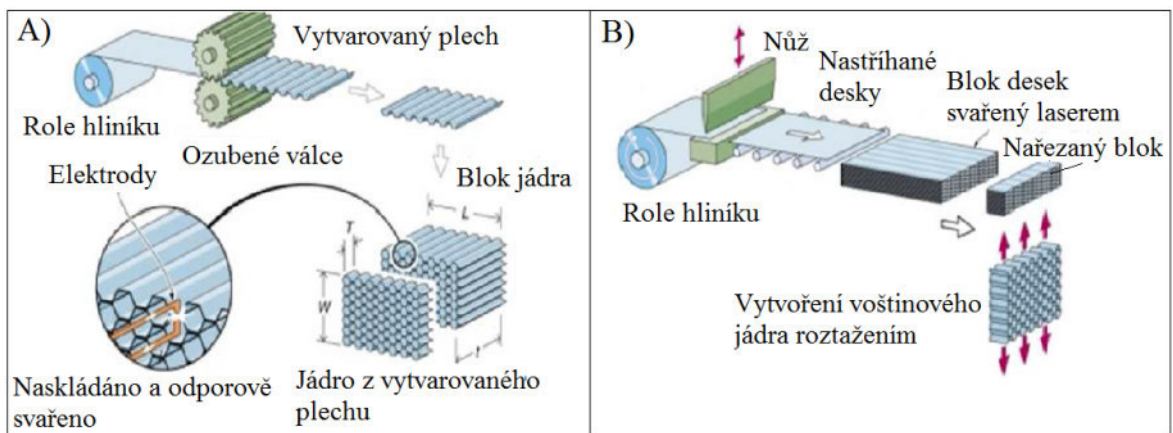
Voštinová jádra pro sendvičové struktury jsou dostupná v mnoha materiálových variantách. Mohou to být papírové, lepenkové voštiny pro nenáročné aplikace s nízkou pevností, tuhostí a zatížením pro použití například v interiérech domácností jako vnitřní dveře, až po extrémně lehké komponenty s vysokou pevností a tuhostí pro letecké konstrukce. Pevnost struktury je dána stabilitou stěny voštiny. Vlastnosti voštinového jádra závisí na velikosti buněk a pevnosti materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Nevýhodou voštiny je malá přilnavost plochy k potahovým vrstvám a musí být použita lepidla s vysokou lepivostí (například epoxidová). [25]

Voštinová jádra mohou být tedy vyráběna prakticky z jakéhokoliv materiálu včetně dřeva, termoplastů, vláknových materiálů, hliníku, nebo oceli. Jednotlivé buňky mohou být vyplněny pěnou, čímž se zvětší styčná plocha pro přilepení potahové vrstvy, stabilizují se stěny voštiny a tím dojde ke zlepšení mechanických vlastností, zvýší se také tepelné a akustické izolační vlastnosti. Zpracování může být do plochých, zakřivených kompozitních, či jiných struktur. [25]

❖ Výroba voštin:

Způsob výroby těchto jader závisí na druhu materiálu voštiny. Termoplastické voštiny jsou vyráběny vytlačováním a následně nastříhány na požadovanou délku. Jiné voštiny, jako papírové, či hliníkové jsou vyrobeny víceúrovňovým procesem. Na velké listy materiálu (rozměrově od 1200 až 3000 mm s tloušťkou stěny 3 až 50 mm) je nanesen tenký pruh lepidla, nebo jsou listy ponořeny do lázně s pryskyřicí a následně vloženy do vyhřívaného lisu, kde dojde k vytvrzení. V případě hliníkových voštin se používá metoda výroby roztažením voštin, nebo válcování s následným svařováním, nebo lepením. Buňky jader jsou

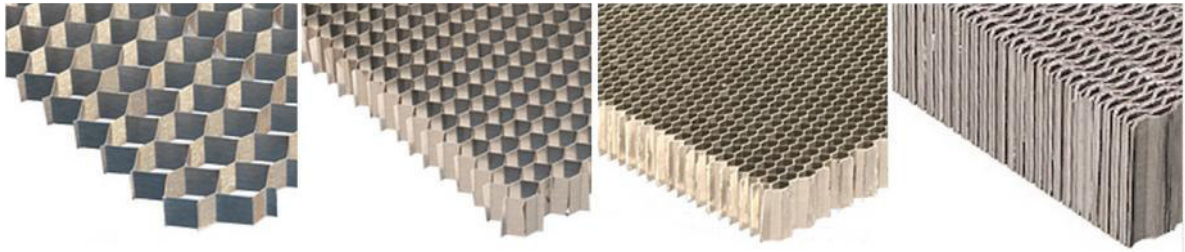
různě tvarované v závislosti na použití jádra pro konkrétní aplikaci. Nejčastější tvarování buňky je šestihránné. Příklad výroby je znázorněn na Obr. 14. [25]



Obr. 14. Výroby hliníkových voštin; A) - válcováním; B) - roztažením; [26]

- Druhy voštinových jader

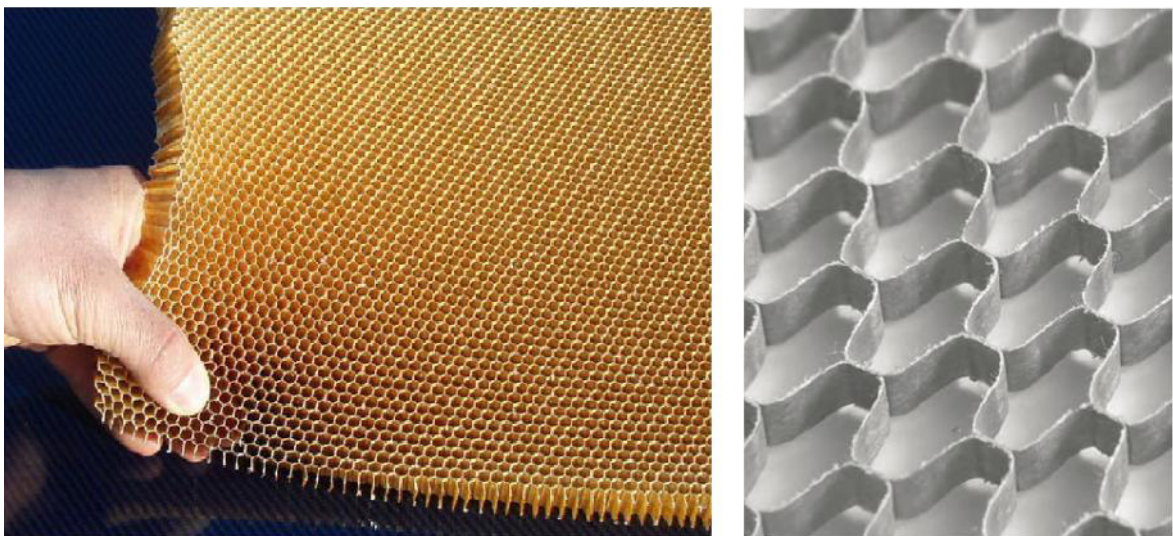
- Hliníkové voštiny: jako konstrukční jádrový materiál poskytují nevyšší poměr pevnosti a hmotnosti. Hliníkové voštiny se dodávají v různých objemových hmotnostech s různě velkými, tvarovými buňkami v různých tloušťkách stěny fólie a celkových délkách desek. Vlastnosti lze tedy ovlivňovat úpravou velikosti buněk, která se pohybuje nejčastěji od 2 do 10 mm a tloušťkou fólie. Tloušťka fólie může být v setinách milimetru až několika milimetrů (0,07 mm - 2 mm). Nejčastější rozmezí hustot se pohybují od 22 až 81 kg·m⁻³. Celkové rozměry bloků voštin (délka, šířka) jsou také rozmanité a to od 0,5 m až 12 m. I navzdory svým dobrým mechanickým vlastnostem musíme hliníkové voštiny sendvičů používat s opatrností, zejména u velkých lodních konstrukcí, kde dochází ke kontaktu se slanou vodou a vznik následných možných problémů s korozi. Značnou nevýhodou hliníkové voštiny je, že nemá tzv. mechanickou paměť, což vytváří riziko nenávratných deformací při rázu na vnější vrstvu. Voština se nenávratně zdeformuje i přes to, že vnější vrstvy se vrátí do původního stavu a následkem toho zhorší mechanické vlastnosti. Vnější vrstvy se na voštinové jádro tvarují ve formách za působení tlaku, nebo vakua s použitím vhodného lepidla.[17],[27]



Obr. 15. Tvary buněk u hliníkových voštinových jader [27]

o Nomex voštiny: tato jádra jsou vyrobena z Nomexového papíru. Nomex je komerční název aramidů. Papír, který obsahuje kevlarová vlákna, nebo méně častá celulózová vlákna. Nomex papírová voština se obvykle ponoří do fenolické pryskyřice a tím se zajistí vysoká pevnost a odolnost proti ohni. Společně s potahy ze skelných nebo uhlíkových vláken mají tyto panely vynikající mechanické vlastnosti, dlouhodobou stabilitu a tvoří nejpevnější a nejlehčí přepážky, motorové přepážky, nebo žebra křidel. V letecké dopravě jsou dále použity jako lehké interiérové komponenty. Při vyplnění buněk fenolickou pěnou mohou sloužit jako izolační materiál. Cena Nomex voštiny oproti jiným voštinám bývá podstatně vyšší.[17],[19]

Nomexové voštiny jsou nejčastěji k dispozici ve dvou základních typech a to oxagonální a hexagonální. Velikost buněk je 3,2 až 7 mm a rozmezí hustot může být 32 až 96 kg·m⁻³ s tlakovou pevností 1 až 7 MPa. [19]



Obr. 16. Nomex voštiny [19],[28]

o Termoplastické voštiny: nabízejí několik užitečných vlastností, jsou lehké a snadno recyklovatelné. Konkrétní termoplastické materiály pro výrobu této voštiny jsou například polykarbonát (PC), nebo polypropylen (PP). Jsou vyráběny ve variantách s trubkovým

tvarem buněk. Mohou být dodávány s bariérovou tkanou, nebo netkanou rohoží pro lepší lepení k potahům a snížení spotřeby pryskyřice. Velikosti buněk mohou být od 4 do 13 mm s hustotou 56 až 320 kg·m⁻³. Nevýhodou je relativně nízká tuhost a obtížnost dosažení ideální mezifázové vazby mezi voštinou a potahovou vrstvou. Jen zřídka jsou používány u vysoce namáhaných komponent. Spíše se užívají jako jednoduché vnitřní výztuže komponent apod. [17],[19]

2.2.3 Dřevěná jádra

Dřevo může být charakterizováno jako „přírodní voština“ která má v mikroskopickém měřítku podobnou strukturu jako struktura syntetických voštin. Při použití dřeva u sendvičových struktur směřují vlákna kolmo k rovině potahu. Vlastnosti dřevěných jader jsou velmi podobné syntetickým, avšak dřevěná jádra mají tu nevýhodu, že i přes všechna chemická ošetření, která máme v dnešní době k dispozici, jsou náchylná k absorpci vlhkosti a hnilobě, pokud nejsou dobře překryta laminátem, nebo pryskyřicí. Další materiál, který se používá je tzv. cedar (druh dřeva). Ten je užíván pro aplikace v lodní dopravě. [17]

❖ Balza

Nejčastěji používané dřevěné jádro. Balza je velký a rychle rostoucí strom. Poprvé byla použita v roce 1940 u lodních trupů. Povrchová vrstva sendviče byla hliníková a jádro z balzy. Tato kombinace materiálů měla velký úspěch, což vedlo námořní průmysl k používání těchto materiálů nadále a do dnes jde o jeden z nejlepších jádrových lodních materiálů. Největšími výhodami je dobrá tepelná izolace, akustická absorpce, materiál se při zvýšení teploty, v porovnání například s pěnovými jádry, se nedeformuje, neměkne a má menší tepelnou vodivost. Balzové dřevo nehoří, spíše pomalu doutná. Nevýhodou je vysoká hustota, která začíná na 100 kg/m³. Balza také absorbuje velké množství pryskyřice při laminaci, což zvyšuje celkovou hmotnost. Její použití je tedy omezeno na aplikace, kde hmotnost nehraje příliš velkou roli a také na méně u namáhaných oblastí. [25]

2.2.4 Adhezní vrstvy (lepidla)

Spojení vnějších vrstev a jader sendvičových struktur se provádí více způsoby pomocí konstrukčních průmyslových lepidel (pryskyřic). V současné době je oblast průmyslových lepidel hodně široká a jejich použití závisí druhu materiálů, které mají být k sobě přilepeny a také na aplikaci, pro kterou má být sendvičová konstrukce použita. Vývoj je již na takové

úrovni, že vlastnosti lepidel v mnoha případech převyšují mechanické vlastnosti samotných lepených materiálů. [14]

V případě použití prepregů, jako potahových vrstev sendviče, se již adhezní vrstva nepřidává, protože pryskyřice je již v prepregu obsažena a při spojování se sendvičovým jádrem, například v autoklávu, dojde k dokončení síťování a tím přilne prepreg k jádru.

Při použití vyztužených vláken se pryskyřice aplikuje v tekutém stavu a vlákna jsou na sebe vrstvena. Příkladem je ruční laminace, nebo vakuová infuze.

Spojení jádra s kovovými, nebo dřevěnými potahy je provedeno pomocí adhezní fólie. Adhezní fólie je předem připravená vrstva pryskyřice v nezesíťném stavu. S takto připravenou fólií se dá snadno manipulovat. Fólie se vloží mezi jádro a potah a v autoklávu, nebo vytvrzovací peci dojde k její polymeraci a tím se spojí sendvičové vrstev v jeden celek. [2]

❖ Druhy lepidel

Tab. 5. Rozdělení a charakteristiky používaných lepidel

Matrice	Druhy	Výhody	Nevýhody	Použití
Termosetová lepidla	Polyesterová	-Vysoké izolační vlastnosti -Vyšší koeficient tření -Vyšší lepivost	-Vyšší cena -Nižší chemická odolnost -Nižší hustota -Zdravotně závadnější	-Namáhané díly -Různá odvětví průmyslu
	Epoxidová			
	Fenolytická			
	Polyamidová			
Termoplastická lepidla	Polyesterová	-Rychlejší polymerace -Snadnější recyklace -Možnost svařování -Šetrnější k prostředí -Chemicky odolnější	-Nižší schopnost tečení	-Nárazníky -Příčnický -Přístrojové desky -Letectví -Vysoce namáhané díly
	Polyamidová			
	Polypropylnová			
	Polyethylenová			

3 TECHNOLOGIE VÝROBY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Výrobní technologie je určena především charakterem výrobku. Volba způsobu výroby a použití vhodné technologie je dána sériovostí dílce, velikostí a členitostí výrobku, kvalitou povrchu, požadovanými vlastnostmi jako pevnost, nebo tuhost a v neposlední řadě také limitem nákladů. Výrobní technologie sendvičových materiálů znázorňuje schéma na Obr. 17.



Obr. 17. Rozdělení způsobů výroby sendvičových struktur [7]

Dalšími technologiemi, kterými se zpracovávají kompozitní materiály, je celá řada. Konkrétně jde o ruční laminování, vakuovou infuzi, pultruzí, rotační navíjení vláken a jiné.

3.1 Vakuové vytvrzování (Vacuum Bagging)

Vakuové zpracování je vhodné pro rozměrné sendvičové konstrukce. Tato metoda využívá podtlaku ke spojení všech vrstev kompozitních, nebo i sendvičových materiálů během jejich vytvrzování. Celá komponenta je vzduchotěsně uzavřena mezi vakem a formou. Vakuová pumpa vysaje všechny vzduch z vaku i vzduch zachycený mezi vrstvami, čímž se zvýší tlakové síly, které tlačí vrstvy vyráběné komponenty k sobě. Jednotlivé vrstvy vláken jsou zpevněny a je zabráněno jejich posunutí. Tím se zefektivní přenos sil mezi vlákny po vytvrzení. Tlak uvnitř vaku je redukován tlakem v okolí a je postupně rovnoměrně rozložen po celé ploše komponenty. Takového výsledku, bychom mechanicky (použitím např. svorek) dosáhli velmi obtížně, nebo vůbec. Po vytvrzení se výrobek vyjme z formy. [32],[33]

❖ Části vakuového systému

- Vakuové čerpadlo

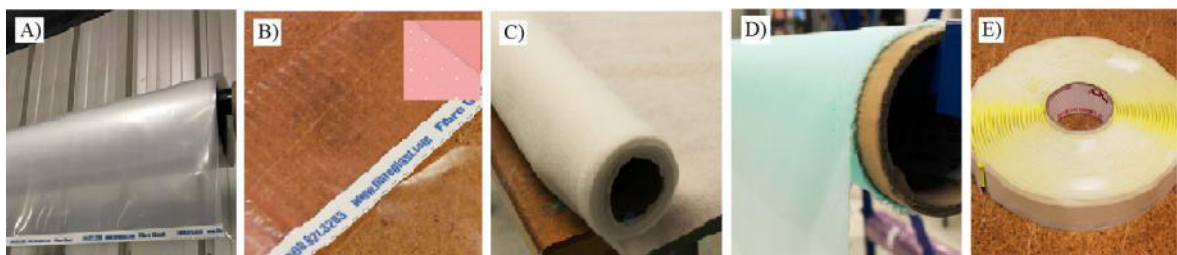
Čerpadla se hodnotí dle výkonu, objemu vzduchu a jaký maximální podtlak dokážou vyvinout. Volba správného čerpadla je závislá na velikosti formy a tedy vaku, který ji obklopuje. Důležité je těsnost celého systému, což výrazně sníží práci čerpadlu. Současně s čerpa-

dlem je použito měřidlo tlaku k detekci netěsností. Měřidlo je součástí čerpadla, nebo je připojeno samostatně k vaku. [33]

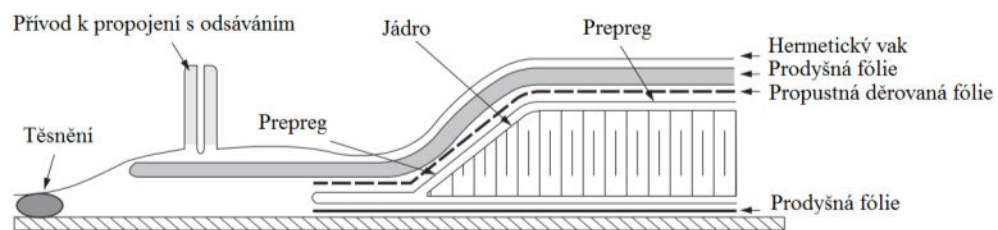
- Fólie, separační a odtrhové vrstvy, těsnění

Jako vakuové fólie se používá celá řada materiálů. Konkrétně jde o nylonové, polyethylenové, nebo polyesterové a další fólie. Jsou navrženy tak, aby kopírovaly obrys i tvarově složitých součástí, jako záhyby hluboce posazené otvory apod. Jsou odolné vysokým teplotám 100 až 400 °C. Mohou se tedy použít při výrobě v autoklávu, nebo vytvrzovací peci. Výrobce určuje, pro jaký typ pryskyřice se vakuová fólie dá použít. Některé jsou univerzální, ale jiné jsou naopak přesně určeny pro konkrétní druh pryskyřice. Existuje také druh fólie, která vytváří mechanický tlak pomocí tepla (při zahřátí se zmenší až o 20%). Lze ji použít tam, kde by bylo klasické vakuování příliš složité, nebo pro opravy komponent.

Jako těsnění se používají těsnící pásy. Dokážou vyvinout vysoké těsnící účinky na formách z různých materiálů (hliníku, oceli, niklu, sklolaminátu). Snesou různé vulkanizační teploty. [33]



Obr. 18. Materiály pro vakuové vytvrzování; (A – vakuová fólie; B - prodyšná fólie; C,D – separační a odtrhové vrstvy; E – těsnící páska) [33]

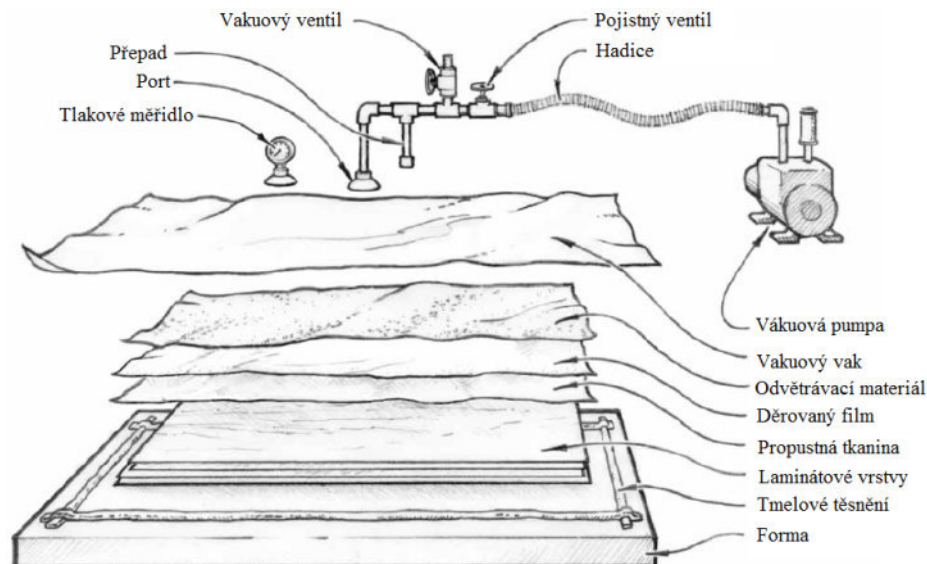


Obr. 19. Příklad vakuování sendvičové struktury [7]

❖ Postup při vakuovém vytvrzování

Používají se jednostranně otevřených skořepinové formy. Dle zvolené skladby laminátu jsou do formy poskládány orientované nařezané prepregy. Ty je možno nahřívát horkým vzduchem pro zvýšení přilnavosti a lepivosti prepregu. Po položení potřebného počtu vrstev je na vrchní poslední vrstvu dílu položena opět odtrhává tkanina a na ni ještě jedna

vrstva umožňující průnik přebytečné pryskyřice do odsávací vrstvy. Odsávací vrstva odsává přebytečnou pryskyřici a je obvykle vyrobena jako rohož z polymerních vláken snášejících teplotu vytvrzování. Odsávací tkanina je překryta prodyšnou fólií a na ni jsou položeny odvodušňovací vrstvy z polymerní, nebo skelné rohože umožňující odsátí vzduchu. Hermetičnost zajišťuje polymerní fólie, nebo vak ze silikonového kaučuku. [31]



Obr. 20. Typické komponenty vakuového vytvrzovacího systému [33]

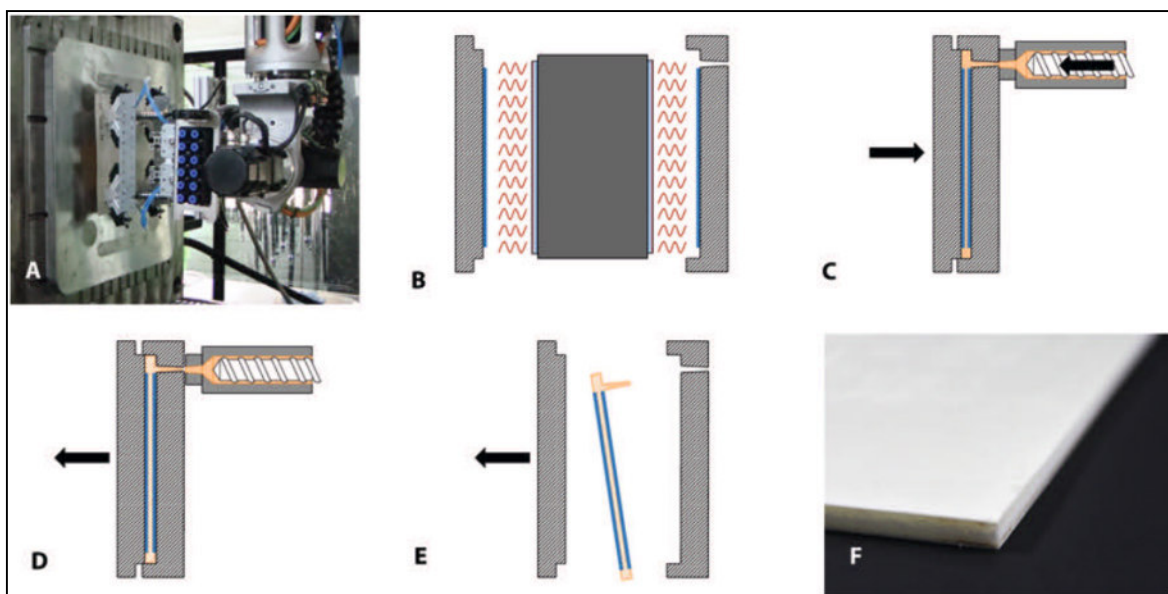
3.2 Lisování

Technologie lisování z prepregu, nebo v případě sendviče je prepreg lisován v kombinaci s jádrem. Výroba probíhá skládáním a vrstvením prepregů. U klasického lisování je vyskládaný díl slisován ve dvoustranné formě s vlastním vyhříváním. V oboustranně uzavřené formě, nastávají problémy s odvodem interlaminárně zachyceného vzduchu, což bývá příčinou pórovitosti výrobku a vysoké zmetkovitosti, což je značná nevýhoda. [7]

3.3 Vstřikování pěny (Foam injection moulding - FIM)

Je dalším příkladem metody výroby sendvičové struktury pod tlakem. Struktura obsahuje vnější vrstvy z vláknových kompozitů a pěnového jádra. Vnější vrstvy jsou vloženy do dutin formy umístěných proti sobě (A). Vrstvy jsou nepřímou zahřívány (B). Následně je forma rychle uzavřena, aby se minimalizovala ztráta teploty a přilnavosti vnějších vrstev. Zároveň je termoplastická tavenina vstříknuta pod tlakem rovnoměrně mezi hrany vnějších vrstev (C). Po ochlazení získá sendvičové jádro požadované rozměry (D) a po otevření

formy se vyjme (E). Následně v závislosti na geometrii formy se ořízne přebytečný materiál (F). Realizace tohoto procesu výroby může být společná pro všechny sendvičové struktury s vláknovými vnějšími vrstvami. Výhodou technologie pěnového vstřikování je nízká hmotnost konstrukcí. Takto vyrobené komponenty jsou vhodné jako podlažní panely, dveřní moduly, palety, kontejnery apod. [30]



Obr. 21. Vstřikování termoplastického pěnového materiálu (FIM) [30]

3.4 Technologie vytvrzování v autoklávu a vysokoteplotní peci

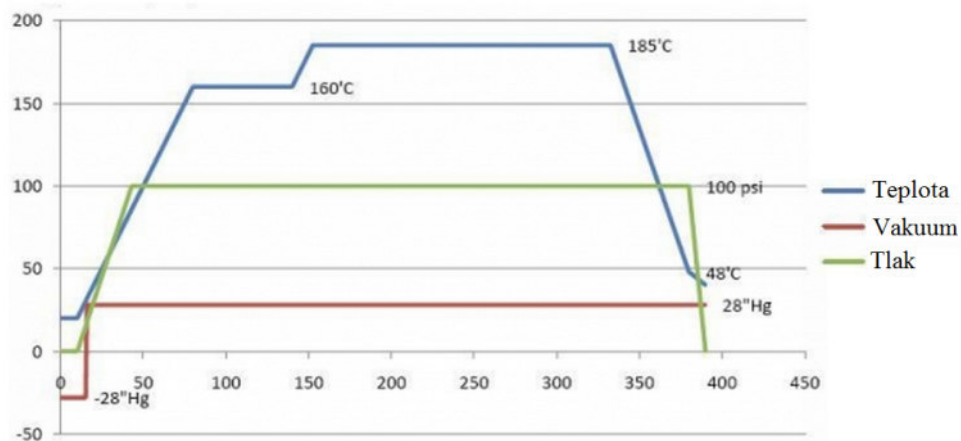
Tato technologie je vhodná zejména pro středně sériovou výrobu mechanicky namáhaných kompozitních dílů. Autokláv je tlaková nádoba, která vytváří podmínky pro vytvrzování komponent za použití vakua, zvýšeného tlaku a kontrolované teploty. Vše je přesně řízeno programem. Nejvíce používanými materiály jsou vrstvené prepregy, nebo sendvičové struktury s prepreg potahy.

Vakuovaná komponenta je vložena do tlakové nádoby (autoklávu). Úplným odsátím vzduchu z vaku začne působit na jednotlivé vrstvy atmosférický tlak. Postupným zvyšováním teploty v komoře dochází k vytvrzování pryskyřice. Vyvozením přetlaku v autoklávu se vrstvy prepregu ještě lépe přitlačí k sobě a tím je zaručen minimální, ale zároveň přesný obsah pryskyřice v komponentě. Doba působení teploty a přetlaku se volí podle rychlosti vytvrzování pryskyřice. Chladnutí musí být pomalé, aby mohla relaxovat vnitřní pnutí v kompozitu, vzniklá rozdílnou teplotní roztažností složek materiálu. V případě tlustostěnných dílů, kdy při větší tloušťce laminátu může dojít v důsledku exotermické reakce při

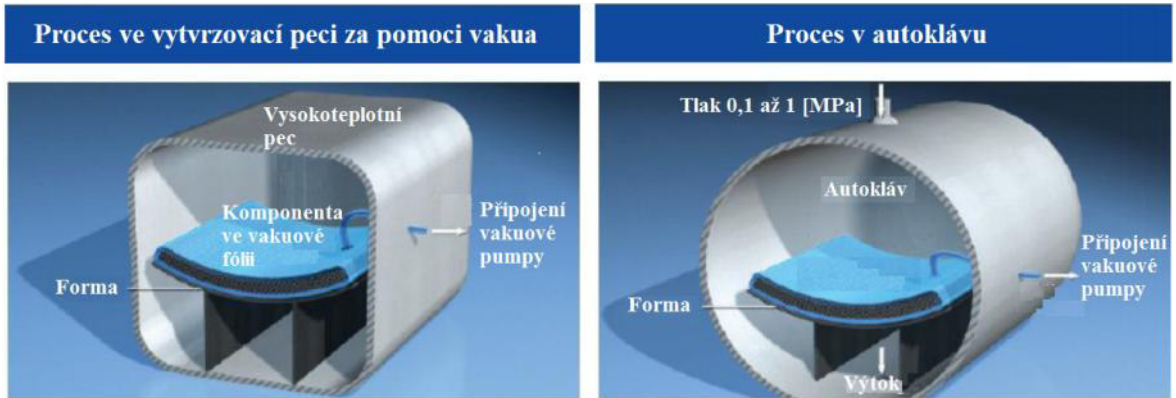
vytvrzování pryskyřice k přehřátí středních vrstev laminátu a tím k poklesu jejich mechanických vlastností. [31]

Další možnost vytvrzování v kombinaci s vakuovou technologií (popsanou v kapitole 3.1) je ve vysokoteplotní peci. Je důležité dodržet vytvrzovací cyklus. Teploty v autoklávu i v peci se pohybují v rozmezí 100 až 200 °C a zahřívání probíhá v intervalu od 1 do 3 °C/min. Obecně platí, že rychlé zvyšování teploty se používá pro komponenty s malou tloušťkou a naopak, pomalý ohřev je užíván u vrstvených dílů s velkou tloušťkou, aby se zaručilo úplné a rovnoměrné vytvrzení. Rychlost ohřívání i ochlazování dílů je nastavena tak, aby se zabránilo náhlým, nebo prudkým změnám teplot, které mohou způsobit nežádoucí tepelné namáhání součástí. Delší doba vytvrzování nemá vliv na kvalitu součástí. Konkrétní průběh vytvrzení udává výrobce s ohledem na druh matrice. Velikost tlakového zatížení se pohybuje v rozsahu 1 až 10 barů (0,1-1 MPa). Tlak/podtlak by měl být zachován po celou dobu ochlazování. [7],[31]

Vytvrzovací cyklus pro laminát (tloušťka 6 mm)



Obr. 22. Příklad vytvrzovacího cyklu prepregu [34]



Obr. 23. Procesní metody vytvrzování prepregů [7]

Tab. 6. Porovnání vytvrzovacích metod ve vysokoteplotní peci a autoklávu [7]

Metoda vytvrzování	Komponenta		Použití
	Kvalita	Tloušťka	
Vakuování v peci	Dobrá až excelentní	Od tenké po silné	-Vlakové komponenty -Letecké komponenty -Větrná energie -Automotiv -Vojenský průmysl
Autokláv	Excelentní	Od tenké po silné	-Vysoce namáhané kompozity -Konstrukční části

Kontrola kvality vytvrzených dílů se provádí ultrazvukovými, termografickými, nebo optickými zařízeními. [7]



Obr. 24. Autokláv [7]

4 TECHNICKÁ TEORIE OHYBU SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Při výpočtech předpokládáme, že jednotlivé části složeného prutu jsou spolu dokonale spojeny. Potom je za ohybu část vláken prutu stlačována a část prodlužována. Vlákná, jež se za ohybu neprodužují ani nezkracují, tvoří tzv. neutrální plochu, do níž při výpočtech klademe počátek svislé souřadnice y . Pro poměrnou deformaci vlákna vzdálenou o y od neutrální osy plyne vztah: [35]

$$\varepsilon_{(y,z)} = \frac{1}{r} \cdot y \quad [-] \quad (1)$$

,kde r [mm] je poloměr zakřivení neutrální plochy ve vyšetřovaném místě, y [mm] je vzdálenost krajního vlákna od neutrální osy.

Podmínka ohybu není omezena pouze na požadavek symetrie tvaru průřezu k ose y , ale vyžaduje se rovněž symetrie struktury průřezu k této ose. Ohybový moment v průřezu je vyvažován normálovým napětím, tj. platí: [35],[36]

$$M = \int_{(S)} dN \cdot y = \int_{(S)} \sigma_n(y)y \cdot dS \quad [Nm] \quad (2)$$

,kde σ_n [MPa] je normálové napětí a v závislosti na deformaci pro něj platí Hookův zákon:

$$\sigma_{(y)} = E_{(y)} \cdot \varepsilon_{(y)} \quad [MPa] \quad (3)$$

,kde E [MPa] je modul pružnosti, ε [-] je poměrná deformace.

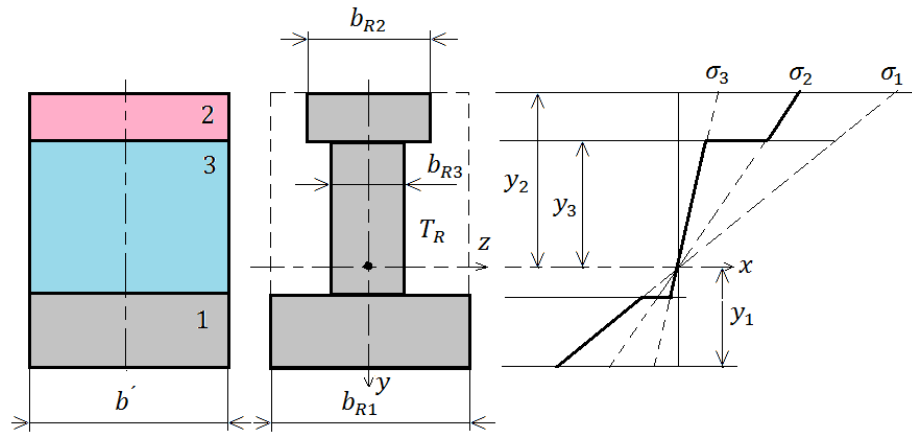
Poloha neutrální osy složeného průřezu vyplývá z podmínky rovnováhy sil v ose x prutu. Protože v průřezu působí pouze dvojice M , je výsledná osová síla v průřezu nulová, tj. [35]

$$N = \int_{(S)} dN = \int_{(S)} \sigma(y)dS = 0 \quad [N] \quad (4)$$

Z podmínky že všechna poměrná prodloužení složené struktury se rovnají a tedy neutrální osa je kladena těžiště útvaru, který vznikne z původního průřezu redukcí šířek b_i jednotlivých ploch S_i v poměru E_i/E_1 . Takto vytvořený výpočtový průřez se nazývá redukovaný průřez složeného prutu Obr. 25. Jako vztažný modul se obvykle volí E_{\max} . Výpočet redukované šířky jednotlivých částí se vypočítá dle vztahu: [35]

$$b_{tR} = \frac{E_i}{E_1} \cdot b_i \quad [mm] \quad (5)$$

,kde b_i [mm] je šířka prutu.



Obr. 25. Redukovaný průřez složeného prutu [35]

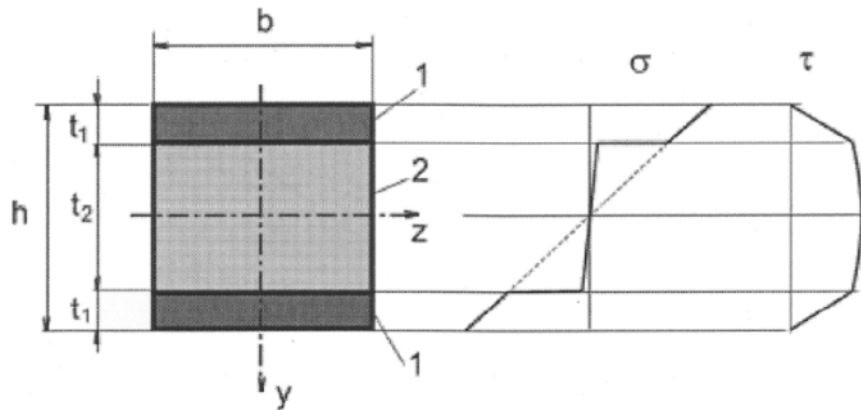
Výrobky z plastů, či kompozitů jsou převážně navrhovány jako tenkostěnné z důvodu omezení hmotnosti. Měníme-li tloušťku tenkostěnného prvku při daných okrajových podmínkách tj. uložení a zatížení, závisí hodnoty ohybových napětí nepřímo na kvadrátu poměru změny tloušťky tj: [35],[36]

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad (6)$$

,kde σ [MPa] je ohybové napětí materiálů, S [mm²] je obsah plochy prvků.

Ohybové deformace se mění se změnou tloušťky. Ohybová tuhost, a únosnost jsou velmi malá u nevyztužených stěn prvků. Je to způsobeno tím, že hmota je soustředěna poblíž střednice prvku, tedy neutrální plochy, kde jsou nulová ohybová napětí. Ramena vnitřních sil jsou tedy malá, takže materiál stěny je při přenosu ohybových momentů málo využit. Zvýšení tloušťky prvku je tedy málo účinné a nevhodné. Řešením je umístit podstatnou část průřezu v relativně větší vzdálenosti od neutrální plochy plošného prvku. Sendvičové stěny s různými typy jader vykazují vysoké poměry ohybové tuhosti vzhledem k objemu materiálu profilu. Povrch sendviče tvoří vrstva kompaktního plastu, směrem ke střednici lehčené stěny se zvyšuje stupeň lehčení, a tedy snižuje modul pružnosti. Zároveň jsou vrstvené sendvičové konstrukce odolné vůči ztrátě stability. U výztuží provedených jednosměrně dochází k tzv. konstrukční ortotropii, při které ve směru výztuže ohybová tuhost vzrůstá a ve směru příčném zůstává na úrovni nevyztužené stěny. [35],[36]

Při navrhování ohýbaných prvků lze dosáhnout vysoké tuhosti při minimální hmotnosti právě spojením dvou vnějších tuhých pevných vrstev a lehčeného jádra Obr. 26. Oblast poblíž neutrální polohy je namáhána nepatrně ve srovnání s namáháním krajních vláken průřezu. [35]



Obr. 26. Průběh napětí sendvičové konstrukce [35]

(1 – vnější vrstvy; 2 – jádro; h – celková tloušťka;

t_1, t_2, t_3 – tloušťky vrstev; σ - ohybové napětí)

Ohybové napětí:

$$\sigma_i(y) = E_i \cdot \frac{1}{r} \cdot y = \frac{E_i}{E_1} \cdot \frac{M}{J_R} \cdot y \quad (7)$$

,kde $\frac{1}{r} = \frac{M}{E_1 \cdot J_R}$ [MPa] je křivost, E [MPa] je modul pružnosti, r [mm] je poloměr zakřivení neutrální osy, y [mm] je vzdálenost vlákna od neutrální plochy, M [Nm] ohybový moment.

Kvadratický moment redukovaného průřezu složeného prutu je:

$$J_R = J_1 + \frac{E_2}{E_1} \cdot J_2 + \frac{E_3}{E_1} \cdot J_3 + \dots + \frac{E_n}{E_1} \cdot J_n \quad (8)$$

,kde J [mm⁴] je kvadratický moment.

Ohybová tuhost:

$$K_O = E_1 \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_1} \cdot J_i = E_1 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \left[1 - \frac{E_1 - E_2}{E_1} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{t_1}{h} \right)^3 \right] \quad (9)$$

pro $E_1 \gg E_2$ a $t_1 \ll t_2$ je pak ohybová tuhost zjednodušená:

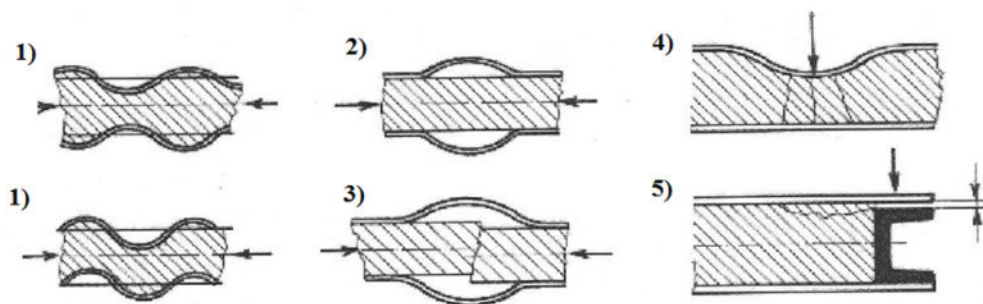
$$K_O = E_1 \cdot \frac{b \cdot h^2 \cdot t_1}{2} \quad (10)$$

,kde b, h, t_1 [mm] jsou rozměry průřezu desky.

Na rozdíl od homogenních výrobků není výsledná únosnost sendviče v ohybu dána pouze materiálovou charakteristikou – pevnost, ale je výslednicí složitého mechanického chování

sendvičové struktury. Únosnost je závislá na geometrických, materiálových a také technologických parametrech. Je omezena poruchami různého typu. Vnější nosné prvky sendviče představují tenkostěnné prvky uložené na pružném jádru a tedy náchylné k různým formám ztráty stability Obr. 27. Tyto porušení mohou být doprovázena odtržením – separací nosných vrstev a jádra a jejich následným porušením. [35]

Při působení osamělých příčných zatížení může docházet k místním poškozením v důsledku stlačení, případně porušení jádra. Tím je snížena únosnost sendvičového prvku v těchto místech. Do těchto míst se vkládají tuhé vložky včleněné do jádra. Důležité je dodržování vhodných tolerancí a zakončovacích prvků. [35]



Obr. 27. Porušení sendvičových struktur [35]

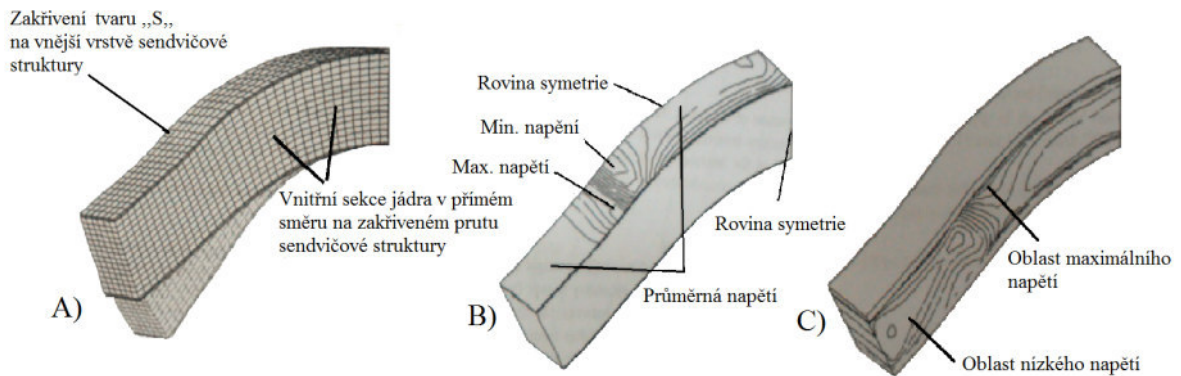
(1 – ztráta stability; 2 – delaminace; 3 – delaminace s porušením jádra;
4 - lokální porušení; 5 – nevhodné tolerance vložených prvků)

4.1 Zakřivené sendvičové pruty v ohybu

Pro přímé sendvičové pruty je tlaková a tahová síla od ohybového momentu zachycována vnějšími vrstvami, kdežto příčné síly jsou zachycovány jádrem jako smyková napětí. Rozložení zatížení je odlišné pro zakřivené sendvičové pruty. Jádro v zakřivených prutech přenáší značná normálová napětí. Tato napětí mohou být tahová, nebo tlaková v závislosti na směru ohybového momentu a v rozložení napětí ve vnitřních sekcích mezi rovnými a zakřivenými částmi materiálu. Normálová napětí v zakřivených prutech v ohybu mohou být limitována vhodným návrhem a zjištěna pomocí výpočtů či testování. To je však nákladné a pouze orientační. Nejeftivnější je metoda konečných prvků. U sendvičových materiálů je obtížné zjistit jejich přesné mechanické vlastnosti, protože se chovají nelineárně. Z toho důvodu se pro výpočty zakřivených sendvičových prutů používá metoda konečných prvků, která je nejeftivnější a nezbytná.[36]

4.1.1 Napětí a deformace

Když zatížíme zakřivené sendvičové pruty v ohybu, vystavujeme jádro normálovému napětí. Tato koncentrace napětí nastane blízko, nebo v místech prohnutí mezi zakřivenými a rovnými částmi ve vnitřních sekcích prutu. Předchozí výzkumy ukázaly, že vnitřní zakřivení jsou ohnuta do tvaru „S“, což může způsobit vzájemné posunutí vnějších vrstev a vznik předčasných vad i při nízkých zatíženích. [36]



Obr. 28. Napětí v zakřivených sendvičových prutech [36]

(A) Deformace zakřiveného prutu působením ohybového momentu; B) Porušení vnější vrstvy vlivem napětí; C) Porušení jádra vlivem působení napětí)

4.1.2 Ruční výpočet zakřivených sendvičových prutů

Napětí zakřivených sendvičových prutů zatížených prostým ohybem je možné spočítat za předpokladu tenkých ploch a malých deformací. Napětí v zakřivených a rovných částech prutů je možné spočítat: [36]

$$\sigma_f = \frac{M}{t_f \cdot d} \quad [MPa] \quad (11)$$

,kde d [mm] je vzdálenost mezi středy vnějších vrstev, t_f [mm] je tloušťka vnějších vrstev, M [Nm] je ohybový moment.

Radiální normálové napětí jádra (kolmé k vnějším vrstvám) je:

$$\sigma_{r,max} = \frac{M}{d \cdot R} \quad [MPa] \quad (12)$$

,kde R [mm] je vnitřní rádius zakřiveného prutu, d [mm] je vzdálenost mezi středy vnějších vrstev.

Předchozími výzkumy a testováním pomocí konečně prvkové metody výpočtu bylo zjištěno, že koncentrace napětí ve vnitřních sekcích zakřivených prutů jsou odlišné. O 15% vyšší napětí bylo zpozorováno ve vnitřních sekcích rovných a zakřivených částech sendvičových prutů. To může být však otázkou návrhu. [36]

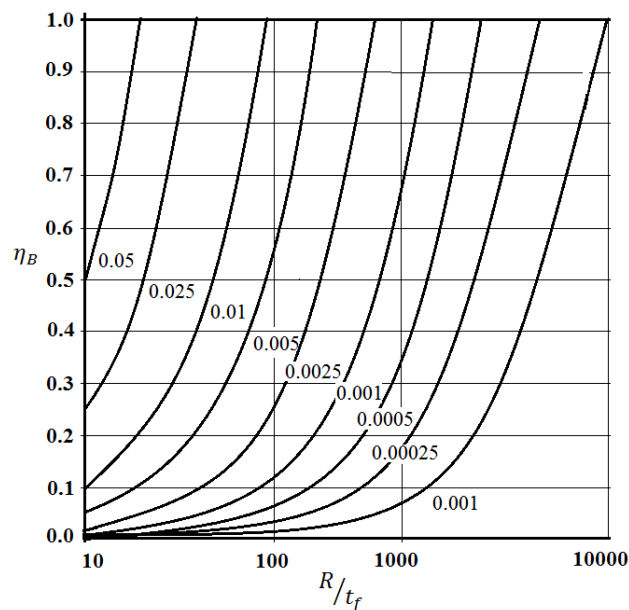
4.1.3 Pevnost zakřivených sendvičových prutů v ohybu

Graf na Obr. 29 porovnává ohybová napětí zakřivených sendvičových prutů s rovnými pruty. Pruty jsou ze stejných materiálů a mají stejnou geometrii. Pouze zakřivení jsou různá. Je zaveden tzv. faktor efektivní účinnosti v ohybu η_b , který představuje vztah mezi ohybovou pevností dvou typů zakřivených prutů. Ve skutečnosti znázorňuje změnu způsobu porušení z vnější vrstvy na porušení jádra. [36]

Směr ohybového momentu je důležitý pro mnoho poruch jádrových materiálů v různých úrovních napětí v tlaku a tahu.

$$\eta_b = \frac{\bar{M}_k}{\bar{M}_r} = \frac{\bar{\sigma}_{r,c} \cdot R}{\bar{\sigma}_f \cdot t_f}, (\eta_b \in (0,1)) \quad (13)$$

,kde $M_k = \bar{\sigma}_{r,c} \cdot R$ [Nm] je maximální ohybový moment zakřivených prutů, $M_r = \bar{\sigma}_f \cdot t_f$ [Nm] je maximální ohybový moment přímých prutů, $\bar{\sigma}_{r,c}$ [MPa] je napětí v zakřivených prutech, $\bar{\sigma}_f$ [MPa] je napětí v přímých prutech, R [Nm] je vnitřní rádius zakřiveného prutu.



Obr. 29. Faktor efektivní účinnosti pro zakřivené pruty [36]

5 MECHANICKÉ TESTY SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ

Celosvětový rozvoj a výroba kompozitních materiálů v různých oblastech průmyslu vedla v důsledku jejich neobvyklých mechanických vlastností ke vzniku zcela nových metod zkoušení a testování, které se u jiných materiálů používají jen zřídka, nebo nepoužívají. [2]

Mechanickými zkouškami stanovujeme mechanické vlastnosti, které jsou mimořádně důležité při použití materiálu pro konstrukční účely. V oblasti kompozitních a vrstvených materiálů má vliv na jejich chování při mechanickém zatěžování především druh potahových vrstev, druh matrice, v případě použití kompozitních potahů je to rozložení plniva, nebo vláken, orientace a obsah vláken, dále druh jádrového materiálu, příp. zakřivení a také vlastní technika zkoušek při testování. [2]

Pro získání relativně přesných dat pro konstrukční výpočty, musí být testy prováděny při velmi přesně definovaných zatíženích a přesných napěťových poměrech testovaného materiálu. Zkouškami se vyhodnocují mechanické, elektrické, hořlavostní charakteristiky, ale mají také experimentální význam. Příklady testovacích metod jsou retenční schopnost dř, smyková pevnost měrná, tvrdost barcol, absorpce vody, hustota, specifická hmotnost, odolnost proti oblouku, dielektrická pevnost, zkouška hořlavosti, tunelový test, kouřová komora, peel testy a další. [2]

Zkoušky se dají rozdělit na statické a dynamické. Měření se provádí jak za normálních pokojových, tak i zvýšených teplot. Níže jsou definovány a popsány vybrané zkoušky důležité pro tuto práci při testování sendvičových struktur.

5.1 Zkouška ohybem

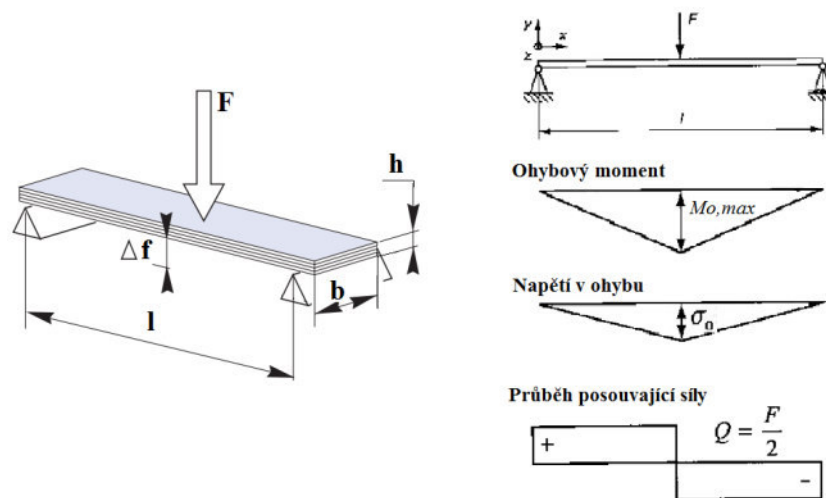
Statická zkouška prováděna za normální pokojové, nebo zvýšené teploty. Při stanovování elastických a pevnostních charakteristik zkouškou ohybem se předpokládá lineární rozložení normálních napětí po průřezu. Hodnoty pevnosti v ohybu závisí výrazně na poloze vláken vzhledem k neutrální rovině. Ohybový moment vyvolá v horních vláknech průřezu tah a ve spodních vláknech tlak. Je-li průřez symetrický, je neutrální rovina v ose zkušební vzorku. To však platí pouze tehdy, má-li materiál stejné vlastnosti v tahu i tlaku. Pokud tomu tak není, neutrální osa se posouvá směrem k tužším vrstvám, kde je při daném zatížení vyšší pevnost. [2]

Zkouška probíhá při tří- nebo čtyřbodovém uložení. Metody se používají k hodnocení ohybových vlastností a stanovení pevnosti v ohybu, ohybového modulu a jiných parametrů,

vyplývající z vztahu ohybové napětí/deformace za předepsaných podmínek. Geometrie zkoušky se volí tak, aby byla omezena smyková deformace a vyloučeno porušení v důsledku mezilaminárního smyku. [37]

5.1.1 Zkouška tříbodovým ohybem

Zkušební těleso podepřené dvěma podpěrami je uprostřed zatěžováno konstantní rychlostí silou, dokud nedojde k jeho porušení, nebo dosažení předem stanovené hodnoty. Ohybový moment se lineárně mění od nuly u podpěr k maximální hodnotě ve středu vzorku. [2][35],[38]



Obr. 30. Tříbodový ohyb, průběh ohybových momentů [2],[7]

Důležité výpočtové vztahy u zkoušky tříbodovým ohybem jsou:

❖ Ohybové napětí

$$\sigma_{f1} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [MPa] \quad (14)$$

,kde $F [N]$ je síla, $L [mm]$ je vzdálenost podpěr, $b, h [mm]$ jsou rozměry zkušební vzorku.

Pro měření ohybového modulu se podle následující rovnice vypočítají průhyby s' a s'' , které odpovídají daným hodnotám ohybové deformace $\varepsilon_f' = 0,0005$ a $\varepsilon_f'' = 0,0025$: [37]

$$s' = \frac{\varepsilon_f' \cdot L^2}{6 \cdot h} \quad a \quad s'' = \frac{\varepsilon_f''}{6 \cdot h} \quad [mm] \quad (15)$$

,kde s' a $s'' [mm]$ jsou průhyby uprostřed tělesa, ε_f' a $\varepsilon_f'' [-]$ jsou ohybové deformace.

❖ Ohybový modul pružnosti

$$E_f = \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad [MPa] \quad (16)$$

,kde Δs [mm] je rozdíl v průhybu mezi s'' a s' , ΔF [N] je rozdíl mezi silou F'' a silou F' při s'' a s' .

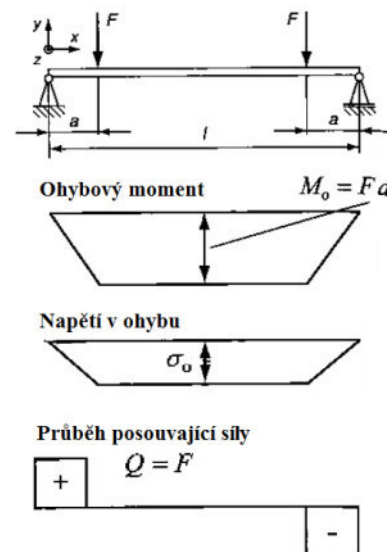
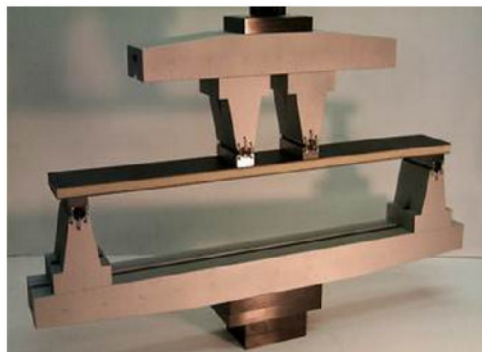
❖ Smyková napětí

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot bh} \quad [MPa] \quad (17)$$

,kde Q [$N \cdot mm^{-1}$] je spojité liniové zatížení.

5.1.2 Zkouška čtyřbodovým ohybem

Vzorek se zatěžuje ve dvou symetricky rozložených místech mezi podpěrami. Výhoda čtyřbodového ohybu spočívá v tom, že zajišťuje konstantní ohybový moment mezi středovými zatěžovacími trny. Tlaková kontaktní napětí způsobená dvěma středovými zatěžovacími trny jsou nižší v porovnání s napětím vyvolaným jedním zatěžovacím trnem při tříbodové zkoušce. Čtyřbodová geometrie se volí tak, aby středová vzdálenost trnů se rovnala 1/3 vzdálenosti podpěr. Vzdálenost mezi podpěrami je zde stejná jako vzdálenost u tříbodového zatěžování, mohou tedy být použita stejná zkušební tělesa. Ohybový moment dosahuje maximální hodnoty pod zatěžujícím břemenem. V tomto případě ohybu nevznikají interlaminární smyková napětí mezi břemeny a tato část nosníku je namáhána pouze čistým ohybem. Smyková napětí vznikají pouze v místech mezi břemenem a podporami. [2],[37],[38]



Obr. 31. Čtyřbodový ohyb, průběh ohybových momentů [2],[39]

Stanovené veličiny mají v první řadě význam srovnávací. Důležité je při těchto testech sledovat druh porušení. Akceptovatelný druh porušení ohýbaného nosníku je porucha vzorku lomem vyvolaným tlakem, nebo tahem. [2]

Výpočtové vzorce pro čtyřbodový ohyb: [37]

$$\sigma_f = \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \quad [MPa] \quad (18)$$

Pro měření ohybového modulu se podle následující rovnice vypočítají průhyby s' a s'' , které odpovídají daným hodnotám ohybové deformace $\varepsilon_f' = 0,0005$ a $\varepsilon_f'' = 0,0025$: [37]

$$s' = \frac{\varepsilon_f' \cdot L^2}{4,7 \cdot h} \quad a \quad s'' = \frac{\varepsilon_f'' \cdot L^2}{4,7 \cdot h} \quad [mm] \quad (19)$$

kde s' a s'' [mm] jsou průhyby uprostřed tělesa, ε_f' a ε_f'' [-] jsou ohybové deformace.

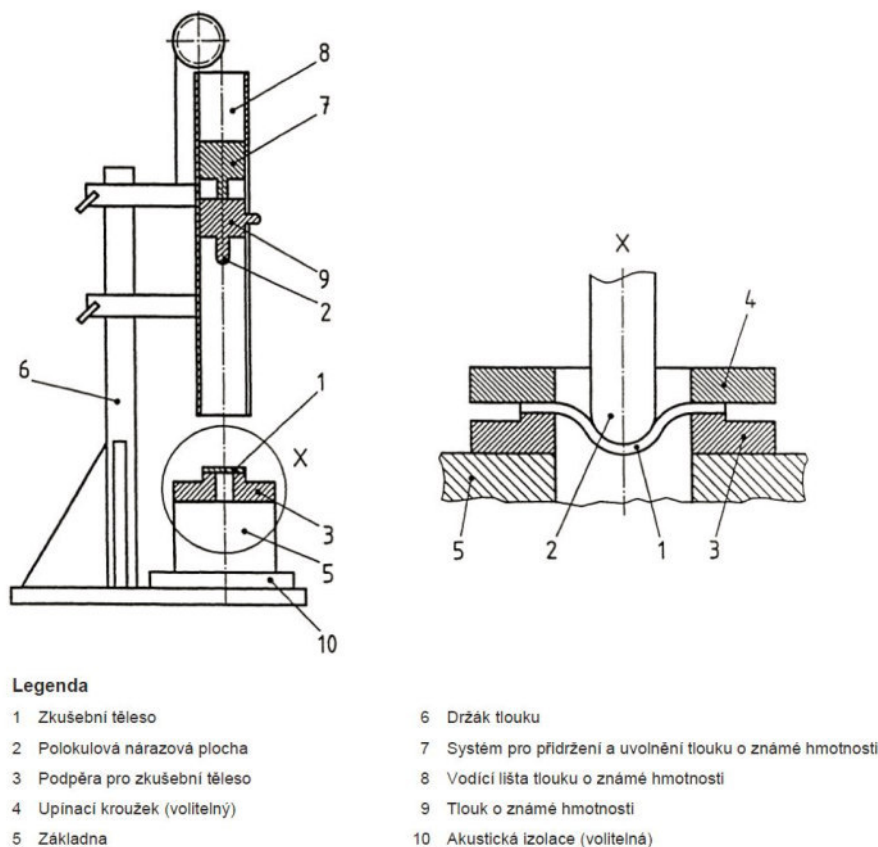
❖ Ohybový modul pružnosti

$$E_f = \frac{0,21 \cdot L^3}{b \cdot h^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad [MPa] \quad (20)$$

,kde Δs [mm] je rozdíl v průhybu mezi s'' a s' , ΔF [N] je rozdíl mezi silou F'' a silou F' při s'' a s' .

5.2 Rázová zkouška – systém padajícího tlouku

Pomocí této zkoušky se stanovuje odolnost materiálu vůči rázům, které na něj mohou působit. V technické praxi se může jednat například o kámen, který náhodně narazí do karoserie vlaku. Zkouška probíhá za přesně definovaných podmínek. Rázová odolnost zkušebního tělesa se stanoví nárazem tlouku známé hmotnosti padajícího volným pádem ze známé výšky. Tlouk dopadá do středu vzorku materiálu kolmo k jeho povrchu. Pád tlouku musí probíhat v podstatě bez tření. Pokud tomu tak není a vzniká tření například od vodících lišt, je nutno toto tření a energetické ztráty zahrnout do výpočtů. Hmotnost závaží tlouku musí být známa s přesností na 1%. Přednostně používaný tlouk má polokulovou leštěnou plochu o průměru $20 \pm 0,2$ mm, nebo $10 \pm 0,1$ mm. Zařízení je citlivé na vibrace, proto je nutná jeho pevná stabilita na kvalitním podkladu. Měření se provádí jak za pokojové tak i nízké teplotě. Schéma padajícího tlouku je na obr. [40]



Obr. 32. Systém padajícího tlouku (příklad) [40]

5.3 Testy adhezních vlastností – peel tests

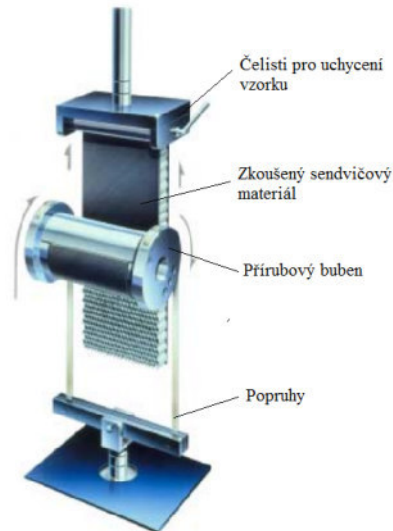
Již od počátku používání adhezních lepidel byly testy přilnavosti materiálů nedílnou součástí lepidel i samotných lepených součástí. Důraz byl tedy kladen nejen na lepidla, ale i na zlepšení, či zvýšení přilnavosti lepených materiálů, často i na úkor odolnosti těchto materiálů vůči vnějším vlivům.

Odolnost proti odlupování je definována jako poměr průměrné síly na jednotku šířky zkušební vzorku měřené podél spáry mezi lepenými vrstvami, které je nutno při testování oddělit. Odlupová napětí vznikají tam, kde jedna nebo více lepených vrstev jsou flexibilní. Adhezní testy ukázaly, že se zvýšením množství lepidla se sice zvýší adheze, ale naopak klesne celková tuhost. Neustálý zájem, o co nejlepší výsledky přilnavosti lepených materiálů, vedl k rozvoji celé škály vhodných testů. Testy se obvykle používají pro porovnání lepidel, ale také ke zjištění houževnatosti, tuhosti, či jiných vlastností.

Mezinárodní zkoušky těchto materiálů provádí firma ASTM International. V následujících podkapitolách jsou popsány nejpoužívanější adhezní testy.

5.3.1 Zkouška odlupu vrstev pomocí navíjecího bubnu

Celé zařízení se skládá z přírubového bubnu a pružné popruhy. Přírubová bubnová svorka slouží k držení vrstvy, která má být odloupena. Buben je vyvážen kolem své osy. Tloušťka jádra není důležitá, avšak vzorek sendvičového materiálu se nesmí při odlupování vrstvy prohýbat. Tato metoda poskytuje přímé srovnání různých lepicích systémů a procesů. [41],[42]



Obr. 33. Zařízení pro test odlupu [41]

Princip měření spočívá v otáčení bubnu, ke kterému je připevněna vnější vrstva sendviče. Buben se otáčí na základě tahové síly působící na popruhy jako. Pevnost v odlupování je definována jako síla potřebná k oddělení dvou členů zkoušeného vzorku daných rozměrů v rámci podmínek zkoušky. [42]

Testem jsme schopni určit průměrný odlupovací moment dle vzorce:

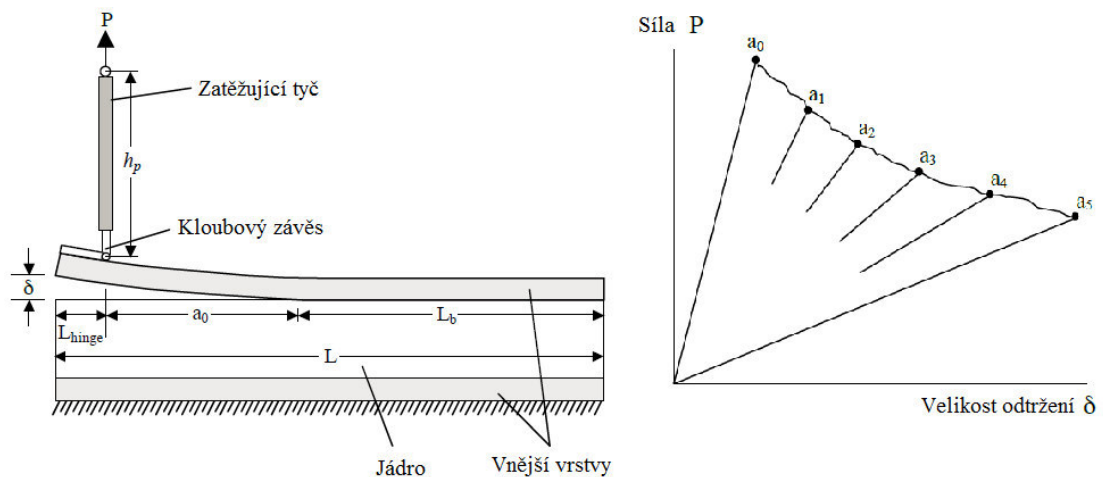
$$T = \frac{(r_0 - r_i)(F_p - F_o)}{W_v} \quad [Nm] \quad (21)$$

,kde r_0 [mm] je rádius obruby pásků, r_i [mm] je poloměr bubnu, $F_p - F_o$ [N] je průměrné zatížení potřebné k odloupení a ohnutí vnější vrstvy, F_o [N] je zatížení, které se vyžaduje pro překonání krouticího momentu, W_v [mm] je šířka vzorku.

5.3.2 Zkouška SBC a DCB odlupem

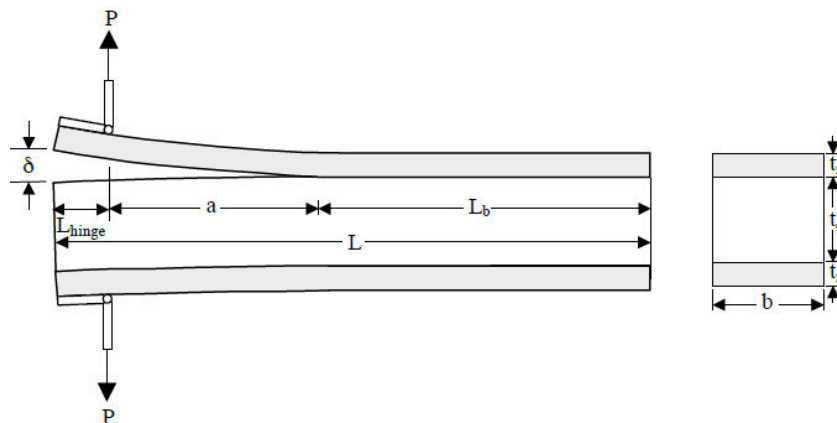
Stejně jako jiné zkoušky se i tento druh zkoušky používá nejen pro sendvičové struktury, ale i pro jiné materiály spojené adhezní vrstvou. Celkovým cílem této zkoušky je měření statické ohybové houževnatosti spojené s odlupem vnější vrstvy od jádra sendviče. Pro tyto

zkoušky byly vyvinuty zkušební vzorky, kde zatěžující síla u zkoušky SBC působí tahem na horní vrstvu sendvičového vzorku, zatím co spodní vrstva je pevně připevněna k základně a je tak zabráněno prohnutí vzorku. Kontrolována je zatěžující síla P a velikost odtržení vnější vrstvy δ . Vyhodnocení vzorků je pak z poměru síly P a velikosti odtržení δ . [43]



Obr. 34. Znárodnění principu testu a průběhu zatěžování [43]

Metoda DCB je rozdílná v tom, že zatěžující síly působí na vnější vrstvy ze dvou stran, jak je znázorněno na Obr. 35. Vyhodnocení testu je obdobné.



Obr. 35. Zatížení vzorku dvojicí sil – metoda DCB [43]

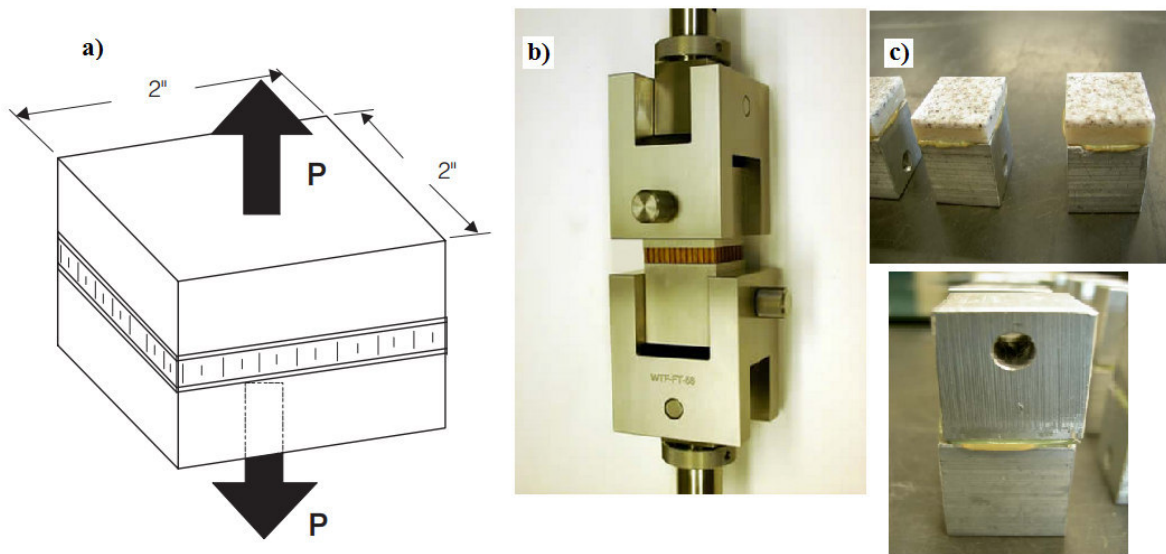
5.4 Zkouška tahem naplocho (Flatwise Tensile Test)

Tento test se používá ke stanovení základní pevnosti v tahu, nebo také pevnosti vazby vnějších potahových vrstev k jádru. Zkouška se provádí na rozměrově přesně stanovených vzorcích, které jsou přilepeny ke kovovým čelistem a společně upevněny v testovacím stroji. Následně je sendvič zatížen tahem kolmo k rovině vzorku. Množství lepidla je ade-

kvátní k ploše vzorku, a musí mít větší pevnost lepeného spoje než potenciální pevnost samotného testovaného vzorku. Je třeba dbát na správnou vytvrzovací teplotu lepidla. Průměrná pevnost v tahu naplocho může být u sendvičové konstrukce spočtena dle vzorce: [44],[45]

$$\sigma_p = \frac{P}{l \cdot w} \quad [MPa] \quad (22)$$

,kde P [Nm] je mez pevnosti, l [mm] je délka vzorku, w [mm] je šířka vzorku.



Obr. 36. Zkouška tahem naplocho; b) Upevnění vzorku v čelistech;

c) Lepený spoj [44],[46]

Pevnost v tahu naplocho lepeného spoje sendvičové struktury představuje nejvyšší síly, které tento spoj může vydržet těsně před selháním. Selhání může nastat v lepeném spoji, nebo v testovaném sendvičovém vzorku. Je tedy nepravděpodobné, že by každý vzorek měl stejnou poruchu, a proto se testuje vždy nejméně deset vzorků. Při měření klesá nebo stoupá statická pevnost v tahu naplocho, což je představující pro předcházení vzniku poruch, nebo vyhodnocování velikosti odporu lepidla. Druh poruch, které mohou nastat je celá řada. [45]

Typy poruch: poškození vnější vrstvy, nebo jádra, selhání přilnavosti lepidla a další. [45]

6 DALŠÍ APLIKACE SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ

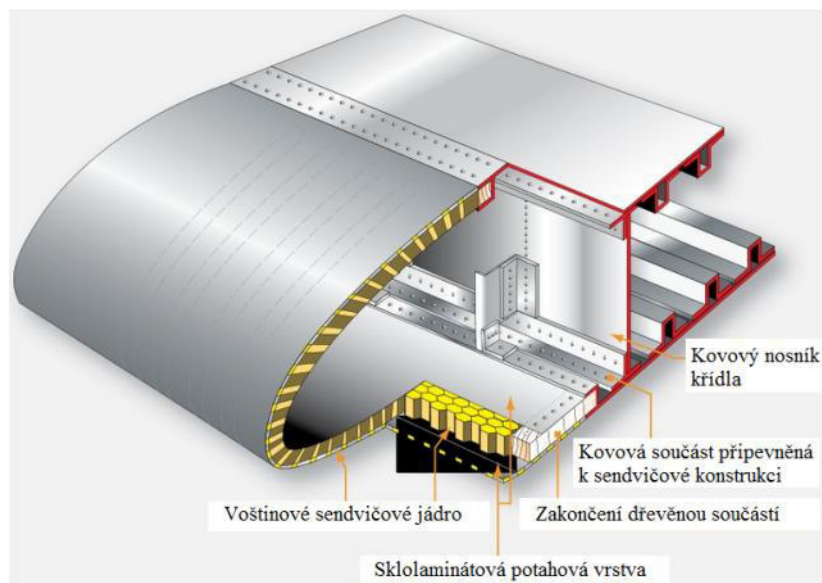
Tato kapitola obsahuje ukázky použití sendvičových konstrukcí v dopravním průmyslu. Je nespočet českých i zahraničních firem, které se zabývají výrobou produktů z kompozitů, nebo vrstvených materiálů. Ukázky jsou zobrazeny a popsány níže.

Firma 5m s.r.o. představuje hliníkové sendvičové panely s vynikající mechanickou odolností při zachování velmi nízké hmotnosti. Firma dostala cenu Inovace roku 2008. [29]



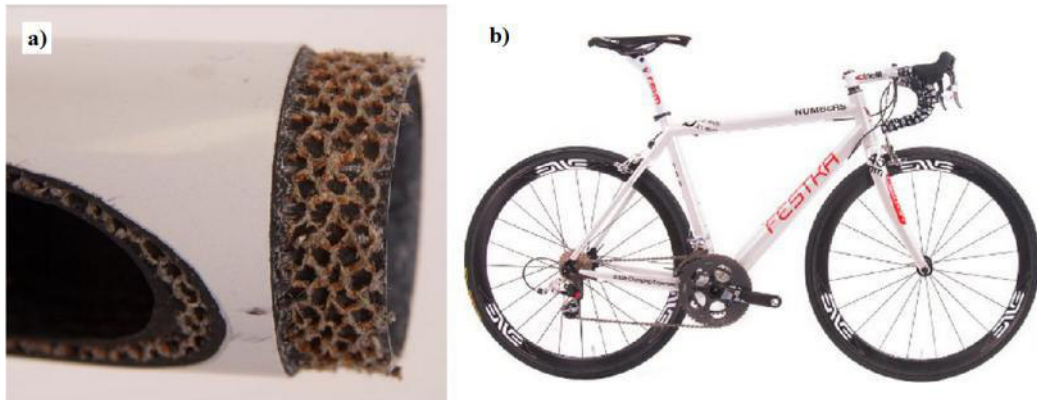
Obr. 37. Sendvičová konstrukce použita k výrobě zadního křídla automobilu [29]

Dalším příkladem je použití zakřivené sendvičové konstrukce, která je použita jako opláštění křídla letadla.



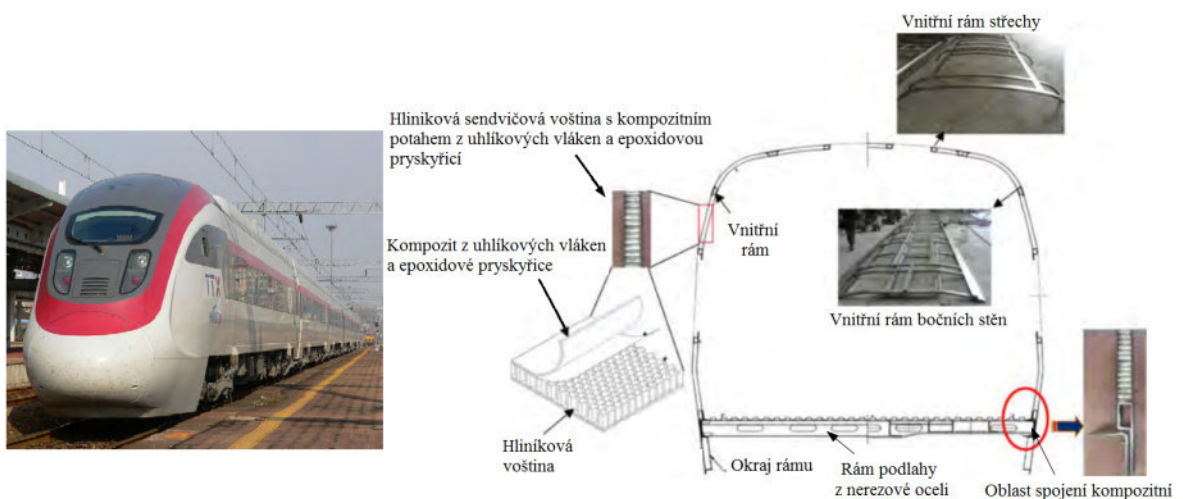
Obr. 38. Část křídla letounu – použití sendviče s voštinovým jádrem [47]

Jízdní kolo Festka je ručně vyrobené z vrstvené konstrukce. Jde o karbonový rám vyrobený ze sendvičových trubek. Největší výhodou je velmi nízká hmotnost, a to 5,5 kg v kombinaci s vysokou odolností proti nárazu (například při pádu z kola). Tato jízdní kola jsou prototypově vyráběna na zakázku dle přesných požadavků cyklistických závodníků.



Obr. 39. a) Trubka rámu kola; b) Kolo Festka ze sendvičových trubek; [48],[49]

Korejský vlak TTX navržen z lehčených sendvičových konstrukcí s podporou vnitřního ocelového rámu. Ocelová podlaha zvyšuje stabilitu a pevnost. Kapotáž vlaku je vyrobena z prepregů obsahujících uhlíková vlákna a epoxidovou pryskyřici jako potahové vrstvy v kombinaci s hliníkovým voštinovým jádrem. Kapoty vlaků jsou běžně vyráběny vrstvením materiálů, lepením adhezních vrstev mezi jádro a potah, vytvrzováním v autoklávu a vakuovými technologiemi. Sendvičové kapoty snižují celkovou hmotnost až o 39% v porovnání s kovovými. Také je nižší zatížení nosného rámu a to až o 28%. [50]



Obr. 40. Korejský vlak TTX ze sendvičových panelů a ocelovým rámem [50]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Úkolem této diplomové práce je navrhnout a vyrobit vhodnou kombinaci materiálů zakřivených sendvičových konstrukcí, které svým materiálovým složením odpovídají komponentům pro vnitřní i vnější obkladové aplikace. Vzorky takto navrhnuté konstrukce jsou vyrobeny v různých tloušťkách a následně mechanicky testovány na zkušebních zařízeních. Zakřivené sendviče budou podrobeny zkoušce tříbodového a čtyřbodového ohybu, kdy bude posuzován vliv zakřivení na změnu ohybových vlastností v porovnání s konstrukcí rovinnou. Další testování bude probíhat na čtvercových sendvičových tělesech pomocí zkoušky tahem naplocho. V neposlední řadě budou ověřeny vlastnosti vybrané konstrukce po rázu v tříbodovém ohybu.

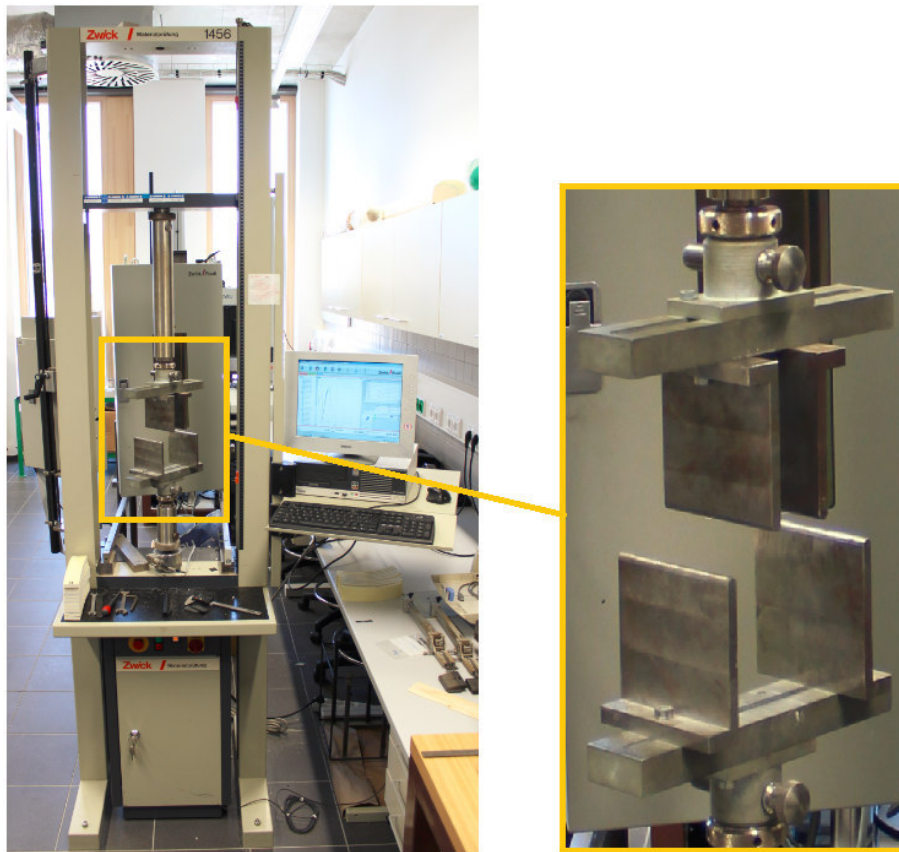
Základní postupové body pro vyhodnocení a dosažení cílů:

- ❖ Výběr vhodného materiálového složení
- ❖ Návrh tvarového zakřivení sendvičové struktury
- ❖ Výroba a zpracování zkušebních vzorků
- ❖ Zkouška tříbodovým ohybem
- ❖ Zkouška čtyřbodovým ohybem
- ❖ Vyhodnocení testovaných sendvičových vzorků ohybem
- ❖ Zkouška tahem naplocho (Flatwise Tensile Test)
- ❖ Hodnocení zbytkových ohybových vlastností po rázu

8 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

8.1 Univerzální zkušební stroj ZWIC 1456

Na univerzálním zkušebním stroji ZWIC 1456 Obr. 41 byly provedeny ohybové zkoušky a zkoušky tahem naplocho. Měření dat je prováděno softwarově v programu TestExpert II. Program během testu graficky zaznamenává průběh zvolených závislostí a také data statisticky vyhodnocuje.



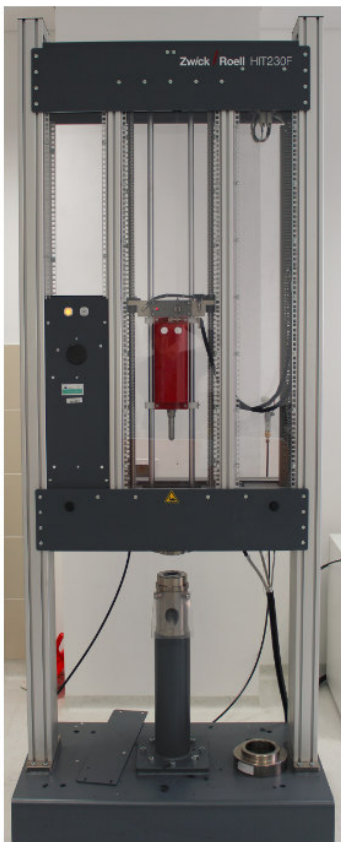
Obr. 41. Univerzální zkušební stroj ZWICK

Tab. 7. Technické parametry zkušebního stroje ZWICK

Technické parametry	
Max. zkušební síla	20 kN
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Výška stroje	1284 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 Kg

8.2 Padostroj ZWICK ROELL HIT 230F

Padostroj je určen pro zkoušky polymerních a kompozitních materiálů a je navržen pro více-osé rázové zkoušky. Testovací těleso o hmotnosti 23,17 Kg dopadá na zkušební vzorek z výšky 440 mm. Výšku je možno libovolně nastavovat. Průběh testu je opět softwarově zpracováván, naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny v tabulce a vyneseny do grafů. V našem případě docházelo ke zmáčknutí vzorku při jeho upevnění v čelistech, což způsobovalo deformaci a vzorek byl pro další měření znehodnocen. Z toho důvodu byl použit mechanický (ruční) padostroj Obr. 43.



Obr. 42 Padostroj ZWIK



Obr. 43. Mechanický (ruční) padostroj

9 NAVRŽENÉ A POUŽITÉ MATERIÁLY

Pro testování byly použity reálné materiály, které se běžně používají pro sendvičové struktury v technické praxi. Mechanické vlastnosti vybraných sendvičových materiálů jsou popsány v následující části.

9.1 Potahové vrstvy navržených sendvičových struktur

Jako potahové vrstvy byly zvoleny kompozitní prepregové materiály.

9.1.1 Prepreg Gurit PHG 840-300-42

Byl vybrán prepregový materiál, který je vyvinut pro průmyslové a železniční aplikace s vysokými specifickými vlastnostmi, zvláště vynikající tepelnou odolností a výbornými FST vlastnostmi. Konkrétní vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách. Je vhodný pro použití s monolitickými, nebo sendvičovými strukturami. Výhodou je dlouhá skladovatelnost. Vytvrzování je možné provést v lisu, autoklávu, nebo vytvrzovací peci. V našem případě byla zvolena vytvrzovací pec.

Tab. 8. Mechanické vlastnosti prepregu PH840-300-42

Vlastnosti	Norma	Hodnota
Pryskyřice		Fenolitická
Hmotnost prepregu	EN 2329	525 ± 30 [g/m ²]
Těkavost	EN 2230 (160°C/10min)	< 6.0 [%]
Tok pryskyřice	2332 (3 vrstvy, 135°C, 8 min, 4 bar)	> 10 [%]
Lepivost		T0, T1, T2
Materiál vláken		Skelná vlákna
Hustota tkaniny	EN 2331	296 [g/m] ± 5[%]
Vazba		8H saténová
Provozní teplota		-55 [°C] až +80[°C]
Obsah pryskyřice	EN 2331	42 ± 3[%]

Tab. 9. Vytvrzovací hodnoty prepregu PH 840-300-42

Specifika	Standartní cykly
Teplota [°C]	120;130;140;160 [°C]
Tlak [MPa]	0,07 – 0,04 [MPa]
Doba vytvrzování [min]	90;60;30;10[min]

Tab. 10. Mechanické vlastnosti prepregu

Vlastnosti	Teplota	Norma	Hodnota
Ohybová pevnost	80 [°C]	ISO 178	300-450 [MPa]
Ohybový modul	80 [°C]	ISO 178	19-22 [GPa]
Odlup na navíjecím bubnu	80 [°C]	EN 2243-3	110 N/75 [mm]
Tg (TMA)	-	TMA	>80 [°C]

9.2 Jádno

9.2.1 Termoplastická polymerní pěna AIREX T90.100

Jedná se o recyklovatelnou termoplastickou polymerní (PET) pěnu s uzavřenou buněčnou strukturou používanou jako jádrový materiál. V dopravním průmyslu je používána na základě vynikající odolnosti proti hoření, kouři a toxickým látkám. Vyznačuje se velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a mimořádnou odolností proti únavě (vysoká únavová pevnost). Dalšími přednostmi jsou chemická stabilita, tepelná izolace, odolnost proti UV záření a zanedbatelná absorpce vody. Tato pěna má při zpracovávání a po vytvrzení dlouhodobou tepelnou stabilitu (až 100°C). Je určena pro snadné použití ve všech zpracovatelských oblastech a také v kombinaci s pryskyřicí, protože má vynikající adhezní vlastnosti. Je vhodná pro všechny aplikace sendvičových struktur jako jádrový materiál vyžadující vysokou požární odolnost.

- ❖ Aplikace: podlahové, střešní krytiny, bočnice a přední masky vlaků a jiných dopravních prostředků, části interiérů, krytování motorů apod.
- ❖ Způsob výroby pěny: kontaktním litím, vakuovou infuzí, lepením, vstřikováním a další.



Obr. 44. Polymerní pěna AIREX T90.100 [21]

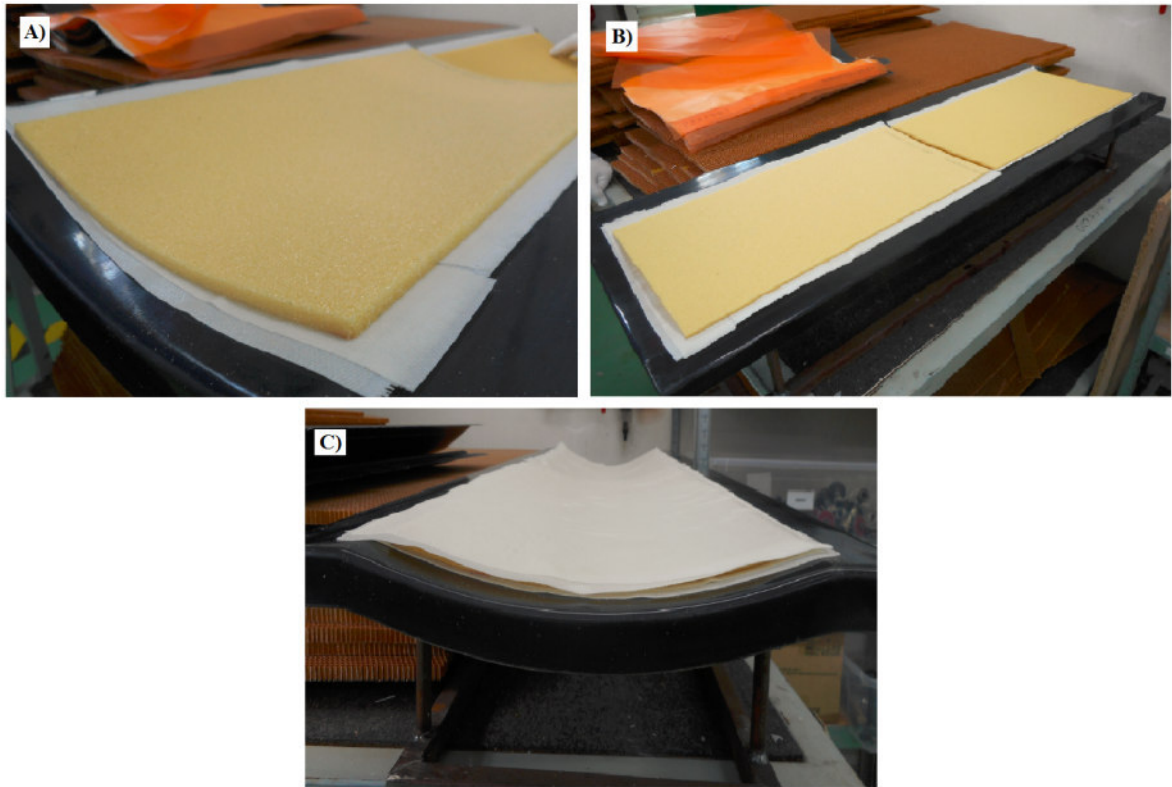
Tab. 11. Vlastnosti polymerní pěny T90.100

Vlastnosti materiálu AIREX T90.100	Norma	Jednotka	Hodnota	
Hustota	ISO 845	[kg/m ³]	Průměr	110
			Typ. rozsah	105-115
Pevnost v tlaku kolmo k rovině	ISO 844	[MPa]	Průměr	1,4
			Minimum	1,2
Tlakový modul kolmý k rovině	DIN 53421	[MPa]	Průměr	85
			Minimum	75
Pevnost v tahu kolmá k rovině	ASTM C297	[MPa]	Průměr	2.2
			Minimum	1.6
Modul pružnosti v tahu kolmý k rovině	ASTM C297	[MPa]	Průměr	120
			Minimum	90
Pevnost ve smyku	ISO 1922	[MPa]	Průměr	0,8
			Minimum	0,7
Modul pružnosti ve smyku	ISO 1922	[MPa]	Průměr	20
			Minimum	18
Prodloužení při přetržení	ISO 1922	[%]	Průměr	10
			Minimum	5
Tepelná vodivost při pokojové teplotě	ISO 8301	[W/m.K]	Průměr	0,033

9.3 Výroba a zpracování zkušebních vzorků pro testování

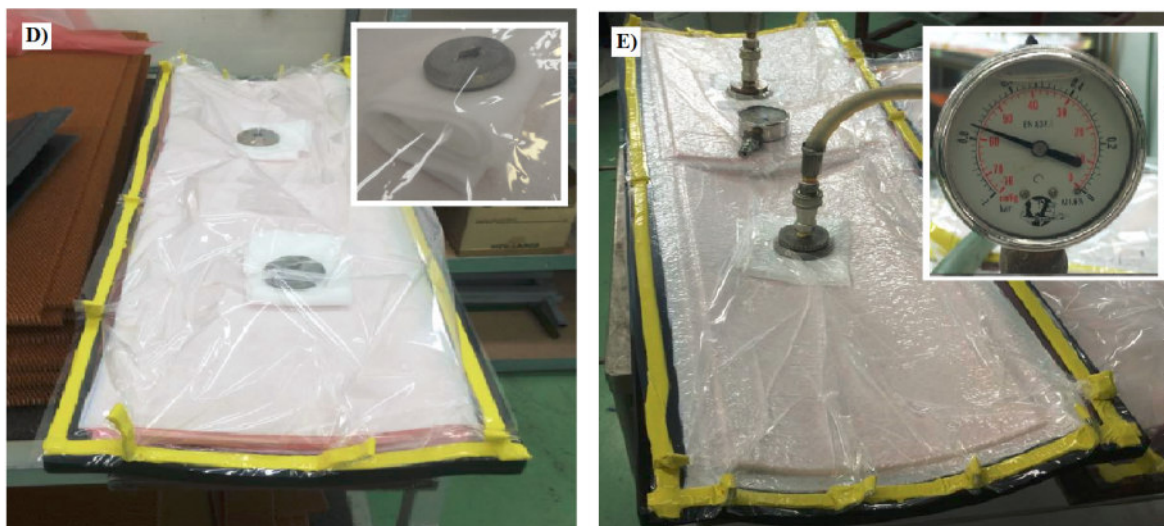
Zkoumané zakřivené sendvičové konstrukce byly vyrobeny z výše uvedených materiálů. Výroba proběhla v otevřených formách vakuovou technologií a vytvrzení bylo provedeno ve vytvrzovací peci.

Jako první byly nařezány prepregy PH840-300-42 na rozměry odpovídající formě. Pěnová jádra AIREX T90.100 byly nařezány na obdobnou velikost. Forma byla odmaštěna a očištěna od nečistot. Z připraveného prepregu byla odstraněna krycí ochranná fólie a samotný prepreg byl vložen do formy. Potah zakřivené sendvičové struktury se skládal ze dvojice vrstev prepregu z každé strany. Následně na dvojici vrstev prepregu byla položena pěna jako jádrový materiál (Obr. 45A, B) a pro uzavření celé sendvičové struktury byla na pěnu položena další dvojice vrstev prepregu Obr. 45C.



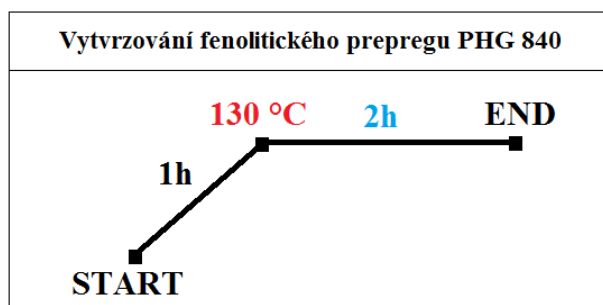
Obr. 45. Výroba sendvičové struktury
(potah a jádro)

Na tyto navrstvené materiály byla položena separační fólie. Dalším krokem bylo přidání odtrhová rohož pro zachycení přebytečné pryskyřice při vytvrzování. Následovalo položení držáků odsávacích ventilů Obr. 46D. Pod ně byla vložena vrstva odtrhové rohože z důvodu ochrany vtlačení kovového držáku ventilu do sendvičové konstrukce při vakuování. Téměř posledním krokem bylo připevnění vakuové fólie pomocí žluté těsnicí pásky k okrajům formy Obr. 46. Žlutá těsnicí páska zajišťuje bezpečné a neprodyšné přilnutí vakuové fólie k formě. Jako poslední byly zasunuty odsávací ventily do držáků a pomocí vakuových pump byl odsát veškerý vzduch z vaku. Netěsnosti, nebo nasávání nežádoucího vzduchu v důsledku podtlaku pod fólií byly kontrolovány tlakovým měřidlem. Ideální podtlak pod fólií byl 0,8 MPa.



Obr. 46. Výroba sendvičové struktury (separační, odtrhové, vakuovací fólie)

Následně byla takto připravená forma vložena do vytvrzovací pece. Vytvrzování probíhá ve dvou fázích, kdy se během časového intervalu 1h zvyšuje teplota až na hodnotu 130°C. Následuje výdrž na této teplotě po dobu 2h. Ukázkou konkrétního vytvrzovacího cyklu pro použitý prepreg zobrazuje Obr. 47.



Obr. 47. Vytvrzovací cyklus pro prepreg

Stejný postup výroby sendvičových panelů se používá i pro reálné aplikace v technické praxi. Všechny vyrobené sendvičové desky byly orýsovány a nařezány na testovací tělesa o šířce 45 mm a délce 210 mm. Následující tabulka udává seznam informací o vyrobených sendvičových panelech, které byly použity pro ohybové zkoušky.

Tab. 12. Seznam vyrobených a testovaných vzorků pro ohybovou zkoušku

Typ vzorku	Označení vzorku	Tloušťka jádra [mm]	Počet testovaných kusů	Zakřivení vzorku [mm]	Způsob uložení	Způsob testování
Přímý	R0-T5	5	10	0	-	Třibodově Čtyřbodově
	R0-T10	10	10			
	R0-T20	20	10			
Zakřivený	R200-T5	5	20	200	Konkávně Konvexně	Třibodově Čtyřbodově
	R200-T10	10	20			
	R200-T20	20	20			
Zakřivený	R400-T5	5	20	400	Konkávně Konvexně	Třibodově Čtyřbodově
	R400-T10	10	20			
	R400-T20	20	20			



Obr. 48. Sendvičové desky

10 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ OHYBOVÝCH ZKOUŠEK

Tato kapitola je zaměřena na zpracování výsledků z jednotlivých měření při ohybových zkouškách. Naměřená data jsou zpracována a rozdělena podle velikosti zakřivení do tabulek. Jsou zde ukázky s popisem poruch a deformací, které vždy zobrazují nejčastěji se vyskytující poruchy sendvičových struktur pro konkrétní sérii měřených těles. Všechna naměřená data byla vyhodnocena ve statistickém softwaru Minitab 17. Statistické veličiny vyhodnocené tímto programem pro tuto práci byly:

❖ Aritmetický průměr

Aritmetický průměr (\bar{x}) je definován jako součet všech hodnot proměnných (x_i) vydělený jejich počtem (n). Popisuje soubor mnoha hodnot a je náchylný na vzdálené hodnoty. [51]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (23)$$

❖ Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka (s) se vypočítá jako druhá odmocnina rozptylu. Je definována jako poměr součinu kvadratických odchylek naměřených hodnot z aritmetického průměru a celkovým počtem proměnných snížený o jedna. [51]

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (24)$$

❖ Minimum a maximum

Tyto statistické parametry určují minimální (min), nebo maximální (max) hodnotu v celém souboru měření. [51]

❖ Dolní kvartil

Dolní kvartil (Q_1) rozděluje datový soubor tak, že 25 % hodnot je menších než tento kvartil a zbytek tj. 75 % je větších, nebo rovno tomuto kvartilu. [51]

❖ Medián

Medián neboli střední kvartil rozděluje datový soubor tak, že polovina hodnot je menších než medián a polovina hodnot je větších, nebo rovno. [51]

❖ Horní kvartil

Horní kvartil (Q_2) rozděluje datový soubor tak, že 75 % hodnot je menších než tento kvartil a zbytek tj. 25 % je větších, nebo rovných. [51]

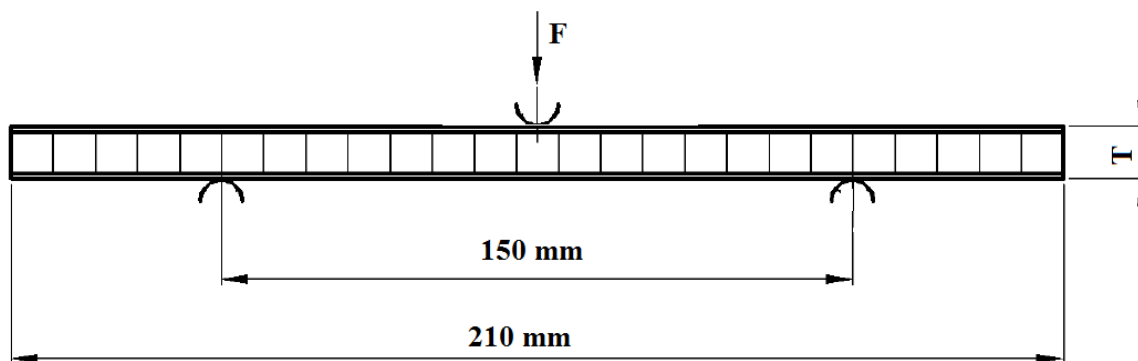
❖ Interkvartilové rozpětí

Tato statistická hodnota (IQR) je mírou variability souboru a je definována jako vzdálenost mezi horním a dolním kvantilem. [51]

$$IQR = x_{0,75} - x_{0,25} \quad (25)$$

10.1 Zkouška třibodovým ohybem

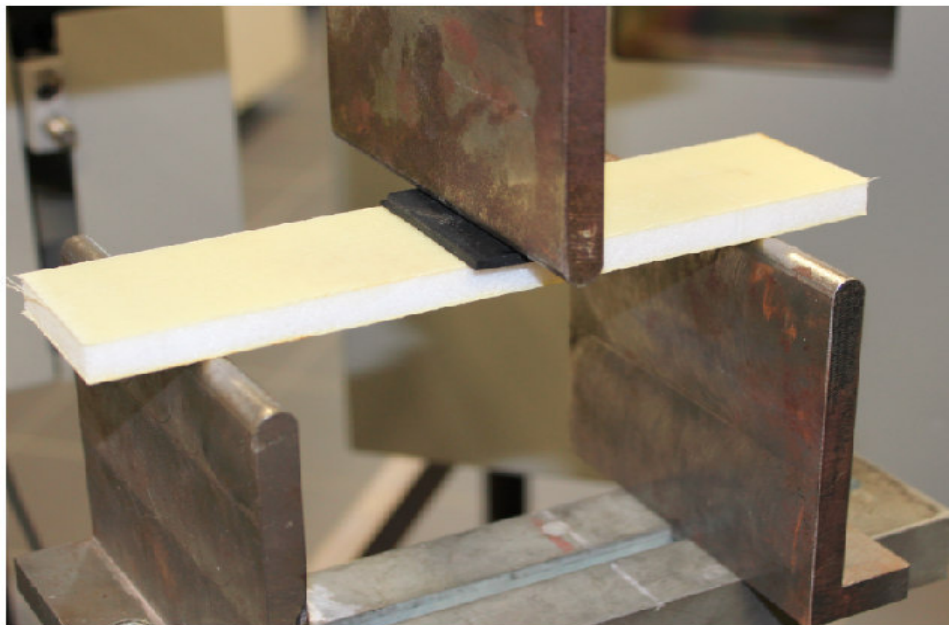
Zkouška sendvičových vzorků byla prováděna na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456. Hodnoty sledované v průběhu této zkoušky byly modul pružnosti v ohybu (efektivní modul) a mez pevnosti v ohybu. Vzdálenost podpěr, na kterých byl vždy testovaný vzorek uložen, byla 150 mm a zatěžující síla působila uprostřed (Obr. 49). Rychlost posuvu příčnicku při měření modulu pružnosti byla 5 mm/min a následná rychlost testu byla 10 mm/min.



Obr. 49. Rozměry přípravku pro třibodový ohyb

10.1.1 Přímé sendvičové panely zatížené třibodovým ohybem

Jako první byly naměřeny a vyhodnoceny rovné (přímé) sendvičové vzorky o tloušťkách 5, 10 a 20 mm. Celkově se měřilo 30 vzorků, tedy 10 od každé tloušťky jádra. Vyhodnocená data z měření přímých prutů jsou uvedena v tabulkách Tab. 13. a 14. Tato vyhodnocená data přímých vzorků jsou považována za etalonový materiál a všechna ostatní data jsou s nimi porovnávána.



Obr. 50. Třibodový ohyb přímého sendvičového prutu

Označování vzorků v tabulkách:

R0-T5
 ↳ Tloušťka jádra v mm
 ↳ Velikost poloměru v mm

Tab. 13. Modul pružnosti v ohybu testovaných struktur v [MPa]

Přímé pruty o tloušťkách jádra T=5, 10 a 20 [mm]								
Vzorek	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R0_T5	6535,00	274,70	6120,00	7000,00	6292,50	6525,00	6755,00	462,50
R0_T10	2141,10	83,60	2000,00	2260,00	2075,00	2160,00	2195,00	120,00
R0_T20	524,50	24,27	474,00	551,00	516,25	526,50	545,25	29,00

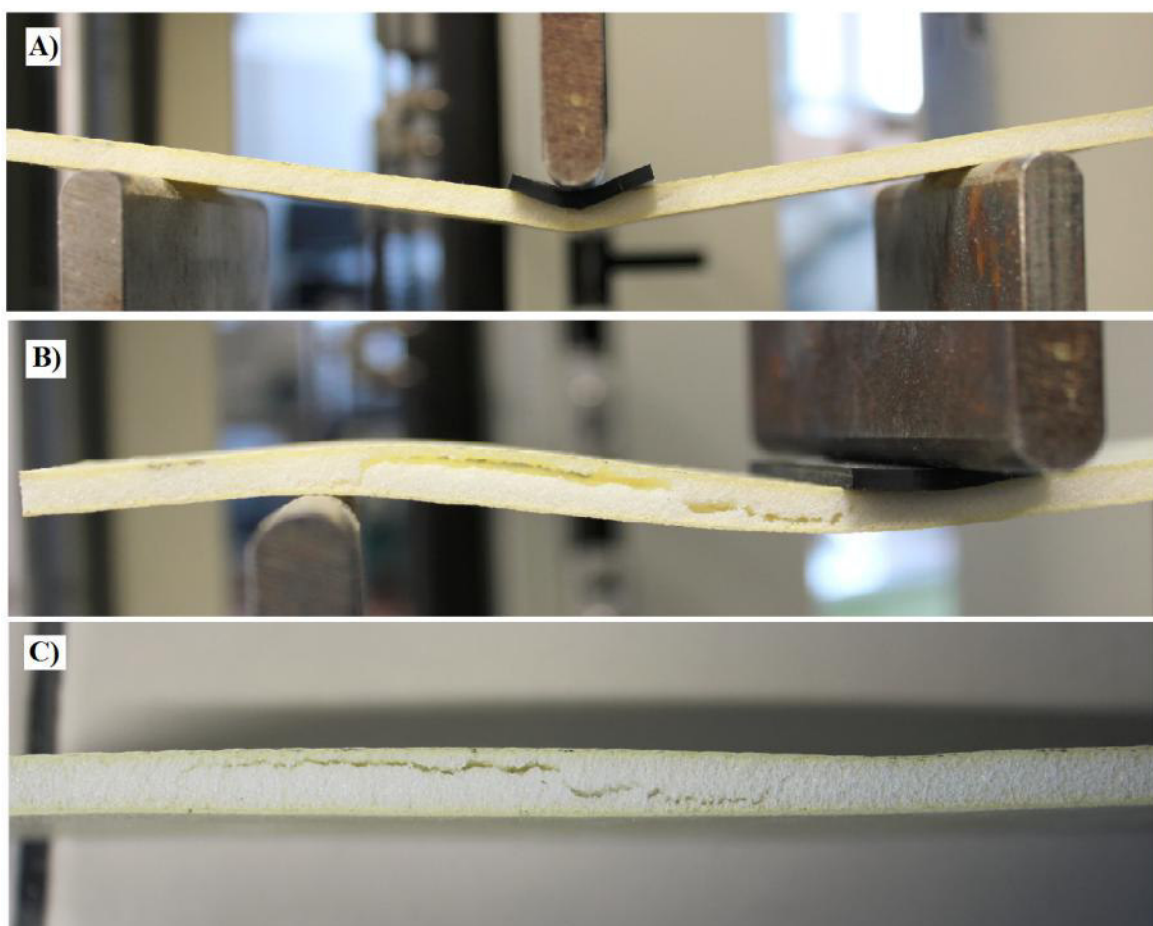
Tab. 14. Mez pevnosti v ohybu testovaných struktur v [MPa]

Přímé pruty o tloušťkách jádra T=5, 10 a 20 [mm]								
Vzorek	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R0_T5	66,22	3,35	61,00	71,10	63,08	66,85	68,70	5,63
R0_T10	21,97	0,94	20,90	23,20	21,05	22,20	22,85	1,80
R0_T20	8,36	0,23	8,07	8,82	8,20	8,34	8,46	0,26

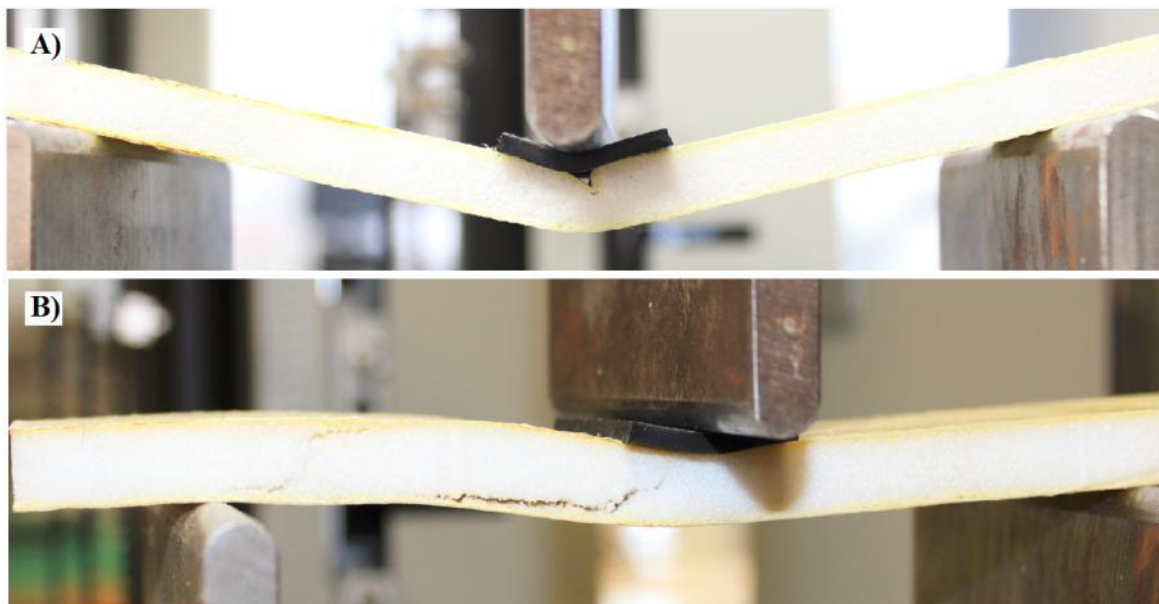
❖ Poruchy přímých prutů při tříbodovém ohybu

Tříbodovým zatěžováním vzorků nedocházelo vždy k jejich úplnému zničení. Při testování přímých sendvičových prutů se vyskytly tři typy poruch. Šlo o lokální porušení, smykové porušení jádra a delaminace vnější vrstvy s následným porušením jádra.

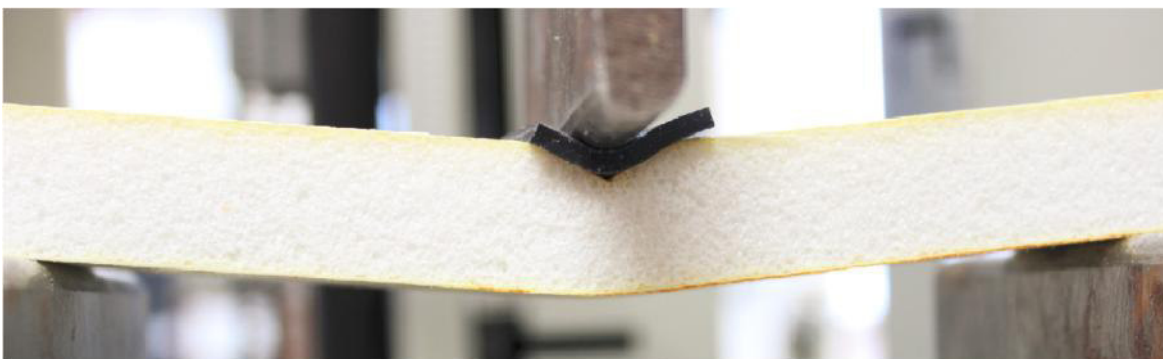
Ohybovým zatěžováním vzorků s tloušťkou jádra 5 mm docházelo nejčastěji ke smykovým porušením jader (Obr. 51B,C). Další častou poruchou bylo lokální porušení v místě zatížení (Obr. 51A). Většina přímých panelů tloušťky 10 mm byla porušena pouze lokálním poškozením v místě zatížení. Ojediněle se objevilo smykové poškození jádra (Obr. 52B). Všechny přímé vzorky o tloušťce jádra 20 mm byly při tříbodovém ohybu poškozeny pouze lokálním porušením v místě zatěžování (Obr. 53).



Obr. 51. Porušení přímého panelu s jádrem 5 mm



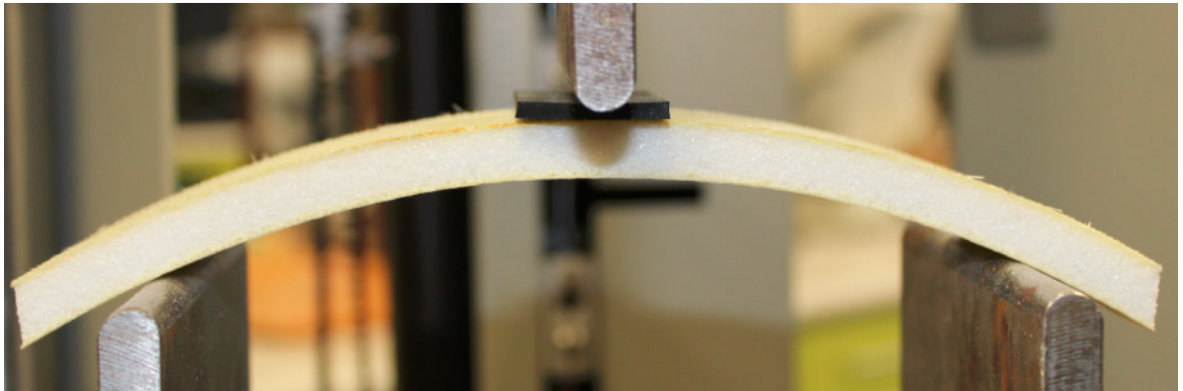
Obr. 52. Porušení přímého panelu s jádrem 10 mm



Obr. 53. Lokální porušení přímého panelu s jádrem 20 mm

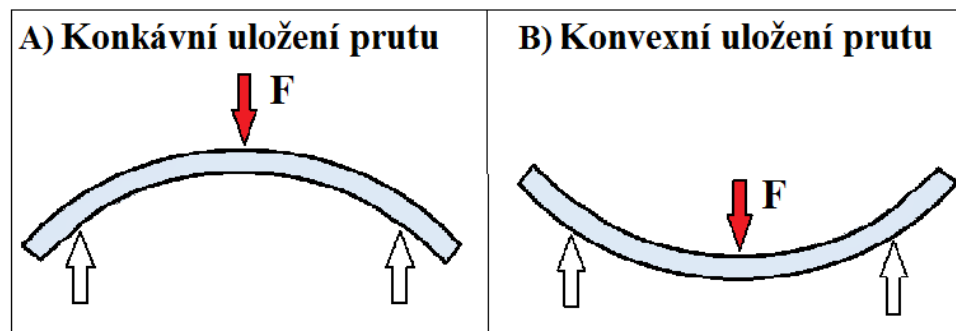
10.1.2 Zakřivené sendvičové panely zatížené tříbodovým ohybem

Zakřivené sendvičové vzorky byly testovány za stejných podmínek jako panely přímé. Postup testování byl shodný a měřilo se vždy 10 zakřivených vzorků, a to o stejných tloušťkách jako u panelů rovinných. Vždy nejprve se zakřivením o poloměru R400 a následně R200 mm. U této zkoušky probíhalo měření ve dvou fázích. V první fázi byly zakřivené vzorky do testovacího zařízení orientovány v konkávním směru. Po naměření všech 60 vzorků se měření opakovalo, ale v konvexně orientovaném směru uložení panelu mezi podpěrami. Celkově bylo tedy naměřeno 120 vzorků. Obr. 55 zobrazuje orientaci uložení při tříbodovém ohybu.



Obr. 54. Konkávní uložení zakřiveného sendviče

Vyhodnocená data ze třibodového měření zakřivených panelů jsou uvedena v tabulkách Tab. 15., 16. Tato vyhodnocená data budou srovnána s etalonovými přímými vzorky.



Obr. 55. Schematické znázornění zakládání panelů mezi podpěrami

Způsob označování vzorků v tabulkách zakřivených prutů:

R400-T5-B

- Způsob uložení (A-konkávní; B-konvexní)-viz. obr. 55
- Tloušťka jádra v mm
- Velikost poloměru v mm

Tab. 15. Modul pružnosti v ohybu testovaných struktur v [MPa]

Tloušťka jádra T=5 mm								
Vzorek	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400-T5-A	6132,00	186,00	5820,00	6320,00	5957,50	6205,00	6312,50	355,00
R400-T5-B	6442,00	257,70	5940,00	6720,00	6252,50	6490,00	6665,00	412,50
R200-T5-A	5552,00	493,00	4960,00	6480,00	5150,00	5355,00	5948,00	798,00
R200-T5-B	6234,00	248,20	5740,00	6620,00	6087,50	6290,00	6412,50	325,00
Tloušťka jádra T=10 mm								
Vzorek	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400-T10-A	2245,00	135,10	1960,00	2470,00	2185,00	2260,00	2332,50	147,50
R400-T10-B	2238,00	175,20	1770,00	2400,00	2232,50	2270,00	2327,50	95,00
R200-T10-A	1994,00	175,00	1540,00	2160,00	1945,00	2035,00	2107,50	162,50
R200-T10-B	2091,00	162,50	1720,00	2260,00	2027,50	2100,00	2220,00	192,50
Tloušťka jádra T=20 mm								
Vzorek	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400-T20-A	495,50	22,82	448,00	530,00	482,25	496,00	511,50	29,25
R400-T20-B	515,20	38,50	427,00	562,00	506,30	523,50	535,80	29,50
R200-T20-A	446,40	21,07	402,00	469,00	428,75	453,00	462,00	33,25
R200-T20-B	493,90	28,52	448,00	531,00	472,00	496,00	518,50	46,50

Tab. 16. Mez pevnosti v ohybu testovaných struktur v [MPa]

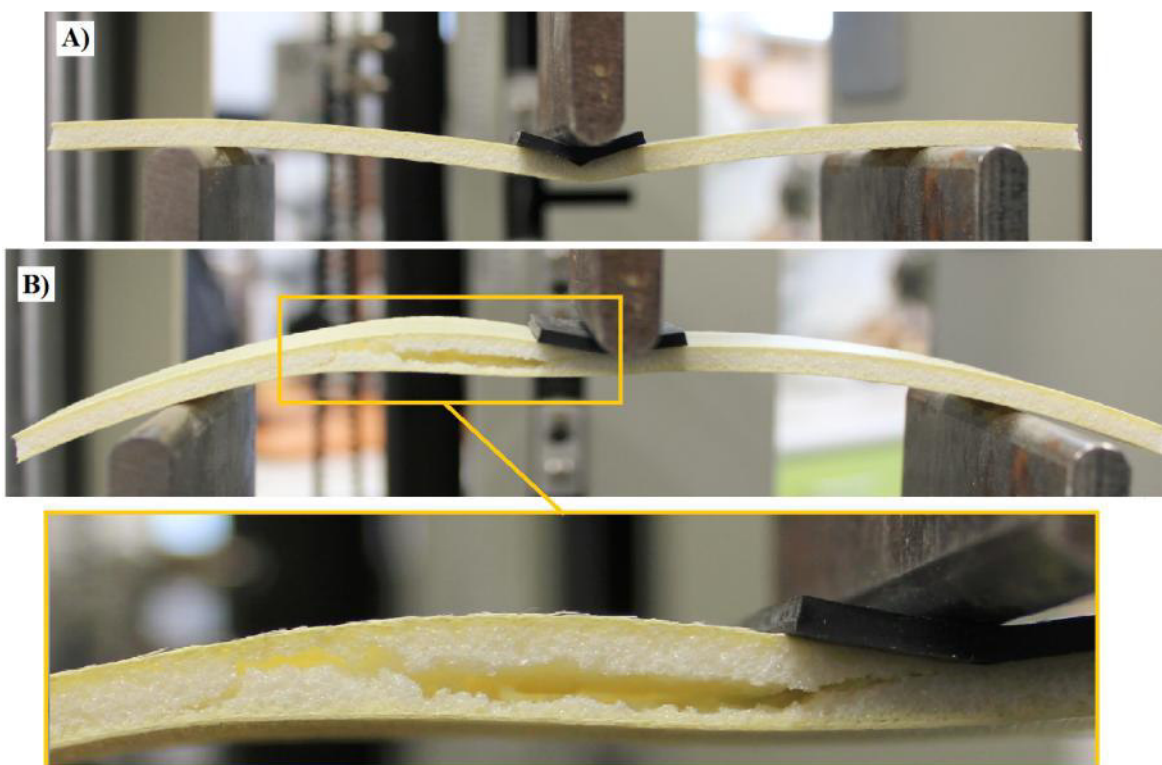
Tloušťka jádra T=5 mm								
Vzorek	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400-T5-A	62,67	2,82	57,60	65,70	60,47	63,65	64,98	4,50
R400-T5-B	60,74	2,89	57,20	65,20	58,15	60,00	63,43	5,28
R200-T5-A	60,17	9,59	40,00	72,00	53,45	62,65	67,08	13,63
R200-T5-B	56,6	3,86	51,1	63,20	53,30	56,80	59,52	6,22
Tloušťka jádra T=10 mm								
Vzorek	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400-T10-A	27,50	1,35	25,60	29,30	26,28	27,55	28,85	2,58
R400-T10-B	25,69	0,89	24,10	27,20	25,18	25,70	26,35	1,18
R200-T10-A	28,32	1,50	26,20	30,60	26,95	28,70	29,53	2,58
R200-T10-B	24,80	3,17	20,40	31,30	23,13	24,25	25,75	2,63
Tloušťka jádra T=20 mm								
Zakřivení	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400-T20-A	8,65	0,58	7,79	9,63	8,17	8,58	9,20	1,03
R400-T20-B	8,71	0,53	8,01	9,64	8,12	8,745	9,05	0,93
R200-T20-A	8,49	0,24	8,00	8,75	8,33	8,505	8,71	0,38
R200-T20-B	8,34	0,72	6,92	9,30	7,98	8,285	9,08	1,10

❖ Poruchy zakřivených prutů při tříbodovém ohybu

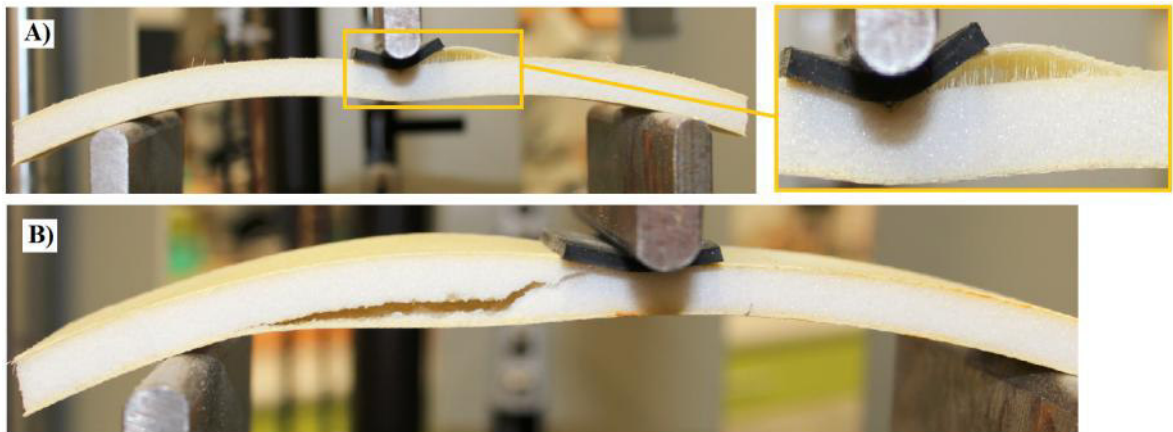
Tříbodovým zatěžováním zakřivených vzorků konvexně i konkávně orientovaných v testovacím zařízení docházelo k celé řadě poruch. Jednalo se o lokální porušení, smyková porušení jader, delaminace vnějších vrstev, nebo delaminace vnějších vrstev s následným porušením jádra.

Jako první byly tříbodově testovány konkávně uložené zakřivené pruty s tloušťkou jádra 5 mm a poloměrem zakřivení R400 mm (Obr. 56). Ve většině případů porušení se jednalo o smykovou deformaci jádra, nebo lokální porušení. Stejný typ porušení vykazovaly i vzorky se zakřivením o poloměru R200 mm.

Viditelně výraznější poruchy byly patrné na vzorcích tloušťky 10 mm se zakřivením R200 a R400 mm (Obr. 57). Zde se ojediněle objevila delaminace horní potahové vrstvy (Obr. 57B).

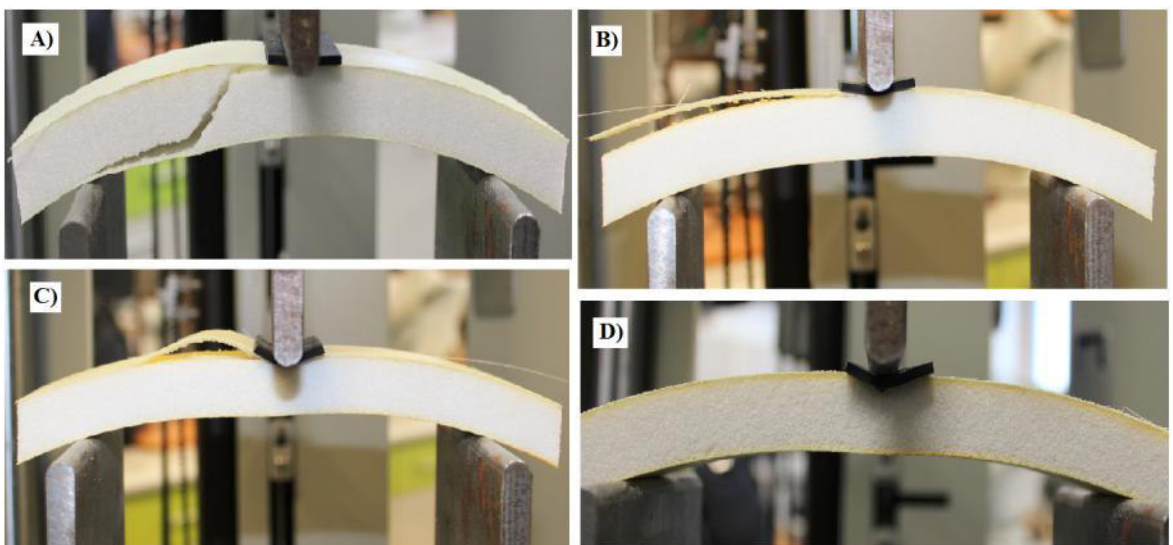


Obr. 56. Poruchy konkávně uloženého panelu s jádrem 5mm a zakřivením R400 mm



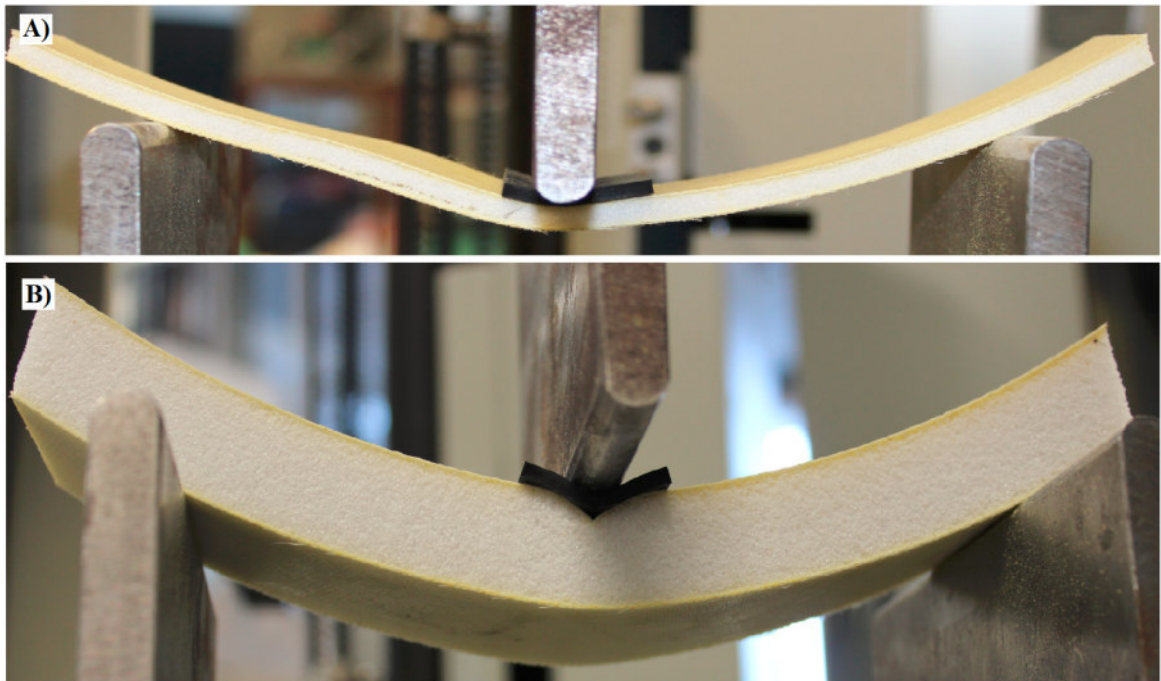
Obr. 57. Poruchy konkávně uloženého panelu s jádrem 10 mm a zakřivením R400 mm

Nejvíce však byly viditelné deformace a porušení na vzorcích o tloušťce 20 mm. Tyto panely vykazovaly při konkávním uložení různé typy poruch. Od delaminace vnějších vrstev, lokálních poškození, smykových deformací, až po delaminaci potahu s následným porušením jádra. Všechny typy poruch jsou vidět na Obr. 58.



Obr. 58. Různé typy poruch sendvičů tloušťky jádra 20 mm

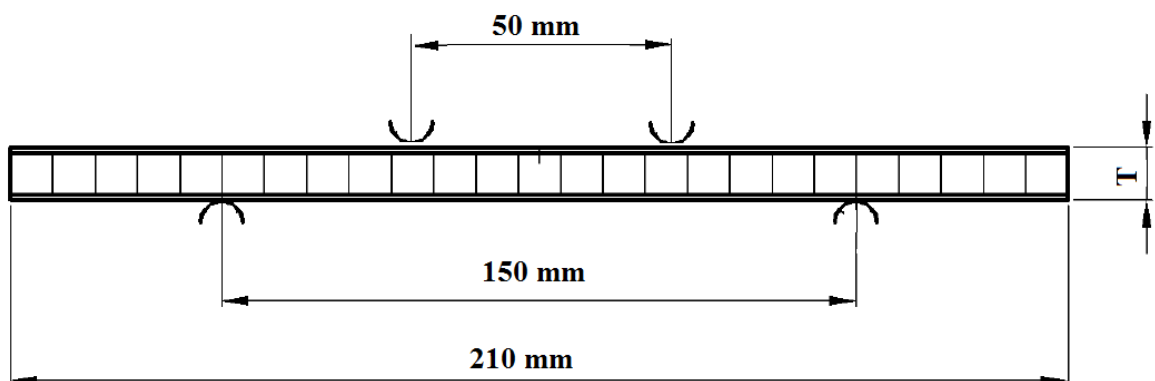
U téměř všech konvexně uložených panelů se v třibodovém ohybu jednalo o totéž poškození, a to lokální deformaci v místě zatížení. Výjimkou byly konvexně uložené panely o tloušťce jádra 5 mm a zakřivením R200 mm, u kterých zřídka docházelo ke smykové deformaci jádra (Obr. 59A).



Obr. 59. Deformace při konvexním uložení

10.2 Zkouška čtyřbodovým ohybem

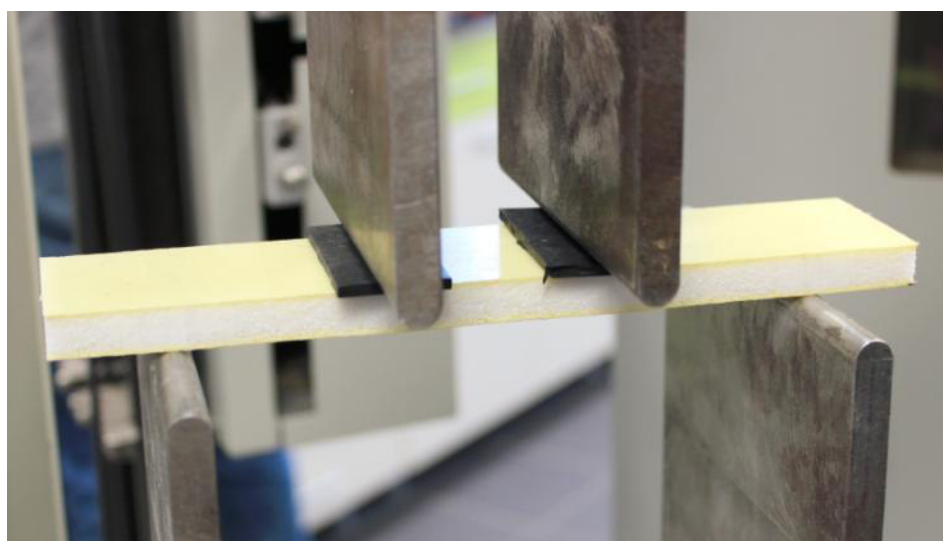
Zkouška čtyřbodovým ohybem zakřivených sendvičových vzorků byla prováděna na stejném univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456 za shodných podmínek. Hodnoty, sledované v průběhu této zkoušky byly modul pružnosti v ohybu (efektivní modul) a mez pevnosti v ohybu. Vzdálenost podpěr, na kterých byl vždy testovaný panel uložen, byla 150 mm. Vzdálenost dvojice zatěžujících podpor byla 50 mm (Obr. 60). Nastavení rychlosti posuvu příčnicku bylo shodné s měřením při tříbodové zkoušce.



Obr. 60. Rozměry přípravku pro čtyřbodový ohyb

10.2.1 Přímé sendvičové panely zatížené čtyřbodovým ohybem

Nejprve byly opět naměřeny a vyhodnoceny rovné (přímé) sendvičové vzorky o tloušťkách 5, 10 a 20 mm. Celkově se měřilo 30 vzorků, tedy 10 od každé tloušťky jádra, jako tomu bylo u tříbodové zkoušky. Vyhodnocená data z měření přímých prutů jsou uvedena v tabulkách Tab. 17., 18. Jedná se opět o modul pružnosti v ohybu a mez pevnosti v ohybu. Tato vyhodnocená data přímých vzorků jsou považována za etalonový materiál a všechna ostatní data ze čtyřbodového měření jsou s nimi porovnávána.



Obr. 61. Čtyřbodové zatížení sendvičového panelu o tloušťce jádra 10 mm

Tab. 17. Modul pružnosti ve čtyřbodovém ohybu testovaných struktur v [MPa]

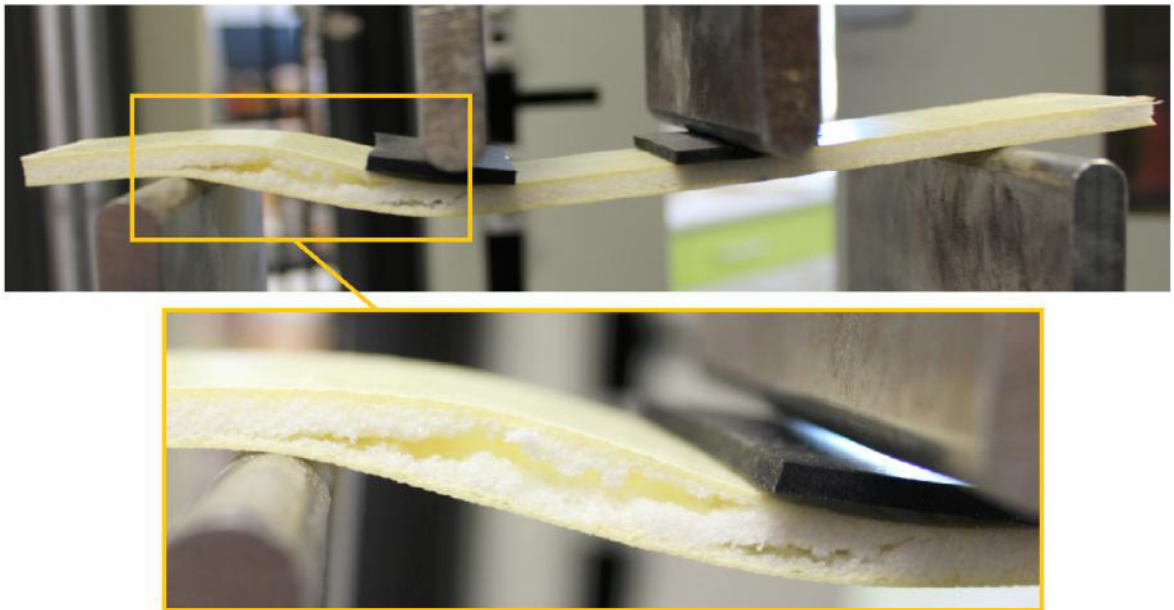
Přímé pruty o tloušťkách jádra T=5, 10 a 20 [mm]								
Vzorek	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R0_T5	6681,3	247,2	6430,0	7120,0	6500,0	6600,0	6915,0	415,0
R0_T10	2246,3	66,7	2160,0	2350,0	2175,0	2250,0	2295,0	120,0
R0_T20	590,00	36,80	517,00	623,00	568,00	600,00	618,00	50,00

Tab. 18. Mez pevnosti ve čtyřbodovém ohybu testovaných struktur v [MPa]

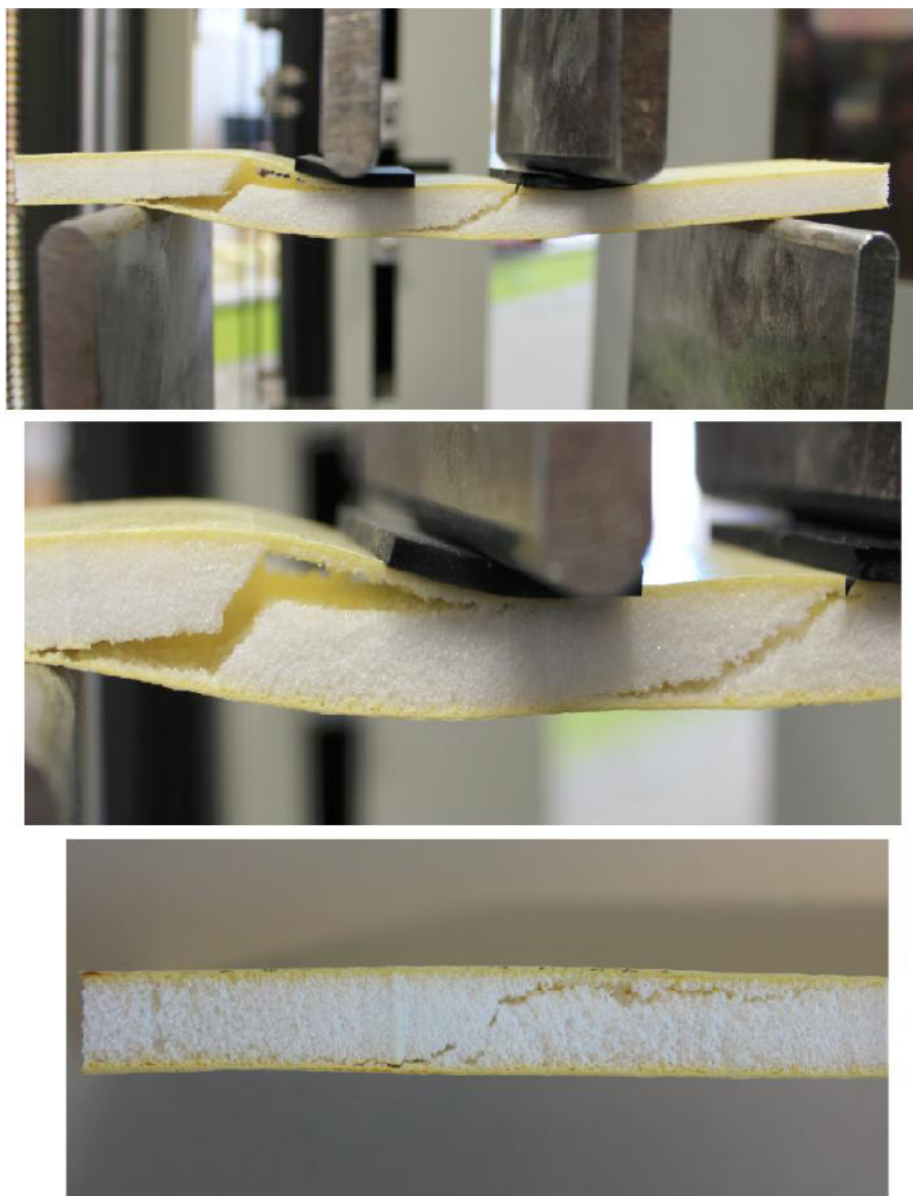
Přímé pruty o tloušťkách jádra T=5, 10 a 20 [mm]								
Vzorek	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R0_T5	49,30	4,13	43,40	55,70	45,33	50,40	52,05	6,72
R0_T10	22,35	1,37	20,90	25,30	21,53	21,90	22,93	1,40
R0_T20	10,23	0,41	9,68	11,00	10,00	10,20	10,40	0,40

❖ Poruchy přímých prutů při čtyřbodovém ohybu

Následující obrázky zobrazují všechny typy poruch, které nejčastěji vznikaly při čtyřbodovém zatěžování přímých sendvičových panelů. Obr. 62 zobrazuje detail nejčastější poruchy, která se v těchto případech vyskytovala, a to smyková delaminace jádra. Stejná porucha se objevovala u všech přímých panelů jak je vidět na Obr. 63-64. U sendviče s jádrem 20 mm bylo také častou poruchou lokální poškození v místě zatížení (Obr. 65).



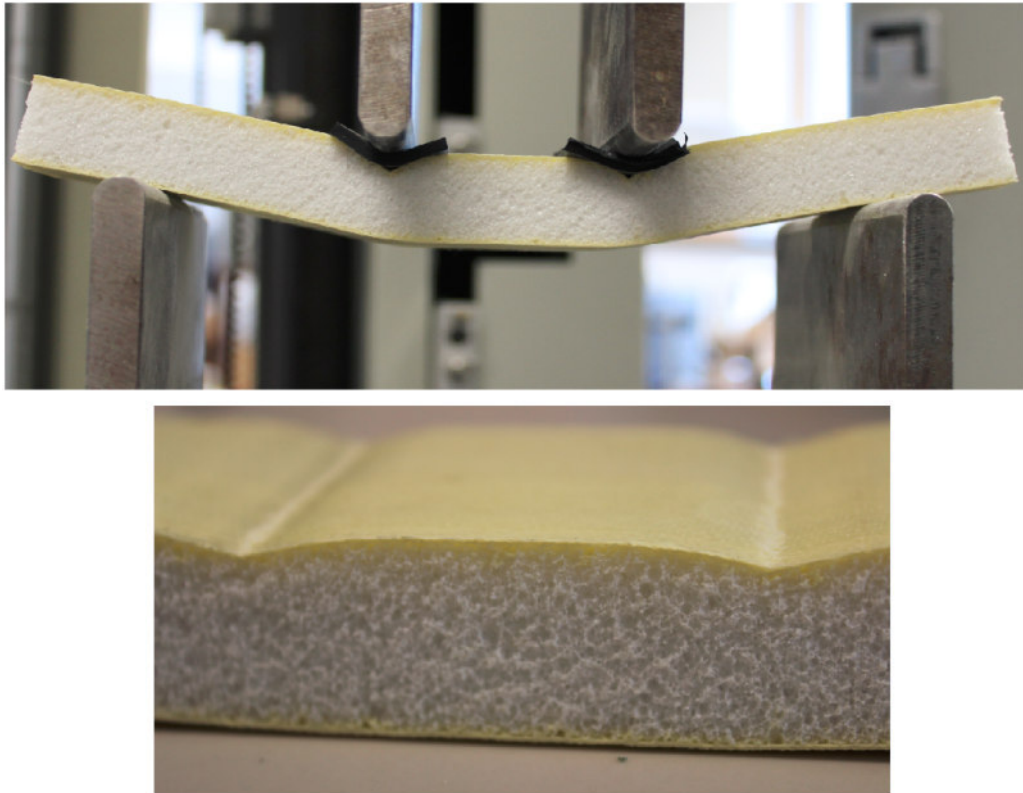
Obr. 62. Smykové porušení přímého panelu s jádrem 5 mm



Obr. 63. Porušení přímého panelu s jádrem 10 mm



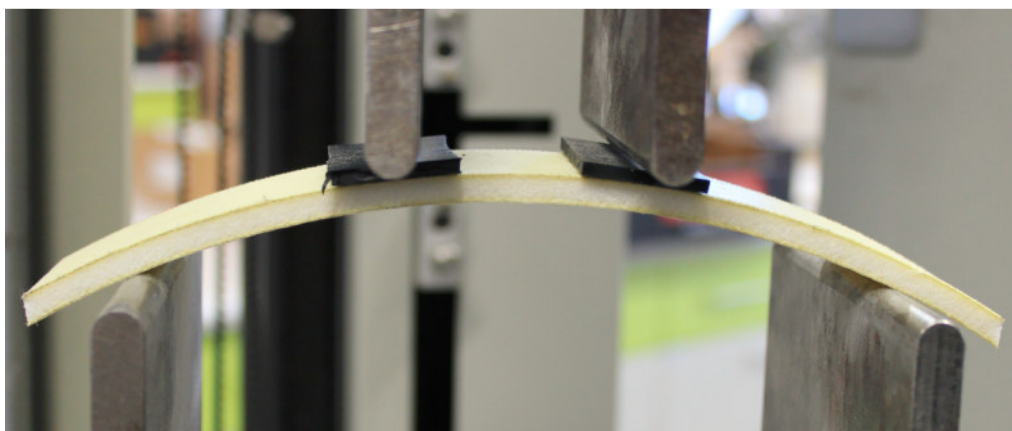
Obr. 64. Smykové porušení jádra přímého panelu s jádrem 20 mm



Obr. 65. Lokální porušení přímého prutu s jádrem 20 mm

10.2.2 Zakřivené sendvičové panely zatížené čtyřbodovým ohybem

Podmínky testování i počet zkoušených vzorků se neměnil. Vždy se nejprve testovaly panely se zakřivením o poloměru R400 mm a následně R200 mm. Celkově bylo tedy naměřeno 30 vzorků. V tomto případě byly vzorky v testovacím zařízení orientovány pouze v konkávním směru jako na Obr. 66, který zobrazuje toto uložení při čtyřbodovém ohybu.



Obr. 66. Ukázka uložení zakřiveného sendviče při čtyřbodovém ohybu

Tab. 19. Modul pružnosti ve čtyřbodovém ohybu testovaných struktur v [MPa]

Tloušťka jádra T=5mm								
Zakřivení	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400	6134,0	208,7	5770,0	6550,0	6022,5	6120,0	6242,5	220,0
R200	5030,0	333,0	4360,0	5630,0	4843,0	5030,0	5228,0	385,0
Tloušťka jádra T=10mm								
Zakřivení	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400	2321,0	123,3	2150,0	2530,0	2222,5	2300,0	2440,0	217,5
R200	1986,0	113,4	1770,0	2170,0	1912,5	2020,0	2045,0	132,5
Tloušťka jádra T=20mm								
Zakřivení	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400	579,80	18,02	561,00	616,00	564,50	576,50	591,75	27,25
R200	474,10	13,73	447,00	494,00	465,75	476,00	481,75	16,00

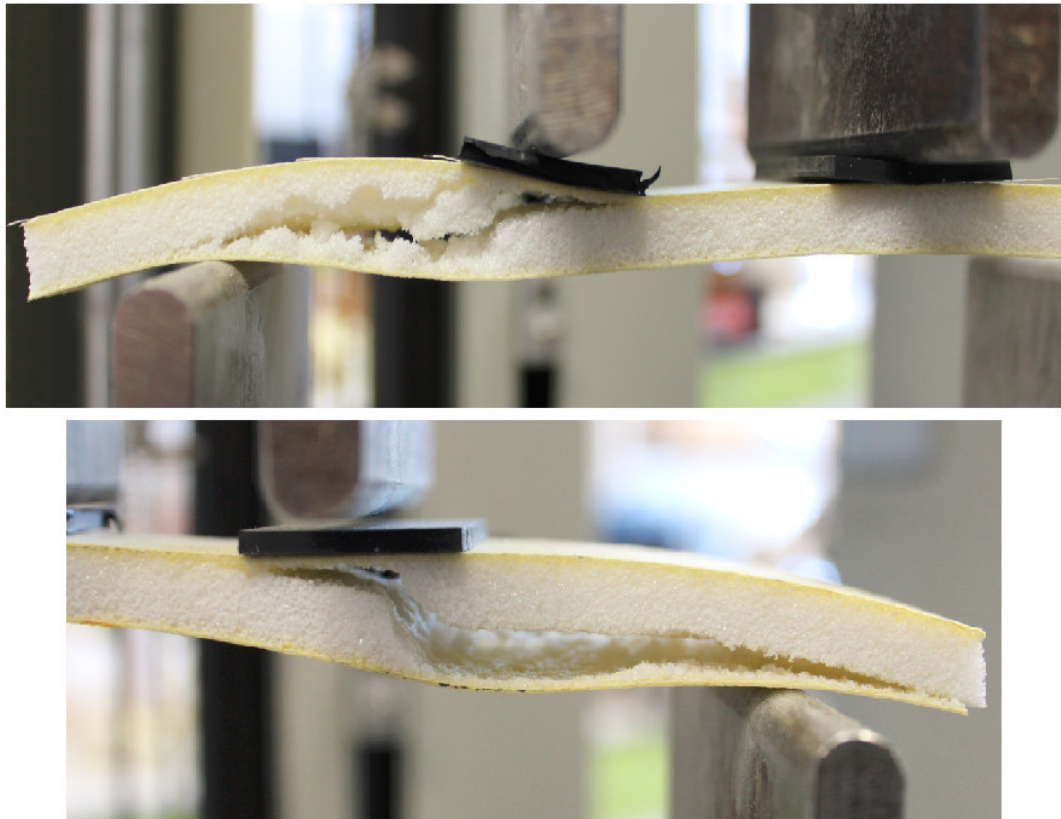
Tab. 20. Mez pevnosti ve čtyřbodovém ohybu testovaných struktur v [MPa]

Tloušťka jádra T=5mm								
Zakřivení	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400	50,76	3,81	41,70	54,50	48,75	52,00	53,33	4,58
R200	47,63	3,90	41,30	54,40	44,73	48,15	49,97	5,25
Tloušťka jádra T=10mm								
Zakřivení	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400	26,99	2,22	22,10	30,00	25,60	27,70	28,38	2,78
R200	26,88	2,69	21,30	30,00	25,08	27,00	29,33	4,25
Tloušťka jádra T=20mm								
Zakřivení	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R400	10,71	0,46	10,20	11,40	10,28	10,60	11,10	0,83
R200	10,01	0,69	9,18	11,20	9,50	9,79	10,75	1,25

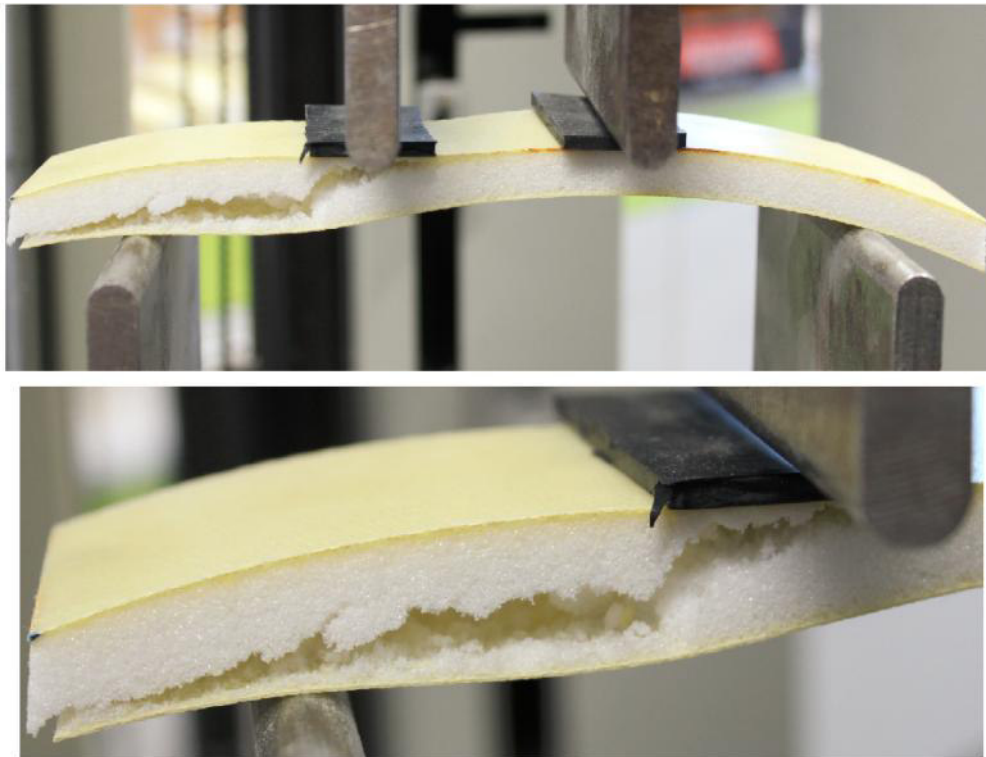
❖ Poruchy zakřivených prutů při čtyřbodovém ohybu

Poruchy zakřivených panelů při čtyřbodovém zatěžování byly výraznější než při tříbodovém. Dvojice zatěžujících sil, nejčastěji způsobovaly smykovou deformaci jádra. Tato porucha se vyskytla u každé testované tloušťky jádra a typu zakřivení vzorků. Po vyjmutí otestovaného vzorku z přípravku, nebyly na povrchu vzorku viditelné zdánlivé poruchy. Obr. 67 zobrazuje smykové delaminace jader u levé, či pravé podpěry přípravku. Míra poškození panelu po vyjmutí z přípravku je vidět na Obr. 69, jedná se o panel s jádrem 10 mm a zakřivením R400 mm. Výjimkou, která se objevila u jader 20 mm, byla delaminace vnější vrstvy mezi podpěrami, jak je zobrazeno v detailu na Obr. 70. U těchto typů

zakřivení se při čtyřbodovém ohybu vůbec neobjevila lokální porucha v místech zatěžování.



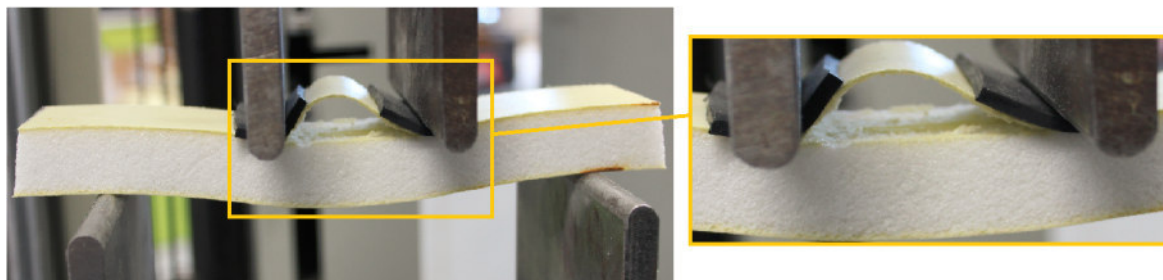
Obr. 67. Deformace panelu se zakřivením R400 mm a jádrem 5 mm



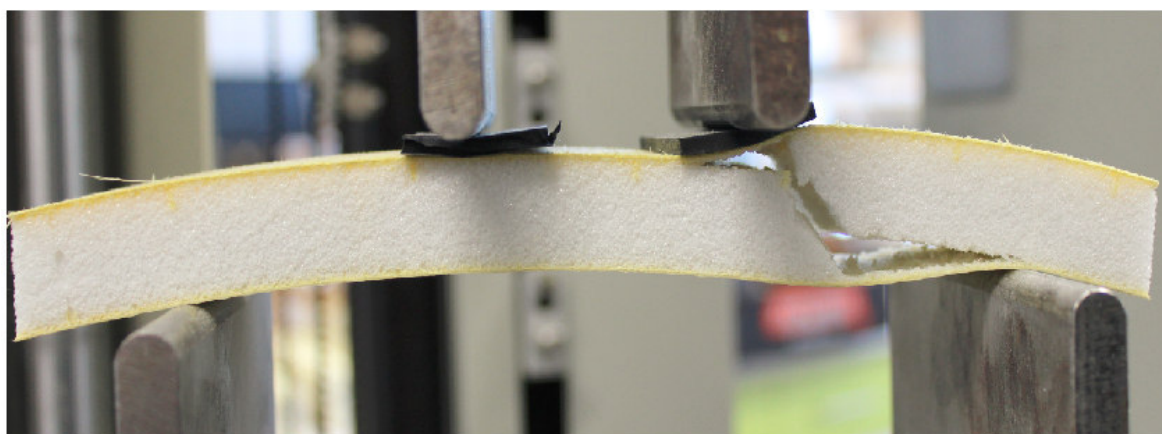
Obr. 68. Smyková deformace panelu s jádrem 10 mm



Obr. 69. Ukázka deformovaného vzorku po čtyřbodové zkoušce (jádru 10 mm)



Obr. 70. Delaminace vnější vrstvy mezi podpěrami vzorku s jádrem 20 mm



Obr. 71. Smyková delaminace jádra 20 mm

11 DISKUZE VÝSLEDKŮ Z OHYBOVÝCH ZKOUŠEK

Následující podkapitoly se postupně věnují podrobnému popisu vyhodnocení statistických výsledků měření, a to vždy pro konkrétní sadu testovaných vzorků.

11.1 Zkouška tříbodovým ohybem

11.1.1 Modul pružnosti v tříbodovém ohybu

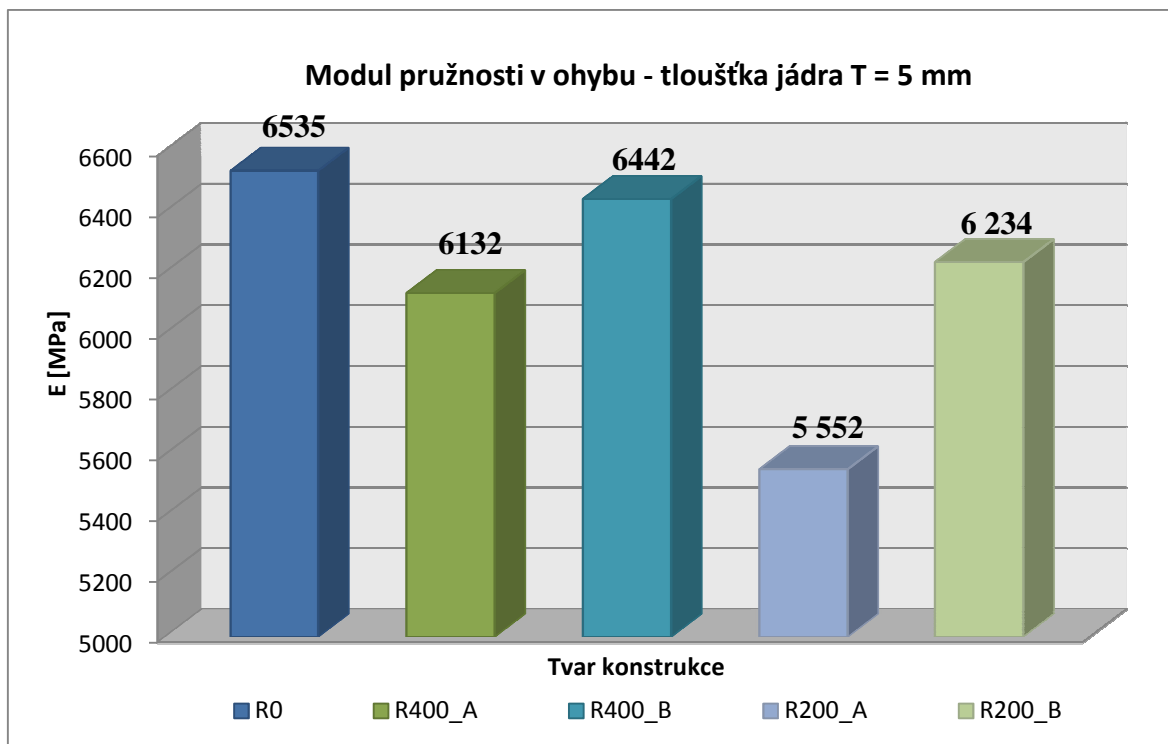
Hodnoty modulů pružnosti by se z důvodu stejnorodosti materiálu neměly příliš lišit.

Nejvyšších hodnot modulů pružnosti a také jejich změn vykazovaly vzorky s jádrem 5 mm. Jak můžeme vidět v grafu (Obr. 72), nejvyšší průměrné maximální hodnoty, které se naměřily, byly u přímého panelu, a to $E_{\max} = 6535$ MPa. K této hodnotě se jen velmi těsně blížily konvexně uložené vzorky se zakřivením R400 a R200 mm, ale vliv zakřivení způsobil pokles hodnot.

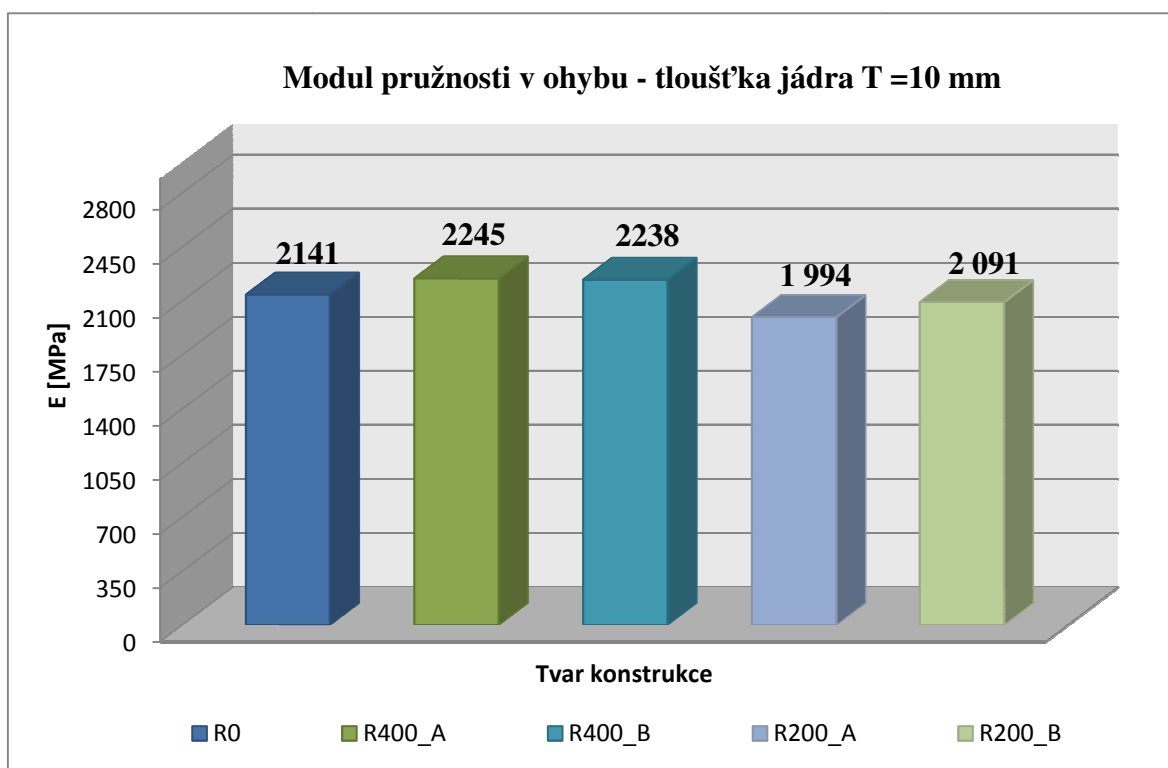
Vzorky s jádrem 10 mm vykazovaly podstatně nižší hodnoty modulu pružnosti v porovnání s panely s jádrem 5 mm. Zde se modul pohyboval kolem hodnoty 2000 MPa (Obr. 73). Zakřivením u panelu R400 došlo ke zvýšení modulu pružnosti o více jak 100 MPa. Při zakřivení R200 došlo naopak k poklesu modulu pružnosti.

Nejnižších průměrných hodnot modulu pružnosti vykazovaly sendvičové vzorky s jádrem 20 mm (Obr. 74). Modul pružnosti se zde pohyboval v okolí hodnoty 500 MPa a celkově nejnižší průměrná hodnota byla naměřena u konkávně uložených vzorků s jádrem 20 mm, a to $E_{\min} = 446,4$ MPa.

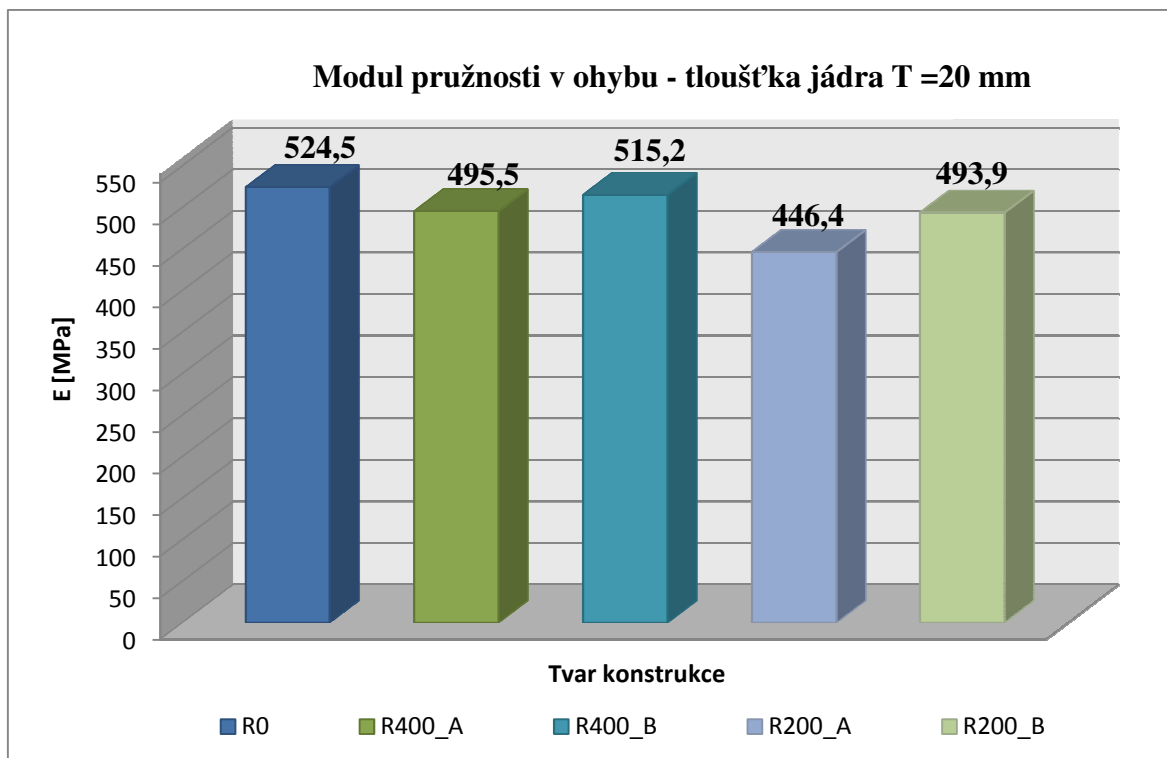
Z výsledků zobrazených v grafech na Obr. 72-74 je patrné, že vliv zakřivení sendvičových panelů z hlediska modulů pružnosti způsobil značný pokles u konkávně uložených panelů s jádrem 5 mm a zakřivením R200 mm. V ostatních případech byl modul stabilnější a nedošlo až tak k velkým skokovým vychýlením.



Obr. 72. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 5 mm



Obr. 73. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 10 mm



Obr. 74. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 20 mm

11.1.2 Mez pevnosti ve třibodovém ohybu

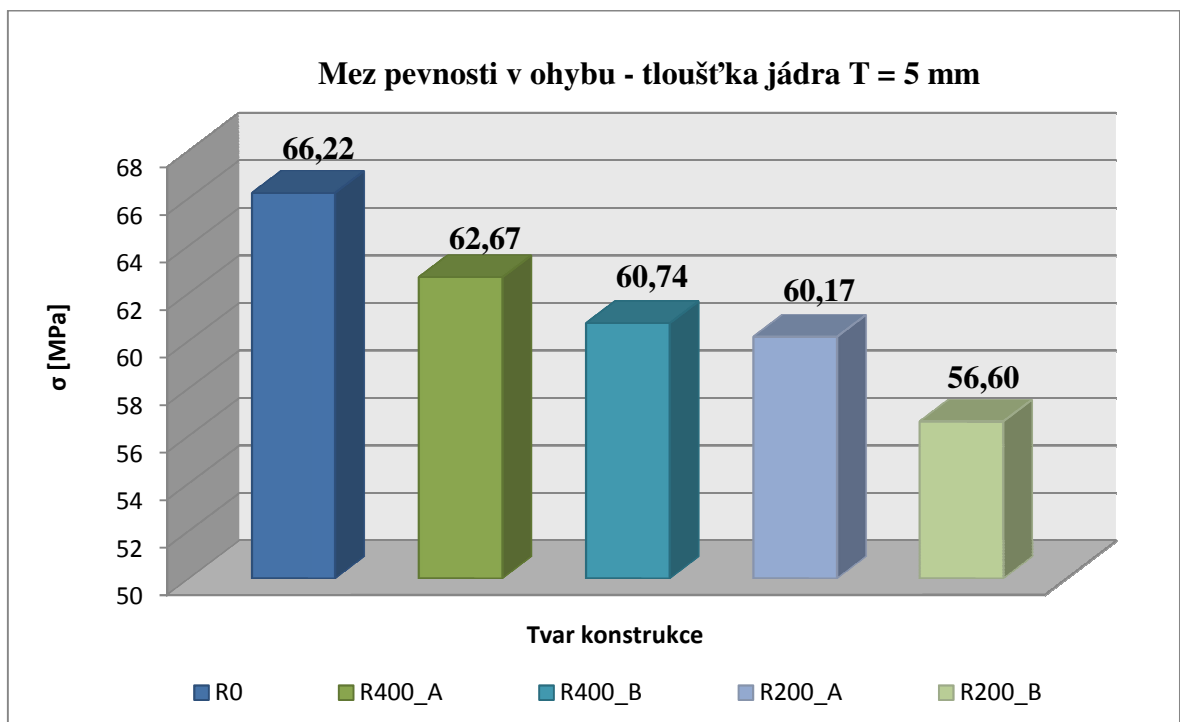
Druhou posuzovanou vlastností sendvičových panelů byla mez pevnosti v ohybu. Jde o nejdůležitější sledovanou hodnotu celého experimentu, která byla rozhodující pro posouzení vlivu zakřivení u jednotlivých posuzovaných sendvičových struktur.

Měření bylo zahájeno se vzorky s tloušťkou jádra 5 mm. Jak je patrné z grafů, tyto panely dosahovaly nejvyšších hodnot meze pevnosti. Nejvyšší průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu přímého panelu byla 66,22 MPa. Ostatní zakřivené pruty s jádrem 5 mm jevíly sestupný pokles hodnot meze pevnosti, z nichž nejnižší průměrnou hodnotu 56,6 MPa měly konvexně uložené pruty se zakřivením R200 mm (Obr. 75 s označením R200_B). To je přesně o 17 % nižší mez pevnosti. U panelů s touto tloušťkou jádra je tedy patrné, že vliv zakřivení má negativní vliv na pevnost panelu bez ohledu na způsob uložení mezi podpěrami. Je důležité podotknout skutečnost, že tyto panely s jádrem 5 mm měly největší průhyb.

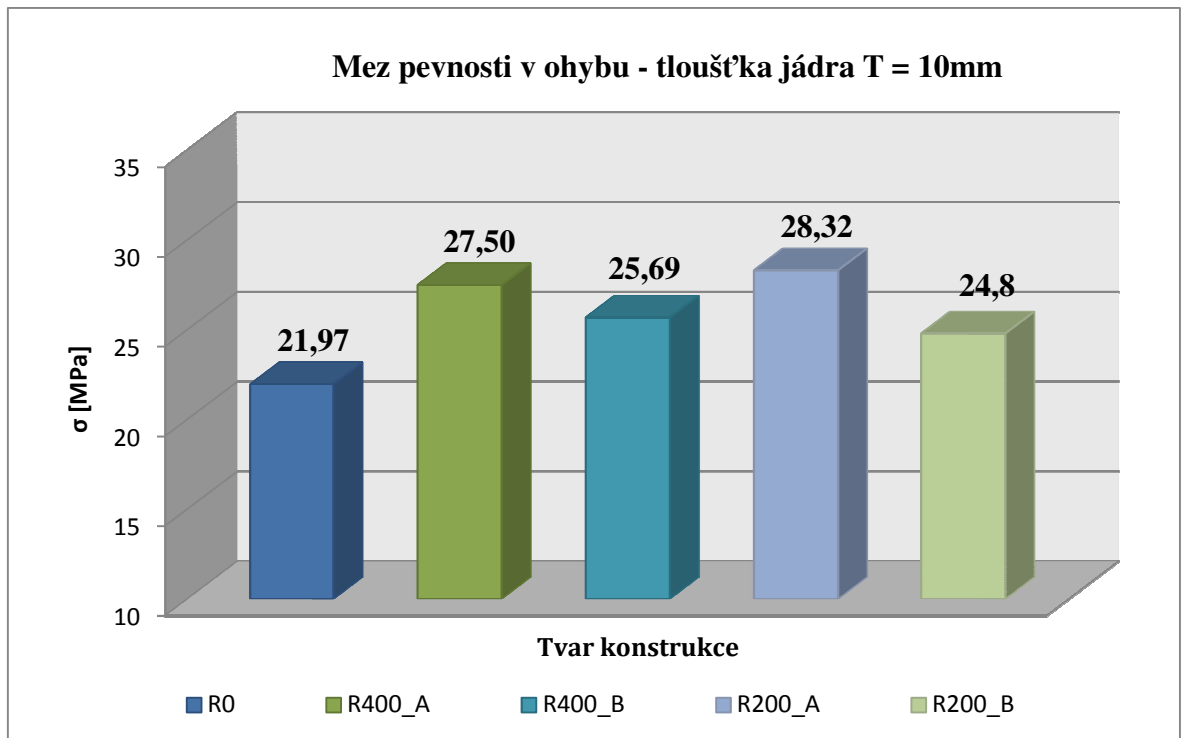
Hodnoty meze pevnosti sendvičových panelů s jádrem 10 mm měly rostoucí charakter. Mez pevnosti v ohybu nám tedy při ohybovém zatěžování zakřivených panelů vzrůstala, v porovnání s přímými vzorky, jak je zřetelně vidět v grafu na Obr. 76. Nejvyšší průměrné meze pevnosti ze sady vzorků s jádrem 10 mm dosáhly konkávně uložené panely se zakří-

vením R200 mm a to 28,32 MPa. Procentuálně se pevnost pro R200 zvýšila oproti R0 o 28,9 %. Nárůst meze pevnosti ostatních zakřivených panelů se k této hodnotě přibližoval.

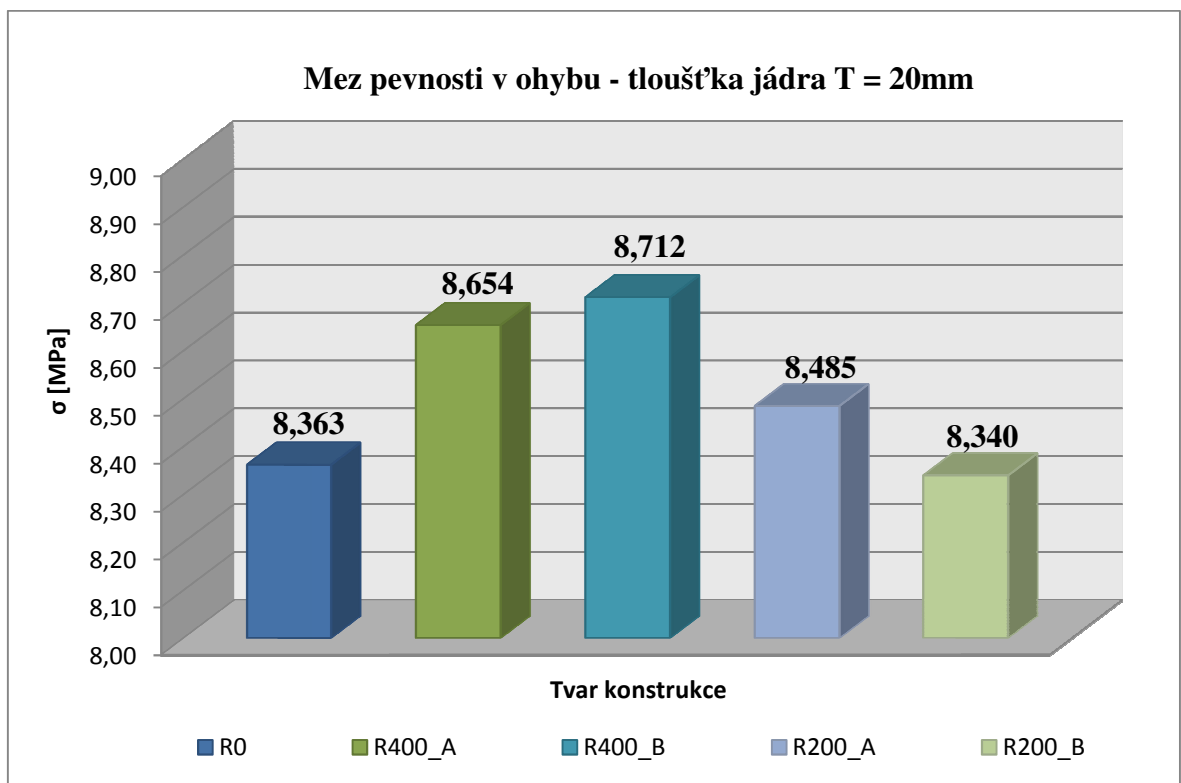
Odlišné výsledky byly naměřeny u panelů s jádrem 20 mm. Při srovnání s předešlými průměrnými hodnotami v grafech na Obr. 75 a 76, vykazují tyto vzorky nejnižší průměrné hodnoty meze pevnosti v ohybu. Nicméně průhyb panelů této sady vzorků byl minimální. Průměrná hodnota 8 MPa byla společná pro všechny vzorky této tloušťky jádra, bez ohledu na vliv zakřivení, nebo způsob uložení mezi podpěrami. Přesně o 4,17 % měly konvexně uložené zakřivené panely s označením R400_B vyšší pevnost ve srovnání s přímými s označením R0. Procentuální hodnoty průměrné meze pevnosti ostatních vzorků se pohybují v rozmezí od 4% až téměř k nulovému navýšení, tedy srovnatelnému s pevností panelu přímých. Žádný ze zakřivených vzorků s jádrem 20 mm neměl nižší ohybovou mez pevnosti, než etalonové přímé vzorky.



Obr. 75. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 5 mm



Obr. 76. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 10 mm



Obr. 77. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 20 mm

11.2 Zkouška čtyřbodovým ohybem

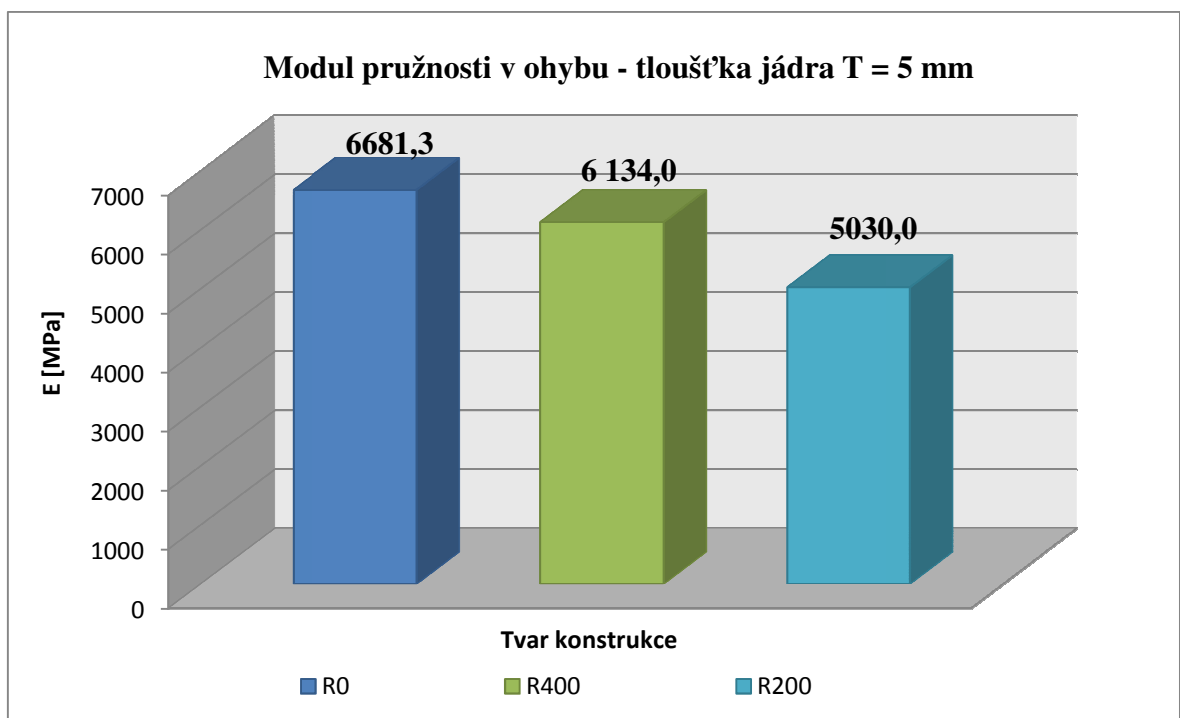
Všechny panely zatěžované čtyřbodovým ohybem byly do testovacího zařízení uloženy pouze v konkávně orientovaném směru.

11.2.1 Modul pružnosti ve čtyřbodovém ohybu

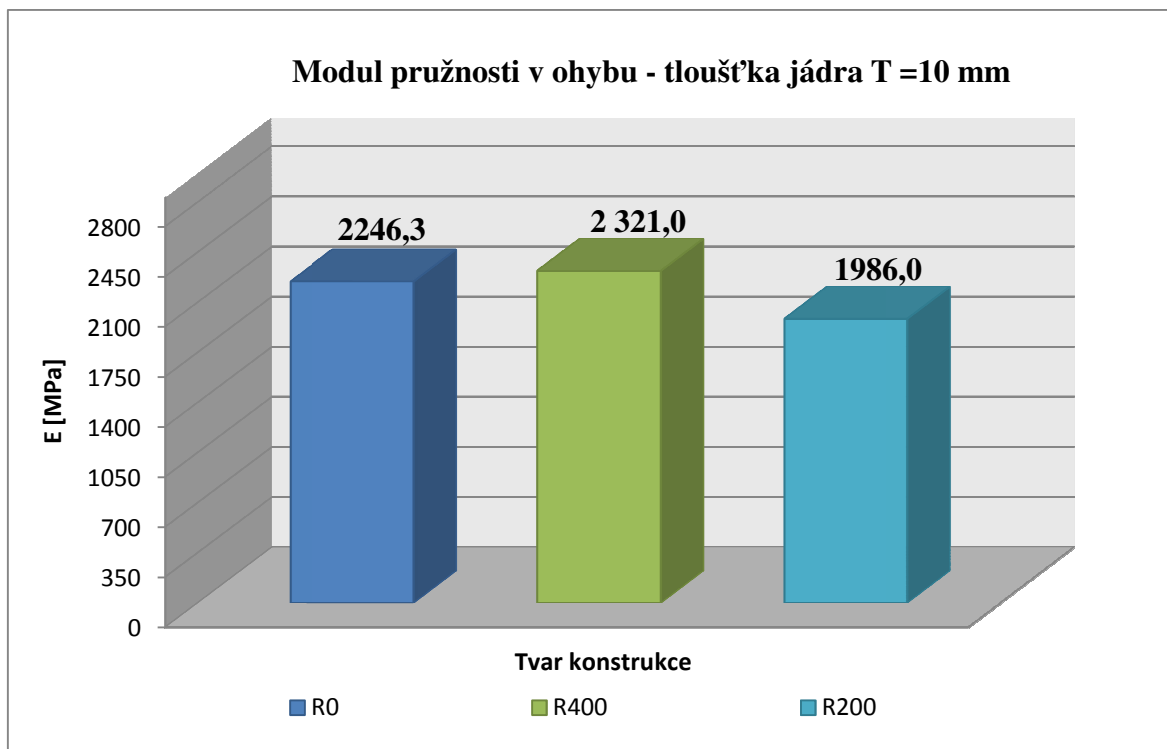
Nejvyšší modul pružnosti, konkrétně 6681,3 MPa vykazovaly přímé sendvičové pruty s jádrem 5 mm. V porovnání se zakřivenými panely jak můžeme vidět na Obr. 78, vzorky se zakřivením R400 a R200 mm měly o poznání nižší modul pružnosti. Vliv zakřivení v porovnání s přímým prutem způsobil snížení modulu pružnosti.

Modul pružnosti u vzorků s tloušťkou jádra 10 mm (R200) Obr. 79 klesl o 260 MPa. Zakřivení prutu R200 mm v tomto případě způsobilo 13 % pokles modulu pružnosti.

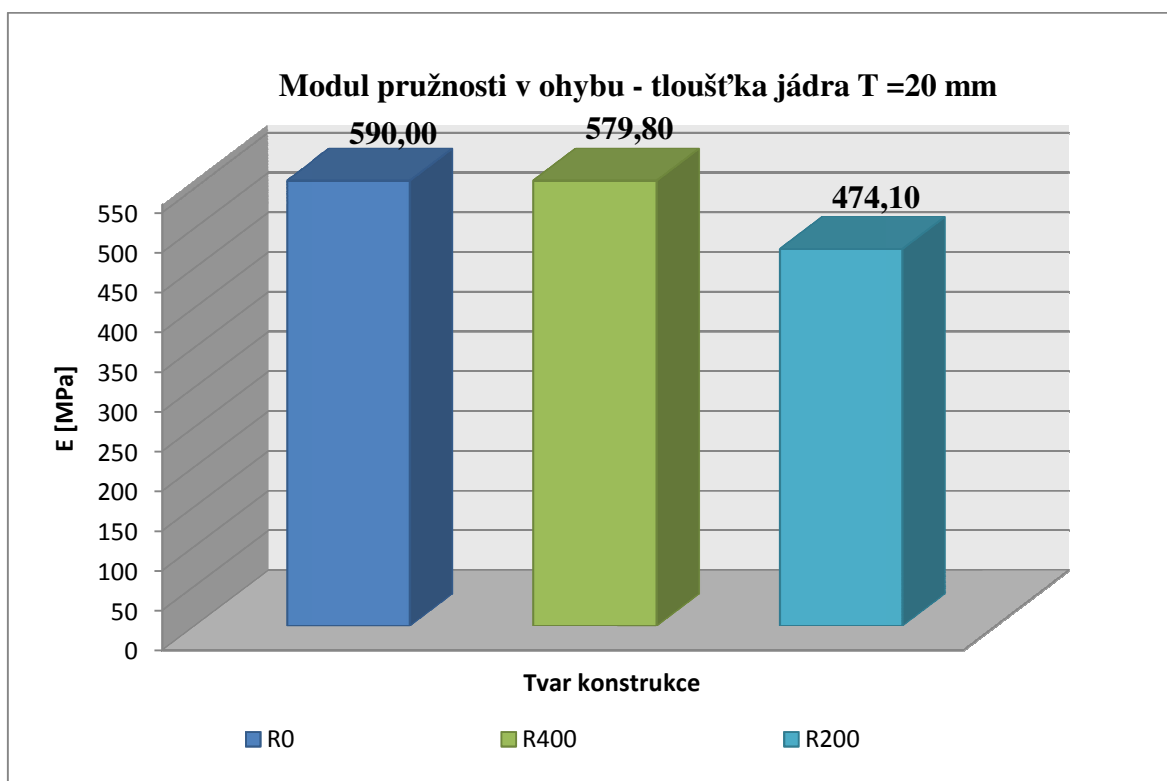
U sendvičů s jádrem 20 mm kde průměrné hodnoty modulu pružnosti leží kolem 500 MPa. Pro vyšší hodnoty zakřivení (R200) dochází pro oba typy jader k významnému poklesu modulu pružnosti.



Obr. 78. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 5 mm



Obr. 79. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 10 mm



Obr. 80. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 20 mm

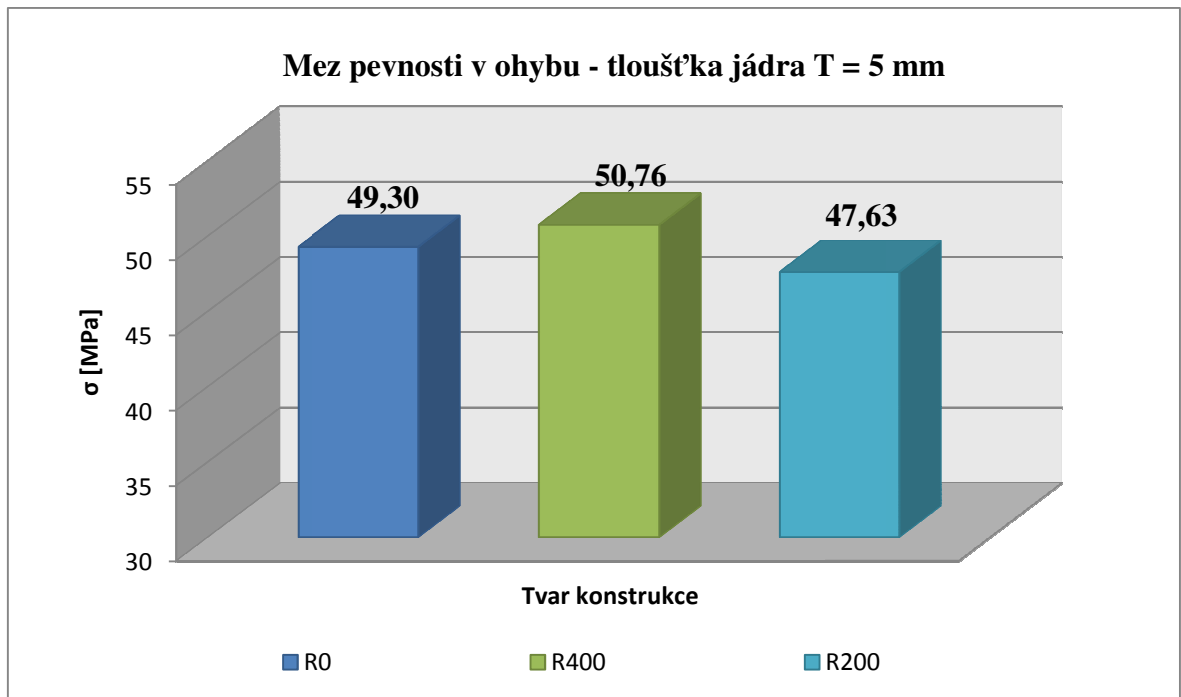
11.2.2 Mez pevnosti ve čtyřbodovém ohybu

Jak již bylo zmíněno mez pevnosti v ohybu, je nejdůležitější sledovanou hodnotu celého experimentu a také jedním z aspektů při rozhodování a posuzování vhodnosti navržených struktur a jejich zakřivení.

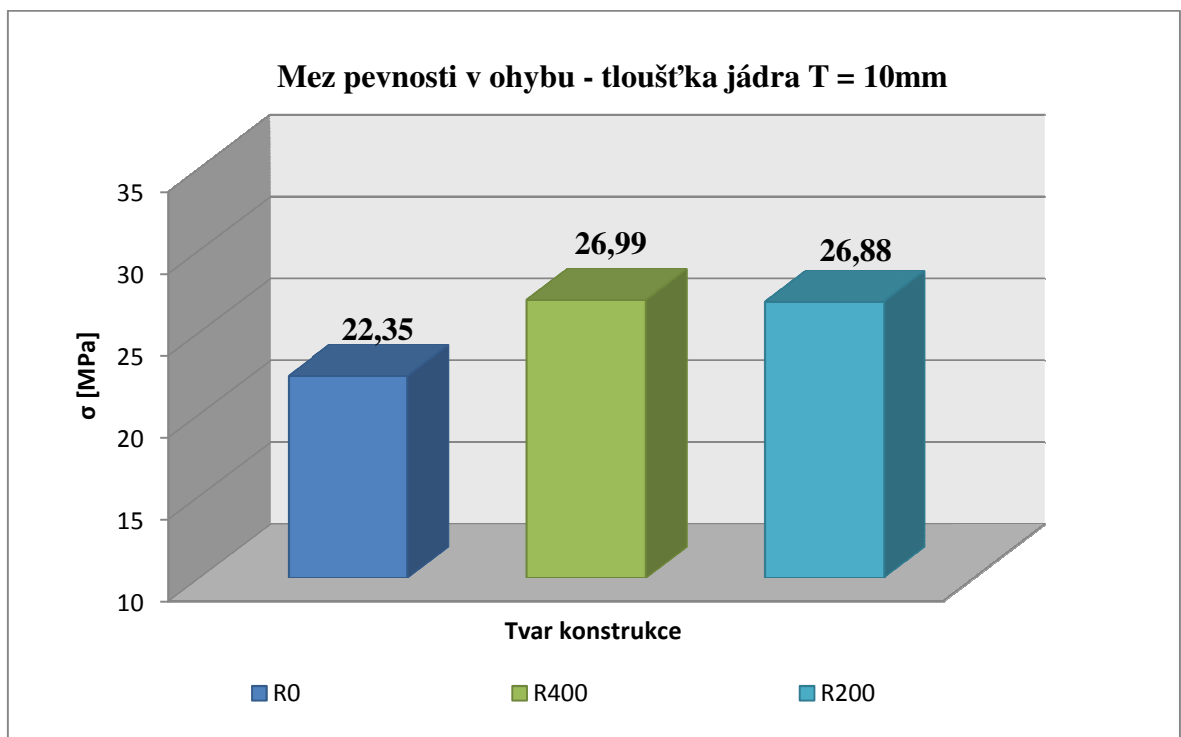
Čtyřbodové měření meze pevnosti začalo přímými sendvičovými panely s jádrem 5 mm, které dosáhly průměrné hodnoty 49,3 MPa. V případě zakřiveného panelu R400 došlo ke zvýšení meze pevnosti jak je vidět na Obr. 81. Konkrétní průměrný nárůst meze pevnosti panelu R400 oproti přímému R0 je o 2,96 %. Zakřivení vzorků R200 naopak způsobilo při čtyřbodovém zatížení pokles meze pevnosti ve srovnání s R0 na hodnotu 47,63 MPa, což je o 3,51 % nižší mez pevnosti.

Výsledky zakřivených panelů s jádrem 10 mm poukazuje na skutečnost, že zakřivením prutů se jejich mez pevnosti může zvýšit až o čtvrtinu. Z grafu na Obr. 82 je vidět zvýšení průměrných hodnot zakřivených panelů R400 a R200 oproti R0 až o více jak 20 %. Přesně o 20,76 % v případě R400.

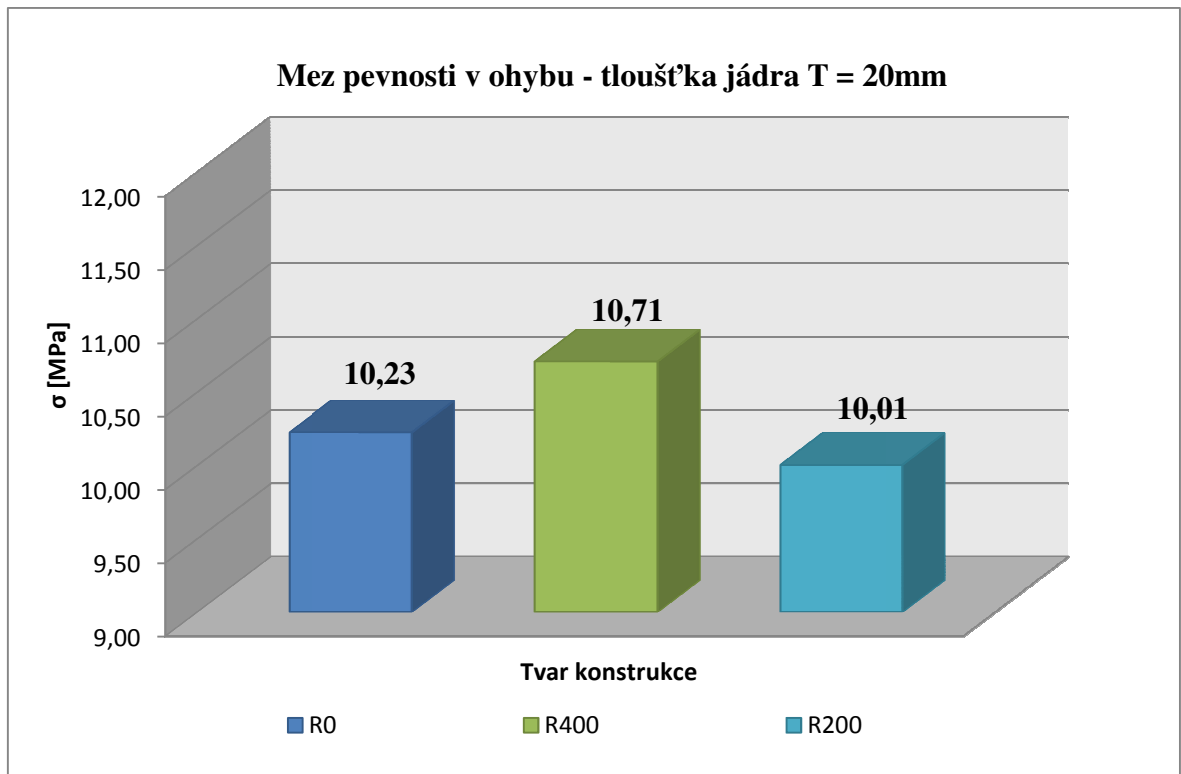
Jako poslední se měřily panely tloušťky 20 mm. Tyto vzorky vykazovaly opět nejmenší průměrné hodnoty meze pevnosti při zkoušce čtyřbodového ohybu. Hodnoty se pohybovaly kolem 10 MPa. Procentuální vyjádření vlivu zakřivení při porovnání s přímými panely se téměř shoduje s první testovanou sadou vzorků s jádrem 5 mm. V tomto případě totiž také vyšlo, že největší mez pevnosti mají zakřivené pruty R400 (Obr. 83), a to 10,71 MPa. Panely se zakřivením R200 znovu vykazují jen nepatrně nižší hodnoty meze pevnosti v porovnání s R0. Procentuálně vyjádřeno o 2,2 %. S ohledem na chyby měření jsou tyto hodnoty zanedbatelné.



Obr. 81. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 5 mm



Obr. 82. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 10 mm



Obr. 83. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 20 mm

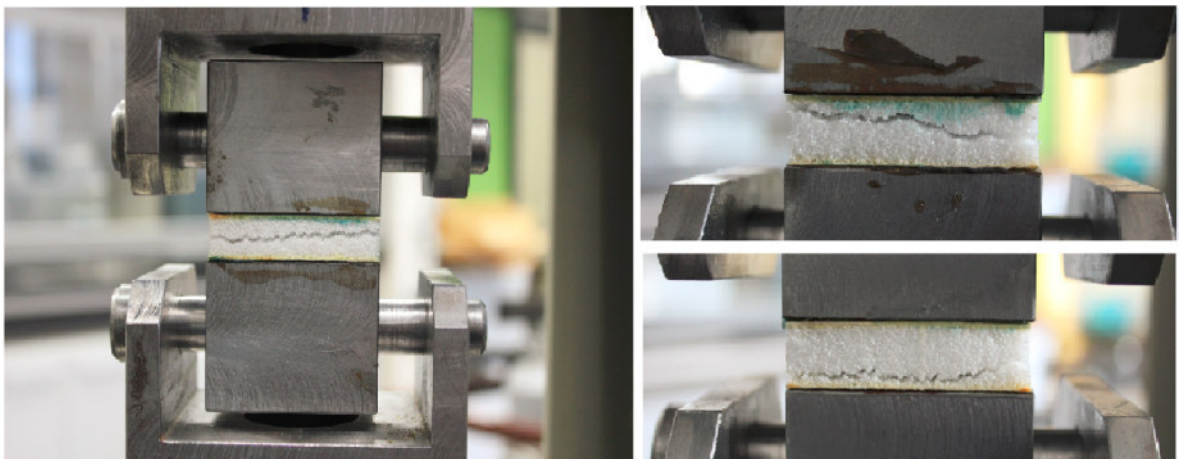
12 ZKOUŠKA TAHEM NAPLOCHO

Touto metodou byla otestována pevnost vazby mezi vnějšími potahovými vrstvami a jádrem sendviče. Princip metody spočívá ve vystavení sendvičové struktury jednoosému tahovému zatížení, kolmému k povrchu sendviče.

Sendvičová struktura vzorku byla složena z prepregů Gurit PHG 840-300-42 (kapitola 9.1.1) a pěnového jádra Airex T90 (kapitola 9.2.1). Vzorky byly vyrobeny shodným způsobem, který je popsán v kapitole 9.3. Testovalo se 7 zkušebních vzorků a jejich rozměry byly 50 x 50 x 10 mm. Byl použit testovací přípravek podle normy ASTM C297. Byl složen ze dvojice přírub, do nichž se pomocí čepu upevnily ocelové kostky spojené lepidlem přes testovaný sendvičový vzorek. K tomuto testovacímu přípravku byly vzorky přilepeny lepidlem Plexus 832, které je vhodné pro lepení součástí se spojitým povrchem.

❖ Výsledky testování

Na Obr. 84 jsou zaznamenány ukázky poruch při tahovém zatěžování sendvičového vzorku přilepeného k čelistem přípravku. Výsledky ukázaly, že pevnost mezi jádrem a potahovými vrstvami je vyšší, než pevnost jádra samotného. Ve všech případech došlo k přetržení vzorku ve středu jádra sendviče, nebo jeho blízkosti, kdy lom se dál šířil zkoušeným tělesem k rozhraní potah jádro.

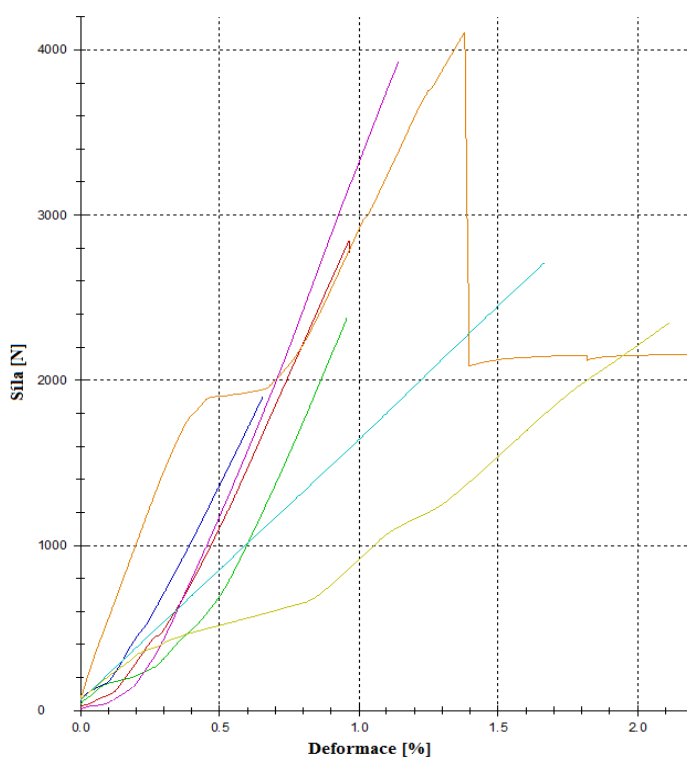


Obr. 84. Porušení jádra při zkoušce tahem naplocho

Obr. 85 ukazuje testovaný vzorek po zkoušce tahem naplocho. Poškozený otestovaný vzorek byl roztržen buď přímo při samotné zkoušce, nebo ručně při demontáži čelistí.



Obr. 85. Vzorek po tahové zkoušce



Obr. 86. Diagram z tahové zkoušky

Tab. 21. Maximální hodnoty sil při zkoušce pevnosti

Zkoušený vzorek	Maximální síla [N]
1.	2850
2.	2380
3.	1910
4.	4110
5.	3930
6.	2710
7.	2350
\bar{x}	2891
s	821

13 RÁZOVÁ ZKOUŠKA – SYSTÉM PADAJÍCÍHO TLOUKU

Původně měla být tato zkouška prováděna na univerzálním stroji ZWICK ROLLER HIT 230F. Při otestování prvních vzorků byla zjištěna skutečnost, že dochází k nežádoucímu zmačkávání vzorku při jeho uchycení mezi čelistmi stroje ještě dříve, než proběhla daná rázová zkouška padajícím tloukem. Tato deformace způsobila znehodnocení vzorku, který tím pádem již nebyl použitelný pro samotné měření průrazu. Z tohoto důvodu byl pro testování zvolen školní laboratorní mechanický padostroj znázorněn výše na Obr. 43.

Měřeno bylo 6 přímých sendvičových panelů o rozměrech 45 x 10 x 210 mm. Hmotnost závaží tlouku byla 20,5 g. Výška pádu, ze které se tlouk spouštěl, byla 300 mm.

Testování bylo provedeno pouze jednou kinetickou energií. Na vzorcích nebyly viditelné známky poškození. Po provedení rázové zkoušky na padostroji, byly vzorky testovány na tříbodový ohyb a sledovala se změna ohybové pevnosti, která se porovnávala s neporušenými etalonovými vzorky. Kinetická energie dopadajícího tlouku byla spočítána dle vzorce:

$$E_k = m \cdot g \cdot h \quad [J] \quad (26)$$

,kde m [kg] je hmotnost tlouku se závažím, $g = 9,81$ [m/s²] je tíhové zrychlení, h je výška pádu tlouku.

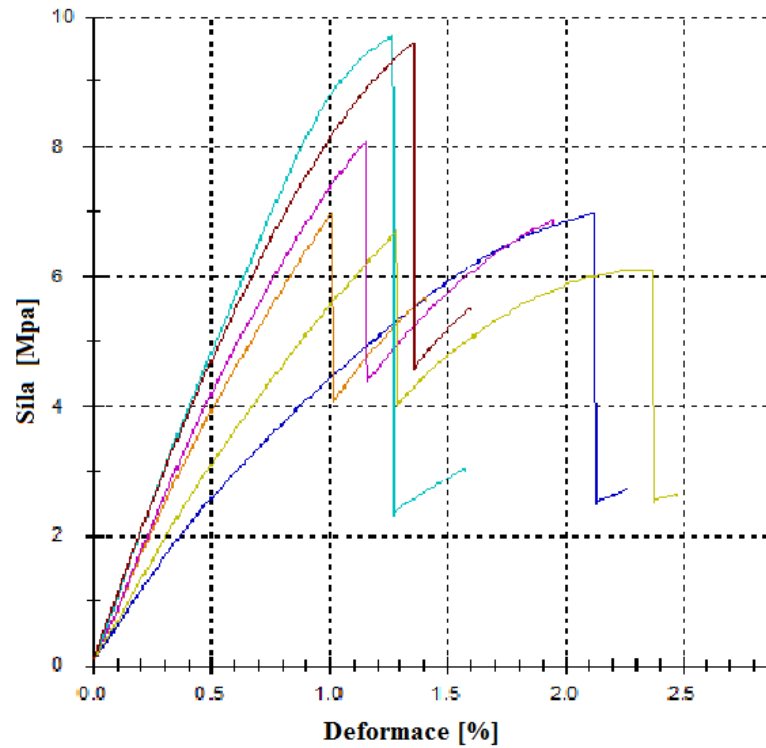
V Tab. 22 je kromě statisticky zpracovaných naměřených hodnot uvedena průměrná hodnota ohybové pevnosti v [MPa] a vypočtená velikost kinetické energie tlouku, kterým se testovala rázová odolnost sendvičového vzorku s tloušťkou jádra 10 mm. Pro srovnání jsou v tabulce uvedeny hodnoty etalonového vzorku.

Tab. 22. Srovnání tříbodové ohybové pevnosti po rázové zkoušce s etalonovým vzorkem

Tloušťka jádra T=10mm								
Velikost kinetické energie dopadajícího tlouku $E_k = 0,06$ [J]								
Zakřivení	\bar{x}	s	Min	Max	Q1	Medián	Q3	IQR
R0	8,015	1,356	6,700	9,700	6,917	7,545	9,633	2,715
R0_etalon	22,35	1,37	20,90	25,30	21,53	21,90	22,93	1,40

Z naměřených dat je patrné, že sendvičová konstrukce má po rázové zkoušce mnohem nižší ohybovou pevnost. Důvodem je, že tělesa byla úderem významně ovlivněna a vznikaly pouze smykové poruchy jádra, kdy jádro zřejmě obsahovalo poruchy uvnitř struktury.

V následujícím grafu jsou uvedeny křivky průběhů ohybových napětí vzorků po rázové zkoušce. Jedná se o závislost síly na deformaci.



Obr. 87. Graf ohybové pevnosti po rázové zkoušce

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo otestovat zvolená materiálová složení pro zakřivené sendvičové konstrukce a posoudit mechanické chování, právě na základě těchto zakřivení při ohybových zkouškách. Výsledky dosažené při ohybovém testování zakřivených panelů byly porovnávány s etalonovou rovinnou sendvičovou konstrukcí. Součástí práce bylo také testování tahových a rázových vlastností. Navržené sendvičové panely byly vyrobeny a nachystány k měření prostřednictvím a ve spolupráci s firmou Form s.r.o. Testování probíhalo ve školní laboratoři.

Při ohybovém testování byly sledovány mechanické vlastnosti panelů. Šlo o modul pružnosti v ohybu (efektivní modul) a mez pevnosti v ohybu. Z výsledků zkoušek bylo vypočteno, že modul pružnosti se až na výjimku panelů s jádrem 5 mm choval stabilně a vliv zakřivení zde nehrál velkou roli.

Jinak tomu bylo u ohybové meze pevnosti. U tříbodového testování bylo rozhodujícím faktorem uložení zakřivených vzorků. Srovnáním přímých a konkávně uložených zakřivených prutů, lze konstatovat, že vliv zakřivení způsobuje zvýšení meze pevnosti navržené sendvičové struktury. Konkrétně nejvyšší mez pevnosti měly zakřivené pruty o tloušťce 10 mm s poloměrem R400 mm. Tuto skutečnost popírá případ sady zakřivených panelů s jádrem 5 mm, kdy mez pevnosti v porovnání s přímými panely ve všech případech klesala.

Při pozorování změny meze pevnosti u čtyřbodového ohybu jsme došli k závěru, že opět jako u tříbodového zatěžování má největší vliv na velikost zakřivení sada vzorků se zakřivením 400 mm, bez ohledu na tloušťku jádra. Vzorky tohoto zakřivení ve všech uvedených měřeních čtyřbodového ohybu vykazovaly více, či méně výrazné zvýšení meze pevnosti.

Předposledním materiálovým testem této práce byla zkouška tahem naplocho. Cílem bylo ověřit, zda je pevnost přilnavosti potahových vrstev k jádru sendviče dostatečná, čehož bylo úspěšně docíleno. Z výsledků zkoušky vyplynulo, že přilnavost potahů k jádru je daleko vyšší, než pevnost použitého jádra.

Celkové testování bylo ukončeno rázovou zkouškou, která poukázala na značné snížení ohybových vlastností po rázovém testu.

Z celkových výsledků lze usoudit, že nejvhodněji se pro použití v technické praxi jeví konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm a s nižším zakřivením R400 mm.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BITZER, By Tom. *Honeycomb Technology Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. ISBN 978-940-1064-743.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] DAVIES, J. *Lightweight sandwich construction*. Malden, MA: Blackwell Science, 2001, xiv, 370 p. ISBN 06-320-4027-0.
- [4] PETRAS, Achilles. *Design of Sandwich Structures*. Cambridge University Engineering Department, 1998. Dostupné z: <https://www.repository.cam.ac.uk/bitstream/handle/1810/236995/Design?sequence=1>. A dissertation. Robinson College University of Cambridge.
- [5] UNIVERSAL METALTEK. *Honeycomb Panel* [online]. 2014 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: http://universalmetaltek.com/aluminium_honeycomb_panels.html#
- [6] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Vlákna pro kompozity. Typy produktů z vláken* [online]. 2013 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [7] HEXCEL. *HexPly Prepreg technology* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Prepreg_Technology.pdf
- [8] Gurit. *Product & Materials: Prepregs* [online]. 2015 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/prepregs.aspx>
- [9] HIGH-PERFORMACNE Composites. *CV CompositesWorld* [online]. 2014 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/spread-tow-technology-takes-off->
- [10] Carbon Fiber Fabric & Prepreg. *JMC, Inc.: Obrázek* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: http://jmcarbon.en.ec21.com/Carbon_Fiber_Fabric_Prepreg--6694005_6694016.html
- [11] Manufacturing process. *SGL GROUP THE CARBON COMPANY: Obrázek* [online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://>

ps://www.sglgroup.com/cms/_common/downloads/products/product-groups/cm/prepregs/High_Performance_Prepregs_e.pdf

- [12] ABOUT: Composite/Plastic. *Facing Materials* [online]. 1968 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://composite.about.com/library/docs/mil-hdbk-23/bl2-1.htm>
- [13] ISOMEK: Sandwich Panels. *Galvanized steel facing sandwich panel* [online]. 2014 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.archiexpo.com/prod/isomek/galvanized-steel-facing-sandwich-panels-insulating-polyurethane-pur-core-60331-323823.html>
- [14] 5M s.r.o.: Slovakia. *Sendvičové panely* [online]. 1992 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.5mslovakia.sk/sendvivoe-panely>
- [15] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [16] UNMANNED SYSTEM TECHNOLOGY. *Sandwich Panels and Laminates for UAVs* [online]. 2008 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.unmannedsystemstechnology.com/company/acp-composites/composite-sandwich-panels-2/>
- [17] CRIPPS, David, Chris O'CONNELL, Mark NOONAN a Martin ORME. SP SYSTEMS. *Composite Materials Handbook* [online]. Newport: SP Systems, 1998 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.bolton.ac.uk/CODATE/SPHandbook.pdf>
- [18] CAMPBELL, F. *Manufacturing processes for advanced composites*. Oxford: Elsevier, 2004, 517 s. ISBN 18-561-7415-8.
- [19] Havel Composites CZ s.r.o. *Katalog* [online]. 2010 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: http://www.havel-composites.com/ktlgfiles/cz_katalog.pdf
- [20] GOGA, Vladimír. *Buňková tělesa. Vlastnosti buňkových těles* [online]. 2010 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=8404>
- [21] GURIT. *PRODUCT INFORMATION : CORE MATERIALS* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://gurit.com/structural-cores.aspx>
- [22] MM Průmyslové spektrum. *Výrobky z hliníkové pěny* [online]. 2007 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny.html>

- [23] Qingdao longchangjie machine co.ltd. *Pvc Crust Foam Board Production Line: Obrázek* [online]. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://plasticextrusion-line.btrworlds.com/productimage/pvc-crust-foam-board-production-line-pvc-foam-board-machine-1794119.html>
- [24] HOA, Suong V. *Principles of the manufacturing of composite materials* [online]. Lancaster, PA: DEStech Publications, 2009 [cit. 2015-02-27]. ISBN 978-161-5830-985. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPMCM0004/principles-manufacturing/principles-manufacturing>
- [25] Honeycomb Cores. *NetComposites* [online]. 2015 [cit. 2015-03-31]. Dostupné z: <http://www.netcomposites.com/guide/honeycomb-cores/46>
- [26] Manufacturing Methods. *Honeycomb Ceramic Design* [online]. 2010 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <http://www.cefns.nau.edu/capstone/projects/ME/2010/SMARTF/project/designdecisions/>
- [27] Honeycomb Cores. *PLASTCORE* [online]. 2008 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <http://www.plascore.com/products/honeycomb-cores/aluminum/>
- [28] FIBERMAX COMPOSITES. *Nomex aramid honeycomb* [online]. 2002 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.fibermaxcomposites.com/shop/nomex-aramid-honeycombbthickness-15-mmbrcell-size-48-mm-p-965.html>
- [29] 5M s.r.o. *Smart technologies in the world of Composites* [online]. 2012 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.5m.cz/cz/lepidla/>
- [30] ROCH, DIPL.-ING. ALEXANDER, DIPL.-ING. ANDREAS MENRATH a DIPL.-ING. TIMO HUBER. Fiber-Reinforced Thermoplastics as Sandwich Construction. *Lightweight Construction for Mass Production* [online]. 2013 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: http://www.ict.fraunhofer.de/content/dam/ict/de/documents/pe_tp_faserverstaerkte_thermoplaste_en.pdf
- [31] KOMPOZITY. *Technologie* [online]. 2010 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>

- [32] VACUUM BAGGING TECHNIQUES. *Vacuum Bagging* [online]. 2010 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.westsystem.com/ss/assets/HowToPublications/Vacuum-Bagging-Techniques.pdf>
- [33] Fibre Glast Developments. *Vacuum Bagging* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: http://www.fibreglast.com/category/Vacuum_Bagging
- [34] Airtech Europe Sarl. *Autoclave cure cycle* [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: http://catalogue.airtech.lu/product.php?product_id=486&lang=EN
- [35] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-807-3189-488.
- [36] ZENKERT, Nordic Industrial Fund. Ed.: D. *The handbook of sandwich construction*. Cradley Heath, West Midlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), 1997. ISBN 978-094-7817-961.
- [37] ČSN EN ISO 14125. *Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností*. Pardubice: Český normalizační institut, 1999.
- [38] ČSN EN 2746. *Letectví a kosmonautika - Sklem vyztužené plasty: Zkouška ohybem - Metoda tříbodového ohybu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [39] Wyoming Test Fixture INC. *Long Beam Flexure Test Fixture: Obrázek* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.wyomingtestfixtures.com/Products/d2.html>
- [40] ČSN EN ISO 6603-1. *Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Litvínov: Český normalizační institut, 2000.
- [41] FRICTION, PEEL, PAPER & ADHESION. *Climbing Drum Peel Test Jig* [online]. 2001 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.elis.it/lloyd-pdf/Grips-frictionandadhesion.pdf>
- [42] ADHESIVESTOOLKIT. *Climbing Drum Peel Test* [online]. 2002 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.adhesivestoolkit.com/Docs/test/MECHANICAL%20TEST%20METHOD%201%20-%20Climbing%20Drum%20Peel%20Test.xtp>

- [43] Sizing Single Cantilever Beam Specimens for Characterizing Facesheet/Core Peel Debonding in Sandwich Structure. *Classes of facesheet/core debond tests* [online]. 2010 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100003052.pdf>
- [44] Mechanical Testing of Sandwich Panels. *Flatwise Tension Test* [online]. 2007 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Panel-Data-Sheets/SandwichPanels_global.pdf
- [45] REICHHOLD. *Using ASTM Method C297, Flatwise Tensile Strength* [online]. 2006 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://marccom.com/clients/reichhold/2007composites/pdfs/Presentations/TUB-Shower.pdf>
- [46] Wyoming Test Fixtures. *Sandwich Panel Flatwise Tensile Test* [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.wyomingtestfixtures.com/Products/fl.html>
- [47] Slideshare. *Aircraft structures* [online]. 2006 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/nasrulazhar/aircraft-structures-33729034>
- [48] Road Bike Action Magazine. *Rámová trubka kola Festka: Obrázek* [online]. 2012 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://roadbikeaction.com/features/rba-features/european-frame-builder-profile-festka>
- [49] Road Bike Action Magazine. *Kolo Festka: Obrázek* [online]. 2012 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://roadbikeaction.com/features/rba-features/european-frame-builder-profile-festka>
- [50] Light-Weighting Methodology in Rail Vehicle Design through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels. *The Korean Tilting Train eXpress (TTX)* [online]. 2011 [cit. 2015-03-11]. DOI: 978-91-7501-002-1. Dostupné z: http://www.kth.se/polopoly_fs/1.167679!/Menu/general/column-content/attachment/Licentiate_thesis_Wennberg.pdf
- [51] Pata, V.: *Úvod do exploratorní statistiky (přednáška)*. Zlín, UTB Zlín, 2010.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\frac{E_i}{E_1}$	[MPa]	Poměr modulů pružnosti
$\frac{S_1}{S_2}$	[mm ²]	Poměr obsahů ploch prvků
$\bar{\sigma}_f$	[MPa]	Napětí v přímých prutech
$\bar{\sigma}_{r,c}$	[MPa]	Napětí v zakřivených prutech
$\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	[MPa]	Poměr ohybových napětí materiálů
E_f	[MPa]	Ohybový modul pružnosti
E_k	[J]	Kinetická energie
F_o	[N]	Zatížení
$F_p - F_o$	[N]	Průměrné zatížení potřebné k odloupenutí a ohnutí vnější vrstvy
J_R	[mm ⁴]	Kvadratický moment redukovaného průřezu
M_k	[Nm]	Maximální ohybový moment zakřivených prutů
M_r	[Nm]	Maximální ohybový moment přímých prutů
Q_1		První kvartil
Q_2		Třetí kvartil
W_v	[mm]	Šířka vzorku
b_i	[mm]	Šířka prutu
b_{tR}	[mm]	Redukovaná šířka
r_0	[mm]	Rádus obruby pásků
r_i	[mm]	Poloměr bubnu
t_1, t_2, t_3	[mm]	Tloušťky desek
t_f	[mm]	Tloušťka vnějších vrstev
\bar{x}		Odchylka aritmetického průměru

η_b	[-]	Faktor efektivní účinnosti pro zakřivené pruty
σ_f	[MPa]	Napětí v zakřivených a rovných prutech
σ_{f1}	[MPa]	Ohybové napětí
$\sigma_{i(y)}$	[MPa]	Ohybové napětí
σ_n	[MPa]	Normálové napětí
σ_p	[MPa]	Průměrná pevnost v tahu naplocho
$\sigma_{r,max}$	[MPa]	Radiální normálově napětí jádra
τ_{max}	[MPa]	Smyková napětí
$\epsilon_{(y,z)}$	[-]	Poměrná deformace vlákna
$\epsilon'_f, \epsilon''_f$	[%]	Ohybové deformace
ΔF	[N]	Rozdíl sil
ΔS	[mm ²]	Rozdíl v průřezech
AL		Hliník
b, h	[mm]	Rozměry desek
d	[mm]	Vzdálenost mezi středy vnějších vrstev
E	[MPa]	Modul pružnosti
F	[N]	Síla
g	[m/s ²]	Tíhové zrychlení
IQR		Mezikvartilové rozpětí
K_o	[Nm ²]	Ohybová tuhost
L	[mm]	Vzdálenost podpěr
l	[mm]	Délka vzorku
M	[Nm]	Ohybový moment
m	[kg]	Hmotnost
Max		Maximální hodnota

Min		Minimální hodnota
N	[N]	Výsledná osová síla v průřezu
P	[Nm]	Mez pevnosti
PEI		Polyetherin
PET		Polystyren
PMMA		Polymethylmetakrylát
PUR		Polyuretan
PVC		Polyvibylchlorid
Q	[Nmm^{-1}]	Spojité liniové zatížení
r	[mm]	Poloměr zakřivení neutrální polohy ve vyšetřovaném místě
R	[mm]	Vnitřní rádius zakřiveného prutu
s', s''	[mm]	Průhyby uprostřed tělesa
T	[Nm]	Průměrný odlupovací moment
w	[mm]	Šířka vzorku
W	[J]	Energie (práce) pro dosažení maximální síly
y	[mm]	Vzdálenost krajního vlákna od neutrální osy
s		Směrodatná odchylka
ε	[%]	Poměrná deformace

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Sendvičová struktura [5].....	11
Obr. 2. Příklady konstrukcí sendvičových struktur [3,5].....	12
Obr. 3. Vazby tkanin; A) Plátno; B) Kerp; C) Atlas; D) Pletenina; [7].....	16
Obr. 4. Hybridní vlákna [10]	16
Obr. 5. Ukázka sendvičových struktur s kompozitními a prepreg potahy [16].....	19
Obr. 6. Schéma výrobního procesu prepregu [11].....	20
Obr. 7. Výroba jednovrstvého prepregu [7].....	21
Obr. 8. Výroba vrstveného prepregu pro aplikaci křídla letounu [9]	21
Obr. 9. Příklady použití kovových potahů [13,14]	23
Obr. 10. Pracovní diagram pěn: tah – tlak [20]	24
Obr. 11. SAN pěna [18]	26
Obr. 12. Aplikace hliníkové pěny [21]	27
Obr. 13. Vstříkovací výrobní linka pro PVC i jiných pěn [23]	28
Obr. 14. Výroby hliníkových voštin; A) - válcováním; B) - roztažením; [26].....	29
Obr. 15. Tvary buněk u hliníkových voštinových jader [27].....	30
Obr. 16. Nomex voštiny [19,28]	30
Obr. 17. Rozdělení způsobů výroby sendvičových struktur [7]	33
Obr. 18. Materiály pro vakuové vytvrzování; (A – vakuová fólie; B - prodyšná fólie; C,D – separační a odtrhové vrstvy; E – těsnicí páska) [33]	34
Obr. 19. Příklad vakuování sendvičové struktury [7].....	34
Obr. 20. Typické komponenty vakuového vytvrzovacího systému [33].....	35
Obr. 21. Vstříkování termoplastického pěnového materiálu (FIM) [30].....	36
Obr. 22. Příklad vytvrzovacího cyklu prepregu [34]	37
Obr. 23. Procesní metody vytvrzování prepregů [7]	38
Obr. 24. Autokláv [7].....	38
Obr. 25. Redukovaný průřez složeného prutu [35].....	40
Obr. 26. Průběh napětí sendvičové konstrukce [35].....	41
Obr. 27. Porušení sendvičových struktur [35]	42
Obr. 28. Napětí v zakřivených sendvičových prutech [36]	43
Obr. 29. Faktor efektivní účinnosti pro zakřivené pruty [36].....	44
Obr. 30. Třibodový ohyb, průběh ohybových momentů [2,7].....	46
Obr. 31. Čtyřbodový ohyb, průběh ohybových momentů [2,39]	47

Obr. 32. Systém padajícího tlouku (příklad) [40].....	49	
Obr. 33. Zařízení pro test odlupu [41]	50	
Obr. 34. Znázornění principu testu a průběhu zatěžování [43]	51	
Obr. 35. Zatížení vzorku dvojicí sil – metoda DCB [43]	51	
Obr. 36. Zkouška tahem naplocho; b) Upevnění vzorku v čelistech; c) Lepený spoj [44,46]	52	
Obr. 37. Sendvičová konstrukce použita k výrobě zadního křídla automobilu [29]	53	
Obr. 38. Část křídla letounu – použití sendviče s voštinovým jádrem [47]	53	
Obr. 39. a) Trubka rámu kola; b) Kolo Festka ze sendvičových trubek; [48,49].....	54	
Obr. 40. Korejský vlak TTX ze sendvičových panelů a ocelovým rámem [50]	54	
Obr. 41. Univerzální zkušební stroj ZWICK.....	57	
Obr. 42. Padostroj ZWIK	Obr. 43. Mechanický (ruční) padostroj	58
Obr. 44. Polymerní pěna AIREX T90.100 [21].....	60	
Obr. 45. Výroba sendvičové struktury (potah a jádro)	62	
Obr. 46. Výroba sendvičové struktury (separační, odtrhové, vakuovací fólie)	63	
Obr. 47. Vytvrzovací cyklus pro prepreg	63	
Obr. 48. Sendvičové desky	64	
Obr. 49. Rozměry přípravku pro tříbodový ohyb	66	
Obr. 50. Tříbodový ohyb přímého sendvičového prutu.....	67	
Obr. 51. Porušení přímého panelu s jádrem 5 mm	68	
Obr. 52. Porušení přímého panelu s jádrem 10 mm	69	
Obr. 53. Lokální porušení přímého panelu s jádrem 20 mm	69	
Obr. 54. Konkávní uložení zakřiveného sendviče	70	
Obr. 55. Schematické znázornění zakládání panelů mezi podpěrami	70	
Obr. 56. Poruchy konkávně uloženého panelu s jádrem 5mm a zakřivením R400 mm.....	72	
Obr. 57. Poruchy konkávně uloženého panelu s jádrem 10 mm a zakřivením R400 mm.....	73	
Obr. 58. Různé typy poruch sendvičů tloušťky jádra 20 mm.....	73	
Obr. 59. Deformace při konvexním uložení	74	
Obr. 60. Rozměry přípravku pro čtyřbodový ohyb	74	
Obr. 61. Čtyřbodové zatížení sendvičového panelu o tloušťce jádra 10 mm	75	
Obr. 62. Smykové porušení přímého panelu s jádrem 5 mm	76	
Obr. 63. Porušení přímého panelu s jádrem 10 mm	77	

Obr. 64. Smykové porušení jádra přímého panelu s jádrem 20 mm	77
Obr. 65. Lokální porušení přímého prutu s jádrem 20 mm	78
Obr. 66. Ukázka uložení zakřiveného sendviče při čtyřbodovém ohybu	78
Obr. 67. Deformace panelu se zakřivením R400 mm a jádrem 5 mm	80
Obr. 68. Smyková deformace panelu s jádrem 10 mm.....	81
Obr. 69. Ukázka deformovaného vzorku po čtyřbodové zkoušce (jádro 10 mm).....	81
Obr. 70. Delaminace vnější vrstvy mezi podpěrami vzorku s jádrem 20 mm.....	82
Obr. 71. Smyková delaminace jádra 20 mm.....	82
Obr. 72. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 5 mm	84
Obr. 73. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 10 mm	84
Obr. 74. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 20 mm	85
Obr. 75. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 5 mm	86
Obr. 76. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 10 mm	87
Obr. 77. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 20 mm	87
Obr. 78. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 5 mm	88
Obr. 79. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 10 mm	89
Obr. 80. Modul pružnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 20 mm	89
Obr. 81. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 5 mm	91
Obr. 82. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 10 mm	91
Obr. 83. Mez pevnosti v ohybu pro vzorky s jádrem 20 mm	92
Obr. 84. Porušení jádra při zkoušce tahem naplocho	93
Obr. 85. Vzorek po tahové zkoušce	94
Obr. 86. Diagram z tahové zkoušky	94
Obr. 87. Graf ohybové pevnosti po rázové zkoušce	96

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Příklad strukturální efektivity sendvičových panelů. Vliv tloušťky jádra na vlastnosti sendviče.[1]</i>	13
<i>Tab. 2. Vlastnosti skelných vláken dle druhu skloviny [2]</i>	17
<i>Tab. 3. Mechanické vlastnosti aramidových vláken [2]</i>	18
<i>Tab. 4. Rozmezí hustot a teplot sendvičových pěnových jader [18]</i>	24
<i>Tab. 5. Rozdělení a charakteristiky používaných lepidel</i>	32
<i>Tab. 6. Porovnání vytvrzovacích metod ve vysokoteplotní peci a autoklávu [7]</i>	38
<i>Tab. 7. Technické parametry zkušebního stroje ZWICK</i>	57
<i>Tab. 8. Mechanické vlastnosti prepregu PH840-300-42</i>	59
<i>Tab. 9. Vytvrzovací hodnoty prepregu PH 840-300-42</i>	59
<i>Tab. 10. Mechanické vlastnosti prepregu</i>	60
<i>Tab. 11. Vlastnosti polymerní pěny T90.100</i>	61
<i>Tab. 12. Seznam vyrobených a testovaných vzorků pro ohybovou zkoušku</i>	64
<i>Tab. 13. Modul pružnosti v ohybu testovaných struktur v [MPa]</i>	67
<i>Tab. 14. Mez pevnosti v ohybu testovaných struktur v [MPa]</i>	67
<i>Tab. 15. Modul pružnosti v ohybu testovaných struktur v [MPa]</i>	71
<i>Tab. 16. Mez pevnosti v ohybu testovaných struktur v [MPa]</i>	71
<i>Tab. 17. Modul pružnosti ve čtyřbodovém ohybu testovaných struktur v [MPa]</i>	75
<i>Tab. 18. Mez pevnosti ve čtyřbodovém ohybu testovaných struktur v [MPa]</i>	75
<i>Tab. 19. Modul pružnosti ve čtyřbodovém ohybu testovaných struktur v [MPa]</i>	79
<i>Tab. 20. Mez pevnosti ve čtyřbodovém ohybu testovaných struktur v [MPa]</i>	79
<i>Tab. 21. Maximální hodnoty sil při zkoušce pevnosti</i>	94
<i>Tab. 22. Srovnání tříbodové ohybové pevnosti po rázové zkoušce s etalonovým vzorkem</i>	95

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P1: TECHNICKÝ LIST PREPREG PH840-300-42

PŘÍLOHA P2: TECHNICKÝ LIST AIREX T.90.100

PŘÍLOHA P3: CD s diplomovou prací v pdf formátu



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/m², 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

PH840-300-42 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 PH840 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/mm².

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

Cured laminates fulfil the flame-retardant Rail specifications:

- BS 476-6 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 ²
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	296 g/m ² +-5 %
Weave Style		8H satin
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	AITM 1.0019/1B	18	MPa
	80		16	
Climbing Drum Peel ¹	RT	EN 2243-3	110	N/75 mm
	80		--	
Bending Load (4-P.) ¹	RT	AITM 1.0018 Fig.2	850	N
	80		--	
Tg (TMA)		TMA	> 80	°C

¹Sandwich structure

Burning Behavior

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



Notice

The data have been obtained from representative sample specimens. Because the properties depend strongly on the fabrication and testing conditions, Gurit cannot guarantee that the data listed above will be achieved with other processes and equipment.

Gurit (Zullwil) AG

Fabrikweg 54
CH-4234 Zullwil
Switzerland

T +41 (0) 61 795 06 01

F +41 (0) 61 795 06 04

Gurit (Kassel) GmbH

Otto-Hahn-Str. 5
D-34123 Kassel
Germany

T +49 (0) 561 99 85 63 0

F +49 (0) 561 99 85 63 22

E info@gurit.com

W www.gurit.com

DATA SHEET

02.2012 (replaces 09.2011)

AIREX[®] T90

Easy Processing Structural FST Foam

CHARACTERISTIC

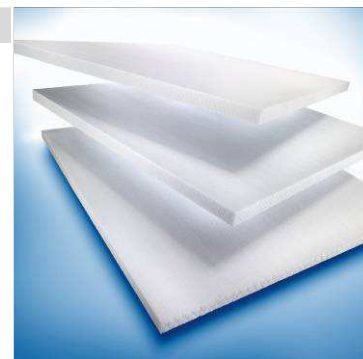
- Superior fire resistance (FAR 25.853; NF 16-101; DIN 5510)
- Outstanding fatigue strength
- Excellent long term thermal stability up to 100 °C (212 °F)
- Best thermal stability in process up to 150 °C (302 °F)
- Good thermal insulation
- Highly consistent material properties
- Easy to process with 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



Europe | Middle East | India | Africa

Airex AG
5643 Sins, Switzerland
T +41 41 789 66 00 | F +41 41 789 66 60
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.americas@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

AIREX BALTEK BANOVA

Typical properties for AIREX® T90		Unit (metrical)	Value ¹⁾	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	kg/m ³	Average <i>Typ. range</i>	65 60 - 70	110 105 - 115	145 140 - 150	210 200 - 220
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm ²	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 ²	Average <i>Minimum</i>	50 35	85 75	115 100	170 145
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm ²	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 ²	Average <i>Minimum</i>	85 70	120 90	170 140	225 180
Shear strength	ISO 1922	N/mm ²	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 ²	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 ²⁾	mm ± 5		610	610	610	610
	Length ²⁾	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

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

²⁾ 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	
	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.

AIREX BALTEK BANOVA

Typical properties for AIREX® T90		Unit (metrical)	Value ¹⁾	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	lb/ft ³	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 ²⁾	mm ± 5		610	610	610	610
	Length ²⁾	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

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

²⁾ 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.