

# **Mechanické a elektromagnetické vlastnosti sendvičových prvků**

Bc. Jakub Bělohlávek

---

Diplomová práce  
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Bělohlávek**  
Osobní číslo: **T19386**  
Studijní program: **N0788A270002 Výrobní inženýrství**  
Studijní obor: **Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Mechanické a elektromagnetické vlastnosti sendvičových prvků**

### Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární řešení se zaměřením na polymerní kompozity a voštiny, které vyhovují podmínkám pro přípravu sendvičových prvků.
2. Pomocí databáze CES EduPack navrhnete a optimalizujete sendvičové prvky se zaměřením na mechanické vlastnosti – ohybovou tuhost, průhyb a cenu.
3. Experimentálně připravte kompozitní laminy a s využitím voštin připravte sendvičové prvky.
4. Sendvičové prvky otestujte pomocí 3-bodové metody a proměřte účinnost proti elektromagnetickému záření v pásmu od 1 do 20 GHz.

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

**Seznam doporučené literatury:**

1. Ehrenstein Gottfried W.: Polymerní kompozitní materiály. 1.vyd. V ČR, ISBN: 978-80-86960-29-6, 2009.
2. ŠUBA, Oldřich: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001, skripta.
3. Michael F. Ashby: Materials Selection in Mechanical Design 5th Edition, Butterworth-Heinemann, 2017, ISBN-10: 0081005997, ISBN-13: 978-0081005996, <http://www.elsevier.com>
4. Knižní a časopisecké a zdroje dostupné prostřednictvím knihovny UTB ve Zlíně.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jarmila Vilčáková, Ph.D.**  
Centrum polymerních materiálů

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Kompozitní materiály jsou velmi perspektivní materiály, které nabízejí široké možnosti modifikace vlastností pro konkrétní aplikace. V této diplomové práci jsou popsány matrice a výztuže vhodné pro výrobu kompozitů, a také plniva, pomocí kterých lze modifikovat vlastnosti, a dále způsoby výroby kompozitních struktur. Dále se teoretická část zaměřuje na popis mechanického chování kompozitů, které je v některých ohledech odlišné od chování homogenních materiálů. Největší pozornost ale práce klade na vlastnosti kompozitů pod účinkem elektromagnetického pole a využitím sendvičových struktur jako materiálů využitelných pro elektromagnetické stínění. Součástí praktické části je výroba sendvičových panelů za použití kompozitních lamin s elektricky vodivými a magnetickými plnivami a hliníkových voštin použitých jako jádra. Tyto panely byly dále otestovány tříbodovou ohybovou zkouškou ke zjištění mechanických vlastností. Také byla prozkoumána účinnost elektromagnetickému stínění v daném frekvenčním rozsahu a na základě toho bylo určeno, zda konkrétní plniva v dané koncentraci splňují předpoklady pro využití v oblasti elektromagnetického stínění.

Klíčová slova: sendvič, kompozit, voština, účinnost elektromagnetického stínění, ohyb

## **ABSTRACT**

Composites are perspective materials that offer a wide range of possibilities for modifying properties for specific applications. The diploma thesis describes matrices and reinforcements suitable for the production of composites, as well as fillers, which can be used to modify properties. The thesis also deals with technologies of production of composite structures. The theoretical part focuses on the description of the mechanical behavior of composites, which is in some aspects different from the behavior of homogeneous materials. However, the work pays the greatest attention to the properties of composites under the influence of the electromagnetic field and the use of sandwich structures as materials usable for electromagnetic shielding. The practical part includes the production of sandwich panels using composite laminates with electrically conductive and magnetic fillers and aluminum honeycombs used as cores. The panels were tested by a three-point bending test to determine their mechanical properties. The efficiency of electromagnetic shielding in a given frequency range was also examined. Based on this it

was determined whether specific fillers in a given concentration meet the requirements for use in the field of electromagnetic shielding.

Keywords: sandwich, composite, honeycomb, electromagnetic shielding efficiency, bending

*„Velké odpovědi nejsou vyryté do kamene. Přizpůsobujeme se novým podmínkám a objevům. Jsme poddajní. Láska nemusí být příkazem ani vírou. Jsme zde proto, abychom odnaučili učení církve, státu a našeho vzdělávacího systému. Jsme tady, abychom zabili válku. V zákopech žádní andělé nejsou. Jsme tu proto, abychom žili naše životy tak dobře, aby se smrt bála nás odnést. Svět patří těm, co se neposerou.“*

Charles Bukowski (1920–1994)

*„Hakuna Matata“*

Timon & Pumba

Chtěl bych touto cestou poděkovat vedoucí své diplomové práce doc. Ing. Jarmile Vilčákové, PhD. za věnovaný čas a odborné konzultace. Za pomoc v laboratoři a věcné připomínky děkuji také Ing. Markovi Jurčovi a Ing. Markovi Gořalíkovi. Poděkování připadá i mojí rodině a všem mým kočkám, a to za jejich podporu během celého mého studia.

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>13</b>
1.1 VÝZTUŽE.....	15
1.2 MATRICE .....	18
<b>2 SENDVIČOVÉ PRVKY</b> .....	<b>19</b>
2.1 JÁDRA SENDVIČOVÝCH PRVKŮ .....	20
2.2 VÝROBA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR.....	23
<b>3 PLNIVA ELEKTROMAGNETICKY STÍNÍCÍCH KOMPOZITŮ</b> .....	<b>26</b>
3.1 ELEKTRICKÁ VODIVOST A TEORIE PERKOLACE .....	27
3.2 MAGNETICKÁ PERMEABILITA .....	28
3.3 ÚČINNOST ELEKTROMAGNETICKÉHO STÍNĚNÍ .....	30
3.4 VÝZKUM A VYUŽITÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH PLNIV V KOMPOZITECH.....	32
<b>4 OHYB SENDVIČOVÝCH PRVKŮ</b> .....	<b>36</b>
4.1 PORUCHY OHÝBANÝCH SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ .....	38
4.2 MĚŘENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	39
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>41</b>
<b>5 POUŽITÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>42</b>
5.1 SÍŤOVACÍ SYSTÉM .....	42
5.2 SKELNÁ TKANINA.....	43
5.3 PLNIVA.....	43
5.4 ANALÝZA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ V DATABÁZI GRANTA EDUPACK .....	43
<b>6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES</b> .....	<b>45</b>
6.1 VÝROBA LAMINÁTŮ RUČNÍ LAMINACÍ ZA POUŽITÍ VAKUA.....	45
6.2 LEPENÍ SENDVIČŮ .....	48
6.3 PŘEHLED VYROBENÝCH LAMINÁTŮ A SENDVIČŮ .....	50
6.4 DĚLENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES VODNÍM PAPRSKEM .....	51
<b>7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ</b> .....	<b>53</b>
7.1 ROZPTYLOVÉ PARAMETRY .....	54
7.2 ZASTOUPENÍ SLOŽEK INTENZITY ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ (R, T, A) PŘI RŮZNÝCH FREKVENCÍCH .....	57
7.3 ÚČINNOST STÍNĚNÍ PROTI ELEKTROMAGNETICKÉMU ZÁŘENÍ.....	60
<b>8 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ TROJBODOVÉHO OHYBU</b> .....	<b>62</b>



8.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH SÉRIÍ .....	64
8.2	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ Z MĚŘENÍ TROJBODOVÉHO OHYBU .....	73
<b>9</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ A NÁVRHY NA ZLEPŠENÍ.....</b>	<b>77</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>89</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>92</b>

## ÚVOD

Elektromagnetické pole je vyzařováno při pohybu jakéhokoli elektrického náboje s nenulovým zrychlením. Generování, vysílání a přijímání elektromagnetických vln je děj, kterého je využíváno v technických zařízeních v oblastech telekomunikace, mobilních sítí, radarové a rádiové techniky, Wi-Fi sítí nebo se také využívá k ohřevu, kdy dochází ke změně elektromagnetické energie na tepelnou. Vlivem rostoucího technologického pokroku a oblíbenosti bezdrátového přenosu signálů tak v našem okolí registrujeme rostoucí hladinu elektromagnetického smogu, kdy různá zařízení pracují na různých frekvencích (resp. v různém frekvenčním rozsahu) a jejich elektromagnetická emisivita má prokazatelný vliv na technická zařízení i na biologické systémy v jejich blízkosti.

Kvůli zabránění dopadání elektromagnetických vln, nebo naopak k zabránění vysílání elektromagnetických vln, se zařízení (potažmo biologické systémy) chrání pomocí materiálů, které dokážou záření odrazit nebo pohltit. Běžně se k těmto účelům používají kovy, ty však mají vysokou hustotu i elektrickou vodivost a stíní převážně na základě odrazu s minimem absorpce. Jakožto absorbéry elektromagnetického záření lze využívat plněných kompozitních struktur, které krom elektromagnetických vlastností, získaných použitými plnivými anebo výztužemi, disponují také nízkou hmotností, dobrou ohybovou tuhostí a jsou hojně využívaným konstrukčním materiálem.

U kompozitních materiálů rozlišujeme výztuž, která nese mechanické vlastnosti, a matici, která výztužný materiál drží pohromadě a udává tvar celku. Kompozity mohou zvenčí působit jako homogenní materiály, uvnitř kompozitu však lze zcela bezpečně rozlišit výztuž, matici a jejich rozhraní. Mechanické vlastnosti kompozitů jsou defacto odrazem vlastností výztuže, nicméně vlákna jako taková nemají samostatně žádnou tuhost. Klíčová je také orientace výztuže, která udává odolnost daného materiálu v určitém směru. Použité matrice jsou nejčastěji polymerní materiály (termoplasty, reaktoplasty i elastomery) omezeně jsou využívány i kovy nebo keramika. Výztuž je sycena polymerní maticí v plastickém až tekutém stavu což dává prostor pro vmíchání dalších plniv a tím i modifikaci vlastností dané kompozitní struktury. Lamináty, tedy plošné kompozitní dílce, jsou povětšinou tenkostěnné výrobky s relativně nízkou tuhostí. Ke konstrukčním účelům tak jsou často využívány ve formě sendvičových struktur, kdy lamináty tvoří horní a dolní potah sendviče a mezi nimi se nachází nejčastěji pěnové nebo voštinové jádro o daleko větší tloušťce. Jako jádrové materiály jsou většinou voleny lehké a poddajné materiály (pěny, voštiny). Ve spojení s potahovými materiály ale dochází ke vzniku sendviče s velmi vysokou ohybovou tuhostí.

To je způsobeno oddálením materiálu od neutrální osy podobně jako v případě profilového nosníku tvaru písmene I. Využívanými skupinami plniv pro modifikaci elektrických a elektromagnetických vlastností jsou různé formy uhlíkových plniv nebo kovové prášky na bázi feritů manganu, zinku, niklu nebo jejich kombinaci.

Relativně dobré mechanické vlastnosti v kontrastu s nízkou hmotností a širokou dostupností materiálů dělají ze sendvičů, a kompozitů obecně, materiál s velkými aplikačními možnostmi. Možnost modifikace vlastností pomocí plniv pak tento potenciál dále rozšiřuje o použití v oblasti elektromagnetického stínění. Vzhledem ke stále zvyšujícímu se trendu konzumnosti v naší společnosti bychom však neměli zapomínat na to, že není potřeba odpad likvidovat, pokud žádný odpad nevzniká. Stejně tak to platí o elektromagnetickém vlnění, jehož využití je nedílnou a důležitou součástí většiny moderních technologií, nicméně jeho používání by mělo být omezeno všude tam, kde nemůžeme ochránit vše, co by tímto vlněním mohlo být negativně ovlivněno.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

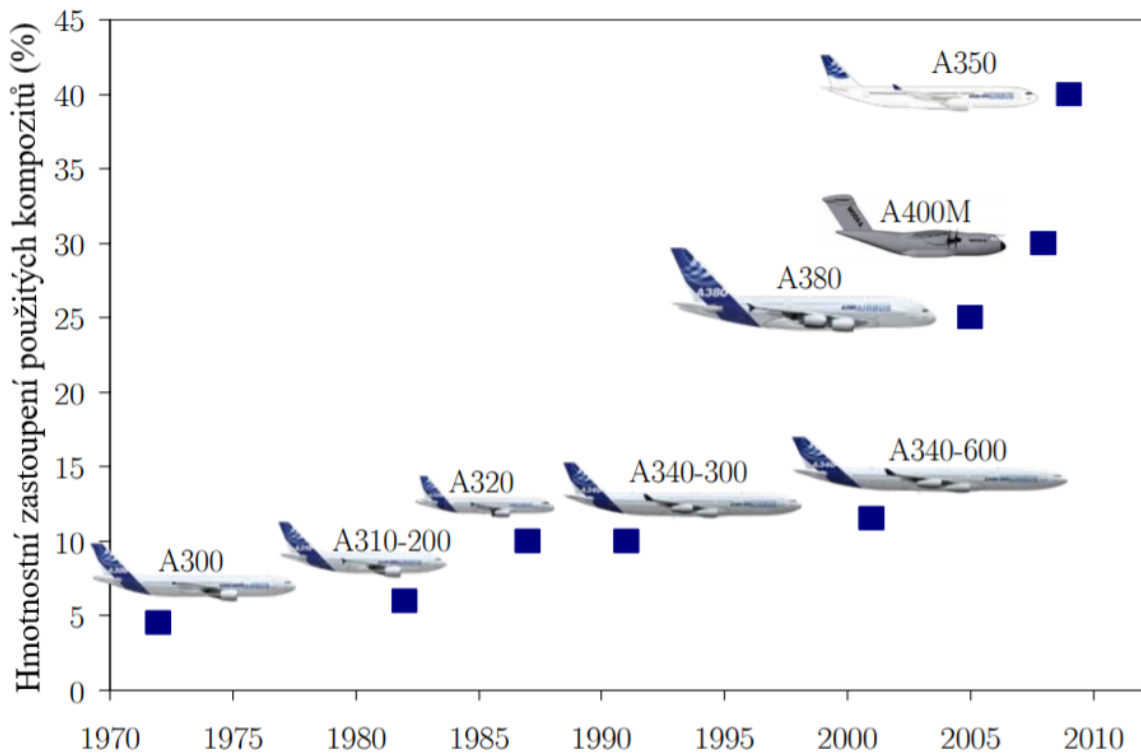
## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Materiálů matric je velké množství, stejně tak i materiálů, tvarů a druhů výztuže. Z nepřeberného množství kompozitních materiálů bude proto dále pozornost věnována primárně kompozitům s reaktoplastickými maticemi a s vláknovou výztuží, jejichž zpracováním a výrobou sendvičů z nich se zabývá praktická část práce.



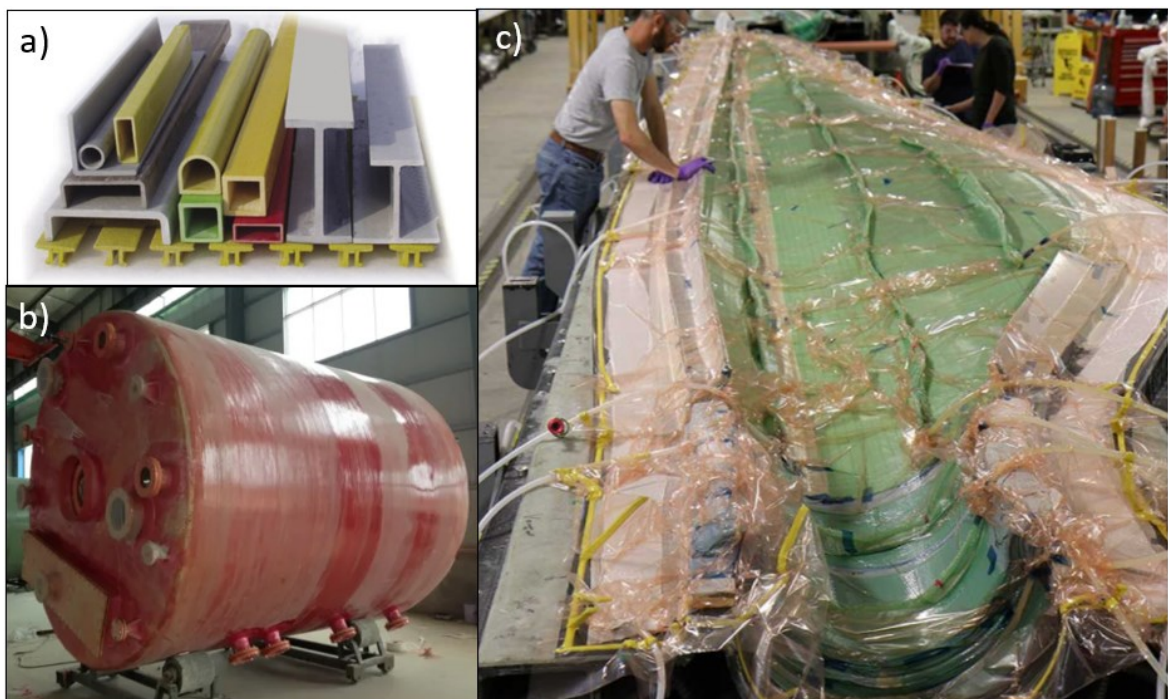
Obrázek 1: Oblasti aplikačního využití kompozitních materiálů. Dle [21]

V kompozitech rozlišujeme výztuž, která je nositelem mechanických vlastností, a matici, která udává tvar výrobku. Vzájemné spojení těchto dvou materiálů musí být co nejdokonalejší s velkou vzájemnou adhezí. Kompozity jsou konstrukčním materiálem



Obrázek 2: Hmotnostní zastoupení použití kompozitů v letadlech společnosti Airbus v letech 1970 až 2010. [7]

využívaným rozšířeně v dopravním průmyslu (automobilová, letecká, vlaková i námořní doprava) a to pro aplikace v interiéru i exteriéru. Na obrázku 2 je znázorněn vývoj využívání kompozitních materiálů v letadlech vyráběných společnostmi Airbus v posledních několika dekádách. Přínos kompozitů je hlavně v nízké hmotnosti současně s relativně dobrými pevnostními charakteristikami při různých druzích namáhání (vzhledem k možnosti různé orientace výztuže), i když vlákna jako taková jsou odolná hlavně v tahu. V závislosti na použitých materiálech matrice a výztuže a popřípadě dalších plniv mohou být kompozitní materiály elektricky vodivé i izolující, disponovat chemickou odolností nebo samozhášivostí a jejich výroba bývá často technologicky i požadovanými vstupy méně náročná než při použití jiných, zejména kovových materiálů (i když naopak existují i výrobní technologie kompozitních struktur velmi procesně náročné). Mimo zmíněný dopravní průmysl tak kompozity nacházejí uplatnění jako profilové stavební materiály, pro výrobu nádrží a nádob, v energetickém průmyslu, při výrobě velkoplošných dílců, bazénů, skluzavek, jako levnější náhrady kamenných podlah, jako absorbery balistických dopadů apod. [1, 4, 7]



Obrázek 3: Příklady použití kompozitních výrobků s vláknovou výztuží. a) stavební profily, b) tlaková nádoba, c) list větrné elektrárny při výrobě. [9, 10, 11]

Velký vliv na vlastnosti kompozitu má vzájemný poměr objemu matrice a výztuže. Pro dokonalý přenos napětí v kompozitu musí být výztuž dokonale smáčená matricí (což může být v případě vláknových výztuží ve formě tkanin někdy technologicky problematické). Nedokonale smáčené plochy výztuže jsou pak často místy vzniku vad. Na druhou stranu, optimální množství matrice je co nejnižší a jen takové, jaké je nezbytně nutné k zaujmutí

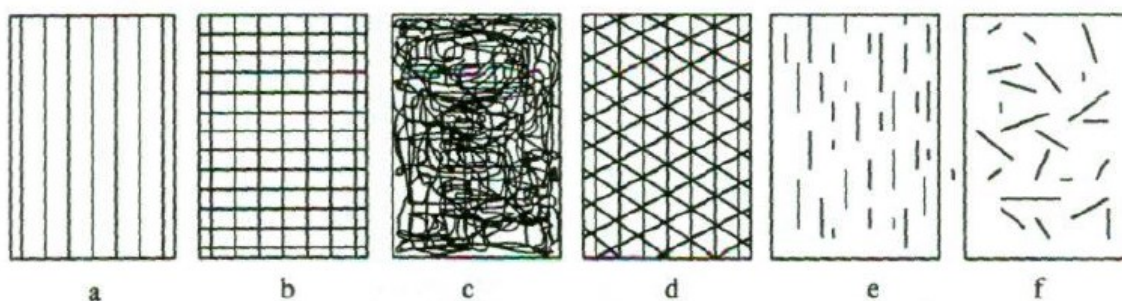
požadovaného tvaru, protože přebytečná matrice v systému způsobuje snížení mechanických vlastností. Optimální poměrné zastoupení výztuže a matrice tedy může vést k dosažení nejefektivnějšího synergismu kompozitní struktury. [2, 5]

## 1.1 Výztuže

Klíčovými vlastnostmi výztužných materiálů jsou jejich tvar, velikost, orientace, druh materiálu (resp. jeho chemické složení), popřípadě i jejich povrchová aktivita. Z těchto charakteristik je nutno vycházet při výběru vhodné výztuže vůči dané matrici, a především k určení její vhodnosti k požadované aplikaci. [1, 3]

Tvarem se výztuže rozlišují jako částicové (partikulární) a vláknové. Částicové výztuže a plniva jsou často spojeny s úsporou hmotnosti a s modifikací vlastností, převážně zlepšení obrobiteľnosti nebo dodání tepelné či elektrické vodivosti. Mají však také zpevňující charakter a významně se podílejí na celkových mechanických vlastnostech. Částicová výztuž zvyšuje odolnost opotřebení a ořezu, nicméně v křehkých maticích může její použití vést ke snížení celkové pevnosti. [5, 6]

Vláknová výztuž se používá v několika podobách, které jsou znázorněny na obrázku 4. Tkaniny, na tomto obrázku označeny písmenem b, se vyrábějí s různými vazbami (plátňová, keprová, atlasová, a další), které jsou vhodné pro různé aplikace v závislosti na složitosti vyráběného dílce. Následují rohože (c), tyto mohou být tvořeny krátkými, dlouhými i nekonečnými vlákny. Kontinuální vlákna mohou být také využívána při technologii navíjení a pultruze, kdy jsou navíjena sice jednosměrně orientovaná vlákna, ale pomocí různých vrstev a převínutí lze vytvořit výrobek s vícesměrně orientovanou strukturou. [1, 12]



Obrázek 4: Některé možné uspořádání vláknové výztuže: a – jednosměrné uspořádání, b – tkanina, c – rohož, d – vícesosá výztuž, e – krátká vlákna orientovaná, f – krátká vlákna neorientovaná [12]

Co se týče materiálů vláknových výztuží, existuje jich celá řada. Některé materiály a hodnoty jejich vybraných vlastností jsou uvedeny v tabulce 1 (udány jsou hodnoty pouze pro vlákna, nikoli pro kompozity z nich).

Tabulka 1: Srovnání vlastností vybraných materiálů vláken. [5, 6, 13]

materiál	modul pružnosti v tahu $E$ (GPa)	mez pevnosti v tahu $\sigma_p$ (GPa)	hustota $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
E – sklo	73	3,5	2,6
S – sklo	86	4,6	2,5
uhlík (vysokomodulový)	390	2,1	1,9
uhlík (vysokopevnostní)	240	2,5	1,9
aramid (Kevlar 49)	130	2,8	1,5
konopí	70	0,6	1,5
juta	60	0,5	1,3
len	100	0,3	1,5
bavlna	27	0,3	1,5

Nejširší uplatnění jako výztužný materiál nachází skelná vlákna a tkaniny. Jedná se o materiál levný a zároveň disponující vlastnostmi, které jsou pro většinu aplikací dostačující. Skelná vlákna se vyrábí v několika standardizovaných druzích, které jsou označeny písmeny (např.: A, E, C, L, S), a liší se elektroizolačními vlastnostmi, tepelnou vodivostí, odolností vůči agresivním prostředím i mechanickými vlastnostmi. Vlastnosti skelných vláken jsou ovlivněny poměrem základních složek sklářských směsí (oxidy křemíku) a dalších přísad (oxidy hliníku, vápníku, hořčíku, popř. oxidy bóru nebo alkalické kovy jako sodík nebo draslík). Roztavené sklo je dluženo průchodem přes trysky zvláknovací hlavy, čímž je dosaženo malého průměru vlákna v rozsahu 5 až 40  $\mu\text{m}$  (nejčastěji okolo 14  $\mu\text{m}$ ) a zlepšení mechanických vlastností. Kvůli slabé adhezi skla k polymerním materiálům jsou vlákna apretována (lubrikována) povrchově aktivními látkami, které zaručují přilnavost vlákna a matrice. [13, 19]

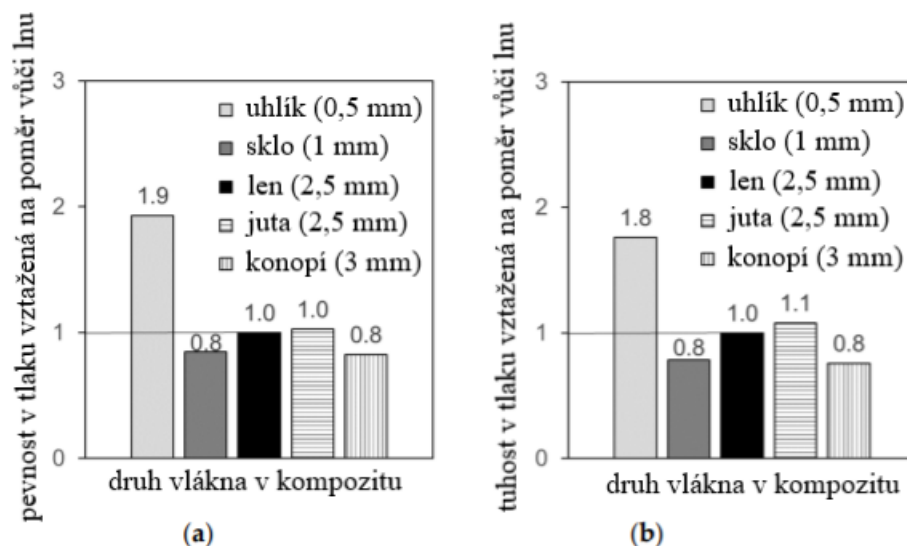
Pro více namáhané prvky, nebo pokud je požadavek na hmotnost přísnější, je vhodným materiálem vlákno uhlíkové. Nevýhodou uhlíkové výztuže je to, že se při nárazech tříští a do prostoru jsou vymrštěny malé jehly připomínající úlomky vláken z tkaniny, a proto je jeho používání v interiérech dopravních prostředků značně omezeno. Průrazům velmi odolávají tkaniny známé pod obchodními názvy Kevlar nebo Nomex. Jedná se o vlákna aromatických polyamidů, zkráceně aramid, která se využívají mimo jiné k výrobě neprůstřelných vest



(Kevlar) a oblečení hasičů odolné vysokým teplotám (Nomex). V kompozitních aplikacích se aramidová vlákna používají jako výztuž helem nebo nádrží vrtulníků a formulí. [5, 13]

Přírodní materiály jsou pro použití ve vlákny vyztužených kompozitech zajímavé hlavně z hlediska obnovitelnosti. Len, juta, konopí a další rostliny jsou udržitelné a obnovitelné plodiny, které mají relativně krátkou dobu růstového cyklu a při jejich pěstování a produkci je potřeba minimální množství herbicidů a energie. Přírodní materiály také podléhají biodegradaci, což může být výhodou z hlediska recyklace, ale zároveň tato vlastnost omezuje jejich dlouhodobé používání. [8]

Výzkum provedený na Ústavu stavebního inženýrství Univerzity v Sydney publikován v periodiku *fibers* v roce 2020 srovnává vlastnosti kompozitů se skelnými, uhlíkovými a různými přírodními vlákny při kompresi. Jako zkušební těleso byla zvolena tenkostěnná trubka čtvercového průřezu o straně 100 mm se zaoblenými rohy. Kompozity z přírodních vláken měly větší tendenci ke ztrátě stability způsobené vzpěrným namáháním a u těchto vzorků snadněji docházelo k bortění stěn. Při použití větší tloušťky stěny (2,5 až 3 mm), dokázaly zkušební tělesa s přírodními vlákny dosáhnout srovnatelných vlastností jako skelné kompozity o tloušťce stěny 1 mm. V grafech na obrázku 5 jsou tyto výsledky shrnuty v poměru vůči kompozitu z lněných vláken. Čísla v závorkách v legendě grafu reprezentují tloušťku stěny daných kompozitů. [8]



Obrázek 5: Graf pevnosti v tlaku vláknových kompozitů (a), graf tuhosti v tlaku vláknových kompozitů (b). [8]

## 1.2 Matrice

Matrice zajišťuje polohu výztuže a tvar výrobku. Také musí být odolná prostředí, ve kterém se bude výrobek používat. Reaktoplastické matrice jsou při výrobě kompozitů používány ve formě kapalných vysokomolekulárních látek, které po přidání síťovacího činidla (tvrdidla, tužidla) vytváří velmi složitou chemickou síť a stávají se látkami pevnými. Tento proces se označuje jako vytvrzování a u některých druhů pryskyřic je pro jeho úspěšný průběh nutno dodat systému také teplo, tlak, nebo kombinaci obou. U reaktoplastů může při vytvrzování docházet ke smrštění a chemická reakce bývá doprovázena vznikem tepla. Zpracovatelské okno, při kterém je možno pryskyřici po přidání tvrdidla zpracovávat se nazývá gel-time, čas gelace nebo také zpracovatelský čas. Po vypršení této doby se viditelně projevuje síťovací reakce, začíná se rapidně zvyšovat viskozita matrice, schopnost smáčet výztuž klesá a technologicky vzato je již matrice nepoužitelná. Vybrané druhy reaktoplastických pryskyřic jsou uvedeny v následující tabulce společně s jejich základním popisem. [1, 5, 13]

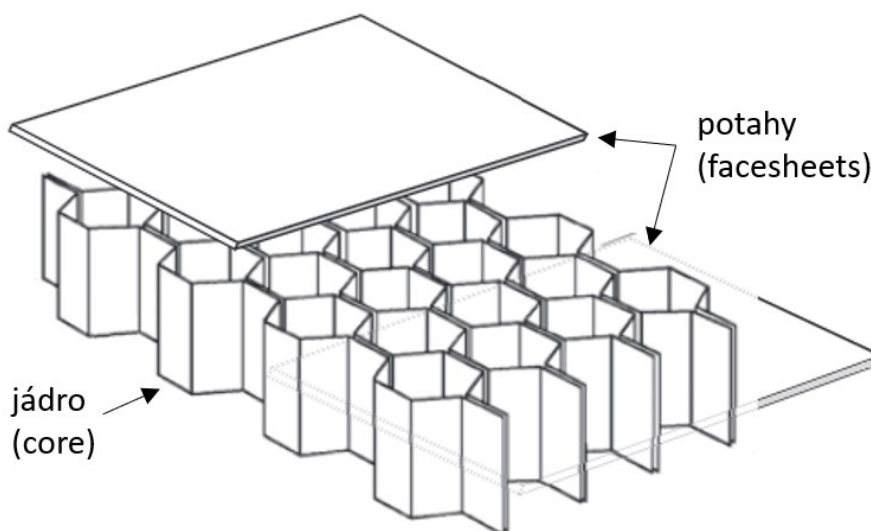
Tabulka 2: Výhody, nevýhody a použití vybraných reaktoplastických matric. [1, 5]

reaktoplastické matrice				
druh	Epoxidové	Polyesterové	Vinylesterové	Fenolické
výhody	vyvážené mechanické vlastnosti	nízká hodnota smrštění	vysoká chemická odolnost	vysoká odolnost teple a hoření
	pomalá vytvrzovací reakce	nízká cena	houževnatost	odolnost chemikáliím
nev.	vyšší cena	vypařování styrenu	nízká tvarová stálost	složitější proces vytvrzování
aplikace	pevnostní aplikace, formy, nástroje, dopravní průmysl	velkoplošné výrobky, trupy lodí, nádoby pro dopravu, bazény	trubky, potrubí, nádrže, ČOV	interiéry dopravních prostředků

Pomalá vytvrzovací reakce uvedená u epoxidových pryskyřic je výhodná z hlediska míchání plniv do kompozitních struktur. Na druhou stranu, zpracovatelské okno může být v některých případech zbytečně dlouhé a může tak prodlužovat výrobní cyklus v sériové výrobě. Vytvrzovací proces fenolických pryskyřic často vyžaduje autokláv nebo jiné zařízení s nastavitelným proměnlivým tlakem a teplotou v čase, což může razantně zvýšit finanční náročnost výroby. [5]

## 2 SENDVIČOVÉ PRVKY

Sendviče jsou materiálovou konstrukcí obecně složenou z jádra sendviče, které je potaženo krycími vrstvami. Tyto vnější vrstvy se označují jako potahy (angl. facesheet). Potahy sendvičů jsou pevné a tuhé materiály, často lamináty nebo kovové plechy. Požadavek na jádra (angl. core) je pak co nejnižší hmotnost a mechanické vlastnosti bývají zpravidla výrazně nižší než u potahových materiálů. Kombinací těchto prvků tak vzniká sendvič s relativně nízkou hmotností ale zároveň s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi hlavně v oblasti ohybové tuhosti. Velký vliv na přenos napětí v sendviči mezi potahem a jádrem má rozhraní těchto dvou prostředí. Při zatížení ohybem pak potahy nesou normálová napětí, zatímco veškerá napětí smykového charakteru jsou přenášena jádrem sendviče. Schéma sendviče je znázorněno na obrázku 6. [2, 5, 14]



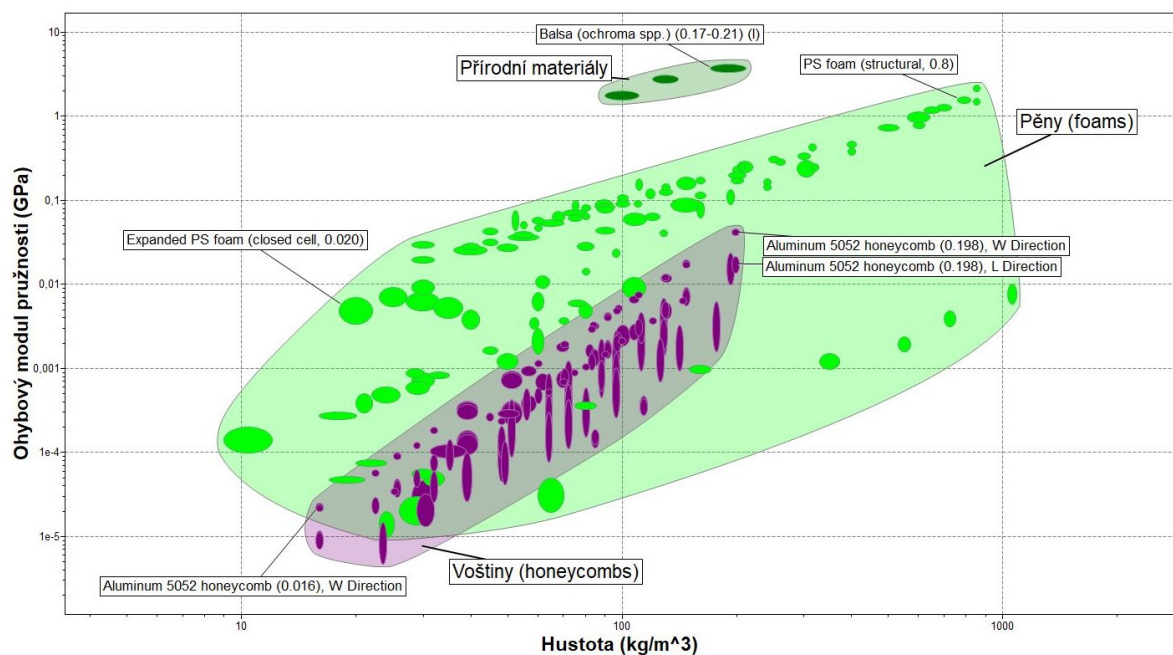
Obrázek 6: Schématické znázornění sendviče (v tomto případě s voštinovým jádrem). Dle [16]

Sendvičová struktura dává svou složitostí prostor ke značnému množství modifikací v závislosti na požadované aplikaci. Lze vytvořit například materiálově nesymetrické prvky, kdy materiály použité na horní a dolní potah jsou odlišné, nebo jsou stejné ale v jiné tloušťce. Oba případy mohou významně změnit tuhost a odolnost sendviče během ohybového namáhání, při kterém jsou vnitřní vlákna namáhána tlakem a vnější vlákna konstrukce namáhána tahem. Pro interiérové aplikace lze krycí plochy sendvičů také opatřit gel-coatem (pohledová vrstva, která se nanáší na formu a při vytvrzování přilne na povrch potahu) nebo ochrannými nástřiky nebo nátěry (aplikovanými až po vytvrzení). S širokým spektrem jádrových materiálů (viz kap. 2.1) a s prakticky nevyčerpatelným fondem laminátových kompozitů (druh výztuže, orientace výztuže, orientace výztuže v jednotlivých

vrstvách, druh matrice a výztuže, technologie výroby, vliv plniv...) jsou sendviče obrovskou materiálovou skupinou s velkým aplikačním potenciálem. [2, 5, 15]

## 2.1 Jádra sendvičových prvků

Nejrozšířenější skupiny materiálů, které se využívají k tvorbě sendvičových jader jsou pěny a voštiny. Uplatnění však nalézají také přírodní materiály (balza, korek). Následující graf vygenerovaný pomocí softwarové materiálové knihovny CES Granta EduPack 2020 zobrazuje vybrané typy jádrových materiálů v závislosti ohybového modulu pružnosti na hustotě, kdy veličiny na osách grafu jsou uvedeny v logaritmickém měřítku. Hlavním

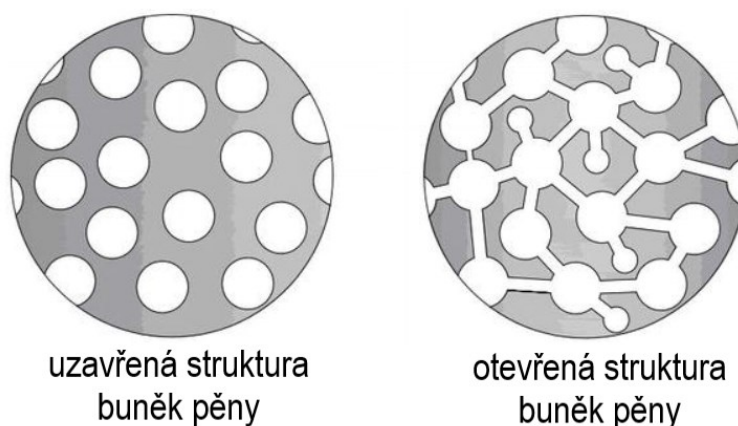


Obrázek 7: Graf srovnávající vybrané materiály jader sendvičů z hlediska závislosti ohybového modulu pružnosti a hustoty.

účelem tohoto grafu je znázornění, že pěny i voštiny disponují širokým spektrem vlastností, a to v závislosti nejen na jejich materiálu, ale také na technologickém zpracování a velikosti, tvaru a struktuře buněk. Jinými slovy: z jednoho materiálu lze vyrábět pěny (popř. voštiny) s různými vlastnostmi. V levé části grafu v oblasti pěnových materiálů (zeleně) je znázorněna pěna z expandovaného polystyrenu (materiál používaný jako stavební tepelná izolace). Z polystyrenu je vytvořena i strukturovaná pěna znázorněna v pravé části zelené oblasti. Rozdíl ohybového modulu je řádově až stonásobný, nicméně i hustota (a tím pádem celková hmotnost sendviče) rapidně roste. Rozsah hustot jádrových pěn je od 10 do 1000 kg/m³ při ohybovém modulu pružnosti v rozmezí od 10 kPa do 3 GPa. U voštin jsou tyto intervaly užší, nicméně variace hustoty se stále pohybuje od 15 do 110 kg/m³ při modulu pružnosti v ohybu od 3 kPa do 30 MPa. [3, 14]

### 2.1.1 Pěny jako jádrové materiály

Pěny používané v jádrech sendvičů jsou nejčastěji polymerního původu. Existují a v sendvičích se omezeně používají i pěny kovové. Hlavními vlastnostmi pěnových materiálů z hlediska využití v sendvičích jsou jejich hustota, odolnost smykovému namáhání, navlhavost, tepelně nebo zvukově izolační schopnosti a vnitřní struktura (která má velmi podstatný vliv na všechny předešlé parametry). Struktura pěn se rozlišuje hlavně na uzavřenou a otevřenou a je schematicky znázorněna na obrázku 8. [14, 18]



Obrázek 8: Uzavřená (vlevo) a otevřená (vpravo) struktura buněk pěny. Dle [18]

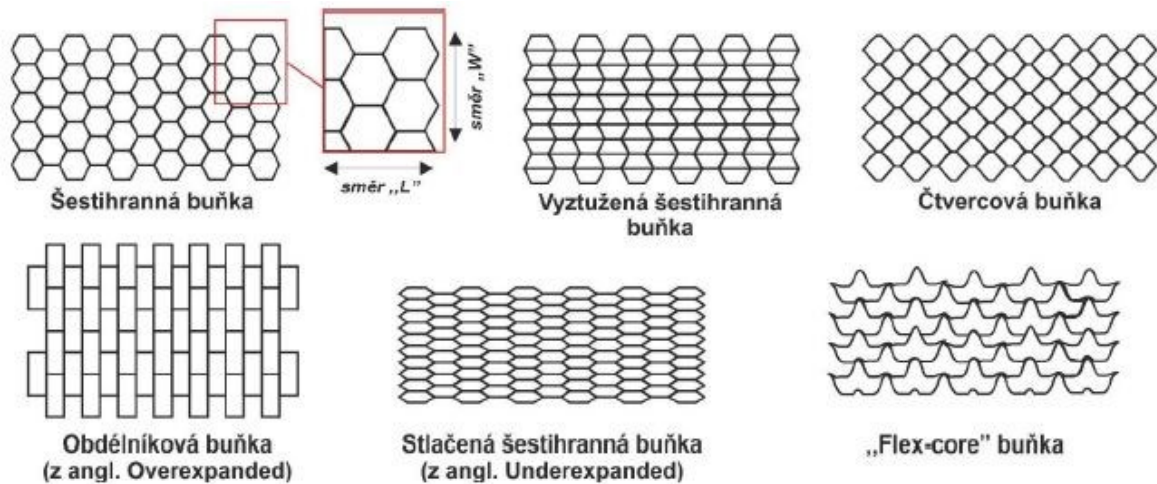
Co se týče výroby polymerních pěn, pak převažují technologie vstřikování, vytlačování, nebo rozpouštění plynu v polymerní matici (první dvě technologie se využívají převážně pro termoplasty, poslední pak pro reaktoplasty). Vytlačované pěny jsou často používané a při jejich výrobě se napěněné struktury dosahuje přidáním nadouvadla do polymerní taveniny v průběhu vytlačování. Dekompozici nadouvadla lze řídit pomocí parametrů technologie (teplota, tlak) a tak lze ovlivnit velikost i množství vzniklých buněk. K výrobě pěn pro jádra sendvičů jsou používány polymerní materiály jako PS (expandovaný i extrudovaný), PVC, PMI, PIR, PET, PU, SAN nebo také fenolické pryskyřice. [3, 15, 17]

### 2.1.2 Voštiny jako jádrové materiály

Nejčastějším materiálem pro výrobu voštinových jader je hliník. Dále pak jsou vyráběny a používány voštiny z oceli, titanu nebo slitin niklu. Z nekovových materiálů jsou používány termoplasty nebo voštiny z papírové lepenky impregnované reaktoplastickými pryskyřicemi. Impregnují se také voštiny z aramidových vláken kalandrovaných do formy papíru. Tyto voštiny (nejčastěji označovány pod obchodním názvem Nomexové) se impregnují fenolickou pryskyřicí. Fenol i aramid mají vysokou odolnost teple i hoření

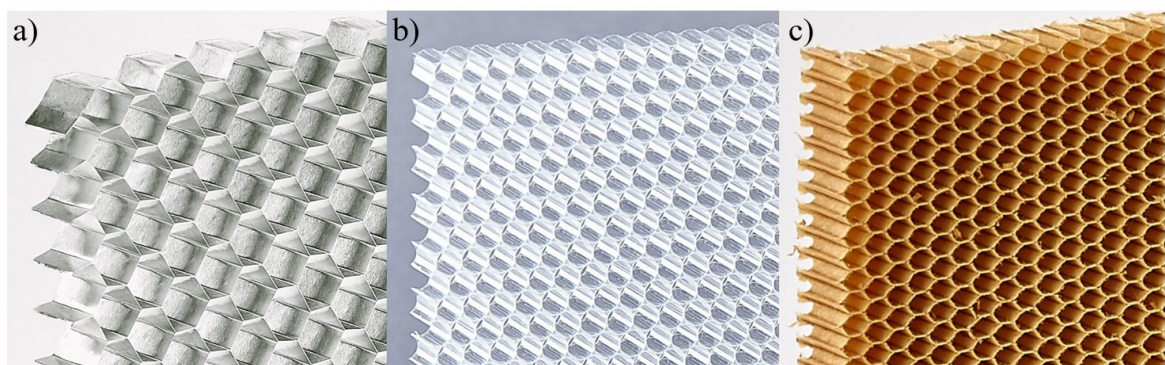


a takto vytvořená voština odolá teplotám až 400 °C, a proto je tento materiál využíván v interiérech letadel nebo jako dielektrický izolátor pro zařízení pracující s vysokou teplotou jako transformátory, generátory, turbíny nebo elektromobily. [14, 20]



*Obrázek 9: Některé tvary buněk voštinových struktur používaných v sendvičích. Dle [41]*

Voštiny lze charakterizovat tvarem a velikostí buněk, tloušťkou stěny buňky a výškou voštiny. Tvarů buněk existuje celá řada a jsou znázorněny na obrázku 9. Nejčastěji využívaným tvarem voštinových buněk jsou však šestiúhelníky připomínající tvar včelí plástve (angl. honeycomb). Důležitým faktorem je orientace buněk voštiny v sendviči vůči namáhání. U šestihranných buněk je rozlišován podélný směr L (z angl. longitudinal) a příčný směr W (z angl. width). Tyto směry jsou taktéž znázorněny na obrázku 9 a rozdíl v ohybovém modulu pružnosti stejných voštin ohýbaných v rozdílných směrech je viditelný v pravém horním rohu fialové části grafu na obrázku 7. Dle tohoto grafického znázornění dosahuje voština orientovaná ve směru W větší ohybového modulu pružnosti než voština orientovaná v L směru. [14, 20]



*Obrázek 10: a) hliníková voština, b) polykarbonátová voština, c) aramidová voština. [21]*

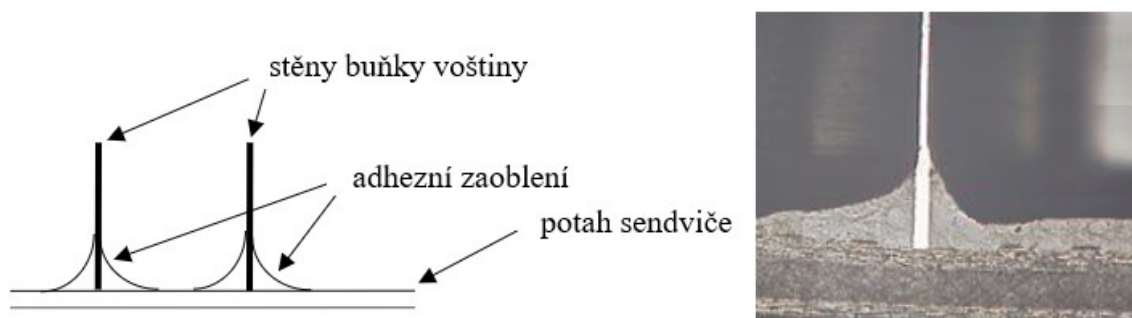
Termoplastické voštiny jsou nejčastěji vyráběny z PC, PP, PE nebo ABS. Oproti kovovým voštinám jsou typické svými dielektrickými vlastnostmi a odolností korozi. Jejich konstrukční využití je kvůli nižším mechanickým vlastnostem omezeno a termoplastické

voštiny se většinou využívají pro interiérové prvky nebo jako tlumiče vibrací a zvuku. Mezi výrobními technologiemi převažuje vstřikování, popřípadě vytlačování. [14]

Kovové voštiny se vyrábějí nejčastěji dvěma způsoby. První je za využití tvarování plechu pomocí drážkovaných válců. Takto tvarované plechy jsou poté položeny na sebe za vzniku požadovaného tvaru buňky a v místě styku jednotlivých plechů jsou svařeny nebo lepeny. Druhá technologie, využívaná hlavně pro lehčí slitiny, zejména ty hliníkové, se provádí tak, že jsou plechy potřeny lepidlem v pruzích. Po navrstvení těchto plechů do bloku jsou bloky rozřezány na požadovanou výšku voštiny a následně jsou roztaženy (expandovány) za vzniku buněčné struktury voštiny. [14, 20]

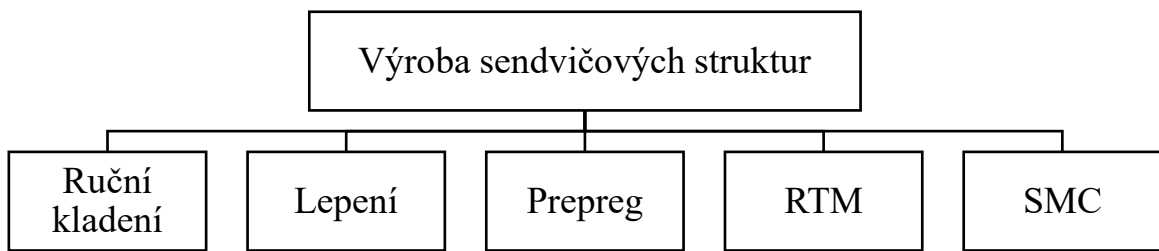
## 2.2 Výroba sendvičových struktur

Sendviče lze vyrábět několika technologiemi. Většinou jsou tyto technologie použitelné pro výrobu samostatných kompozitních výrobků, v případě výroby sendvičů se pouze přidá jádrový materiál. Problémem může být soudržnost všech vrstev sendviče, neboť u voštinových jader je styková plocha mezi potahy a jádrem pouze plocha stěny buňky, která je u hliníkových voštin tvořena plechem o tloušťce v řádech desetin milimetru. Vrstva pryskyřice, popřípadě lepidla, nesmí příliš zatékat do buněk jádra (čímž by docházelo ke zvýšení hmotnosti), zároveň ale musí být jádro a potah co nejlépe spojeny, protože jejich rozhraní má klíčový vliv na přenos napětí mezi nimi a díky tomu má sendvič charakteristické mechanické chování (viz kapitola 4). Toto rozhraní se nazývá adhezni zaoblání (obrázek 11) a jeho pevnost roste se snižující se velikosti buněk voštin. [21, 24]



Obrázek 11: Adhezni zaoblání znázorněno schematicky (vlevo), skutečné adhezni zaoblání (vpravo). Dle [24]

Výrobních technologií využívaných pro výrobu sendvičových struktur je povícero a ty nejpoužívanější z nich jsou pro přehlednost uvedeny na obrázku 12. Metoda ručního kladení, lepení a prepreg technologie jsou z hlediska procesu relativně podobné technologie. Při ručním kladení se na separovanou formu postupně kladou vrstvy tkaniny, která se současně sytí pryskyřicí pomocí štětce či válečku. Po dosažení požadovaného množství



Obrázek 12: Nejpoužívanější technologie výroby sendvičů. Dle [1, 16]

vrstev se položí jádro sendviče a pokračuje se v kladení vrstev horního potahu. Alternativou je také využití vakuové infuze. Při prepreg technologii se využívá předimpregnovaných tkanin, které se musí před použitím uchovávat v chladícím boxu, protože při pokojové teplotě by začala matrice v nich obsažená vytvrzovat. Tyto materiály jsou dobře zpracovatelné, neboť se pouze vyskládá potřebný počet vrstev mezi které se vloží jádro a takto připravený sendvič se vytvrzuje v lisu nebo autoklávu. Lepení předvyrobených potahů k jádrům může být problematické z hlediska adhezního rozhraní, jak již bylo popsáno výše. K lepení se využívá lepidel k tomu určených nebo také pryskyřice. Tato metoda byla použita i pro výrobu sendvičů v praktické části a její detailnější postup je popsán v kapitole 6.1. [1, 5, 23, 24]



Obrázek 13: Řez vchodovými dveřmi domu vyrobeny SMC technologií. Dle [36]

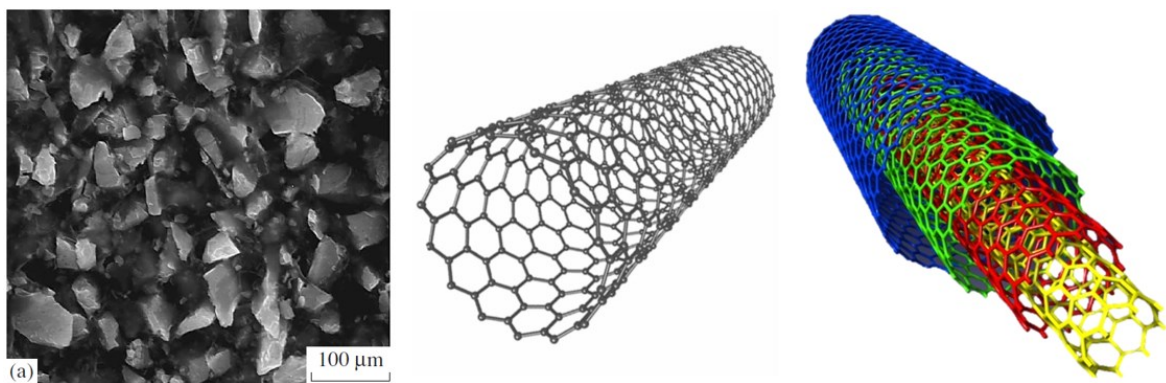
Hlavně strojní výbavou jsou pak náročnější výrobní technologie uvedené dále vpravo v diagramu na obrázku 12. K výrobě oboustranně pohledových dílců se používá technologie RTM (Resin Transfer Molding), kdy je využíváno dvoudílné formy vyrobené z laminátu, hliníku nebo oceli. Do formy jsou předpřipraveny tkaniny a jádro a po uzavření formy vstříknuta pryskyřice dovnitř formy pod tlakem 0,2 – 0,35 MPa. Ta pomocí rozvodných systémů rovnoměrně prosycuje tkaninu a spojuje k ní jádro. Pro rychlejší, hladší a rovnoměrnější průběh prosycování se může využít také vakua, pak se technologie označuje



jako VARTM. Při technologii SMC (Sheet Molding Compaund) se využívá ocelových vyhřívaných forem. Dochází zde k lisování předimpregnovaných vláknových rohoží do plošných dílů, které mají výborné dielektrické vlastnosti a jsou odolné vůči plazivým proudům. Využití této technologie nalézá při výrobě skříní kabelových rozvaděčů nebo dílů karosérií automobilů. Pokud jsou využity i jádra, musí odolat lisovacímu tlaku až 4 MPa. [1, 16, 22, 36]

### 3 PLNIVA ELEKTROMAGNETICKY STÍNÍCÍCH KOMPOZITŮ

Hlavním účelem plniv přidávaných do vláknových kompozitů bývá většinou modifikace jiných než mechanických vlastností. Přítomná plniva ale mohou svým tvarem a charakterem ovlivňovat (pozitivně i negativně) pevnost, tuhost, houževnatost a podobně. Jak již bylo popsáno výše, vlastností ovlivnitelných pomocí plnicích systému je mnoho, nicméně dále se práce zabývá pouze plnivy pro úpravu elektrických a elektromagnetických vlastností kompozitu. Takto plněné struktury mají uplatnění jako absorbéry elektromagnetických vln a pro výrobu součástí pro vysokofrekvenční zařízení. [5, 25]



Obrázek 14: SEM snímek kompozitu plněného MnZn ferity (vlevo), znázornění jednovrstvých (uprostřed) a vícevrstvých (vpravo) uhlíkových nano-tub. [25, 32]

Kromě modifikačních vlastností, které se přidáním plniv snažíme přenést do kompozitu, jsou také důležité povrchové a strukturální vlastnosti samotných částic. Na ztužující vlastnosti (pevnost v tahu, pružnost, odolnost otěru) má vliv velikost částic a jejich měrný povrch. Stejně tak tyto faktory ovlivňují viskozitu a tendenci shlukování částic do aglomerátů při zpracování. Pórovitost a povrchová aktivita částic pak hrají roli v oblasti vzniku a růstu vnitřních defektů. Z aplikačního hlediska jsou pak zajímavé a důležité materiálové konstanty elektrické vodivosti, permitivity a magnetické permeability. [25]

Podle fyzikálních vlastností lze plniva dělit na:

- a) Elektricky vodivá plniva (uhlík, hliník)
- b) Magnetická plniva (slitiny železa, nikl, kobalt, měkké ferity)

Elektricky vodivým materiálem a nejširším zástupcem plniv této skupině je uhlík. Uhlík je jako plnivo kompozitů využíván ve formě vláken, sazí (CB, z angl. carbon black), redukovaného oxidu grafitu (grafén) nebo v podobě nano-tub. Tyto nano-tuby jsou tvořeny krystalickou mřížkou atomů uhlíku stočenou do válcového tvaru. Jedná se povětšinou o hexagonální krystalickou mřížku, která však může existovat hned v několika atomárních

uspořádáních (armchair, zigzag, chirální uložení). Nano-tuby mohou být jednovrstvé (SWCNT) nebo více vrstvé (MWCNT) při průměru 1 až 2 nm se vzdáleností vrstev 0,34 nm a jejich modelová struktura je znázorněna na obrázku 14. Grafitické nano-tuby jsou vyráběny laserovým ozařováním, výbojem mezi elektrodami, anebo chemickou depozicí par (CVD). Uhlíkové saze pak vznikají při nedokonalém spalování nebo tepelným rozkladem uhlovodíků. Uhlíková vlákna jsou zpracovávána termickými nebo elektrochemickými procesy většinou z taveniny obsahující krystalickou fázi, která je zvlákňována. [25, 27]

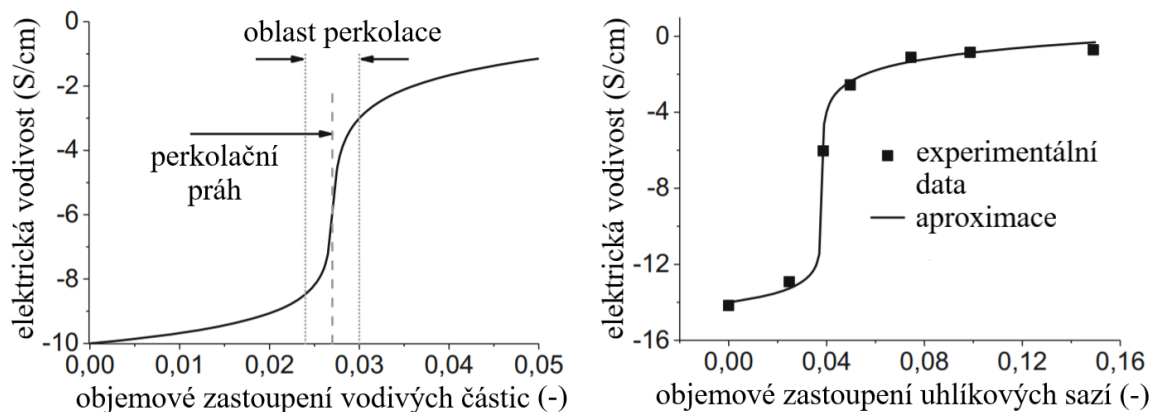
Vlastnostmi jak elektrického, tak i elektromagnetického spektra disponují hlavně kovové materiály, které jsou používány v různých tvarech částic od vloček, přes vlákna až po nepravidelné částice. Z magnetických plnicích materiálů jsou nejpoužívanější zástupci nikl, ocel, karbonylové železo (CIP z angl. carbonyl iron powder) a často různé kombinace, feritické směsi nebo jejich oxidy. Právě měkké ferity (NiZn, MnZn, Co<sub>2</sub>Z, Co<sub>2</sub>W) jsou perspektivním plnicím materiál pro kompozity na bázi polymerů s elektromagnetickými vlastnostmi. Tyto feritické formace mají krystalickou mřížku spinelového tvaru jejíž uspořádání je vhodné pro vznik interakcí mezi kovovými ionty a ionty kyslíku což vede k feromagnetickým vlastnostem. [27]

### 3.1 Elektrická vodivost a teorie perkolace

Elektrická vodivost označuje schopnost materiálu vést elektrický proud. Hodnota této veličiny udává velikost elektrického proudu procházející vodičem při jednotkovém napětí na jeho koncích. Perkolační teorie pak popisuje systémy, které vykazují neuspořádané chování z hlediska elektrické vodivosti. Mezi takové systémy patří i kompozity. Při plněných kompozitních strukturách lze rozlišovat vodivost povrchovou a objemovou a lze ji měřit pro stejnosměrné i střídavé napětí. [35]

Elektrická vodivost v plněných kompozitech se samozřejmě odvíjí od vodivosti plnicích částic, nicméně důležité je i objemové zastoupení částic, jejich tvar, dispergace a distribuce v objemu, případně i závislost vodivosti při změně teploty. Kritický obsah částic, při kterém se z nevodivého kompozitu stává materiál vodivý, se označuje jako perkolační práh. Perkolační práh je zobrazován perkolační křivkou, která znázorňuje závislost elektrické vodivosti na koncentraci plniva. Křivka je charakteristická oblastí perkolace okolo inflexního bodu (perkolační práh). Jedná se o takovou koncentraci plniva v kompozitu, při které dochází ke skokové změně vodivosti. Teoretický průběh funkce a srovnání s experimentálními daty naměřenými pro částice uhlíkových sazí v kompozitní

struktury s polymerní matricí (PP/EVA) jsou znázorněny na obrázku 15. Z grafu je patrné, že v daném kompozitu vodivost rapidně roste při objemu okolo 4 % uhlíkových sazí v polymerní matrici. [33, 34, 35]



Obrázek 15: Teoretická perkolační křivka (vlevo), perkolační křivka kompozitu s matricí PP/EVA plněného uhlíkovými sazí (vpravo). Dle [35]

Přenos elektrických nábojů podél řetězce vodivých částic nastává, pokud jsou částice v přímém kontaktu. Dobře dispergované a distribuované částice však bývají obaleny nevodivou vrstvou polymerní matrice a musí tedy mezi nimi existovat přenos náboje i skokovým mechanismem. Ten může probíhat například tepelnou emisí elektronů v místech mezi sousedními vodivými částicemi. [33, 34, 35]

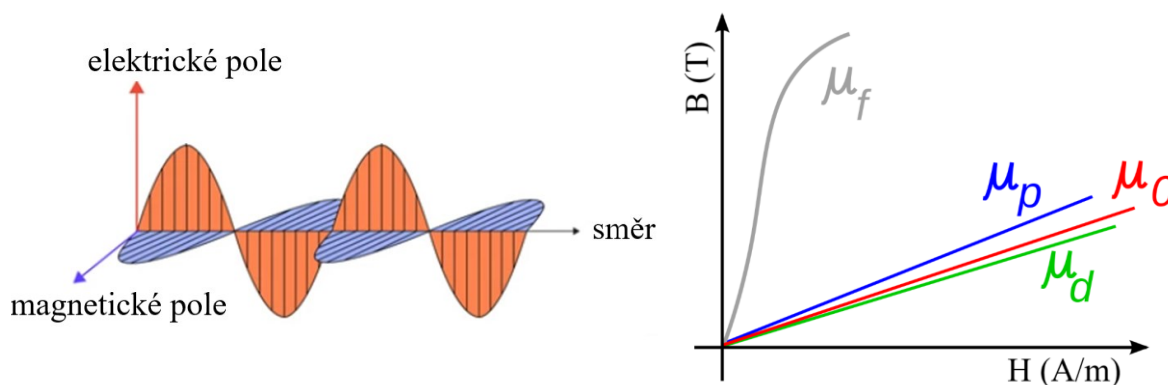
### 3.2 Magnetická permeabilita

Permeabilita je materiálová charakteristika daná poměrem magnetické indukce  $B$  (T) a intenzity magnetického pole  $H$  (A/m) a označuje se řeckým písmenem  $\mu$  (H/m). V elektromagnetismu představuje intenzita magnetického pole to, jak bude indukována změna organizace magnetických dipólů v daném prostředí. Vzájemný vztah veličin je uveden zde:

$$B = \mu \cdot H \quad (1)$$

Magnetická permeabilita tedy označuje míru schopnosti vybuzení indukce v materiálu v magnetickém poli určité intenzity nebo lze popsat jako propustnost daného prostředí pro elektromagnetický signál. Veličina je to skalární pro izotropní materiály, pro anizotropní materiály je však permeabilita popsána tenzorem druhého řádu. [37, 39]

Z hlediska schopnosti indukovat magnetické pole rozdělujeme materiály na feromagnetické, paramagnetické a diamagnetické. Zjednodušený průběh závislosti jejich permeabilit v magnetickém prostředí ve srovnání s permeabilitou vakua je zobrazen na obrázku 16



Obrázek 16: Vlevo: elektrická a magnetická část elektromagnetického pole šířícího se ve vlně daným směrem. Vpravo: graf závislosti magnetické indukce na intenzitě magnetického pole zobrazující permeabilitu pro materiály feromagnetické ( $\mu_f$ ), paramagnetické ( $\mu_p$ ), diamagnetické ( $\mu_d$ ) a vakuum ( $\mu_0$ ). Dle [28, 39]

vpravo. Feromagnetické (Fe, Co, Ni, Gd) látky jsou takové, které si po vystavení elektromagnetickému poli zachovávají magnetičnost (schopnost přitahovat jiné magnetické látky) a lze je označit jako permanentní magnety. Feromagnety jsou však z hlediska šíření elektromagnetického vlnění prostředím silně nelineárním a vykazují také poměrnou hysterézi. Paramagnetické látky jsou schopny vykazovat elektromagnetické vlastnosti při vystavení elektromagnetickému poli. Látky diamagnetické pak při vystavení elektromagnetickému vlnění vytváří pole s opačným nábojem dipólů a jejich relativní permeabilita (poměr permeability daného prostředí a permeability vakua) je menší než 1, což odpovídá i průběhu křivek na obrázku 16. Permeability vybraných kovových materiálů jsou zapsány v tabulce 3. Velmi širokým rozsahem permeability disponují manganozinečnaté ferity (MnZn) uvedeny v této tabulce. Tento materiál je jedním z plniv dále použitých v praktické části práce. [28, 39]

Tabulka 3: Permeability vybraných materiálů. [39]

prostředí	permeabilita $\mu$ (H/m)	relativní permeabilita $\mu/\mu_0$ (-)
železo	$2,5 \times 10^{-1}$	200 000
kobaltová ocel	$2,3 \times 10^{-2}$	18 000
uhlíková ocel	$6,3 \times 10^{-3}$	5 000
manganozinečnaté ferity	$4,4 \times 10^{-4} - 2,5 \times 10^{-2}$	350 - 20 000
niklozinečnaté ferity	$1,3 \times 10^{-5} - 2,9 \times 10^{-3}$	10 - 2 300
vakuum	$4\pi \times 10^{-7}$	1
měď	$1,3 \times 10^{-6}$	0,99

Vlastnosti magnetických materiálů jsou ale různé při různých frekvencích vlnění. Lepší srovnání feromagnetických materiálů a jejich elektromagnetických charakteristik při vysokých frekvencích (kvůli zohlednění fázového posunu mezi proudem a napětím) umožňuje zavedení magnetické permeability jako komplexní veličiny, kdy jsou její složky dány následujícím vztahem:

$$\bar{\mu} = \mu' + j \cdot \mu'' \quad (2)$$

Kde v tomto vztahu  $\bar{\mu}$  (H/m) je komplexní permeabilita,  $\mu'$  (H/m) je relativní skutečná složka permeability (indukčnost),  $\mu''$  (-) je relativní imaginární složka permeability (ztrátová složka) a  $j$  je fázový vektor udávající prodlevu mezi složkami. [39]

### 3.3 Účinnost elektromagnetického stínění

Elektromagnetická účinnost stínění (angl. electromagnetic shielding efficiency) je vlastnost látek udávající schopnost odrazet nebo absorbovat vlny elektromagnetického pole, tedy zabránění (odstínění) průchodu vln skrz materiál. Předpoklady pro tuto schopnost plynou z vlastností materiálů a jejich chování v elektromagnetickém poli. Stínící materiál musí být elektricky vodivý v takové míře, aby při dané frekvenci vlnění tyto vlny odrazil nebo absorboval. Intenzita elektromagnetického vlnění lze energeticky popsat jakou součet čtverců energie odražené, absorbované a energie, která prošla skrze materiál dle následujícího vztahu. [28]

$$R^2 + A^2 + T^2 = 1 \quad (3)$$

Kde poměrná část odražené intenzity magnetického vlnění je  $R$  (z angl. reflection), poměrná část pohlcené intenzity magnetického vlnění je  $A$  (z angl. absorption) a  $T$  je poměrná část prošlé intenzity magnetického vlnění (z angl. transmission). [37]

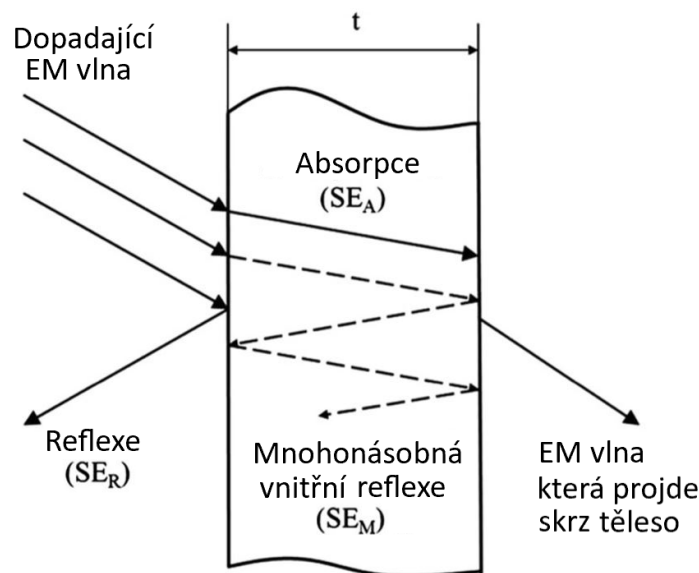
Principiální schéma stínícího děje je uvedeno na obrázku 17. Absorbce a reflexe jsou zde charakterizovány jako účinnost stínění  $SE$  (z angl. shielding efficiency) s odpovídajícím indexem. Mnohonásobná vnitřní reflexe je děj, který přímo vede k absorpci vln. Zařízení pro měření elektromagnetické stínivosti slouží současně jako vysílač i přijmač elektromagnetických vln. Při měření jsou tedy zaznamenány vlny odražené i průchozí z obou vysílačů/přijmačů. Tyto údaje jsou zapisovány pomocí komplexních parametrů rozptylu materiálu stínícího elektromagnetickou interferencí (rušením) z dvouportového vektorového analyzátoru. Je tedy zaznamenávána intenzita dopadajícího ( $I_0$ ), přenášeného ( $I_T$ )

a odraženého ( $I_R$ ) elektromagnetického signálu, na základě kterých jsou dopočítány rozptylové parametry  $S_{11}$  a  $S_{21}$ , dle rovnic [28, 37]:

$$S_{11} = 20 \log \frac{I_R}{I_0} \quad (4)$$

$$S_{21} = 20 \log \frac{I_T}{I_0} \quad (5)$$

Jednotkou intenzity vlnění a stejně tak i jednotkou rozptylových parametrů je dB. Decibel je poměrnou jednotkou obdobně jako procento, využívá ale logaritmického přepočtu poměru intenzit elektromagnetického vlnění (v případě využívání dB jako jednotky intenzity hluku se do poměru dosazují hodnoty hladiny akustického tlaku vyvolaného zvukovou vlnou). Dle rovnic (4) a (5) tedy parametr  $S_{11}$  účuje množství intenzity odražené vlny z dopadajícího signálu a parametr  $S_{21}$  udává intenzitu vlny přenášené měřeným tělesem. [25, 28]



Obrázek 17: Schéma dějů při dopadu elektromagnetické vlny na objekt. Dle [28]

Účinnost stínění daná odrazivostí ( $SE_R$ ), pohltivostí ( $SE_A$ ), průchodností ( $SE_T$ ) a účinnost stínění mnohonásobnými vnitřními odrazy ( $SE_M$ ) se pak na základě parametrů rozptylu určí dle následujících vztahů, kde jednotkou účinností stínění je dB. [37]

$$SE_T = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{|S_{21}|^2} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) \quad (6)$$

$$SE_R = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{1 - R} \right) \quad (7)$$

$$SE_A = 10 \log_{10} \left( \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{1 - R}{T} \right) \quad (8)$$

$$SE_M = 20 \log_{10} \left( 1 - 10^{\frac{SE_A}{10}} \right) \quad (9)$$

Vcelku nešťastně je voleno označení celkové účinnosti stínění označené také s indexem T (z angl. total). Pro přehlednost je tedy voleno, a v praxi i ve vědeckých výzkumech používáno, označovat celkovou účinnost stínění bez indexu  $SE$  (dB) dle následujícího součtového vztahu.

$$SE = SE_A + SE_R + SE_M \quad (10)$$

Kdy účinnost stínění mnohonásobnými vnitřními odrazy  $SE_M$  má význam pouze při nízkých tloušťkách použitých materiálů, při frekvenci řádově v jednotkách kHz a pokud hodnota absorpční složky účinnosti stínění  $SE_A$  je nižší než 10 dB. V opačném případě, kdy nejsou tyto podmínky splněny (hlavně pokud  $f \geq$  GHz,  $|SE_A| \geq 10$  dB) jsou hodnoty mnohonásobných odrazů zcela zanedbatelné a uvažuje se  $SE_M \approx 0$  dB. Pak je předešlá rovnice (10) přepsána do tvaru (11). [37]

$$SE = SE_A + SE_R \quad (11)$$

### 3.4 Výzkum a využití elektromagnetických plniv v kompozitech

Využití materiálů a jejich potenciální účinnost elektromagnetického stínění plyne z jejího principu. Elektromagneticky stínící materiály dokáží odrážet energii dopadající vlny, ale minimum této energie pohlčí. Proto vyšší praktický význam mají materiály, které energii vln dokáží pohlcovat. Tyto materiály se označují jako absorbéry. Takto tedy mohou zabraňovat vlnám šířícím se z generátoru elektromagnetického signálu a nebo naopak chránit před ovlivněním dopadajícími vlnami. Velké množství výzkumů zabývajících se měření účinnosti stínění za využití kompozitních materiálů využívá epoxidové matrice, dále jsou pak často využívány polyuretany nebo polypropylen. Vede k tomu zejména snadná zpracovatelnost epoxidů a jejich vyvážené mechanické vlastnosti. Nicméně použita se celá řada polymerních matric na bázi reaktoplastů, termoplastů, elastomerů nebo jejich kombinací (tzv. blend). [28, 40]

Naměřené hodnoty účinnosti elektromagnetického stínění z výzkumných experimentálních měření jsou zapsány v tabulce 4. Jednotlivé hodnoty jsou vybrány z různých zdrojů, kdy měření byla provedena za daných podmínek, v různých frekvenčních rozsazích a s různými

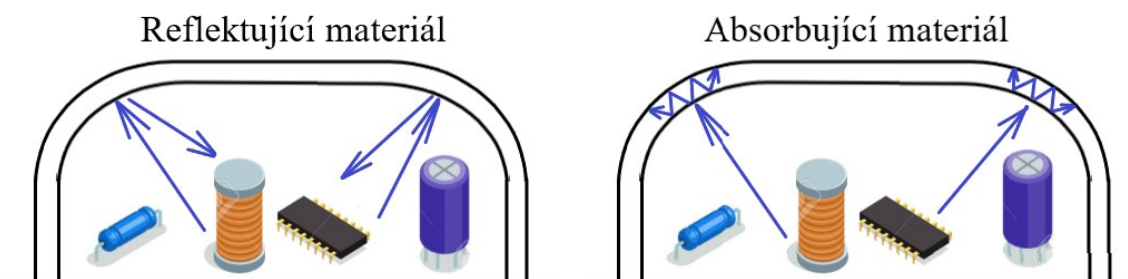


materiály. Tato tabulka tedy představuje průřez různými stínícími kompozitními materiály, které využívají polymerních matric.

Tabulka 4: Vybrané stínící materiály a jejich charakteristiky. [26, 27, 28]

plnivo	matrice	objemové zastoupení (%)	frekvence (GHz)	SE (dB)
MWCNT + MnZn ferity	epoxidová	4	10	17
MWCNT	PP	7,5	10	34
SWCNT	epoxidová	15	10	25
hliníkové vločky	PES	20	2	26
ocelová krátká vlákna	PES	20	2	<b>42</b>
nikl částicový	PES	9	2	23
niklová vlákna	PES	7	2	<b>58</b>
uhlíková vlákna + saze	NR	20 + 10	9	20
uhlíková tkanina	epoxidová	40	9	<b>62</b>

Některé zajímavé výsledky účinnosti elektromagnetického stínění jsou v tabulce označeny tučně. Při měřeních, která probíhala při frekvenci 2 GHz mají velmi výrazné stínící vlastnosti polymerní kompozity s ocelovými vlákny (42 dB) a ještě vyšší hodnoty vykazuje kompozit plněný vlákny niklovými (58 dB) při objemové koncentraci 9 % oproti 20% objemové koncentraci ocelových vláken. Nejvyšších hodnot účinnosti stínění z uvedených dat dosahuje uhlíková tkanina zastoupena v objemu 40 % v epoxidové matrici a to až 62 dB při frekvenci 9 GHz.

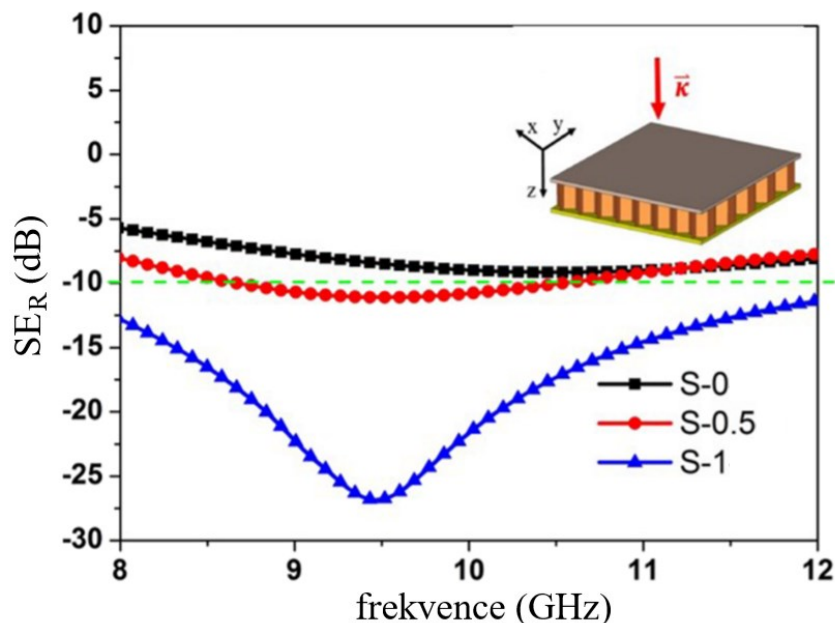


Obrázek 18: Elektromagnetické stínění – materiál, který zcela odráží vlny (vlevo), materiál, který zcela pohlcuje vlny (vpravo). Dle [29]

Elektromagnetické stínění je ochranou před rušivými vlivy z okolního prostředí, popřípadě ochrana zabraňující šíření rušivých vlivů. Uplatnění tedy stínící materiály nacházejí v každém elektrotechnickém zařízení, které elektromagnetické pole generuje. Zvláště pak různé mikročipy a malé elektronické součásti jsou citlivé na změny frekvencí a mohou tak být snadno ovlivněny okolním elektromagnetickým polem. Elektromagnetické pole generuje i zařízení, které chceme uchránit, proto je důležitá absorpční složka stínivosti. Bez ní by materiál pouze odrážel a tím by mohlo docházet k odrazům uvnitř štítu a tím

i k ovlivnění součásti, která má být chráněna, což je znázorněno na obrázku 18. Na tomto obrázku je znázorněn zcela vodivý materiál (například kovový plech), který všechny dopadené vlny odráží zpět a tím může docházet k ovlivnění elektrického zařízení uvnitř tohoto štítu. Druhý příklad je ideálně absorbující materiál, který pohlcuje veškeré dopadené vlny. Stínící materiály se nabízejí také jako ochrana před zbraňovými systémy, které využívají právě elektromagnetických vln k vyzáření elektroniky. [25, 28, 40]

Základem pro získání stínících vlastností je elektrická vodivost systému. V kompozitních materiálech (které jsou svým charakterem elektrické izolanty) se pro dodání vodivosti využívá kromě přidávání plniv také potažení vodivým opláštěním. Tyto vodivé potahy mohou být ve formě fólií nebo lepících pásek, využívá se i žárového pozinkování, katodického pokovování nebo nátěr vodivými hmotami. [28]



Obrázek 19: Graf účinnosti stínění v závislosti na frekvenci. S-0 = 0 mg CIP, S-0.5 = 100 mg CIP, S-1 = 200 mg CIP. Dle [30]

Sendvič s voštinovým jádrem byl použit jako předmět výzkumu týmu z univerzity ve Wuhanu, ČLR. Jako materiál potahu byl v tomto vědeckém pojednání uveřejněném v roce 2018 použit kompozitní absorbér obsahující práškové karbonylové železo (CIP) ve formě vloček a uhlíkové saze (CB) v parafinové matrici. Byly vytvořeny sendviče se třemi různými koncentracemi kovového prášku kdy autoři publikace udávají hmotnost matrice ve všech absorbérech 180 mg, hmotnost CB ve všech absorbérech 20 mg, a dle hmotnosti CIP jsou absorbéry označeny S-0 (pro 0 mg), S-0.5 (pro 100 mg) a S-1 (pro 200 mg). Sendviče pak byly otestovány v pásmu frekvencí od 8 do 12 GHz. Naměřené výsledky jsou zobrazeny na

obrázku 19. Účinnost stínění alespoň 10 dB (označena v grafu čárkovanou čarou, kdy důležitá je absolutní hodnota) je taková hodnota, při které se již materiál dá považovat za stínící, protože 90 % energie vlny bylo odraženo nebo absorbováno. Nejlepším stínícím výsledkem pak disponuje největší koncentrace CIP v absorbéru (vzorek S-1), která dosahuje hodnoty -27,5 dB při frekvenci 9,5 GHz. [30]

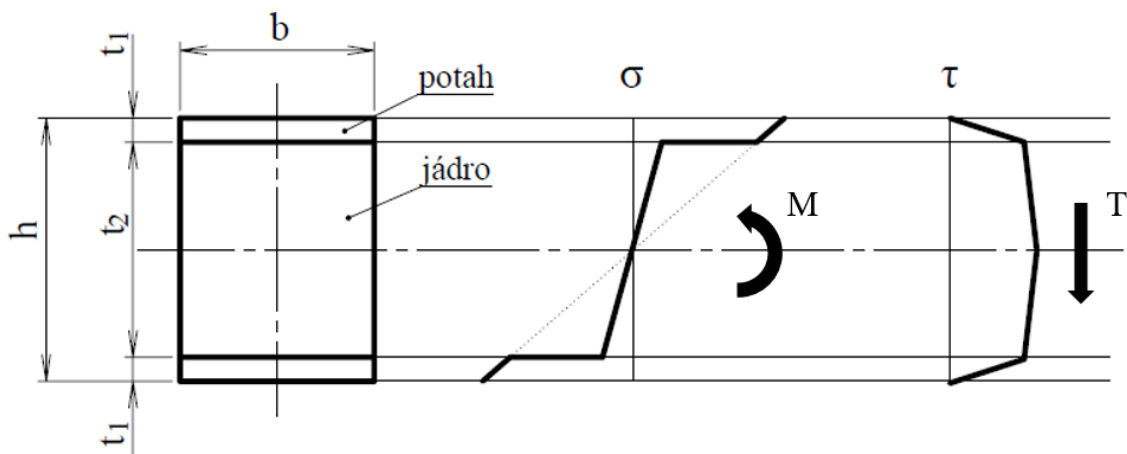
Pro průmyslové a komerční účely a aplikace se v nejlepších případech využívají absorbéry s účinností stínění  $|SE| \geq 30$  dB, které jsou nepropustné pro 99,9 % dopadajících elektromagnetických vln. Využitelné a používané jsou i materiály s hodnotou účinnosti stínění  $|SE| \geq 20$  dB, u nichž je potenciál nepropustnosti na hodnotě 99 %. Nicméně obecně platí, že minimální hodnota účinnosti stínění je požadována alespoň  $|SE| \geq 10$  dB pro zabránění průchodu 90 % EMI vlnění. Účinnost stínících materiálů se liší v závislosti na použité frekvenci elektromagnetického vlnění. Rozsah frekvenčních pásem používaných v elektrotechnice a různých zařízeních je uveden v tabulce 5, kde je zvýrazněna oblast frekvenčního rozsahu, jehož měření se věnuje praktická část. [37]

Tabulka 5: Frekvenční pásma, jejich rozsahy a aplikační využití. [37]

rozsah frekvencí	název frekvenčního pásma	aplikace
3 kHz – 30 kHz	velmi nízké frekvence	majáky, signální věže
30 kHz – 300 kHz	nízké frekvence	námořní komunikace
300 kHz – 3 MHz	střední frekvence	AM rádiové vysílání
3 MHz - 30 MHz	vysoké frekvence	radiofrekvenční identifikace zboží
30 MHz – 300 MHz	velmi vysoké frekvence	FM rádiové vysílání, televize
300 MHz - 1 GHz	ultra vysoké frekvence	televize, mikrovlnný ohřev, mobily
<b>1 – 2 GHz</b>	<b>L pásmo</b>	mobily, LAN, GPS, radar
<b>2 – 4 GHz</b>	<b>S pásmo</b>	bluetooth, mobily, televize
<b>4 – 8,2 GHz</b>	<b>C pásmo (J pásmo)</b>	satelitní komunikace, mobily, wifi
<b>8,2 – 12,4 GHz</b>	<b>X pásmo</b>	satelitní komunikace, monitorování počasí, systémy vzdušné obrany, řízení letecké dopravy
<b>12,4 – 18 GHz</b>	<b>K<sub>u</sub> pásmo</b>	satelitní komunikace
<b>18 – 27 GHz</b>	<b>K pásmo</b>	satelitní komunikace
27 – 40 GHz	K <sub>a</sub> pásmo	satelitní komunikace
40 – 75 GHz	V pásmo	výzkum a vojenské technologie
75 – 110 GHz	W pásmo	výzkum a vojenské technologie

#### 4 OHYB SENDVIČOVÝCH PRVKŮ

Makrostruktura vrstvených sendvičových materiálů je nehomogenní a kvůli tomu je i jejich mechanické chování výrazně odlišné od materiálů homogenních. Technická teorie ohybu je schopna na základě geometrických a materiálových parametrů stanovit předpokládanou hodnotu ohybové pevnosti. Skutečná pevnost je však vždy v porovnání s pevností teoretickou nižší, neboť je ovlivněna parametry kvality výroby a soudržnosti sendvičové struktury. Obecně platí, že veškerá smyková napětí v sendviči přenáší lehčené jádro, a naopak normálová napětí (tah a tlak) jsou přenášeny potahy sendvičů. Teoretický průběh normálových i smykových napětí v sendviči společně se směrem působení ohybového momentu  $M$  a posouvajících sil  $T$  je znázorněn na následujícím obrázku. [2]



Obrázek 20: Průběh normálových a tečných napětí v sendvičovém prvku. Dle [2]

Pro stanovení ohybové tuhosti tohoto sendvičového prvku je nutno brát v potaz rozdílné velikosti modulů pružnosti v tahu  $E$  (MPa) materiálu jádra a sendviče. Stejně tak musí být započítán i rozdíl ploch, ve kterých se napětí vyskytuje, daných tloušťkou  $t$  (mm) jednotlivých vrstev a výškou  $h$  (mm) a šířkou  $b$  (mm) sendviče. Při znalosti těchto údajů pak ohybová tuhost sendviče  $K_0$  ( $\text{N}\cdot\text{mm}^2$ ) lze stanovit dle vztahu:

$$K_0 = E_1 \frac{bh^3}{12} \left[ 1 - \frac{E_1 - E_2}{E_1} \left( 1 - 2 \frac{t_1}{h} \right)^3 \right] \quad (12)$$

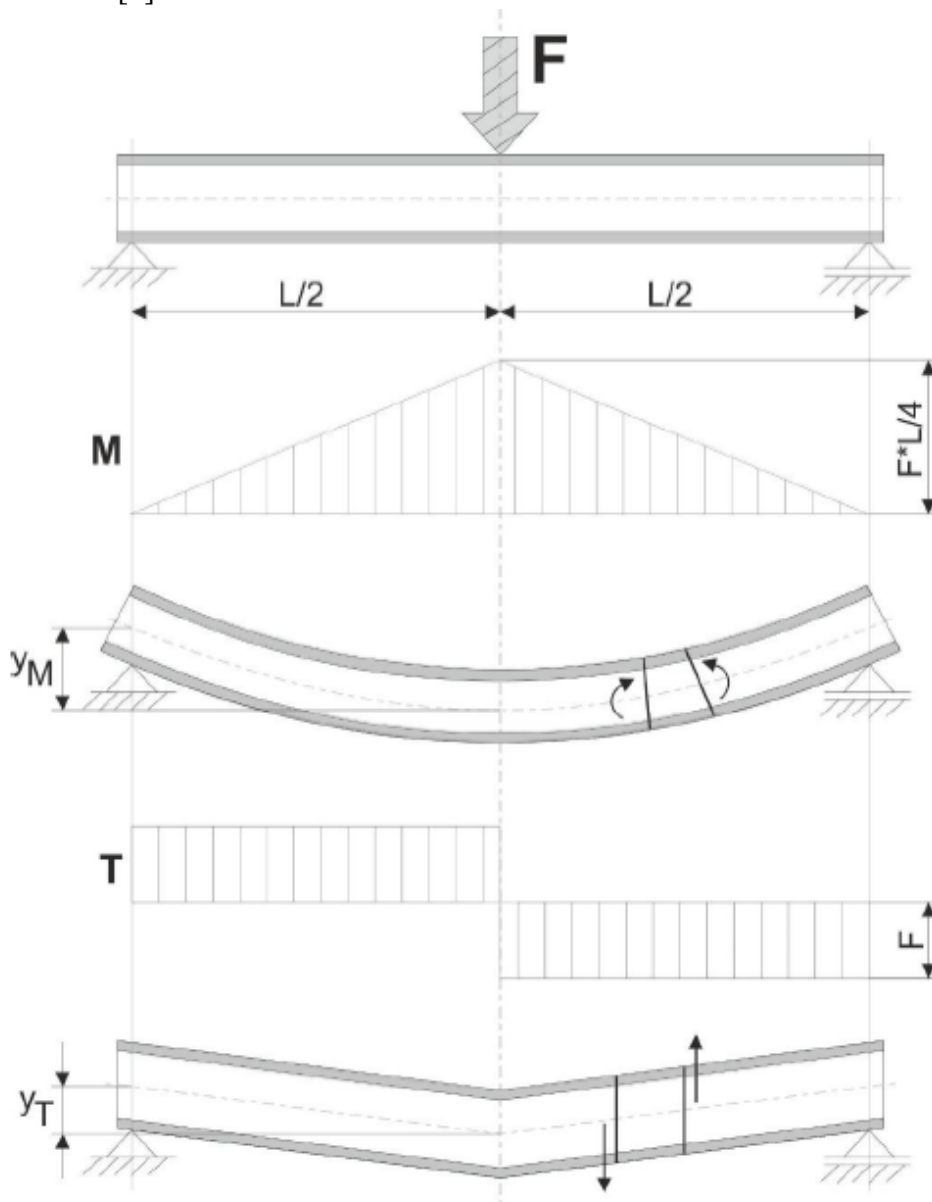
Kde index 1 odpovídá dle obrázku 20 hodnotám týkajících se materiálu potahu a index 2 se vztahuje k hodnotám materiálu jádra. Průběh normálových a tečných namáhání v sendviči navádí k optimálnímu využití materiálu v podobě poměrů  $E_1 \gg E_2$ ,  $t_1 \ll t_2$ . Pak platí:

$$K_0 = E_1 \frac{bh^2 t_1}{2} \quad (13)$$

Takovéto případy, kdy je velmi tenká tloušťka nosného potahu zároveň s významně větším modulem pružnosti, jsou například právě sendviče s laminátovými potahy. Kvůli nízké tloušťce potahů a tím způsobenému přenosu smykových napětí jádrem je jádro vystaveno také značným smykovým deformacím. Celkový průhyb sendvičového nosníku  $y$  (mm) je tedy součtem průhybu jádra  $y_T$  (mm) a průhybu potahů  $y_M$  (mm) a je dán následovně.

$$y = y_T + y_M = \frac{Fl^3}{48K_0} + \frac{Fl}{G_2bt_2} \quad (14)$$

Kde  $F$  (N) je zatěžující síla,  $l$  (mm) je vzdálenost podpěr,  $G_2$  (MPa) je modul pružnosti ve smyku materiálu jádra. Složky průhybu a schéma celé problematiky je znázorněno na obrázku 21. [2]



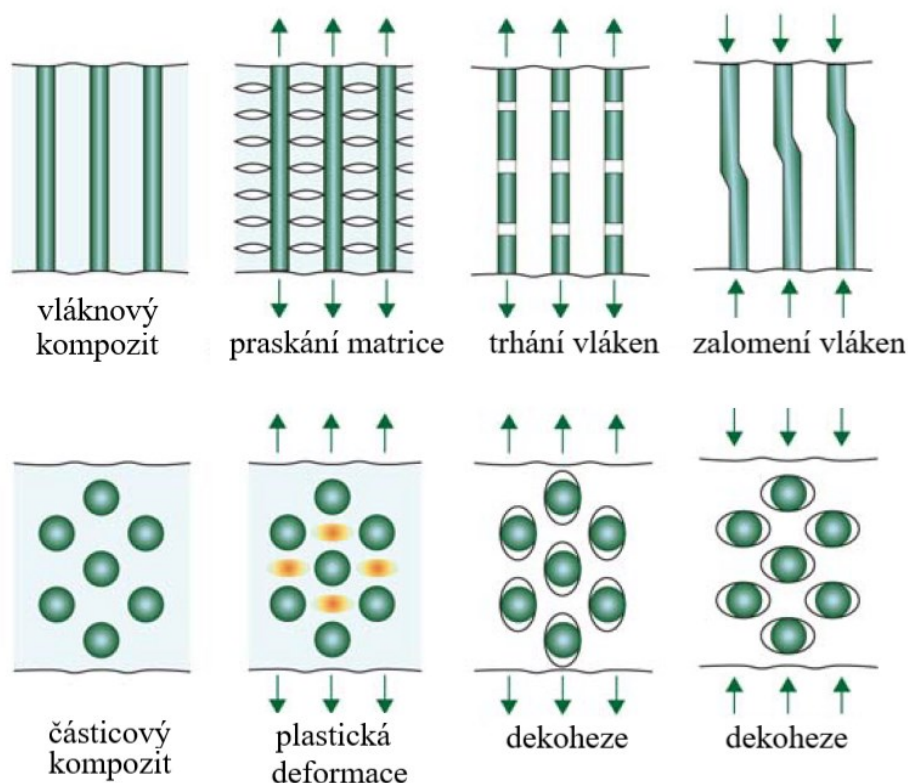
Obrázek 21: Průhyb sendvičového nosníku. [41]

#### 4.1 Poruchy ohýbaných sendvičových konstrukcí

Sendvičové prvky jsou nejčastěji testovány a v praxi namáhány ohybovým zatížením. Technická teorie ohybu udává, že ohyb je složen tahem vnějších vláken a tlakem vnitřních vláken materiálu. Vrstvený materiál (kterým je v tomto případě celý sendvič i jeho potah tvořený vrstveným laminátem) je tedy namáhán jako celek ale také mezilaminárními namáháními. V samotném laminátovém potahu pak může docházet k delaminaci nebo jiným defektům. [1, 3]

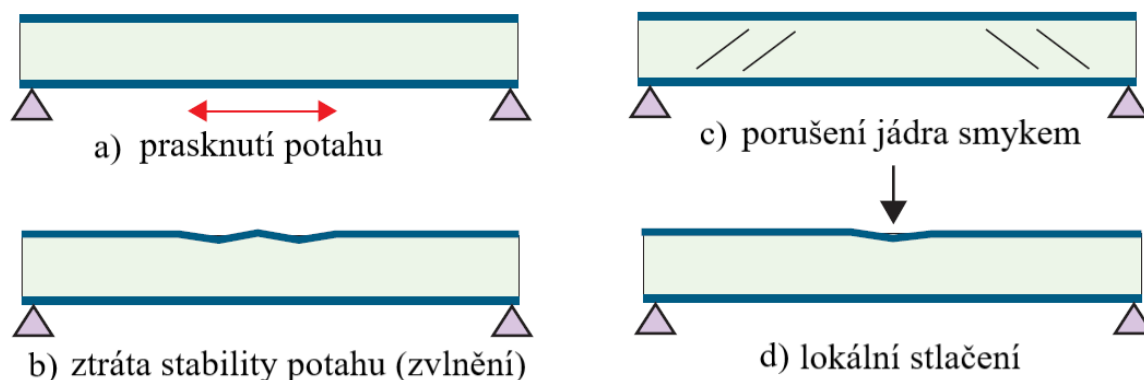
K těm nejčastějším nedostatkům laminátových struktur patří suchá místa, pórovitost způsobená vmícháním vzduchu do matrice při zpracování, hromadění pryskyřice v rozích formy nebo přemostění (nedotečení). Tato místa většinou slouží jako koncentrátoři napětí, ve kterých se projeví deformace, mají tedy vrubový účinek. [3, 4]

Při namáhání může dojít také k porušení na úrovni fází kompozitu, tedy dojde k porušení vláknové výztuže, popřípadě ke změně polohy výztuže částicové nebo plniv. Defekty výztužných a plnicích systémů jsou znázorněny na obrázku 22. Se zvyšováním zatížení kompozitu dochází k redistribuci napětí mezi jeho komponenty, dokud se některý z nich vlivem namáhání neporuší. V tomto okamžiku jsou již ve struktuře patrné trvalé deformace,



Obrázek 22: Poruchy vláknové výztuže (nahore), poruchy částicové výztuže (dole). Dle [3]

nicméně kompozit je stále schopný přenášet zatížení. Konečné porušení nastává při selhání jak výztužného, tak i vyztuženého materiálu. Optimální je tedy dosažení takového poměru výztuže a matrice tak, aby oba tyto materiály selhali současně. [3]



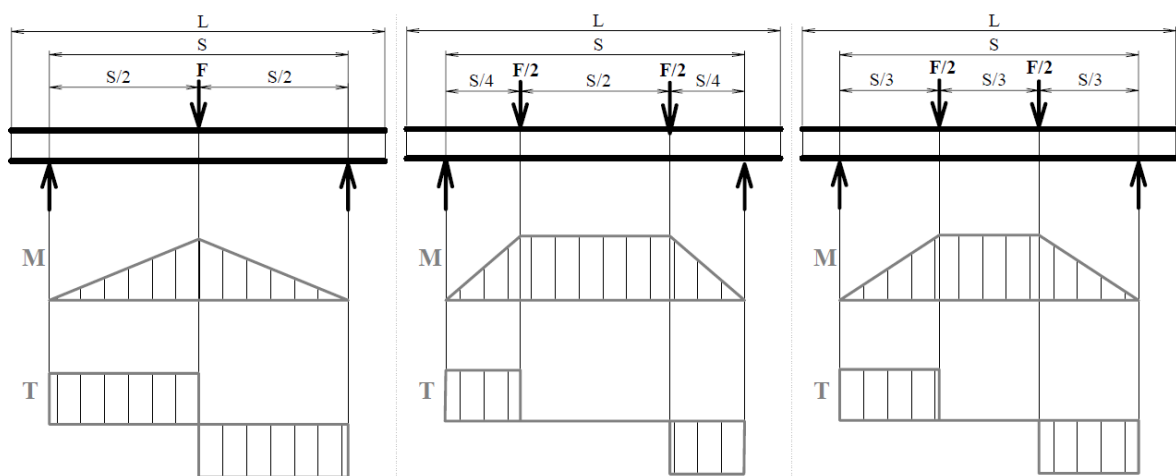
Obrázek 23: Druhy selhání sendvičových struktur. Dle [3]

Selhání sendvičových panelů při ohybovém zatížení může nastat v několika různých případech (viz. obrázek 23). Ve většině případů je přítomno více druhů selhání s tím, že jeden z nich dominuje. Prvním případem je prasknutí potahu na straně namáhané tlakem. K tomuto dochází při překročení meze pevnosti v kluzu vláken. Při vzpěrném zatížení potahu dojde k lokální ztrátě stability, která se projevuje zvlněním krycího potahu. Toto je časté u voštinových jader v místech, kde potah není podepřen stěnou buňky voštiny. Eliminace nebo alespoň snížení náchylnosti sendviče k této poruše lze použitím voštiny s menšími buňkami. K porušení jádra dochází nejčastěji smykovým účinkem, anebo lokálním stlačením, kdy je porušen potah i jádro v tomto místě. Smykové porušení se projevuje nejčastěji prasknutím jádra mezi potahy pod úhlem okolo 45°. Lokální poruchu stlačení má za následek působení osamělých příčných sil, které způsobí v daném místě překročení pevnosti jádra v tlaku a dojde ke zborcení a stlačení jádra i potahu. Všechny tyto poruchy jsou ve většině případu doprovázeny částečnou nebo úplnou delaminací jádra a potahů sendviče. [2, 3, 22, 41]

## 4.2 Měření ohybových vlastností sendvičových konstrukcí

Pro zjištění ohybových vlastností sendvičů se využívá zkoušek tříbodovým nebo čtyřbodovým ohybem. Při obou zkouškách se využívá univerzálního zkušebního stroje za využití přípravků, kdy na nepohyblivé části stroje jsou umístěny dvě podpory v normou definované vzdálenosti  $S$  (mm) a na pohyblivé části stroje (příčniku) je umístěn přípravek s jedním (v případě tříbodového ohybu) nebo dvěma (pro čtyřbodový ohyb) tlačnými trny. Zkoušky jsou rozdílné průběhem ohybového napětí v nosníku (zkušebním tělese). Při

zatížení osamělou silou na střed nosníku uloženého na dvou podporách dochází ke vzniku ostrého lokálního maxima ohybového momentu. V tomto místě dochází ke skokové změně orientace momentu i posouvajících tečných sil. Vliv tečného namáhání je zmírněn při použití čtyřbodového ohybu, kdy ohybový moment má mezi dvěma tlačnými trny konstantní velikost a velikost posouvajících tečných sil je zde nulová. Pro čtyřbodový ohyb je možno využít dvou variant. Při první z nich je vzdálenost mezi tlačnými trny polovina rozteče podpor  $S$ , při druhé metodě je vzdálenost mezi tlačnými trny rovna třetině rozteče podpor  $S$ . Jednotlivé možnosti zkoušky ohybem jsou vyobrazeny na obrázku XX včetně průběhů ohybových napětí a posouvajících tečných sil. [31]



Obrázek 24: Průběh ohybového momentu a posouvajících příčných sil při trojbodovém ohybu (vlevo), čtyřbodovém čtvrtinovém ohybu (uprostřed), čtyřbodovém třetinovém ohybu (vpravo).

Maximální pevnost jádra ve smyku  $\tau_S$  (MPa) se pro vyhodnocení zkoušky určuje z maximální síly při porušení  $F_{max}$  (N) a rozměrů sendviče: tloušťky sendviče  $h$  (mm), tloušťky jádra  $c$  (mm) a šířky sendviče  $b$  (mm), dle vztahu:

$$\tau_S = \frac{F_{max}}{(h + c) \cdot b} \quad (15)$$

Další vyhodnocovanou veličinou je napětí v potahu  $\sigma$  (MPa), počítáno dle rovnice 16, ve které  $t$  je tloušťka potahu sendviče (mm) a  $S$  je rozteč podpěr (mm).

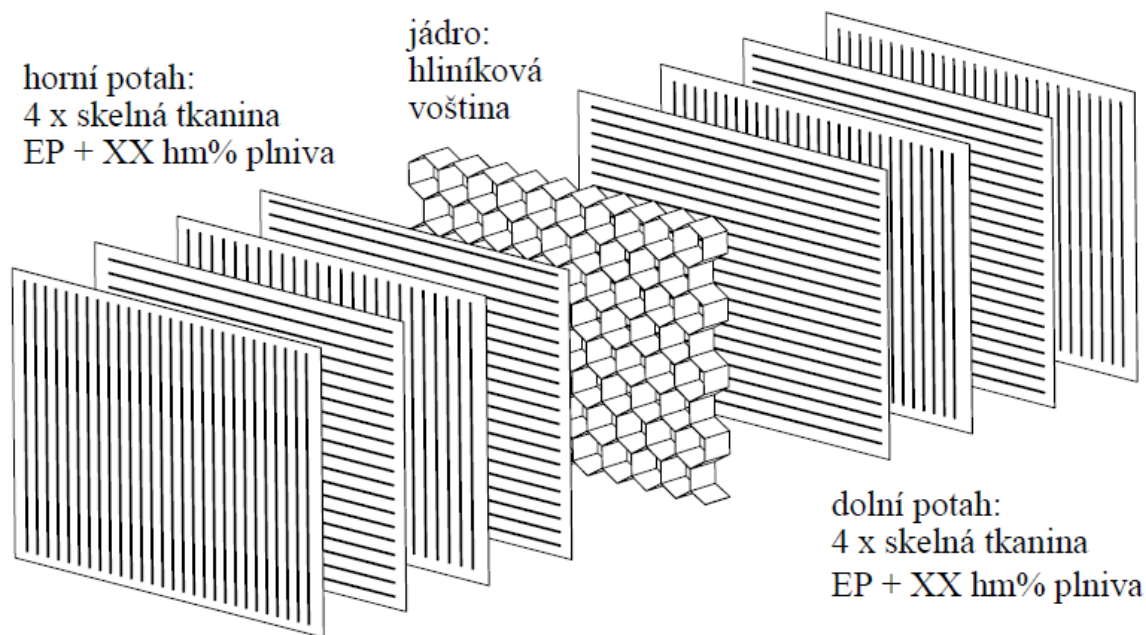
$$\sigma = \frac{F_{max} \cdot S}{2t \cdot (h + c) \cdot b} \quad (16)$$



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 POUŽITÉ MATERIÁLY

Pro výrobu laminátů a následných sendvičů byla použita epoxidová pryskyřice s vhodným tužidlem, jednosměrně orientovaná skelná tkanina, hliníková voština a plniva – uhlíkové saze a manganozinečnaté ferity.



Obrázek 25: Schéma orientace výztuže laminátů v potazích sendviče a popis jednotlivých potahových materiálů a materiálu jádra.

Na obrázku 25 je pak schéma orientace skelné tkaniny v jednotlivých vrstvách potahového laminátu pro sendvič (SEND). Matrice laminátu (LAM) je tvořena epoxidovou pryskyřicí (EP), do které byla přidávána jednotlivá plniva v různých hmotnostních koncentracích.

### 5.1 Síťovací systém

Použitá epoxidová pryskyřice je vhodná pro laminování při pokojové teplotě s následným vytvrzením při stejné nebo zvýšené teplotě. Zpracovatelský čas pryskyřice se pohybuje od 25 min do 5 hodin v závislosti na teplotě a druhu použitého tužidla. Systém disponuje relativně nízkou viskozitou, díky čemuž je jeho použití technologicky neproblematické. Výborné jsou také adhezni vlastnosti vůči plnivům. Použitá pryskyřice je obchodně označena LG 120, tužidlo HG 120, a jejich míchací poměr je 4:1. Kvůli dobrým mechanickým vlastnostem udává výrobce možnost použití pro stavbu lodí a dalších dopravních aplikací, sportovního náčiní, forem a náradí. Vlastnosti obou složek vytvrzovací směsi jsou shrnuty v tabulce 6.

Tabulka 6: Vlastnosti použité pryskyřice a tužidla. Dle [45]

vlastnosti	pryskyřice LG 120	tužidlo HG 120
hustota (g/cm <sup>3</sup> )	1,13 – 1,17	0,96 – 0,99
viskozita (Pa·s)	700 – 900	10 – 20
teplota při zpracování (°C)	20 – 50	
teplota vytvrzování (°C)	20 – 150	
čas gelace při 25 °C (hod)	příbl. 3 – 4	
čas gelace při 45 °C (hod)	příbl. 2	

## 5.2 Skelná tkanina

Jako výztužný materiál byla použita skelná tkanina tvořena jednosměrně orientovanými rovingy (pramenci). Tyto pramence (osnova) jsou tvořeny nekonečnými vlákny bez zákrutu a v tkaninu jsou v tomto případě spojeny kolmo orientovanými průplety (útek) s použitím plátňové vazby. To má za následek, že tento typ tkaniny příliš nadržuje tvar a snadno se třepí. Jednotlivé okrajové rovingy mají také tendenci se od tkaniny zcela odpojit. Jednotlivé druhy tkaniny se označují pomocí hmotnosti jednoho metru čtverečního, kdy tato konkrétní má hmotnost 220 g/m<sup>2</sup>. Pro výrobu jedné laminy byly použity 4 vrstvy skelné tkaniny. Jednotlivé vrstvy byly kladeny tak, aby byly pramence kolmé k vrstvě předešlé

## 5.3 Plniva

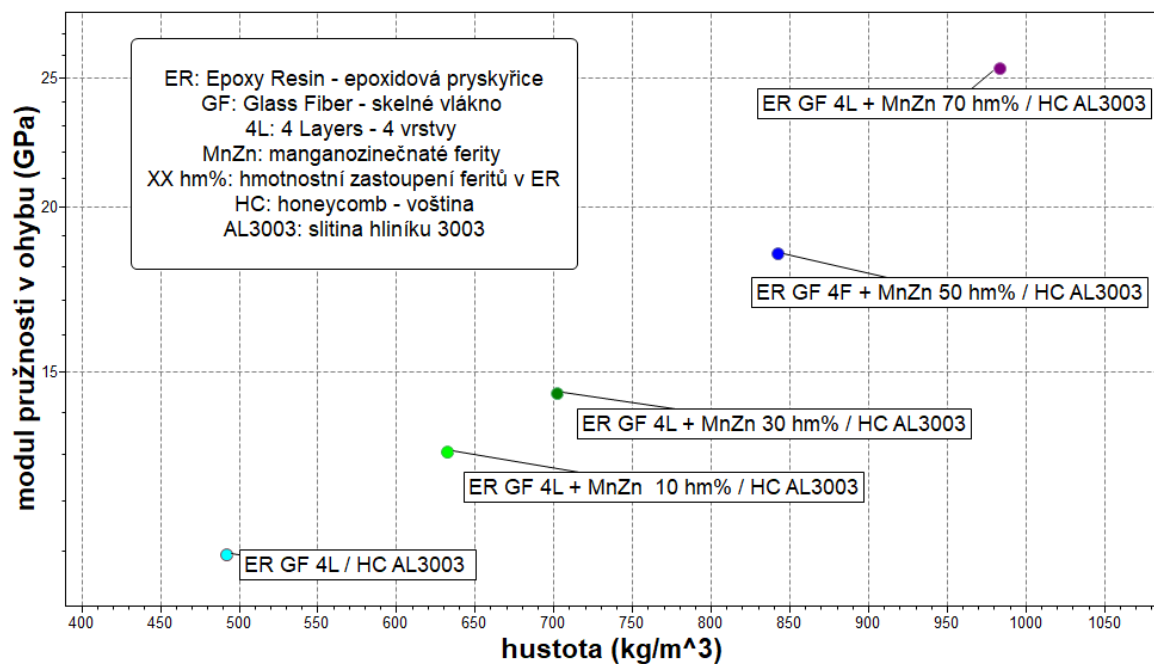
Jako plniva přidaná do matrice byly využity dva materiály, a to uhlíkové saze (angl. carbon blacks, CB) a manganozinečnaté ferity. Obě tato plniva jsou ve výchozím stavu ve formě prášku a byla vmíchávána do pryskyřice před přidáním vytvrzovacího činidla. Použité saze jsou označeny Vulcan XC-72R a v laminátech jsou použity v koncentracích 1, 5 a 10 hm%. Manganozinečnaté ferity (dále v práci označovány pod zkratkou MnZn) byly použity v koncentracích 10, 30, 50 a 70 hm%. Použití hmotnostního zastoupení bylo upřednostněno před objemovým kvůli snadnějšímu odměřování (vážení). Saze totiž i při nízké hmotnosti zaplňují značný objem. Hustota použitých uhlíkových je 1,8 g/cm<sup>3</sup>, hustota manganozinečnatého feritického prášku je 4,9 g/cm<sup>3</sup>.

## 5.4 Analýza použitých materiálů v databázi Granta EduPack

Softwarová materiálová knihovna Ansys Granta EduPack (dříve CES EduPack) je nástrojem pro grafické porovnávání různých materiálových veličin. Databáze obsahuje data o fyzikálních, chemických a mechanických vlastnostech materiálů, o jejich ceně, uhlíkové stopě a o způsobu jejich aplikačních využití. Jedná se o nástroj, který pomáhá navrhovat

a optimalizovat výběr materiálu ve strojírenských, designových i vědeckých projektech. Program také nabízí možnost vytvoření kompozitních struktur z materiálů, které má dostupné.

Pomocí databáze lze také syntetizovat vlastní kompozitní materiály. Toho bylo využito a byly simulovány sendvičové prvky z materiálů co nejvíce podobným těm, které byly k dispozici pro přípravu reálných zkušebních těles. V databázi Granta EduPack byl jako materiál potahů vytvořen kompozit ze skelné prepregové tkaniny impregnované epoxidovou matricí. Tento kompozit byl poté použit jako výchozí materiál pro kompozit částicový, kdy byla přidána jednotlivá hmotnostní zastoupení manganozinečnatého feritického prášku. Z těchto laminátových potahů a z hliníkové voštiny pak byly syntetizovány sendviče zobrazené na obrázku 26.



Obrázek 26: Závislost ohybového modulu pružnosti na hustotě pro sendviče s MnZn ferity v potazích syntetizované pomocí databáze Ansys Granta EduPack.

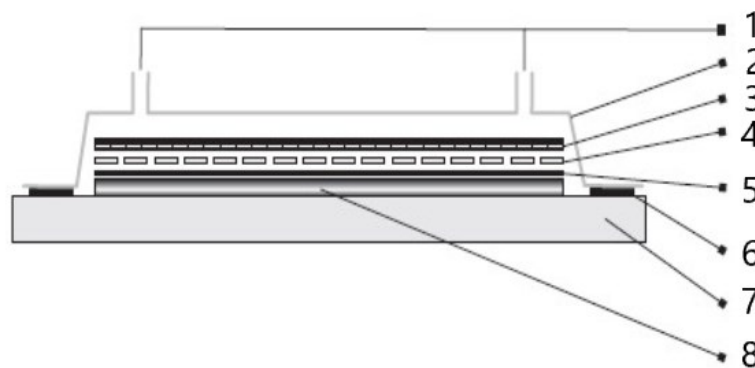
Hodnoty ohybového modulu i hustoty jsou orientační, neboť není nijak definovaná technologie ani postup výroby. Na základě této závislosti však existuje předpoklad, že s rostoucím množstvím plniva (tedy i s vyšší celkovou hustotou) bude růst také modul pružnosti v ohybu, a tedy i odolnost ohybovému zatížení sendviče.

## 6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

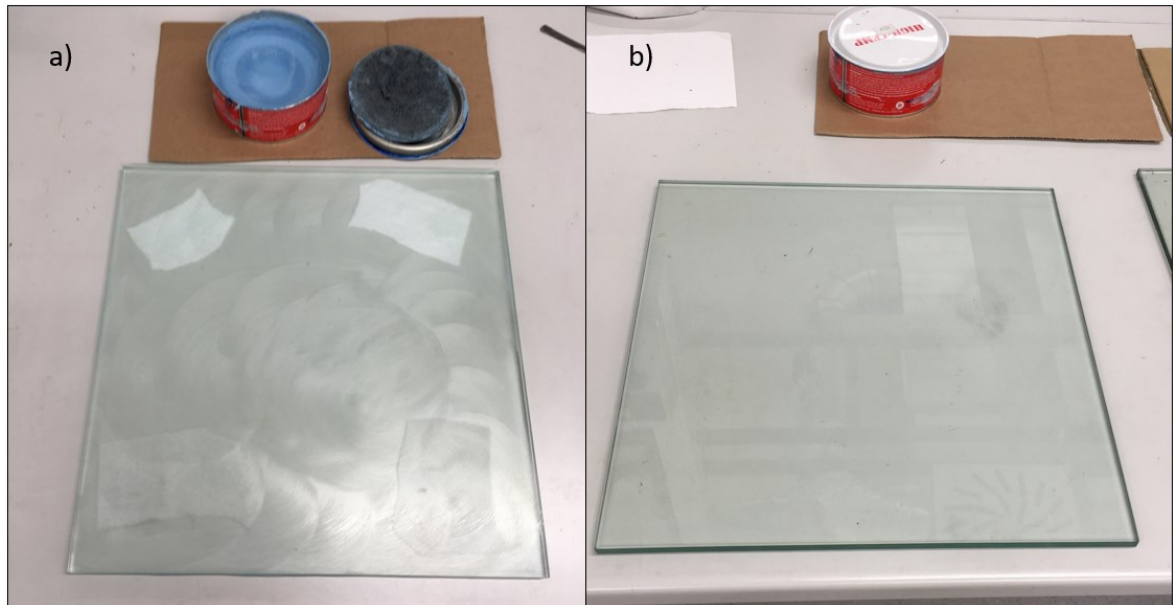
Jako zkušební tělesa pro měření elektromagnetických a mechanických vlastností byly vyrobeny sendviče s potahy ze čtyřvrstvého sklo-epoxidového laminátu a s hliníkovou voštinou použitou jako jádro. Celkem bylo pro měření vyrobeno osm sendvičů s různou koncentrací plniv o rozměrech zhruba 300 x 300 mm, výška sendviče okolo 20 mm. Rozměr sendvičů byl zvolen záměrně, neboť zkušební vzorky pro měření účinnosti elektromagnetického stínění na použitém zařízení (dle ČSN IEC 1000-1-1) musejí být o rozměrech minimálně 250 x 250 mm. Pro měření mechanických vlastností, konkrétně tříbodové ohybové zkoušky (dle ASTM C393), je zapotřební použít zkušebních těles s podstavou obdélníku o rozměrech 220 x 45 mm. Sendviče byly tedy po změření elektromagnetických vlastností rozřezány pomocí technologie vodního paprsku.

### 6.1 Výroba laminátů ruční laminací za použití vakua

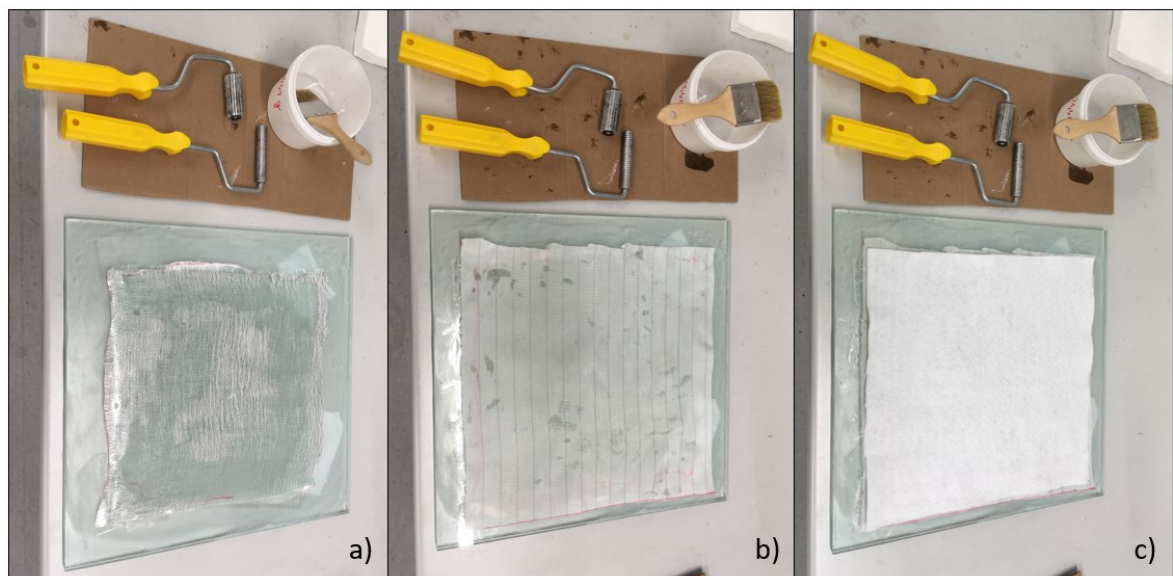
Metoda ruční laminace se provádí kladením vrstev tkaniny na separovanou formu se současným sycením této tkaniny matricí. Teoretické schéma položených vrstev a použitých materiálů je zobrazeno na obrázku 27. Jako formy sloužily skleněné desky o délce strany 400 mm, na které byly nanесeny tři vrstvy separačního vosku. Nanesená vrstva separátoru se po vytvrnutí rozleští do zrcadlového lesku. Výrobce udává pro vytvrnutí první vrstvy až 30 minut, pro následné vrstvy 8 až 10 minut. Správně provedená separace zajistí vyplnění mikropórů na povrchu formy, čímž se zabrání přilnutí kompozitního výrobku k formě a zároveň se zajistí jeho hladký povrch. Nános separačního vosku je zobrazen na obrázku 28 vlevo. Zde je také vidno balení separačního vosku a houbička, pomocí které je vosk nanášen. Vpravo na obrázku 28 je pak forma vyleštěna a připravena k laminaci. Časové prostoje



Obrázek 27: Schéma technologie ruční laminace za použití vakua. 1 – připojení na vakuovou vývěvu, 2 – vakuovací fólie, 3 – odsávací rohož, 4 – perforovaná separační fólie, 5 – strhávací tkanina, 6 – těsnící pásek, 7 – naseparovaná forma, 8 – kompozitní laminát. Dle [5]



Obrázek 28: a) separační vosk nanesen na formě, b) vyleštěná separovaná forma vzniklé čekáním na vytvrzení separátoru byly využity k naměření a nastříhání tkanin a dalších technologických materiálů. Kromě čtyř vrstev skelné tkaniny je při využití vakuového odtahu nutno použít také strhávací tkaninu, perforovanou separační fólii a odsávací rohož. Do odsávací rohože je nasáta přebytečná pryskyřice, které je z laminátu odtažena pomocí vakua. Aby tato matricí nasycená rohož nepřisívala k vyráběnému laminátu jsou mezi nimi umístěny ještě strhávací (separační) tkanina a perforovaná fólie, skrz kterou pryskyřice odchází rovnoměrně. Postup kladení těchto vrstev je znázorněn na obrázku 29.

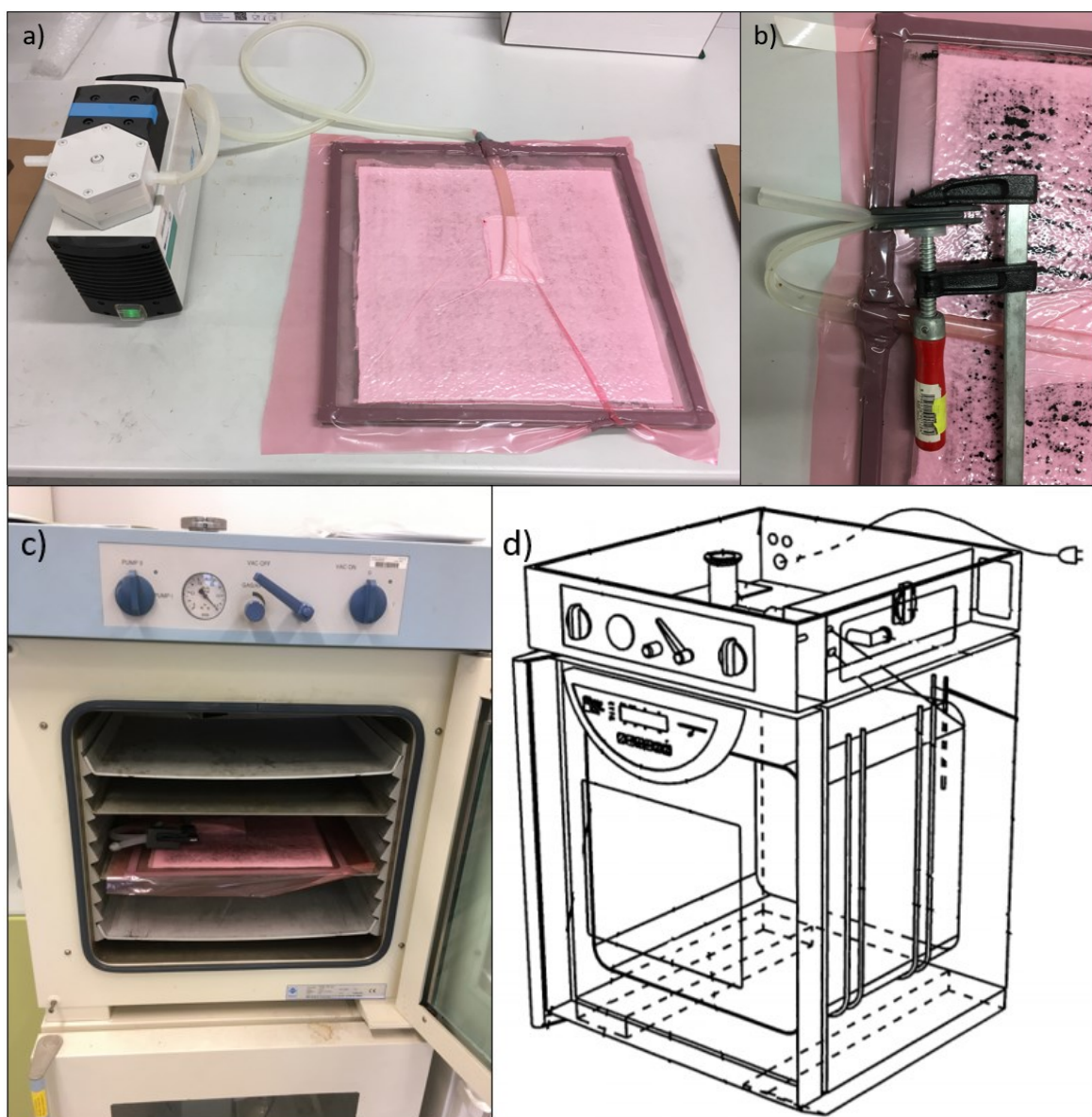


Obrázek 29: a) skelná tkanina nasycena epoxidovou matricí, b) přiložená strhávací tkanina, c) přiložená odsávací rohož



Potřebné množství pryskyřice se určuje jako hmotnost použité výztužné tkaniny zvětšena o 10 %. Tato hmotnost přísluší směsi pryskyřice a tvrdidla a musí se tedy mezi tyto složky rozdělit v požadovaném poměru. Konkrétní hmotnosti jednotlivých složek kompozitů a sendvičů jsou pro přehlednost souhrnně uvedeny v kapitole 6.3.

Po navážení potřebného množství pryskyřice, tužidla a případně plniv byla na naseparovanou formu nanесena vrstva této směsi, na tu byla položena skelná tkanina a pomocí štětce a tlačných válečků byla tato tkanina nasycena. Následovalo položení další vrstvy tkaniny a její sycení. Celkem byly téměř všechny lamináty vyrobeny v tloušťce čtyř vrstev. Pouze laminát s hmotnostním plněním 70 % MnZn byl vyroben jen dvouvrstvý.



Obrázek 30: a) odsávání vzduchu z prostoru pod vakuovací fólií, b) uzavření vakuovací hadice při transportu formy do vyhřívané pece, c) umístění laminátu v peci, d) schéma vyhříváního zařízení Vacucell.

Viskozita systému v tak vysoké hodnotě plnění totiž byla obrovská a směs byla jen velmi těžko roztíratelná a sycení tkaniny bylo problematické. Jednotlivé vrstvy tohoto vysoce plněného kompozitu také měli tendenci se od sebe již při výrobě delaminovat. Při výrobě bylo tedy v rámci zachování technologičnosti použito u této koncentrace pouze dvou vrstev.

Po uložení všech výrobních i technologických materiálů byl obvod formy oblepen pomocí těsnícího pásku. Z vakuové vývěvy byla natažena plastová hadička sloužící k odtahu vzduchu a tím odsátí přebytečné pryskyřice z laminátu do odsávací rohože. Tato hadička musí být také co nejlépe utěsněna lepícím páskem. Následně byla forma překryta vakuovací fólií, jejíž těsnost zajišťuje právě lepící pásek. Vakuování je znázorněno na obrázku 30 pod písmenem a) (vlevo nahoře). Vpravo je pak vyobrazeno zajištění vakua při transportu formy do vyhřívané trouby, protože vytvrzování laminátů probíhalo při 60 °C po dobu 14 hodin. Samotné vyhřívané zařízení je pak znázorněno dole na fotografii (c) a na schématu (d) dle výrobce. Poté, co lamináty prošly vytvrzovacím cyklem, byly odformovány a připraveny na následující lepení k voštině při tvorbě sendvičů.

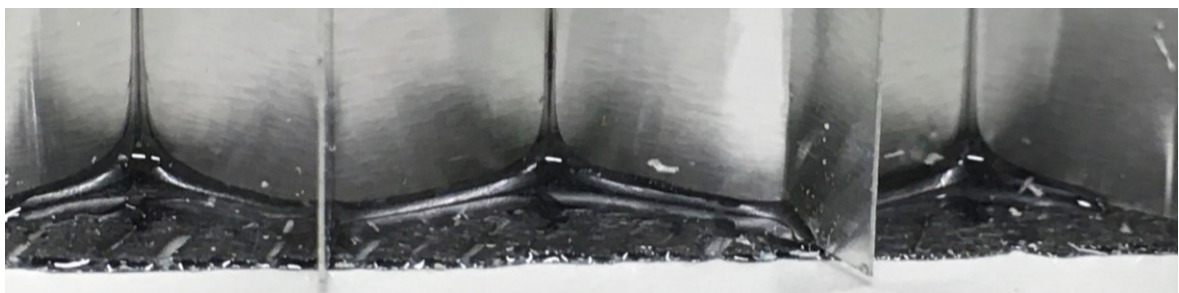
## 6.2 Lepení sendvičů

Voština, která byla použita pro výrobu sendvičů byla pro účely práce poskytnuta společností *ALU-composite panels, spol., s.r.o.* se sídlem v Zubří a její rozměry jsou uvedeny v následující tabulce.

*Tabulka 7: Rozměry použité voštiny*

výška voštiny (mm)	strana hexagonu (mm)	tloušťka stěny (mm)	slitina
18	8	0,12	AL3003

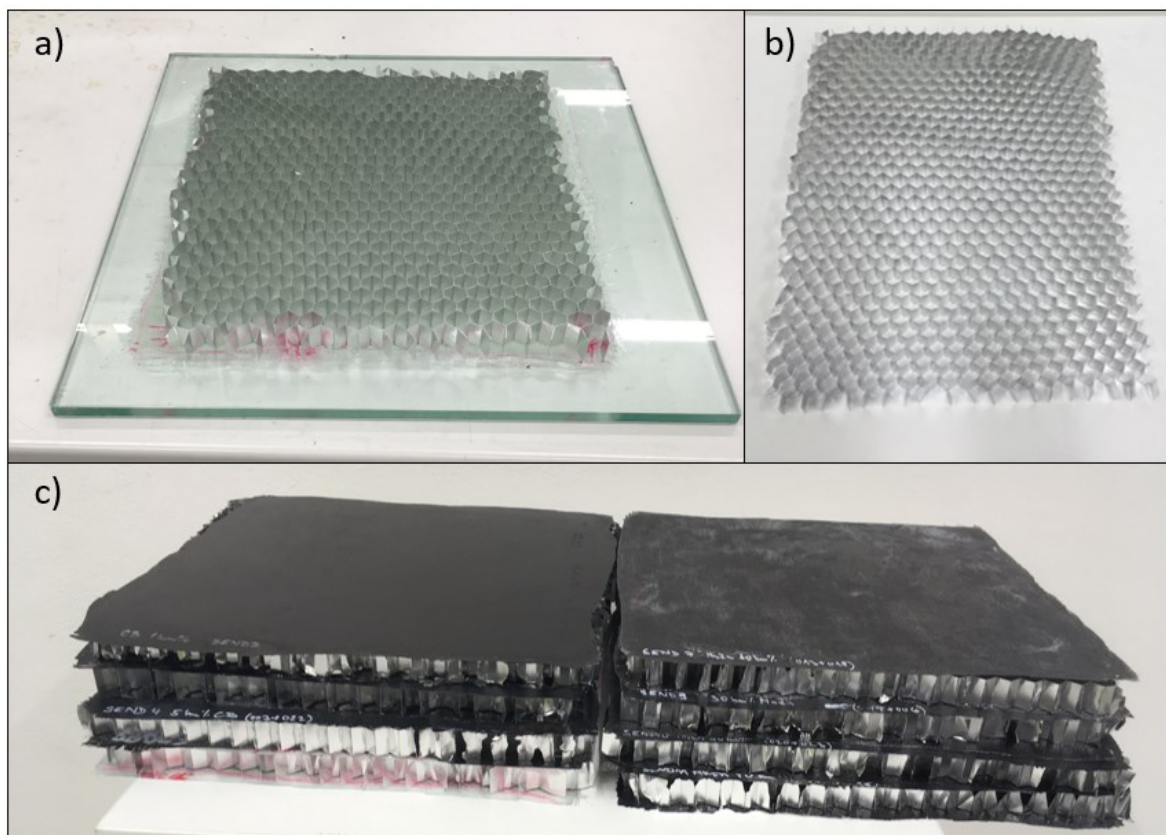
Při lepení sendvičů musí být zajištěna co největší možná soudržnost jádra a potahů. Teoreticky se tomuto věnuje kapitola 2.2 výše, kde je znázorněno adhezní zaoblení. Na obrázku 31 je zobrazeno spojení skutečného sendviče, vyrobeného pro účely měření v této



*Obrázek 31: Adhezní spojení, kterého bylo dosaženo na vyrobeném sendviči mezi krycím potahem a voštinou*



práci. Při výrobě sendvičů metodou lepení bylo nejprve vyzkoušeno několik zkušebních výrobků, které nebyly dále použity pro měření, ale byl na nich odzkoušen navrhnutý technologických proces. Nejprve byla opět naseparována forma. Na formu byla položena laminátová deska a ta byla potřena vrstvou pryskyřice (stejně jako matrice v laminátu). Zajistit optimální množství pryskyřice bylo problematické, neboť při slabé vrstvě by sendvič nedržel pohromadě, ale při příliš velké vrstvě by pryskyřice zatekla do buněk voštiny a tím by se zbytečně zvyšovala hmotnost sendviče. Po natření byla na laminát položena voština a ta byla zatížena po dobu 30 minut pomocí dalších skleněných desek a ocelového závaží. Poté byla tato polovina sendviče uzavřena do vyhřívané pece VacuCell a prošla vytvrzovacím cyklem při 60 °C po dobu 14 hodin. Po vytvrzení byl opět na separovanou formu položen druhý krycí potah, ten byl také natřen pryskyřicí a na něj byla přiložena voština již slepená s prvním krycím potahem a opět následovalo vytvrzení. Sendvič byl vyráběn nadvakrát, neboť při zkušební výrobě bylo vyzkoušeno, že takto vyrobený sendvič má lepší spojení mezi lamináty a jádrem než sendvič vyrobený na jeden krok. Samostatná voština, částečně vyrobený sendvič a všechny vyrobené sendviče jsou pak zobrazeny na obrázku 32.



Obrázek 32: a) sendvič opatřen zatím pouze jedním potahem, b) voština před přilepením k sendviči, c) všechny vyrobené sendvičové panely

### 6.3 Přehled vyrobených laminátů a sendvičů

Pro přehlednost jsou v tabulce 8 uvedeny hmotnostní údaje z průběhu výroby. Nejprve je uvedeno označení sendviče, poté označení obou laminátů pro konkrétní sendvič, následuje hmotnost skelné tkaniny a podle ní určená hmotnost směsi síťovadla. Kvůli snížení počtu sloupců v tabulce proto není uvedena samostatná hmotnost pryskyřice a tužidla, ale jejich celkové množství, které se mezi tyto složky dělí v poměru 4:1.

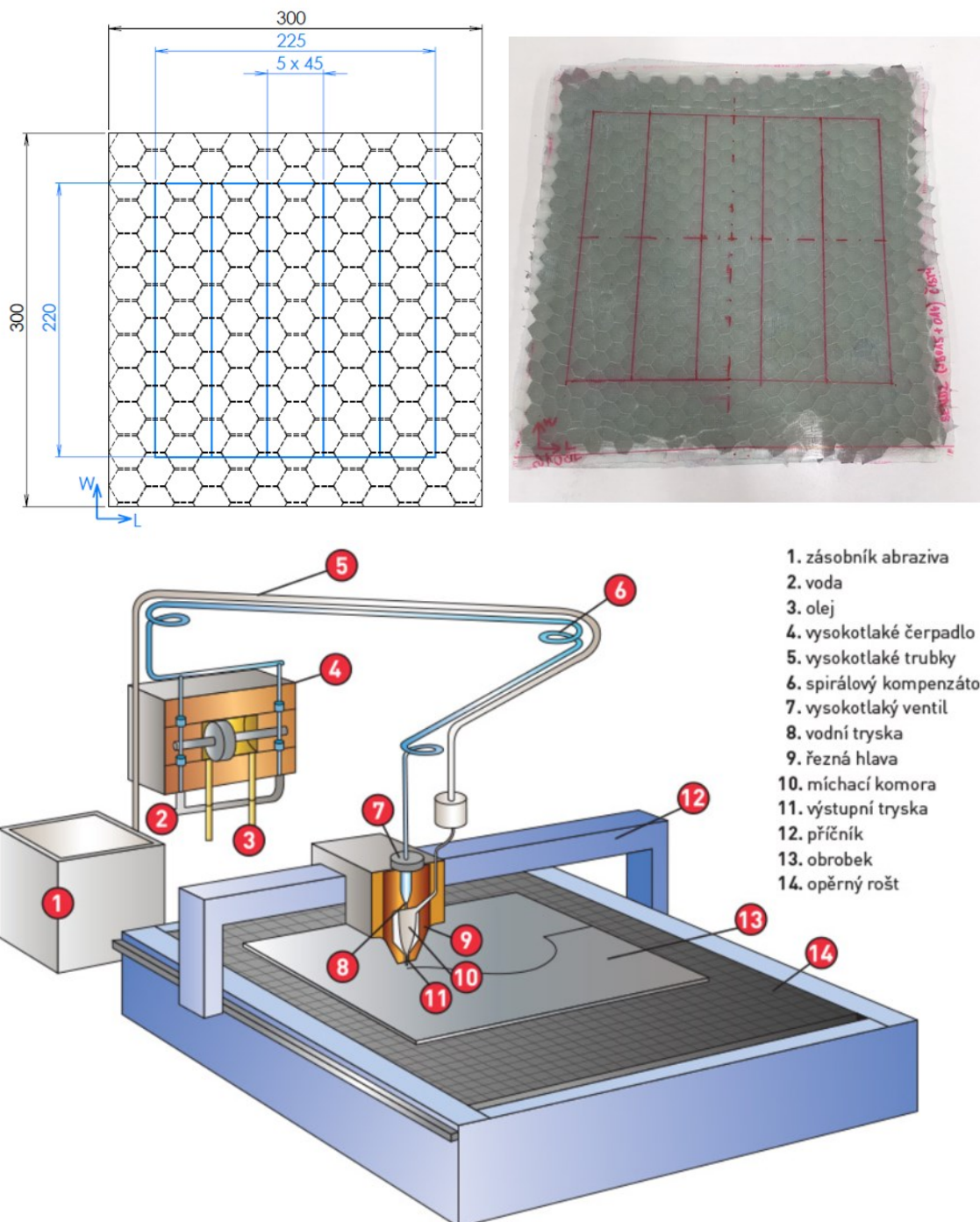
Tabulka 8: Přehled vyrobených laminátů a sendvičů

sendvič	laminát	druh plniva	koncentrace plniva $k_p$ (hm%)	hmotnost skelné tkaniny $m_s$ (g)	hmotnost síťovadla $m_{p+}$ (g)	hmotnost plniva $m_{pl}$ (g)	hmotnost nevyužitého síťovadla $m_z$ (g)	celková hmotnost laminátu $m_l$ (g)	hmotnost voštiny $m_v$ (g)	hmotnost síťovadla pro lepení $m_{lep}$ (g)	celková hmotnost sendviče $m_{send}$ (g)
SEND2	LAM15	-	-	77,4	85	-	35,5	126,9	76,2	20,1	376,2
	LAM16			80,6	88	-	38,1	130,5		22,5	
SEND3	LAM04	CB	1	70,4	80	0,8	24,2	127,0	79,2	21,7	381,6
	LAM05			75,2	82	0,8	27,8	130,2		23,5	
SEND4	LAM02	CB	5	74,7	82	4,3	30,1	130,9	74,4	24,1	389,7
	LAM22			78,2	86	4,5	29,2	139,5		20,8	
SEND5	LAM09	CB	10	77,1	84	9,7	25,4	145,4	77,9	21,4	407,5
	LAM17			73,4	81	9,5	24,7	139,2		23,6	
SEND7	LAM13	MnZn	10	78,5	86	9,6	28,9	145,2	76,8	22,7	417,5
	LAM18			81,5	90	10,0	32,1	149,4		23,4	
SEND9	LAM06	MnZn	30	72,1	80	34,3	24,9	161,5	76,6	24,1	464,6
	LAM19			77,5	85	36,5	18,5	180,5		21,9	
SEND10	LAM20	MnZn	50	79,7	88	88,0	38,4	217,3	78,2	22,6	546,2
	LAM23			77,2	85	85,0	40,0	207,2		20,9	
SEND11	LAM08	MnZn	70	39,7	45	105,0	35,1	154,6	77,4	22,9	425,9
	LAM21			38,2	44	102,7	37,6	147,3		23,7	

Lamináty byly vyráběny ze čtyř vrstev skelné tkaniny. Čtverce tkaniny byly střihaný z rozvinuté role a nepřesnosti při rozměrování i střihání se projevují v rozdílech hmotnosti tkanin pro jednotlivé lamináty. Při manipulaci s tkaninou se také oddělily některé krajní pramence, což má na rozdíl hmotností také vliv. Pouze sendvič SEND11 se 70% zastoupením plniva MnZn byl vyroben z potahů ze dvou vrstev kvůli technologičnosti výroby, jak je uvedeno v příslušné kapitole výše. I přes to je ale tento sendvič ve výsledku těžší než sendvič neplněný nebo sendviče plněné do 10 hm%, a to kvůli vysoké hustotě manganozinečnatého feritického kovového prášku.

## 6.4 Dělení zkušebních těles vodním paprskem

Zkušební tělesa pro měření ohybových vlastností sendviče byla vyrobena až po změření elektromagnetických vlastností, pro jejichž měření bylo zapotřebí celého sendvičového panelu. Z každého sendviče bylo nařezáno pět zkušebních těles o rozměrech 220 x 45 mm dle normy ASTM C393. Při řezání těles bylo nutno dodržet orientaci voštin ve směru W a L



Obrázek 33: Schéma rozměrů a polohy zkušebních těles na panelu (vlevo nahoře), panel s předkreslenými dráhami řezu (vpravo nahoře), schéma zařízení pro řezání vodním paprskem (dole) [46].

(viz teoretická část, kapitola 2.1.2) kdy byla zvolena orientace ve směru W, která by měla zajistit lepší mechanické vlastnosti. Řezání vodním paprskem bylo vysoutěženo a provedeno ve společnosti *MRB Sazovice, spol. s.r.o.* Rozměry zkušebních těles a jejich orientace při odebrání ze sendviče jsou znázorněny na obrázku 33 vlevo nahoře. Vpravo nahoře na obrázku 33 je sendvič bez plniva (SEND2), na kterém jsou tyto čáry řezu předkresleny. Schéma technologického zařízení k řezání vodním paprskem je na stejném obrázku dole. Při řezání vodním paprskem ztrácí paprsek při průchodu přes materiál relativně rychle energii a při velkých tloušťkách může dojít k podřezání výrobku. Nepříliš kvalitním povrchem disponuje po řezání vodou spodní laminát sendviče. Na obrázku 34 jsou k sobě přiloženy dvě vyřezaná zkušební tělesa, kdy jsou k sobě přiložena podřezanou hranou spodního laminátu sendviče a jakostně lepší hranou horního potahu sendviče.



Obrázek 34: Podřezaná hrana spodního potahu sendviče po řezání vodním paprskem (nahore), jakostně lepší hrana horního potahu sendviče po řezání vodním paprskem (dole).

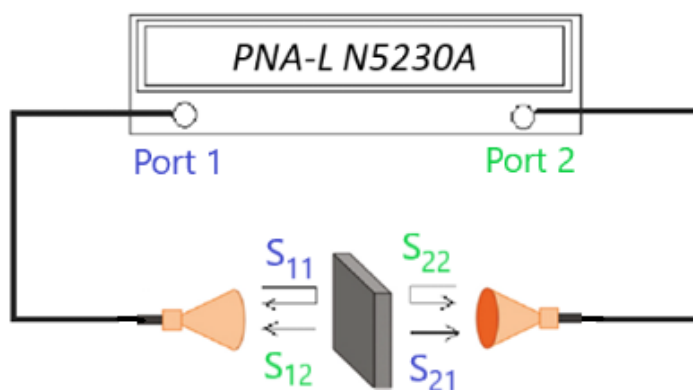


Obrázek 35: Zkušební tělesa nařezaná ze sendvičových panelů.



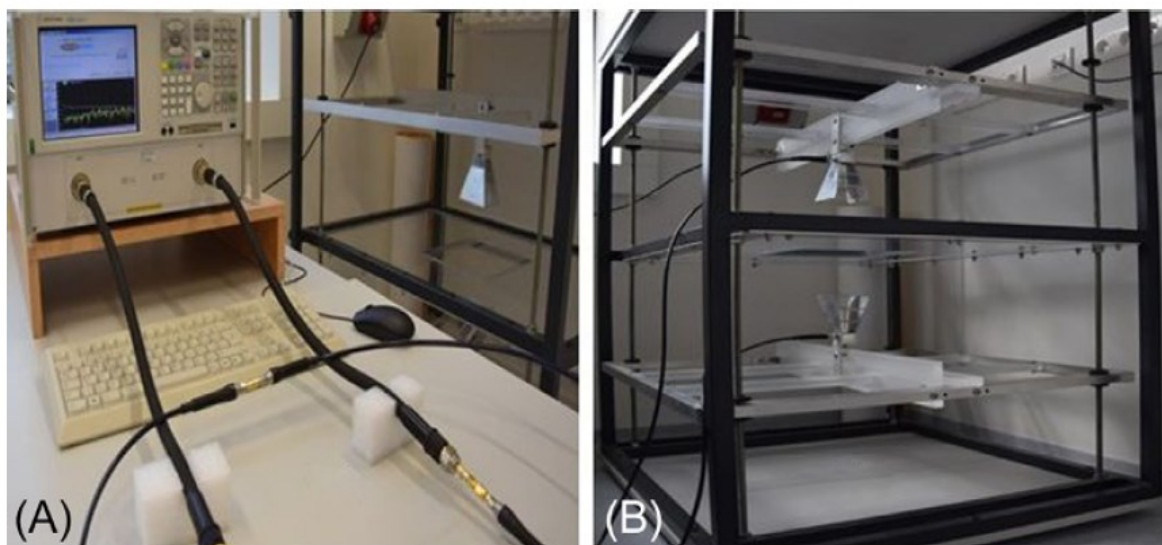
## 7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ

Elektromagnetické vlastnosti byly měřeny ještě na nerozřezaných sendvičových panelech metodou měření ve volném prostoru (anténa – vzorek – anténa), kdy byly určeny rozptylové parametry odrazivosti a transmise  $S_{11}$  a  $S_{21}$  s dopočtem dalších veličin dle vztahů uvedených v teoretické části v kapitole 3.3. Schéma vysílajících a přijímaných signálu je uvedeno na obrázku 36.



Obrázek 36: Schéma principu anténového měřicího zařízení PNA-L N5230A. Dle [37]

Oba porty jsou připojeny k anténám a k vysílači/přijímači elektromagnetického signálu. Před měřením je nutno přístroj nakalibrovat, a to pomocí kalibračních desek. Velikost měřeného tělesa je v ideálním případě alespoň 250 x 250 mm tak, aby vzorek zakryl celý otvor v desce mezi anténami. Proto byly sendviče vyrobeny v rozměrech 300 x 300 mm, aby bylo zajištěno co nejprůkaznější měření, neboť okraje laminátu ani sendviče nejsou



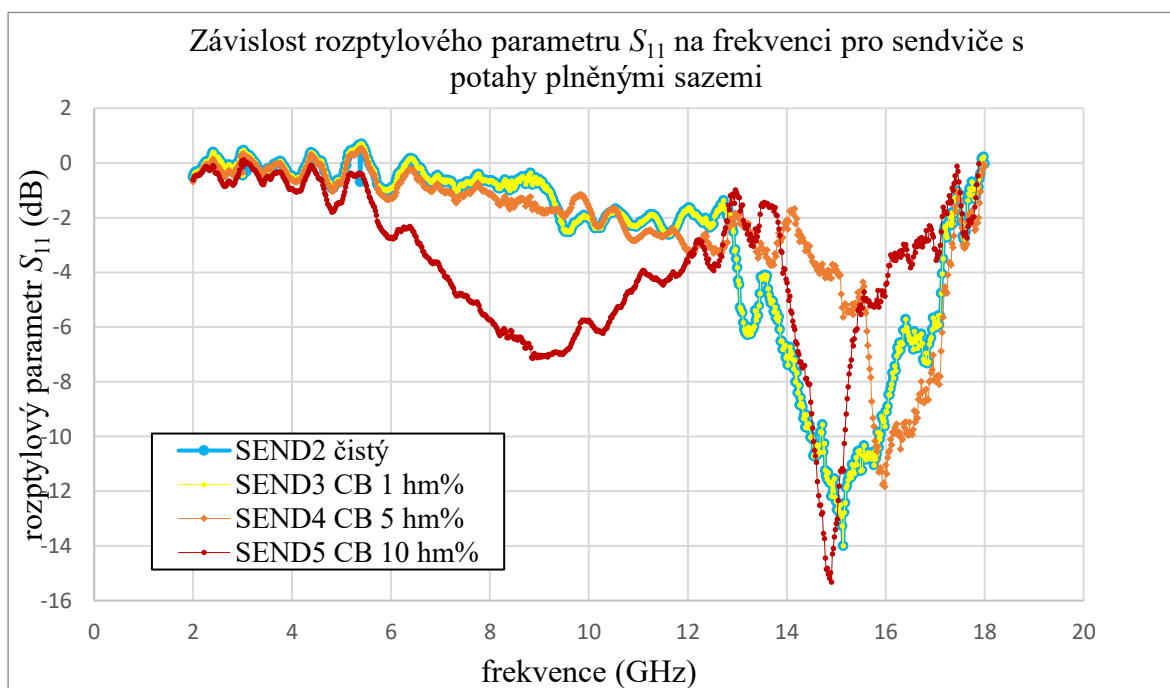
Obrázek 37: (A) měřicí zařízení pro měření parametrů účinnosti elektromagnetického stínění PNA-L N5230A, (B) detail na prostor pro umístění zkušební vzorku. [47]

vzhledem k použité výrobní technologii v nejvyšší jakosti. Zařízení vysílá a zpět zapisuje data v závislosti na frekvenci elektromagnetického signálu, kdy je hodnota pro parametry  $S_{ij}$  zapsána v rozpětí od 2 do 18 GHz. Druhý software v přístroji zároveň dokáže měřit reálné a imaginární složky permitivity a magnetické permeability.

## 7.1 Rozptylové parametry

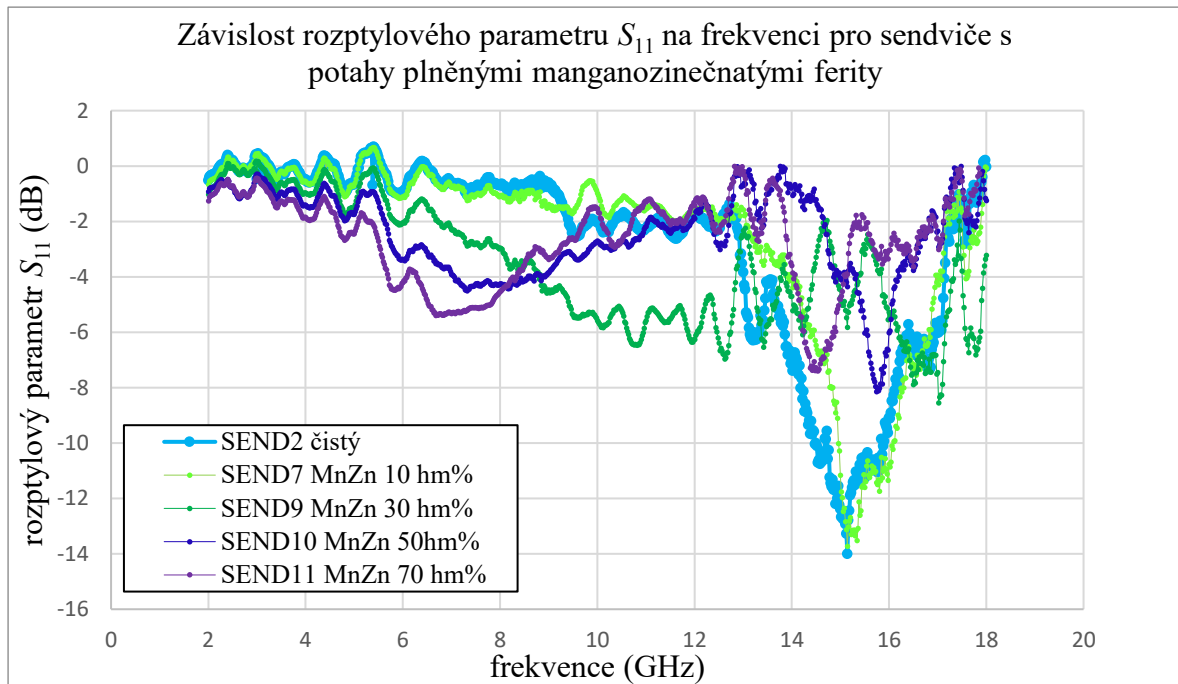
Rozptylové parametry  $S_{11}$  a  $S_{21}$  byly naměřeny a vyneseny do grafických závislostí na frekvenci. V těchto grafech lze pozorovat, že při rezonanční frekvenci  $f_R$  (GHz) dosahuje rozptylový parametr svého minima. Při hodnotě odrazového rozptylového parametru -10 dB je materiál schopný pohltit až 90 % intenzity energie dopadající elektromagnetické vlny. Pokud se hodnota  $S_{11}$  blíží nule, pak dochází ke stínění elektromagnetického záření odrazem.

V grafu na obrázku 38 je vidět, že sendvič SEND2 bez plnění a sendvič s obsahem 1 hm% sazí v potazích SEND3 dosahují totožných výsledků. Rezonanční frekvence výchozí sendvičové struktury  $f_R = 15,1$  GHz nastává při hodnotě  $S_{11} = -14,0$  dB. Při hmotnostním zastoupení sazí 5 hm% (SEND4) nastává  $f_R = 15,9$  GHz při  $S_{11} = -11,8$  dB. Přítomnost plniva se zde tedy projevila zvýšením hodnoty rezonanční frekvence a zároveň poklesem hodnoty odrazového rozptylového parametru. Červená křivka pak značí SEND5 s koncentrací sazí 10 hm%. Na této křivce lze vidět dva výrazné píky, tedy dvě rezonanční frekvence. Jeden pik je v grafu v oblasti vpravo ( $f_R = 14,9$  GHz,  $S_{11} = -15,3$  dB) což je příspěvek voštinového



Obrázek 38: Graf závislosti rozptylového parametru  $S_{11}$  na frekvenci pro sendviče s potahy plněnými uhlíkovými sazími.

jádra (obdobě jako u ostatních sendvičů). Druhý pík se nachází v nižším frekvenčním pásmu, s minimem při  $f_r = 8,9$  GHz,  $S_{11} = -7,1$  dB, což je příspěvek plněného laminátu 10 hm% CB.

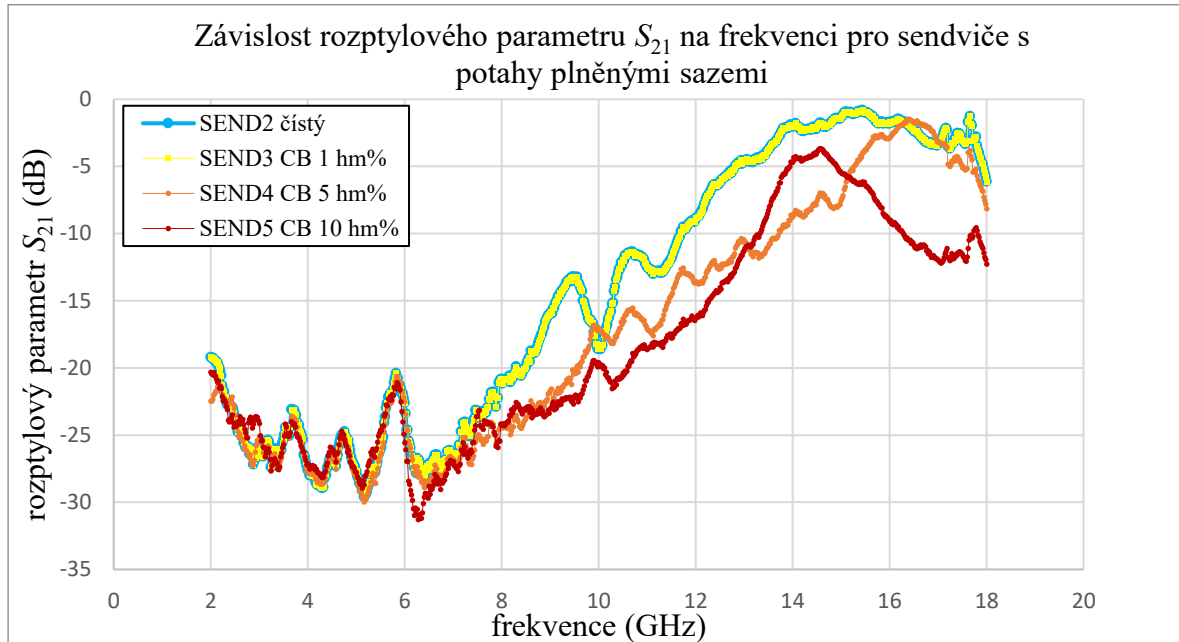


Obrázek 39: Graf závislosti rozptylového parametru  $S_{11}$  na frekvenci pro sendviče s potahy plněnými manganozinečnatými ferity.

Průběh rozptylového parametru  $S_{11}$  pro sendviče s potahy plněnými MnZn ferity je na obrázku 39. V pravé části grafu je opět vidět rezonanční frekvence výchozí sendvičové konstrukce. Světle zelená barva znázorňuje průběh pro 10 hm% MnZn (SEND7) a její průběh je velmi podobný s průběhem světle modrým, který značí sendvič bez plniva (SEND2). Při vyšších koncentracích již jsou naměřené průběhy rozdílné. Pro koncentrace 30, 50 a 70 hm% MnZn jsou rozpoznatelné dvě rezonanční frekvence. Ve vyšších hodnotách se jedná o příspěvek voštinového jádra, který je ovlivněn vlastnostmi plněného potahu. V nižších frekvencích se jedná o rezonanci samotného plněného potahového materiálu. Dle grafu na obrázku 39 s rostoucí koncentrací MnZn feritů dochází k posunutí rezonanční frekvence  $f_R$  do nižší frekvenční hodnoty (MnZn 30 hm%:  $f_R = 17,1$  GHz; MnZn 50 hm%:  $f_R = 15,7$  GHz; MnZn 70 hm%:  $f_R = 14,4$  GHz). Při rostoucí koncentraci dochází k většímu zaplnění matrice plnivem, což vede k poklesu demagnetizačního pole a to lze pozorovat právě i snížením rezonanční frekvence.

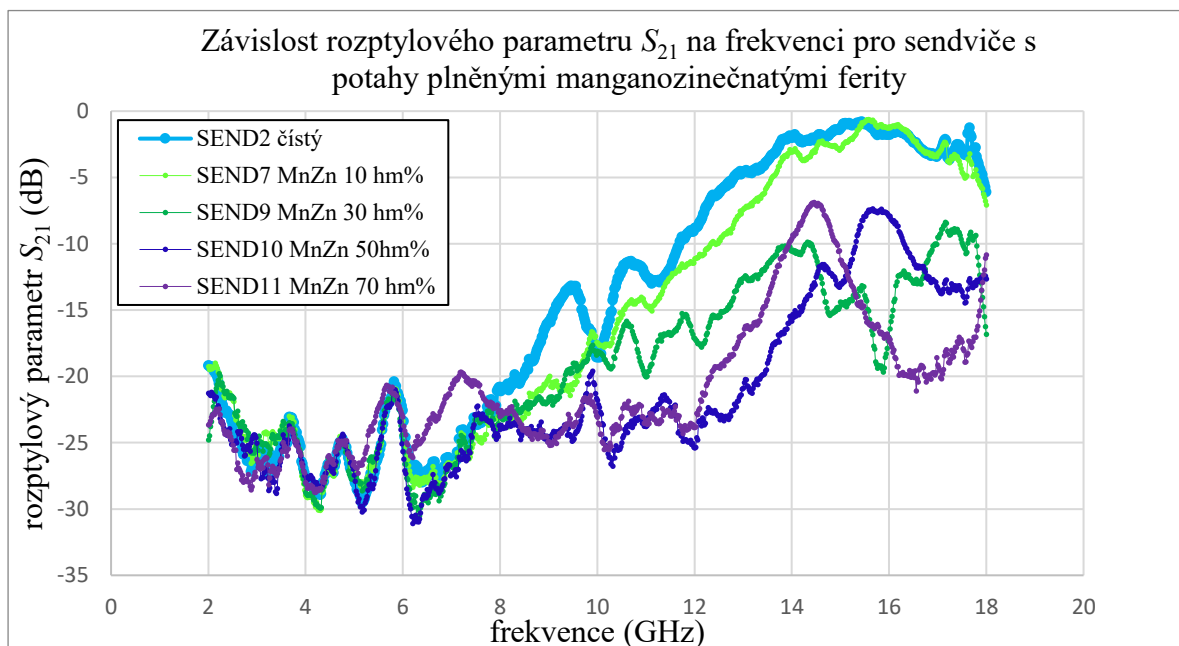
Zatímco na základě rozptylového parametru  $S_{11}$  se určuje odrazivost daného systému, rozptylový parametr  $S_{21}$  je stěžejním pro určení pohltivosti stínění daného materiálu. Na grafu na obrázku 40 je tento parametr uveden v závislosti na frekvenci pro sendviče s potahy plněnými uhlíkovými sazemi. V pravé části grafu je lokální extrém funkce (maximum)

sendviče s 10 hm% plněním posunut doleva ( $f_R = 14,7$  GHz) oproti sendviči s plněním 5 hm% ( $f_R = 16,5$  GHz). Pokud se hodnoty  $S_{21}$  blíží hodnotě -30 dB, pak převážná část intenzity energie elektromagnetické vlny skrz kompozit neprojde, tedy se absorbuje či odrazí. Konkrétní hodnoty poměrné části intenzity vlny  $R$   $T$  a  $A$  jsou uvedeny v kapitole 7.2.



Obrázek 40: Graf závislosti rozptylového parametru  $S_{21}$  na frekvenci pro sendviče s potahy plněnými uhlíkovými sazemí.

Stejně tak je posun rezonančních frekvencí směrem doleva při rostoucí koncentraci plnění patrný pro sendviče SEND9, SEND10 a SEND11 plněné manganozinečnatými ferity.



Obrázek 41: Graf závislosti rozptylového parametru  $S_{21}$  na frekvenci pro sendviče s potahy plněnými manganozinečnatými ferity.



## 7.2 Zastoupení složek intenzity elektromagnetického záření (R, T, A) při různých frekvencích

Z naměřených rozptylových parametrů byly určeny poměrné procentuální zastoupení odražené  $R$ , pohlcené  $A$  a prošlé  $T$  intenzity energie elektromagnetického záření pro jednotlivé sendvičové struktury. Tyto výsledky jsou zapsány v následujících tabulkách a graficky znázorněny při vybraných frekvencích 3, 6, 9, 12, 15 a 18 GHz. V tabulce 9 jsou hodnoty prvního sendviče vybarveny, aby byla patrná korespondence s grafickými výsledky. Volba barev byla na základě úvahy, že se snažíme získat absorbér elektromagnetického záření. Tedy absorbovaná složka je označena zeleně (tento výsledek je preferovaný), odražená složka je označena žlutě (jako přijatelný výsledek) a prošlá část vlnění je označena červeně.

Tabulka 9:  $R$   $T$   $A$  pro sendvič bez plnění a sendviče plněné uhlíkovými sazemi (CB) při vybraných frekvencích.

$f$ (GHz)	SEND2 (čistý)			SEND3 CB 1 hm%			SEND4 CB 5 hm%			SEND5 CB 10 hm%		
	R (%)	T (%)	A (%)	R (%)	T (%)	A (%)	R (%)	T (%)	A (%)	R (%)	T (%)	A (%)
3	89,9	0,3	9,8	89,9	0,2	9,9	92,6	0,3	7,1	97,2	0,4	2,4
6	80,8	0,6	18,6	80,8	0,6	18,6	74,2	0,6	25,2	53,3	0,3	46,4
9	87,1	2,6	10,3	87,1	2,6	10,3	68,0	0,7	31,3	19,6	0,5	79,9
12	67,3	13,1	19,6	67,3	13,0	19,7	47,4	4,4	48,2	43,4	2,4	54,2
15	5,8	73,4	20,8	5,8	73,4	20,8	40,7	17,7	41,6	4,8	28,5	66,7
18	52,5	47,4	0,1	52,5	47,4	0,1	78,5	20,7	0,8	51,0	6,0	43,0

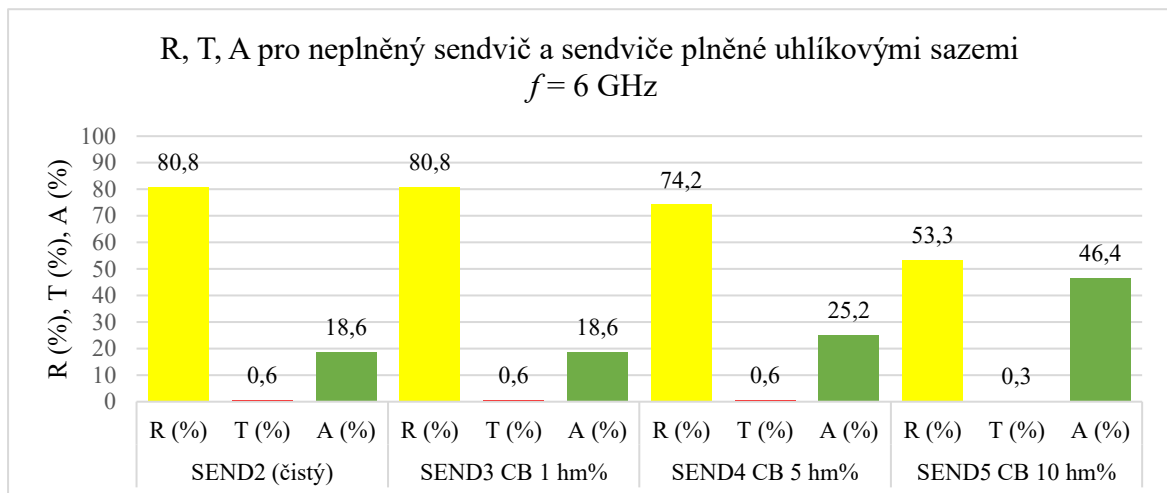
Sendvič bez plnění (SEND2) a sendvič plněný 1 hm% sazí (SEND3) vykazují v celém zobrazeném spektru frekvencí prakticky stejné poměrné hodnoty  $R$   $T$  a  $A$ . Stejným způsobem jsou i zapsány i hodnoty v tabulce 10, což jsou hodnoty vybrané pro sendviče s potahy plněnými manganozinečnatými ferity.

Tabulka 10:  $R$   $T$   $A$  pro sendviče plněné manganozinečnatými ferity (MnZn) při vybraných frekvencích.

$f$ (GHz)	SEND7 MnZn 10 hm%			SEND9 MnZn 30 hm%			SEND10 MnZn 50 hm%			SEND11 MnZn 70 hm%		
	R (%)	T (%)	A (%)	R (%)	T (%)	A (%)	R (%)	T (%)	A (%)	R (%)	T (%)	A (%)
3	89,8	0,3	9,9	95,8	0,3	3,9	93,7	0,3	6,0	90,6	0,2	9,2
6	77,3	0,5	22,2	62,3	0,3	37,4	45,9	0,3	53,8	38	0,5	61,5
9	72,9	1,0	26,1	35,7	0,7	63,6	41,1	0,4	58,5	46	0,3	53,7
12	68,6	7,7	23,7	23,7	1,9	74,4	64,7	0,3	35,0	72	0,4	27,6
15	7,7	52,4	39,9	33,7	3,6	62,7	39,4	5,0	55,6	33,1	7,5	59,4
18	72,9	25,9	1,2	47,6	2,1	50,3	75,2	5,4	19,4	50,7	8,2	41,1

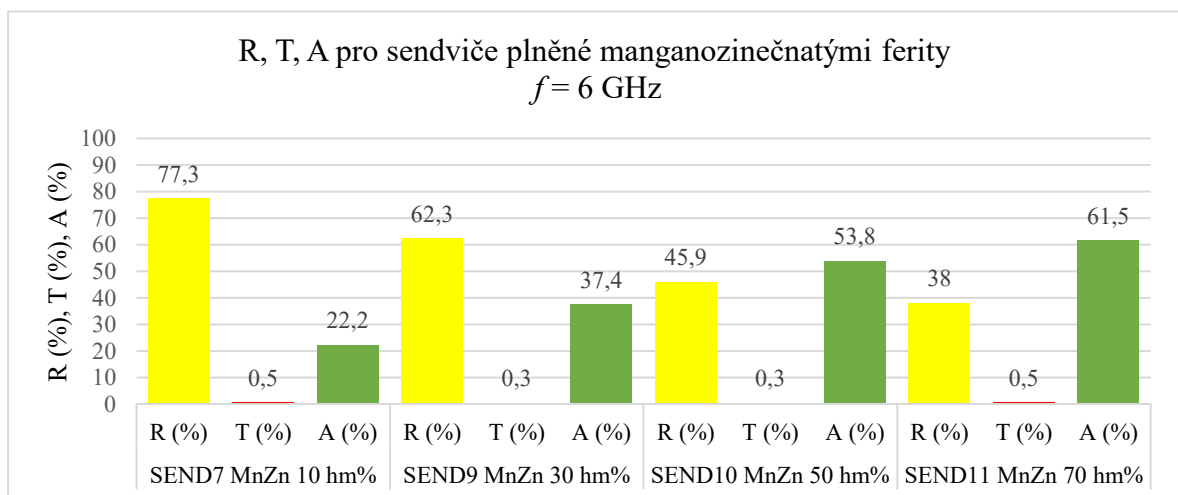
V následujících grafických závislostech jsou znázorněny sloupcové grafy, ve kterých jsou hodnoty  $R$ ,  $T$ ,  $A$  uvedeny pro jednotlivé frekvence. V grafu jsou vždy uvedeny data pro čtyři sendviče (stejně jako v tabulkách 9 a 10).

Při frekvenční hodnotě 3 GHz se u všech osmi sendvičů pohybuje hodnota odrazivosti okolo 90 %, z celkové energie dopadající vlny pak jen okolo 0,3 % prochází skrz a zbytek do 100 % je hodnota absorpce. Při frekvenci 6 GHz už vyšší koncentrace uhlíkových sazí (SEND5 CB 10 hm%) vykazují až 46,4 % absorpční složky, což je znázorněno na sloupcovém grafu na obrázku 42.



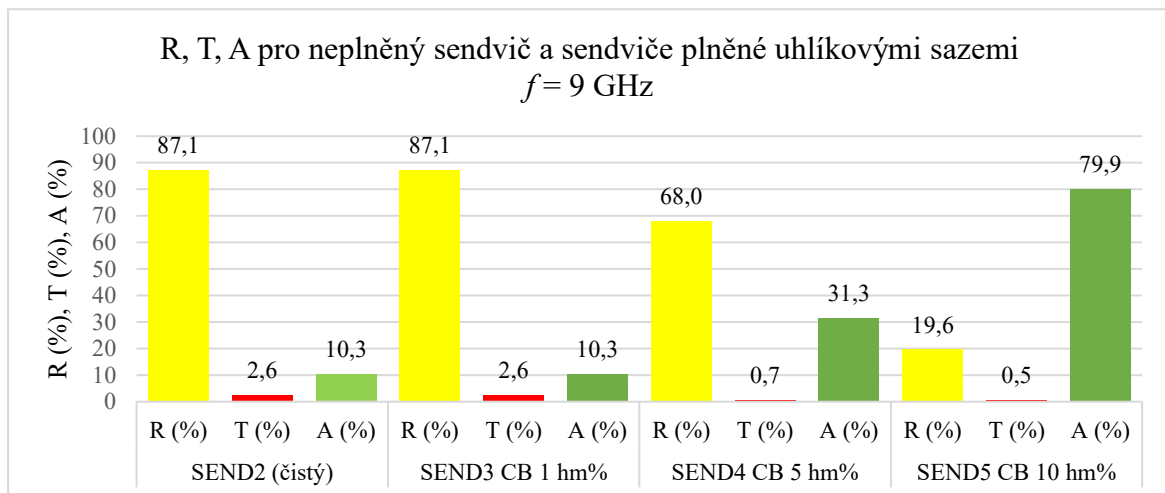
Obrázek 42: Procentuální zastoupení reflexe, transmise a absorpce elektromagnetického stínění pro sendvič neplněný a plněné uhlíkovými sazemi při frekvenci 6 GHz.

Při stejné frekvenci dosahuje plnění manganozinečnatými ferity obdobného rozdělení složek dopadajícího elektromagnetického záření. Na obrázku 43 je vidět, že při frekvenci 6 GHz roste s koncentrací plniva i schopnost absorbovat elektromagnetické vlny. Zlomek vlnění, které prošlo, je minimální.



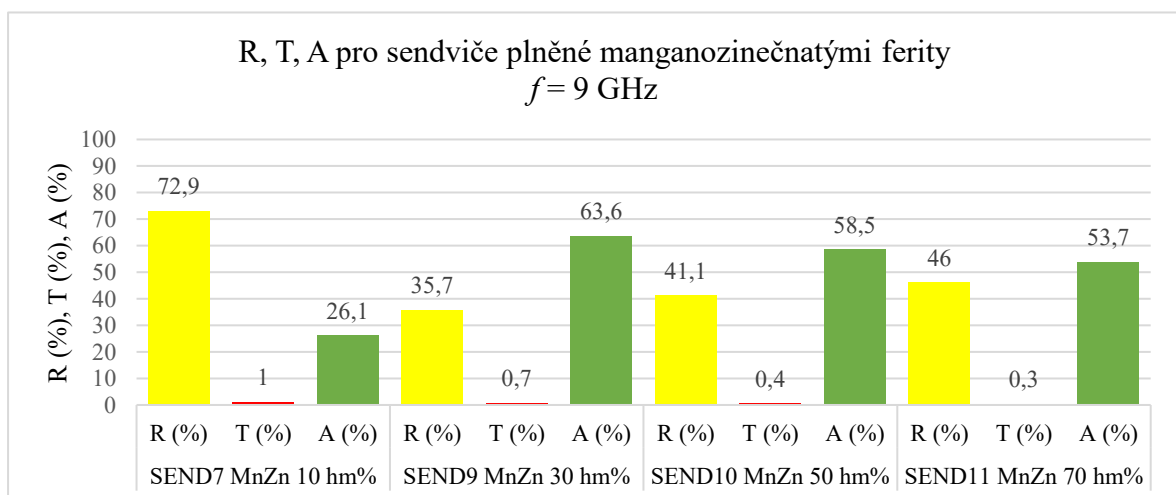
Obrázek 43: Procentuální zastoupení reflexe, transmise a absorpce elektromagnetického stínění pro sendviče plněné manganozinečnatými ferity při frekvenci 6 GHz.

Při frekvenci 9 GHz je u neplněného sendviče a u sendviče s 1 hm% sazí (CB) v potazích zaznamenán pokles absorpční složky ve prospěch složek reflexe i transmise. Naopak pro koncentrace sazí 5 a 10 hm% se velikost absorpční složky zvětšuje. U sendviče SEND5 CB 10 hm% dokonce na hodnotu  $A = 79,9 \%$ , což je nejvyšší hodnota absorpční složky ze všech sendvičů při všech frekvencích. Tyto údaje lze odečíst z grafu na obrázku 44.



Obrázek 44: Procentuální zastoupení reflexe, transmise a absorpce elektromagnetického stínění pro sendvič neplněný a plněné uhlíkovými sazími při frekvenci 9 GHz.

Při frekvenci 9 GHz pro sendviče s lamináty plněnými MnZn ferity lze pozorovat velký nárůst absorpční složky u plnění 30 hm % sendviče SEND9 (63,6 % oproti 37,4 % při frekvenci 6 GHz). U zbylých koncentrací není změna poměru složek intenzity nijak zásadní.



Obrázek 45: Procentuální zastoupení reflexe, transmise a absorpce elektromagnetického stínění pro sendviče plněné manganozinečnatými ferity při frekvenci 9 GHz.

Další nárůst frekvence (12 GHz) pak u nízkých koncentrací plniv (0 hm%, 1 hm% CB, 5 hm% CB, 10 hm% MnZn) vede ke zvětšení podílu elektromagnetické záření, které prošlo skrz daný materiál (transmisní složka). Koncentrace 30 hm% MnZn v této frekvenci ale nabývá své nejvyšší dosažené hodnoty absorpční složky a to 74,4 % (dle tabulky 10).

### 7.3 Účinnost stínění proti elektromagnetickému záření

Celková účinnost stínění proti elektromagnetickému záření se skládá ze složek účinnosti stínění odrazem ( $SE_R$ ) a účinnosti stínění pohltivostí ( $SE_A$ ). Tedy celková účinnost stínění sendvičových prvků ukazuje součet schopností elektromagnetické vlny odrážet a pohlcovat v daném frekvenčním pásmu  $SE = SE_R + SE_A$ , kdy tyto hodnoty jsou určeny dopočtem z rozptylových parametrů dle vztahů z kapitoly 3.3.

Zkušenosti v potřebách stínění elektrotechnických přístrojů vedli ke kategorizaci materiálů podle orientačních dosažených hodnot účinnosti stínění elektromagnetického záření.

Tabulka 11: Hodnocení materiálů dle účinnosti stínění. Dle [47]

účinnost stínění $SE$ (dB)	hodnocení
0 – 10	nedostatečné stínění
10 – 30	stínění pro minimální požadavky
30 – 60	stínění dostačující pro většinu běžných požadavků
60 – 90	velmi dobré stínění
90 – 120	vysoce kvalitní stínění

Dle naměřených rozptylových parametrů  $S_{11}$  a  $S_{21}$  je patrné, že již samotná výchozí sendvičová struktura bez plniva v potazích je schopna stínit elektromagnetické záření na základě principu odrazu i absorpce, protože hliníkové jádro je elektricky vodivé. Plniva v potazích pak do struktury přináší posun rezonančních frekvencí, vytvoření druhotné rezonanční frekvence a také ustálení fluktuace naměřených dat.

Tabulka 12: Účinnost stínění pro vybrané sendviče

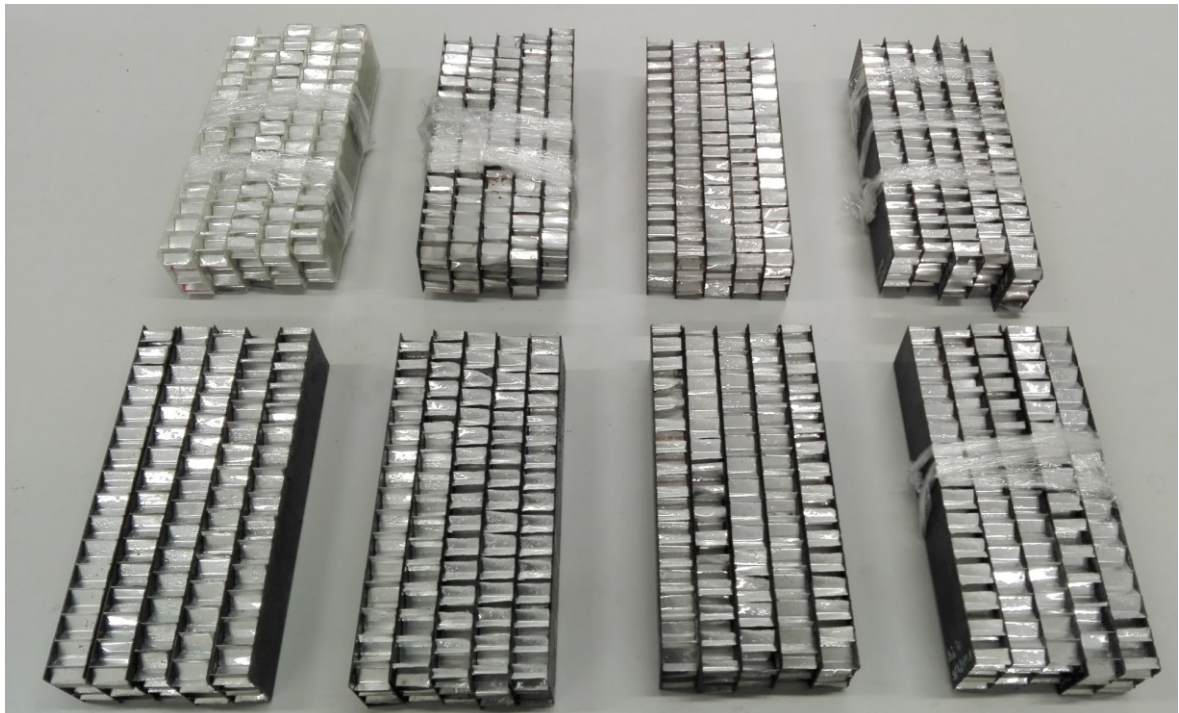
sendvič	$f$ (GHz)	$SE_R$ (dB)	$SE_A$ (dB)	$SE$ (dB)
SEND2 bez plniva	15	23	22	45
SEND5 CB 10 hm%	9	17	10	27
	15	24	9	32
SEND11 MnZn 70 hm%	7	13	14	27
	16	10	16	26

V tabulce 12 jsou uvedeny hodnoty účinnosti stínění elektromagnetického záření vybraných sendvičů, které dosahují alespoň minimálních požadavků dle tabulky 11. Hodnoty 45 dB dosahuje SEND2, jehož potahy jsou tvořeny pouze sklolaminátem bez dalších plniv. Účinnost je to sice nejvyšší, avšak je pouze lokální a s průběhem, u kterého se nabízí otázka optimalizace ve zbylém měřeném frekvenčním rozsahu, neboť tam nedosahuje tak

uspokojivých hodnot. Širších frekvenčních spekter uplatnění pak dosahují plněné struktury. U nejvyšší použité koncentrace sazí (10 hm%) převažuje v obou rezonančních frekvencích poměr účinnosti stínění dané odrazem. Oproti tomu konstrukce SEND11 plněná manganozinečnatými ferity vykazuje větší poměrné zastoupení stínícího efektu pohlcením elektromagnetického záření a je možné ji označit za širokopásmový absorbér.

## 8 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ TROJBODOVÉHO OHYBU

Zkouška trojbodovým ohybem byla prováděna a měřena na zkušebních tělesech vyřezaných vodním paprskem ze sendvičových panelů. Celkem bylo připraveno 40 zkušebních těles, z každého sendvičového panelu pět. Jednotlivé série byly očištěny od procesních kapalin dělicí technologie a popsány číslem sendviče, číslem zkušebního tělesa, druhem plniva a hmotnostní koncentrací plniva. Výška sendviče je zhruba 20 mm.

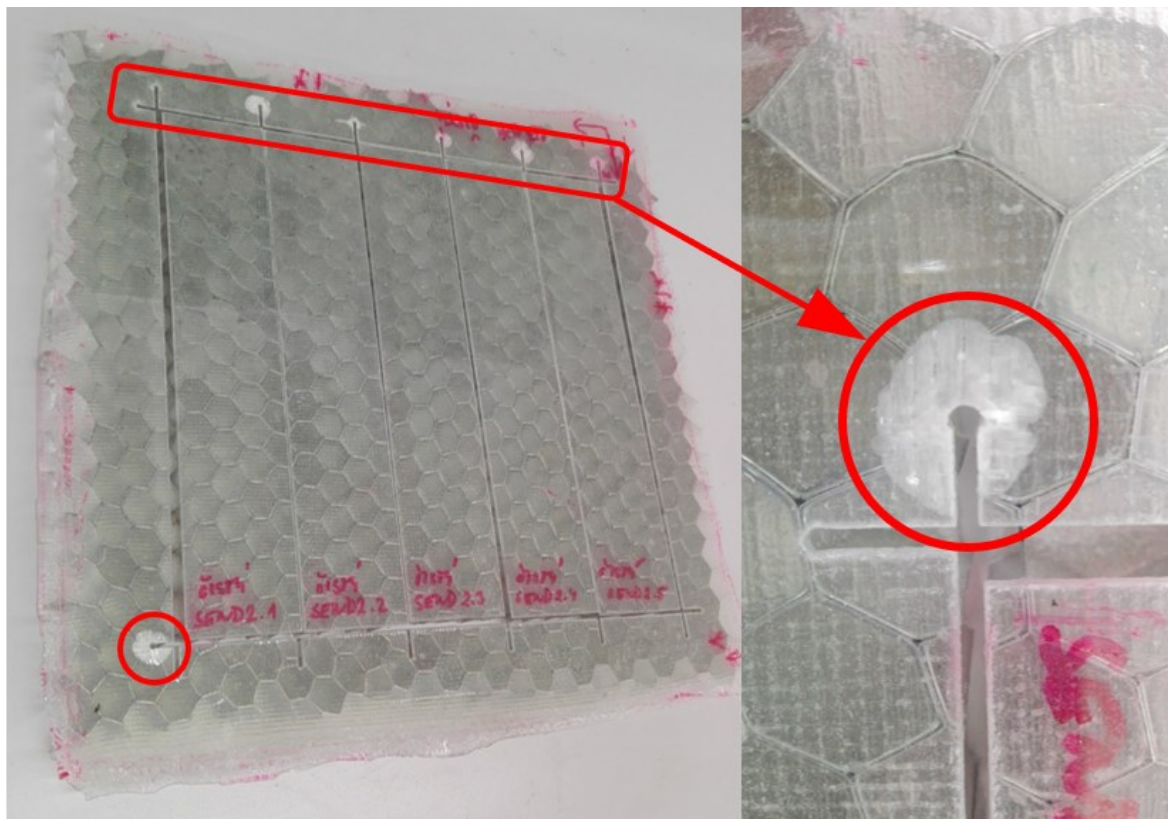


Obrázek 46: Připravená zkušební tělesa pro zkoušku tříbodovým ohybem. Horní řada zleva: SEND2, SEND3 CB 1 hm%, SEND4 CB 5 hm%, SEND5 CB 10 hm%. Spodní řada: SEND7 MnZn 10 hm%, SEND9 MnZn 30 hm%, SEND10 MnZn 50 hm%, SEND11 MnZn 70 hm%.

Již před měřením bylo zjevné, že soudržnost potahů a jádra není neoptimálnější. Toto bylo dáno hlavně technologií výroby sendvičových panelů, tedy lepením předem vyrobených laminátů k voštině. Při vnější kontrole panelů, bylo také zjevné, že k porušení soudržnosti mezi lamináty a jádrem došlo i vlivem energie nárazu vodního paprsku při tvorbě pilotního otvoru (místo, kde dochází k prvotnímu průrazu paprsku skrz materiál, odkud se následně paprsek pohybuje v osách X a Y souřadného systému stroje). Kvůli tomuto došlo také k místní delaminaci samotného potahového laminátu sendviče SEND2 bez plniva, což je vyznačeno na obrázku 47. Z pěti zkušebních vzorků ze sendviče SEND2 byl u jednoho zcela odlepen horní potah od voštiny a tento vzorek byl vyřazen. Další dva zkušební vzorky byly částečně odlepeny, nicméně jejich odolnost trojbodovému ohybu byla vyzkoušena. Výsledky těchto dvou měření však jsou výchozím stavem zkušebních těles značně ovlivněna (viz kapitola 8.1.1, obrázek 48). Ostatní sendviče již vadu v podobě delaminace v místě



pilotního otvoru vodního paprsku nevykazovaly a ani jejich potahy nebyly od jader na žádném z vzorků před zkouškou odlepeny.



Obrázek 47: Delaminace horního potahu sendviče SEND2 (bez plniva) v místě prvotního průchodu vodního paprsku.

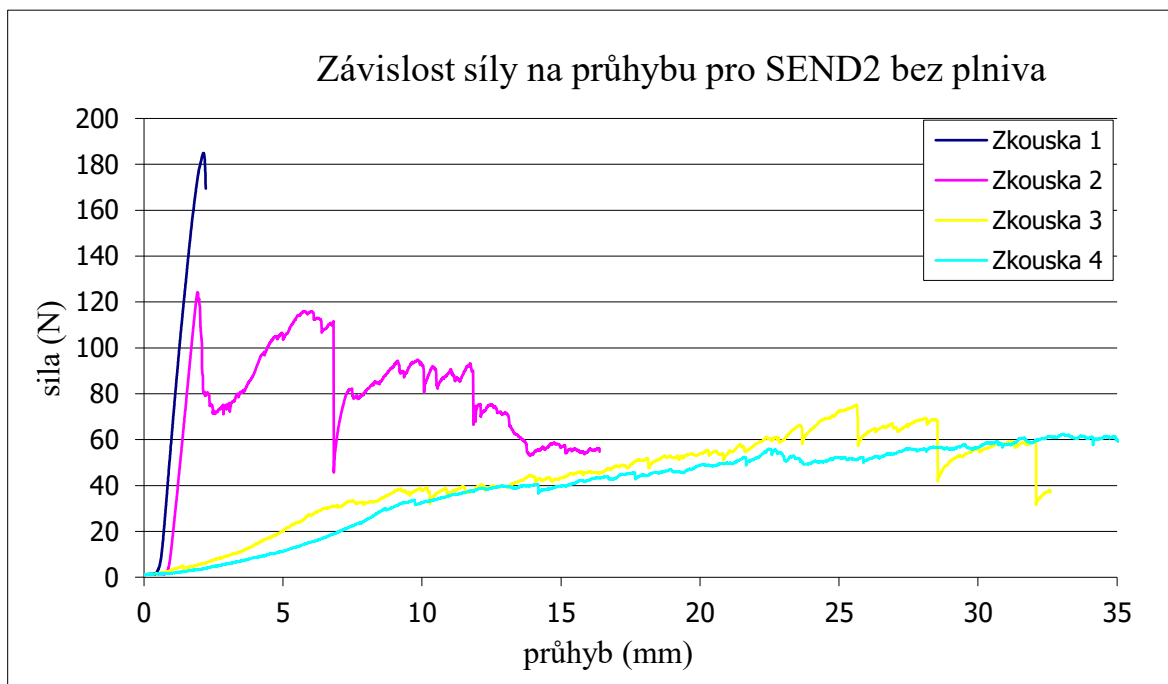
Zkouška trojbodovým ohybem byla provedena na univerzálním trhacím stroji Tensometric M350-5CT pro testování s konstantním přírůstkem deformace a současným sledováním vyvolané síly, který byl opatřen přípravkem pro tuto zkoušku.

Zkouška byla vykonána dle normy ASTM C393 se zkušebními vzorky o podstavě obdélníka 220 x 45 mm s výškou sendviče 20 mm. Jednotlivé rozměry byly změřeny a zapsány pro výpočet navazujících veličin. Rychlost posuvu příčnicku byla dle příslušné normy zvolena 6 mm/min. Zkušební stroj zaznamenal průběh síly, kterou příčnick stroje působil na ohýbaný sendvičový nosník a zároveň tomuto odpovídající průhyb nosníku. Z číselných záznamů pak byla vždy pro každý vzorek ze série vybrána maximální ohybová síla  $F_{\max}$  (N), ze které byla následně určena pevnost jádra ve smyku  $\tau_s$  (MPa) a napětí v potahu  $\sigma$  (MPa) dle vztahů (15) a (16) v kapitole 4.2. Softwarem zkušebního zařízení pak byl určen modul pružnosti v ohybu  $E_f$  (MPa). Tyto veličiny jsou pak pro každou koncentraci plniv (tj. pro každou sérii zkušebních těles) zapsány v tabulkách a doplněny o průměrné hodnoty a směrodatné odchylky průměru.

## 8.1 Výsledky měření jednotlivých sérií

Pro přehlednost jsou měření jednotlivých sérií zkušebních těles rozdělena do podkapitol.

### 8.1.1 Ohyb SEND2 bez plniva



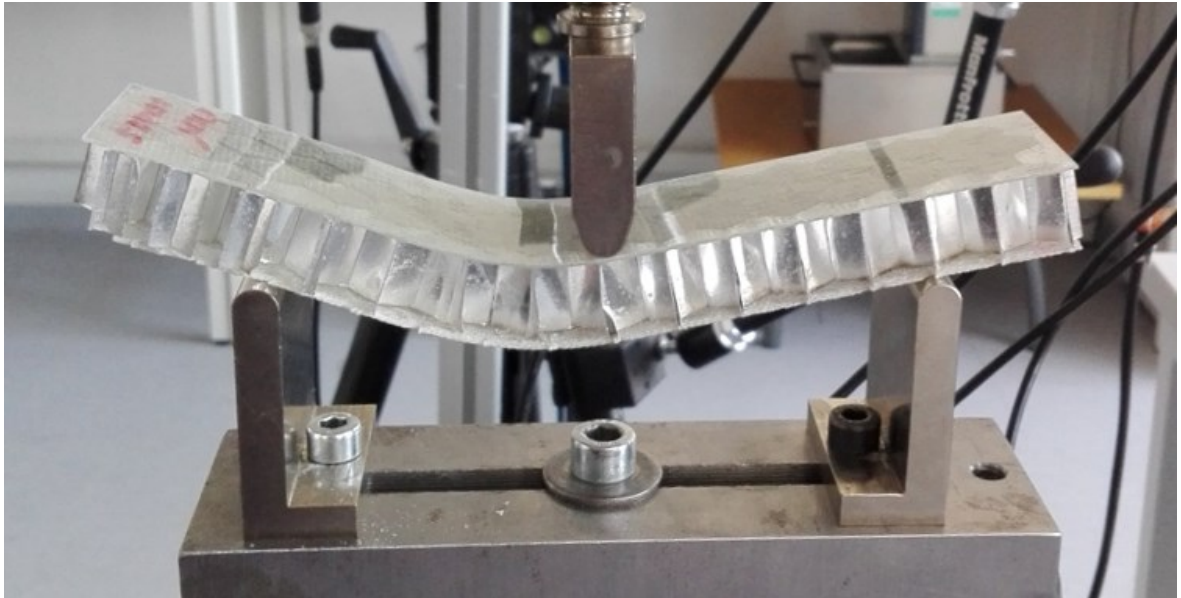
Obrázek 48: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND2 bez plniva.

U první testované série byla porušena adheze mezi potahem a jádrem ze čtyř měření pouze dvoje data (Zkouška 1, Zkouška 2) vypadají, že mají výpovědní hodnotu. Tato dvě zkušební tělesa se ohýbala až do porušení jádra což se v grafu projevuje jako maximální hodnota ohybové síly. Zkušební tělesa 3 a 4 již měla částečně odlepené horní potahy od voštiny a konstrukce se při namáhání chovala jako pouze přiložené neslepené samostatné materiály, které po sobě klouzali, čemuž odpovídá i grafické znázornění (Zkouška 3, Zkouška 4) na obrázku 48. Hodnoty z těchto dvou měření jsou v tabulce 13 označeny červeně a nebyly započteny do průměrných hodnot. Jedno z měření je pak vyobrazeno na obrázku 49.

Tabulka 13: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND2

SEND2		maximální síla $F_{\max}$ (N)	pevnost jádra ve smyku $\tau_s$ (MPa)	napětí v potahu $\sigma$ (MPa)	modul pružnosti v ohybu $E_f$ (MPa)
zkouška	1	185,0	0,108	8,1	341,2
	2	124,2	0,073	5,4	290,2
	3	75,1	0,044	3,3	15,3
	4	63,1	0,037	2,8	9,2
průměr		154,6	0,091	6,8	315,7
směr. odch.		43,1	0,025	1,9	36,1

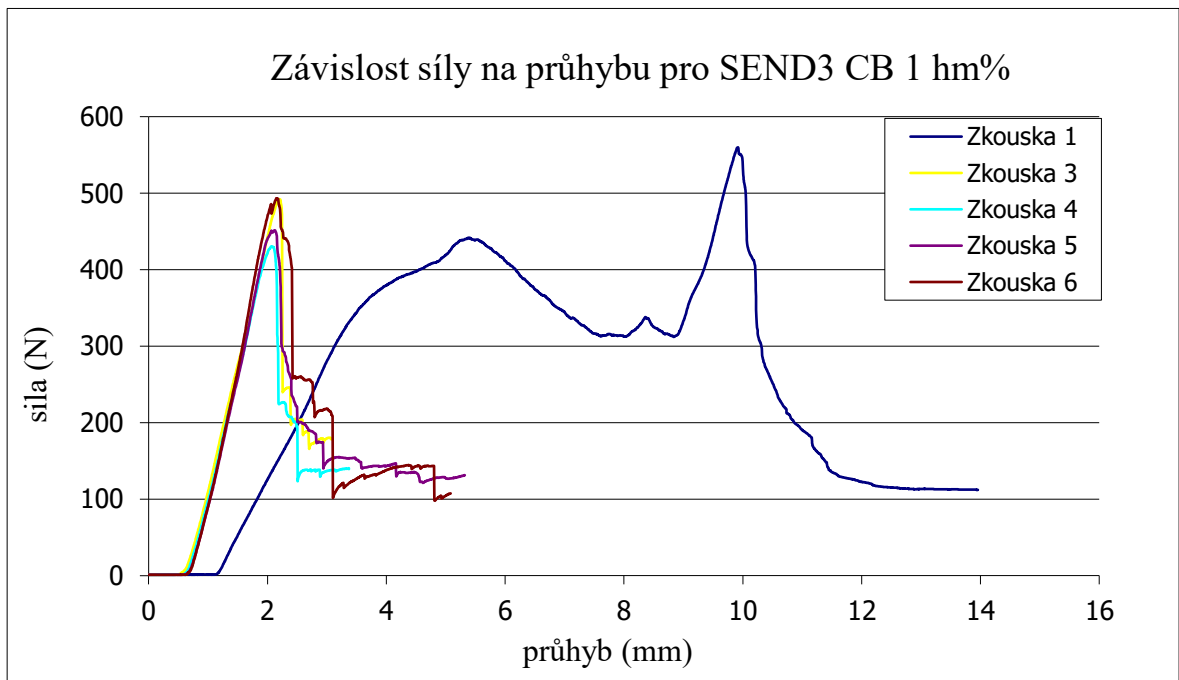




Obrázek 49: Zkušební těleso ze sendviče SEND2 zatěžované trojbodovým ohybem.

### 8.1.2 Ohyb SEND3 CB 1 hm%

Sendvič plněný jedním hmotnostním procentem uhlíkových sazí SEND3 CB 1 hm% dosahoval o poznání vyšších hodnot maximální ohybové síly před porušením sendviče. Toto může být způsobeno více faktory, kterým je věnována pozornost v diskusi.



Obrázek 50: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND3 CB 1 hm%.

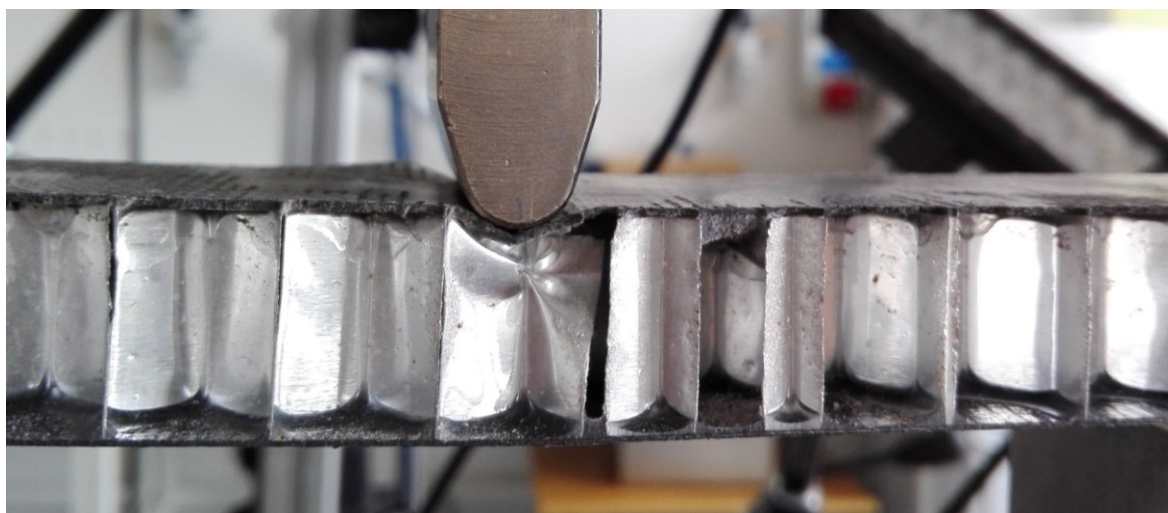
Oproti ostatním vykazuje rozdílný charakter křivka označena Zkouška 1 na grafu na obrázku 50. U tohoto zkušebního tělesa ze sendviče SEND3 s plněním 1 hm% sazí došlo k lokálnímu stlačení potahu. To mělo za následek vzpříčení stěn voštiny a poté nárůst

ohybového síly po mezi průhybem o velikosti 9 a 10 mm. Poté již došlo k selhání celé konstrukce. Maximální síla v tabulce 14 je však uvedena při prvotním porušení sendviče.

Tabulka 14: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND3 CB 1 hm%

SEND3 CB 1 hm%		maximální síla $F_{\max}$ (N)	pevnost jádra ve smyku $\tau_s$ (MPa)	napětí v potahu $\sigma$ (MPa)	modul pružnosti v ohybu $E_f$ (MPa)
zkouška	1	441,7	0,258	19,4	330,4
	2	492,2	0,288	21,6	789,3
	3	430,4	0,252	18,9	678,7
	4	493,4	0,289	21,6	802,9
	5	451,3	0,264	19,8	850,4
průměr		466,8	0,3	20,5	780,3
směr. odch.		31,2	0,0	1,4	72,6

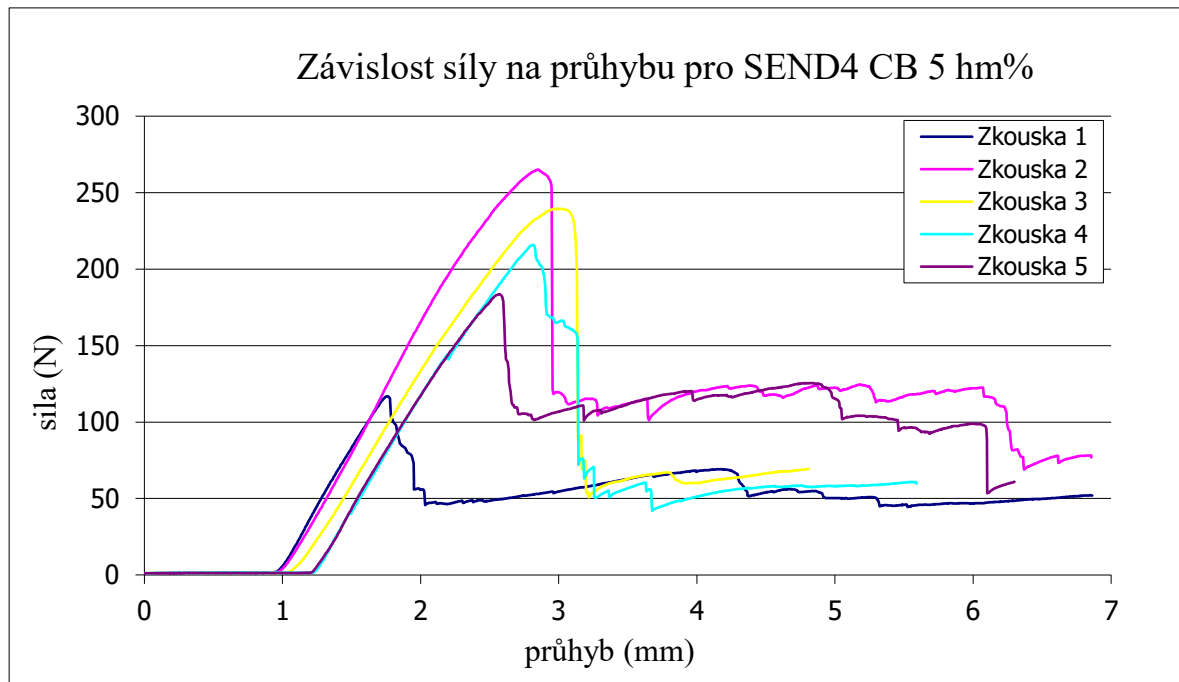
Popsané zkušební těleso se také značně liší získaným ohybovým modulem, a proto bylo toto měření vyřazeno z výpočtu průměrných hodnot.



Obrázek 51: Lokální stlačení potahu zkušebního tělesa ze SEND3 CB 1 hm%.

### 8.1.3 Ohyb SEND4 5 hm%

Další měřenou sérií byly vzorky sendviče plněného pěti hmotnostními procenty uhlíkových sazí SEND4 CB 5 hm%. I v tomto souboru měření ohybové síly se vyskytuje odlehlá hodnota, a to první měřený vzorek (Zkouška 1). Velikost maximální dosažené ohybové síly u tohoto vzorku je v porovnání s ostatními čtyřmi dosti nižší a proto byl tento řádek (tabulka 15) také vyřazen z výpočtu průměrných hodnot. Grafické znázornění průběhu síly je pro tyto zkušební tělesa zobrazen na obrázku 52.



Obrázek 52: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND4 CB 5 hm%.

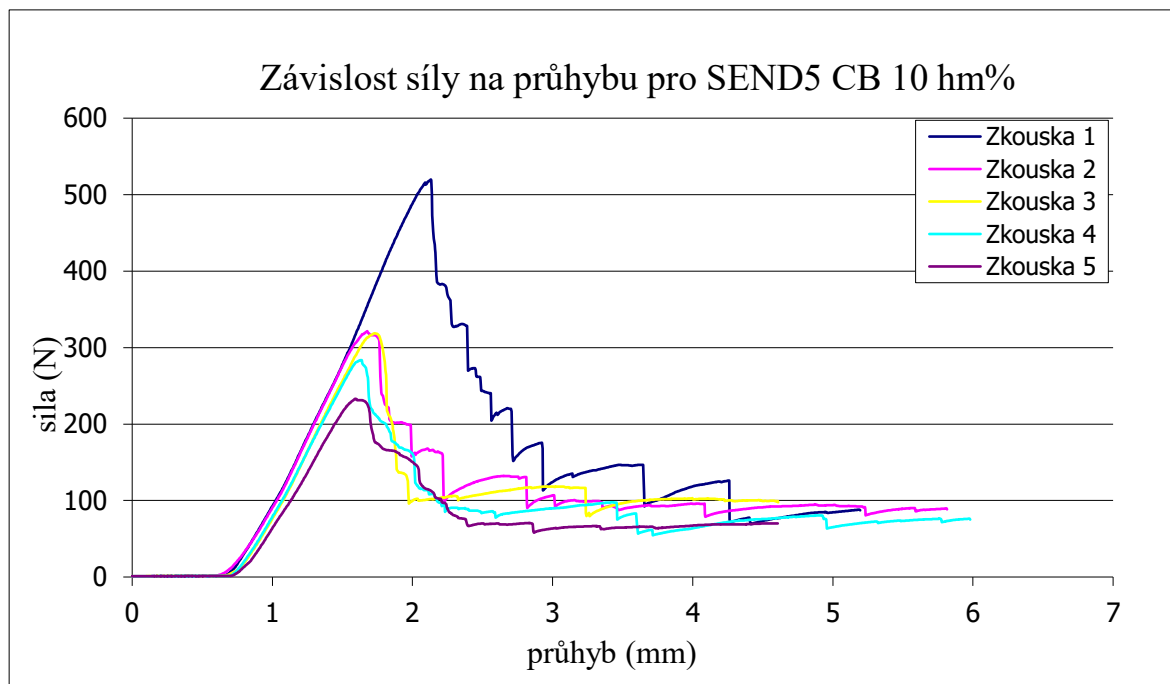
Průměrná maximální síla dosažená u zkušebních těles ze sendviče SEND3 CB 1 hm% byla  $466,8 \text{ N} \pm 31,2 \text{ N}$ , kdežto průměrná maximální síla u SEND4 CB 5 hm% byla  $226,0 \text{ N} \pm 34,7 \text{ N}$ . Jedná se o více než 50% pokles průměrné maximální síly.

Tabulka 15: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND4 CB 5 hm%

SEND4 CB 5 hm%	maximální síla $F_{\max}$ (N)	pevnost jádra ve smyku $\tau_s$ (MPa)	napětí v potahu $\sigma$ (MPa)	modul pružnosti v ohybu $E_f$ (MPa)	
zkouška	1	116,8	0,068	5,1	391,5
	2	265,1	0,155	11,6	384,0
	3	239,4	0,140	10,5	354,9
	4	216,0	0,126	9,5	361,7
	5	183,5	0,107	8,0	380,1
průměr	226,0	0,119	9,9	370,2	
směr. odch.	34,7	0,020	1,5	14,1	

#### 8.1.4 Ohyb SEND5 CB 10 hm%

Při měření zkušebních těles sendvičů s potahy s desetiprocentním hmotnostním zastoupením uhlíkových sazí se průběh označen Zkouška 1 opět jeví jako výrazně odlišná hodnota co se týče maximální ohybové síly. Hodnota dosaženého modulu pružnosti v ohybu  $887,9 \text{ MPa}$  je také vyšší než zbylé hodnoty těles ze stejné série. Průměr maximálních ohybových sil ( $289,2 \text{ N} \pm 41,2 \text{ N}$ ) je vyšší než při 5% koncentraci, ale je nižší než při koncentraci 1 %.



Obrázek 53: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND5 CB 10 hm%.

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zapsány v tabulce 16, kde jsou červeným písmem vyznačeny hodnoty z grafu (obrázek 53) označeny jako Zkouška 1, které byly z průměrných hodnot vyřazeny.

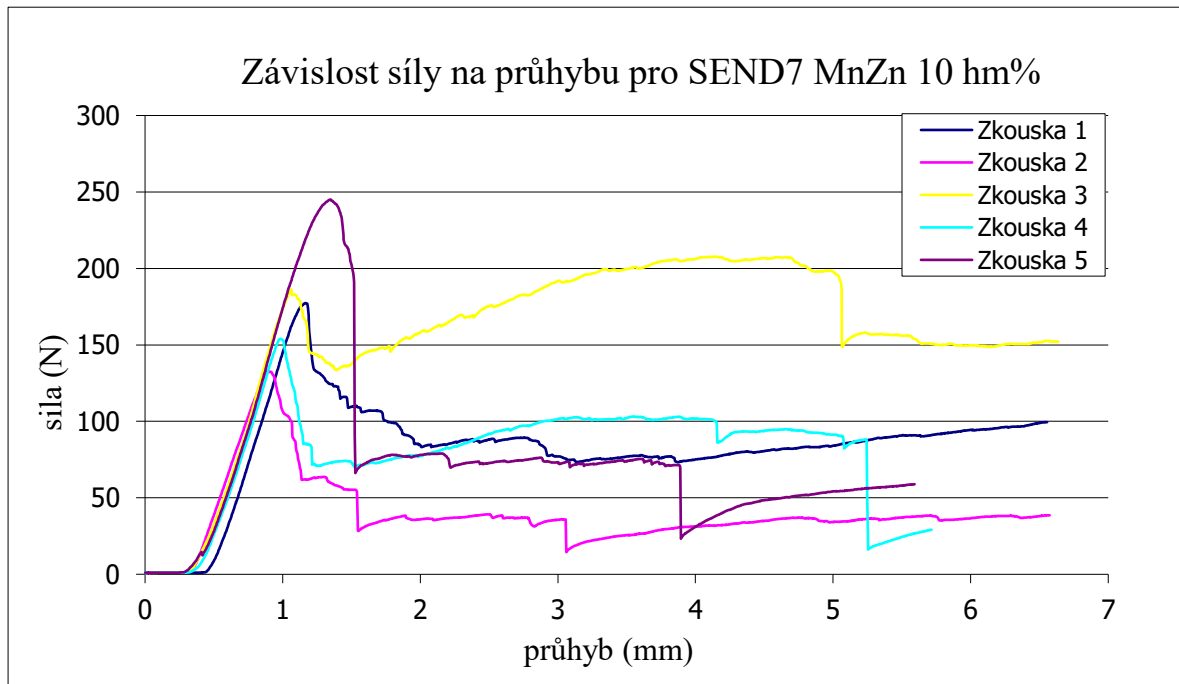
Tabulka 16: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND5 CB 10 hm%

SEND5 CB 10 hm%		maximální síla $F_{\max}$ (N)	pevnost jádra ve smyku $\tau_s$ (MPa)	napětí v potahu $\sigma$ (MPa)	modul pružnosti v ohybu $E_f$ (MPa)
zkouška	1	519,8	0,304	22,8	887,9
	2	321,5	0,188	14,1	721,8
	3	318,6	0,186	14,0	729,8
	4	283,6	0,166	12,4	734,0
	5	233,1	0,136	10,2	687,2
průměr		289,2	0,169	12,7	718,2
směr. odch.		35,7	0,021	1,6	18,5

### 8.1.5 Ohyb SEND7 MnZn 10 hm%

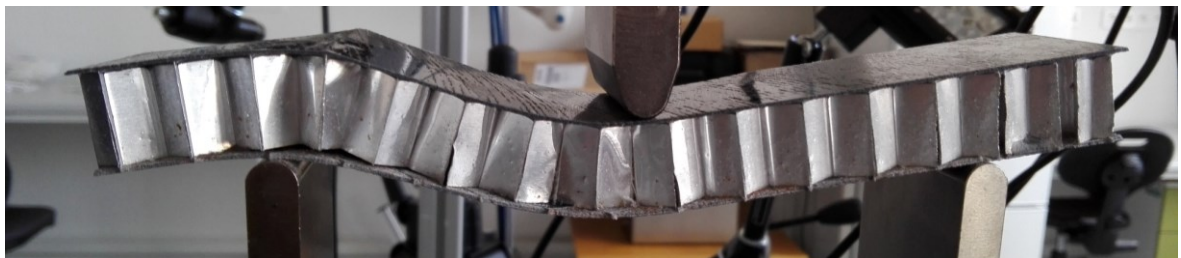
V grafu závislosti síly na průhybu při ohýbání SEND7 jsou hned dvě křivky, které zasluhují větší pozornost. První je křivka Zkouška 3 (žlutá), kde se po dosažení maximální ohybové síly konstrukce poruší, hodnota síly se propadá, ale následuje opětovný nárůst až do průhybu zhruba 5 mm, kdy dochází k druhotnému poškození. Nárůst síly je způsoben zborštěním vnitřní stavby buněk voštiny. Tyto buňky se nejspíše vzájemně zapřely a tím došlo ke zpevnění porušení konstrukce. Podobně jako v předchozích případech ale konstrukce byla

označena jako porušená již při prvotním poškození, a i v příslušné tabulce 17 je uvedena hodnota síly při prvotním selhání nosníku. Toto konkrétní zkušební těleso je při zatížení zobrazeno na obrázku 54. Druhou nestandardní křivkou je křivka označena Zkouška 5. Při této zkoušce bylo dosaženo řádově vyšší síly než při ostatních čtyřech měřeních. Tento řádek je sice zapsán v tabulce 17, ale tyto hodnoty nebyly zahrnuty do vypočtených průměrných hodnot.



Obrázek 54: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND7 MnZn 10 hm%.

Porušený zkušební vzorek sendviče je vyfotografován na obrázku 56. K porušení jádra došlo u levé podpěry. U předešlých sérií (bez plnění, nebo plnění sazemi) docházelo k porušení jádra uprostřed, pod tlačným trnem. Při použití manganozinečnatých feritů jako plniva ale docházelo spíše k obdobnému praskání u krajních podpěr jako u tohoto testu.



Obrázek 55: Porušení zkušební tělesa (Zkouška 3) ze SEND7 MnZn 10 hm%.

Průměrná hodnota maximálních ohybových sil při 10 hm% manganozinečnatých feritů obsažených v epoxidové matici sklolaminátového potahu sendviče SEND7 je sice vyšší než tato hodnota pro sendvič SEND2 bez plnění ( $162,7 \text{ N} \pm 24,0 \text{ N}$  oproti  $154,6 \text{ N} \pm 43,0 \text{ N}$ ) ale

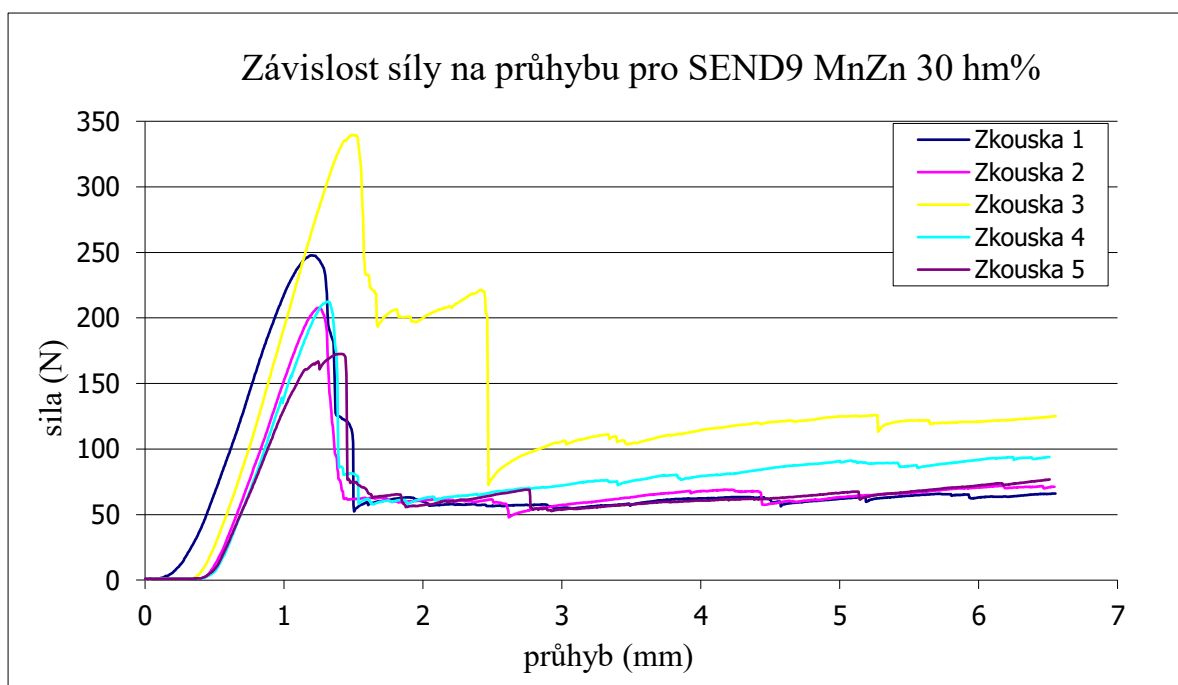
nejedná se o zásadně velký rozdíl. Vzhledem k velikosti směrodatných odchylek těchto průměrů a vzhledem k malému množství měření lze tyto hodnoty označit za velmi podobné.

Tabulka 17: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND7 MnZn 10 hm%

SEND7 MnZn 10 hm%		maximální síla $F_{\max}$ (N)	pevnost jádra ve smyku $\tau_s$ (MPa)	napětí v potahu $\sigma$ (MPa)	modul pružnosti v ohybu $E_f$ (MPa)
zkouška	1	177,3	0,104	7,8	662,1
	2	133,1	0,078	5,8	581,6
	3	186,3	0,109	8,2	591,9
	4	154,0	0,090	6,8	558,3
	5	244,9	0,143	10,7	653,7
průměr		162,7	0,095	7,1	598,5
směr. odch.		24,0	0,014	1,1	44,7

### 8.1.6 Ohyb SEND9 MnZn 30 hm%

Z pěti měření se i u této série vyskytlo jedno, které dosahuje vyšších hodnot. Jedná o zkušební těleso, jehož průběh je označen jako Zkouška 3. Stejně jako u zkušební tělesa ze sendviče SEND7 došlo ke zlomení jádra sendviče v blízkosti krajní podpěry přípravku pro zkoušku ohybem.



Obrázek 56: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND9 MnZn 30 hm%.

Při zvýšení koncentrace plniva (MnZn ferity) na 30 hm% je pozorovatelný i nárůst průměrné maximální ohybové síly, kterou zkušební tělesa vydržely. Průměrná dosažená hodnota



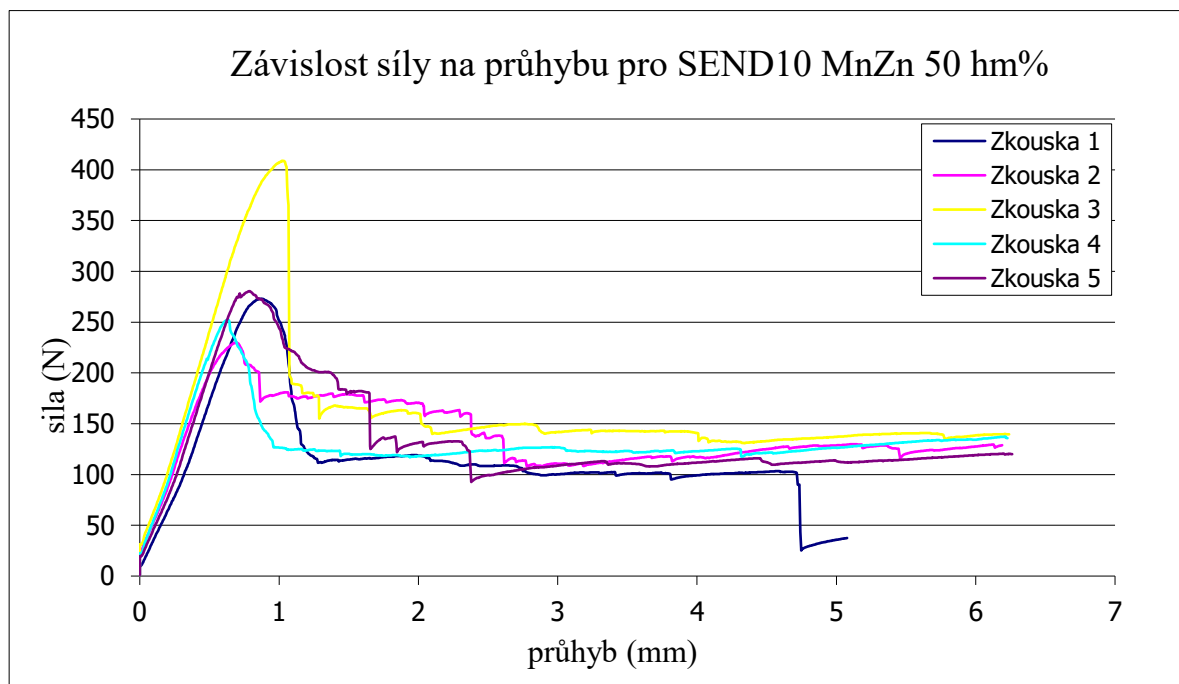
maximální ohybové síly je  $(210,1 \pm 30,8)$  N při průměrném ohybovém modulu pružnosti  $(638,0 \pm 53,3)$  MPa.

Tabulka 18: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND9 MnZn 30 hm%

SEND9 MnZn 30 hm%		maximální síla $F_{\max}$ (N)	pevnost jádra ve smyku $\tau_s$ (MPa)	napětí v potahu $\sigma$ (MPa)	modul pružnosti v ohybu $E_f$ (MPa)
zkouška	1	247,8	0,145	10,9	681,7
	2	207,7	0,121	9,1	678,5
	3	339,7	0,199	14,9	757,8
	4	212,5	0,124	9,3	622,6
	5	172,6	0,101	7,6	569,3
průměr		210,1	0,1	9,2	638,0
směr. odch.		30,8	0,0	1,3	53,3

### 8.1.7 Ohyb SEND10 MnZn 50 hm%

Při koncentraci 50 hm% MnZn feritů jedno ze zkušebních těles také dosáhlo velmi vysoké hodnoty maximální ohybové síly.



Obrázek 57: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND10 MnZn 50 hm%.

Křivka Zkouška 3 (žlutá křivka v grafu na obrázku 57) dosahuje hodnoty 408,8 N, kdežto průměr zbývajících čtyř měření je  $258,8 \text{ N} \pm 22,8 \text{ N}$ . Oproti předešlé nižší koncentraci se jedná opět o nárůst této průměrné hodnoty. Stejně tak roste i průměrný modul pružnosti v ohybu na hodnotu  $749,9 \text{ MPa} \pm 66,1 \text{ MPa}$ . Naměřené a doložené hodnoty pro tuto sérii

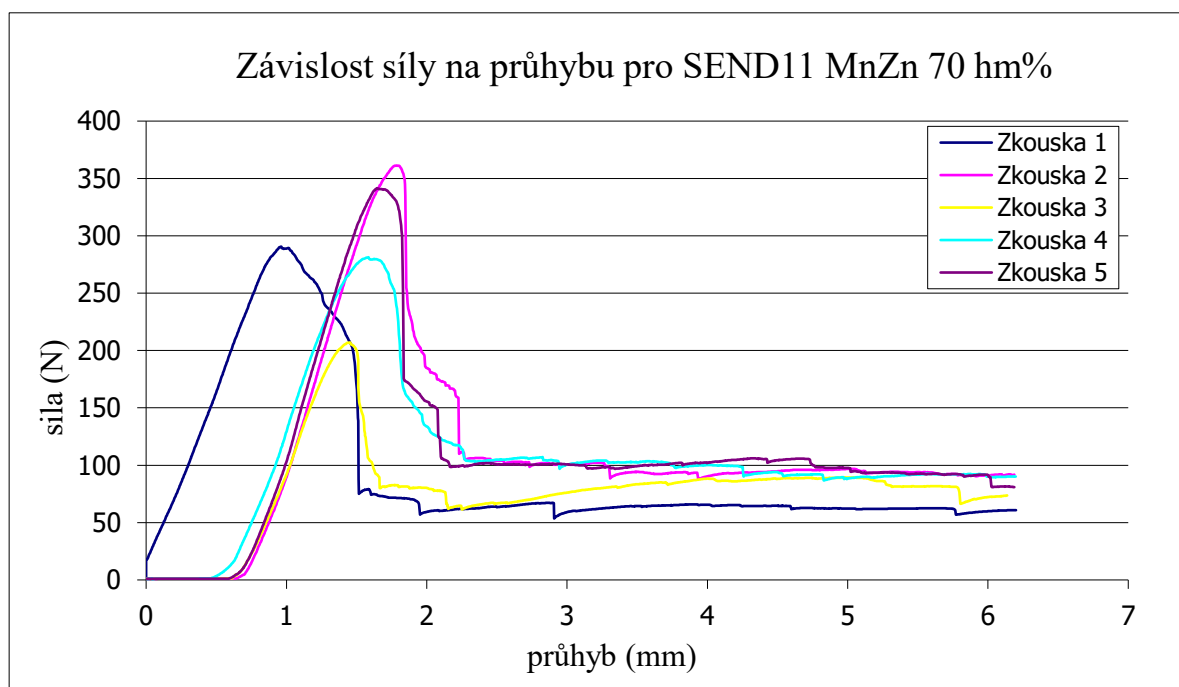
zkušebních těles jsou uvedeny v tabulce 19. Červeně zvýrazněné jsou hodnoty, které byly z výběru selektovány jako odlehlé.

Tabulka 19: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND10 MnZn 50 hm%

SEND10 MnZn 50 hm%		maximální síla $F_{\max}$ (N)	pevnost jádra ve smyku $\tau_s$ (MPa)	napětí v potahu $\sigma$ (MPa)	modul pružnosti v ohybu $E_f$ (MPa)
zkouška	1	273,1	0,160	12,0	675,4
	2	229,7	0,134	10,1	764,6
	3	408,8	0,239	17,9	1084,7
	4	252,1	0,147	11,1	832,6
	5	280,5	0,164	12,3	727,2
průměr		258,8	0,151	11,4	749,9
směr. odch.		22,8	0,013	1,0	66,1

### 8.1.8 Ohyb SEND11 MnZn 70 hm%

Při hmotnostním zastoupení 70 % manganozinečnatých feritů v epoxidové pryskyřici byly potahy sendviče vyrobeny pouze ze dvou vrstev sycené skelné tkaniny. I přes to jsou ale dosažené hodnoty maximální ohybové síly v porovnání s ostatními koncentraci tohoto plniva největší. Z naměřených hodnot bylo opět vybráno jedno měření, které se dosaženými hodnotami výrazněji odlišuje od měření ostatních. I v tomto případě to bylo zkušební těleso číslo 3 jehož průběh zkoušky trojbodovým ohybem je v grafu na obrázku 58 zaznačen žlutě.



Obrázek 58: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND11 MnZn 70 hm%.



Na rozdíl od předešlých dvou případů (SEND9, SEND10) ale tento zkušební vzorek vykazoval podstatně nižší dosaženou hodnotu ohybové síly. Průměrná hodnota modulu pružnosti v ohybu je (bez zařazení červěně označené hodnoty)  $(623,0 \pm 72,5)$  MPa, což je oproti předešlé koncentraci MnZn feritů 50 hm% pokles.

Tabulka 20: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND11 MnZn 70 hm%

SEND11 MnZn 70 hm%		maximální síla $F_{\max}$ (N)	pevnost jádra ve smyku $\tau_s$ (MPa)	napětí v potahu $\sigma$ (MPa)	modul pružnosti v ohybu $E_f$ (MPa)
zkouška	1	290,5	0,170	12,7	561,1
	2	361,3	0,211	15,8	697,2
	3	207,0	0,121	9,1	578,4
	4	281,4	0,165	12,3	560,4
	5	341,5	0,200	15,0	673,3
průměr		318,7	0,186	14,0	623,0
směr. odch.		38,8	0,023	1,7	72,5

## 8.2 Porovnání výsledků z měření trojbodového ohybu

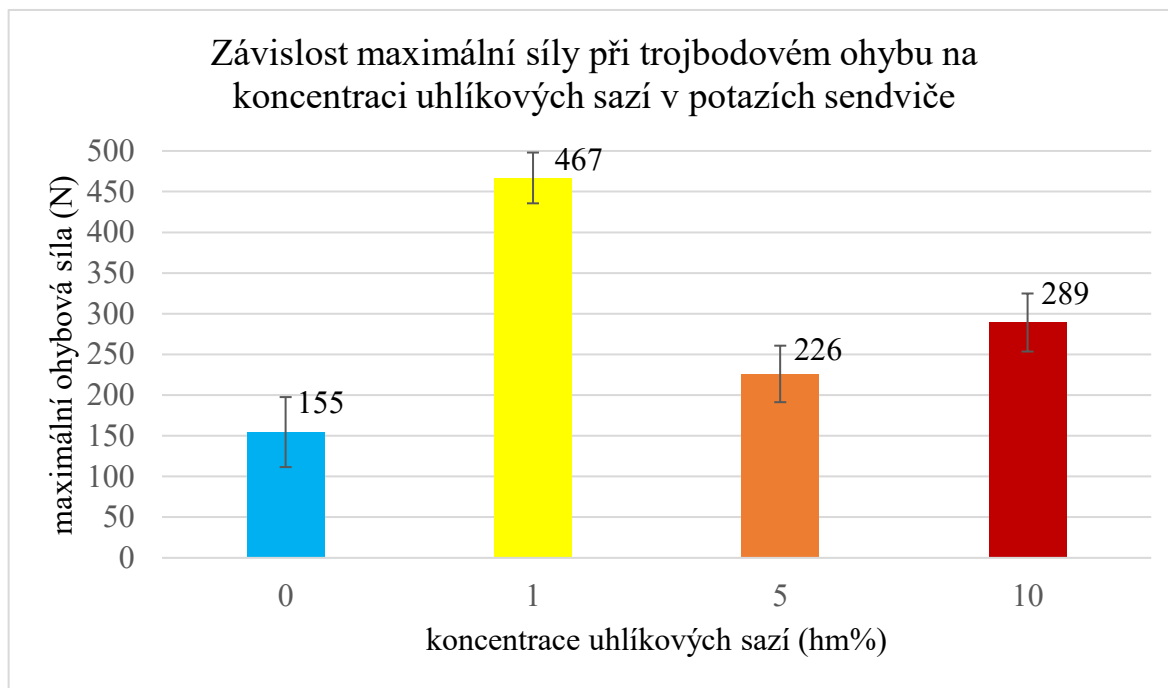
Hlavním účelem zkoušky tříbodového ohybu, bylo zjištění, zda má změna koncentrace plniva vliv na pevnostní charakteristiky. Tabulka 21 obsahuje souhrn průměrných hodnot maximální síly, pevnosti jádra ve smyku, napětí v potahu a modulu pružnosti v ohybu pro jednotlivé sendviče.

Tabulka 21: Souhrn průměrných hodnot zkoumaných veličin u ohybu sendvičových prvků

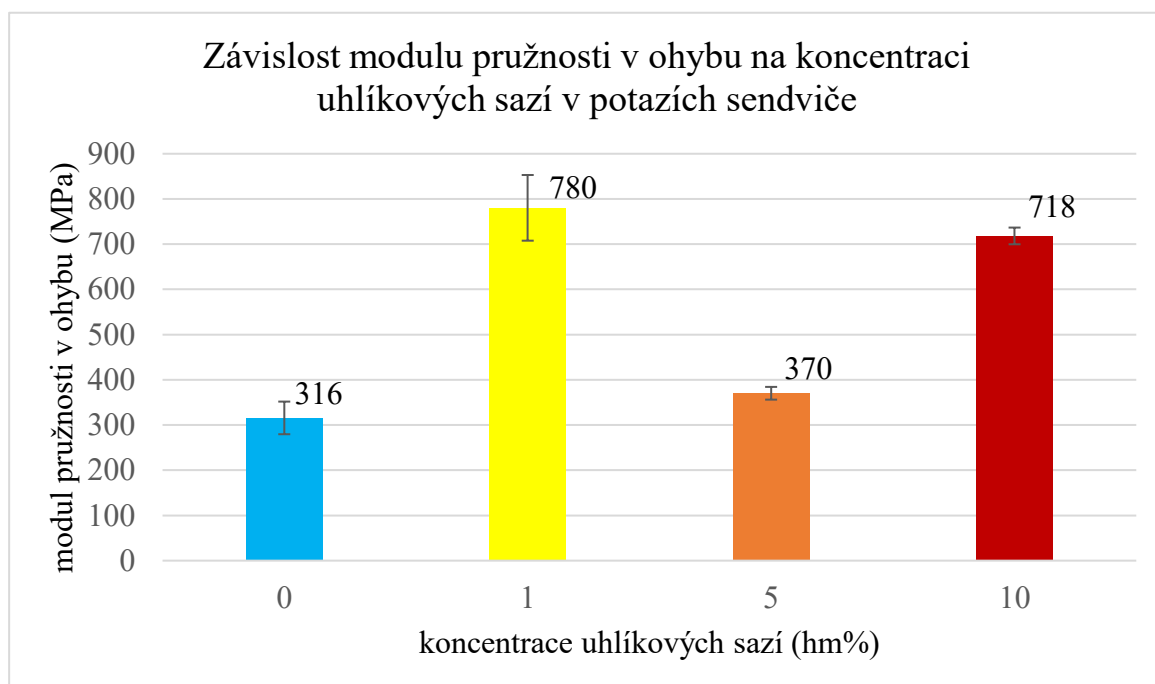
označení sendviče	druh plniva	konc. plniva (hm%)	maximální síla $F_{\max}$ (N)		pevnost jádra ve smyku $\tau_s$ (MPa)		napětí v potahu $\sigma$ (MPa)		modul pruž. v ohybu $E_f$ (MPa)	
			průměr	s.o.	průměr	s.o.	průměr	s.o.	průměr	s.o.
SEND2	-	0	155	43	0,090	0,025	6,8	1,9	316	36
SEND3	CB	1	467	31	0,273	0,018	20,5	1,4	780	73
SEND4	CB	5	226	35	0,132	0,020	9,9	1,5	370	14
SEND5	CB	10	289	36	0,169	0,021	12,7	1,6	718	18
SEND7	MnZn	10	163	24	0,095	0,014	7,1	1,1	598	45
SEND9	MnZn	30	210	31	0,123	0,018	9,2	1,3	638	53
SEND10	MnZn	50	259	23	0,151	0,013	11,4	1,0	750	66
SEND11	MnZn	70	319	39	0,186	0,023	14,0	1,7	623	73

Hodnoty plněných systému jsou dále graficky srovnávány s hodnotami sendviče bez plniva v laminátových potazích (SEND2). Barvy použité v grafech v této kapitole byly voleny shodně s barvami z kapitoly, která se věnuje měření elektromagnetických vlastností.

Sendvič s plněním 1 hm% uhlíkových sazí SEND3 dosahuje až trojnásobné průměrné maximální síly v ohybu (467 N) oproti neplněnému systému SEND2 (155 N). Sendvič s 5% hmotnostní koncentrací SEND4 dosahuje hodnoty ohybové síly 226 N a při koncentraci 10 hm% SEND5 je hodnota 289 N.



Obrázek 59: Graf závislosti maximální síly na koncentraci uhlíkových sazí v potazích sendviče při trojbodovém ohybu.

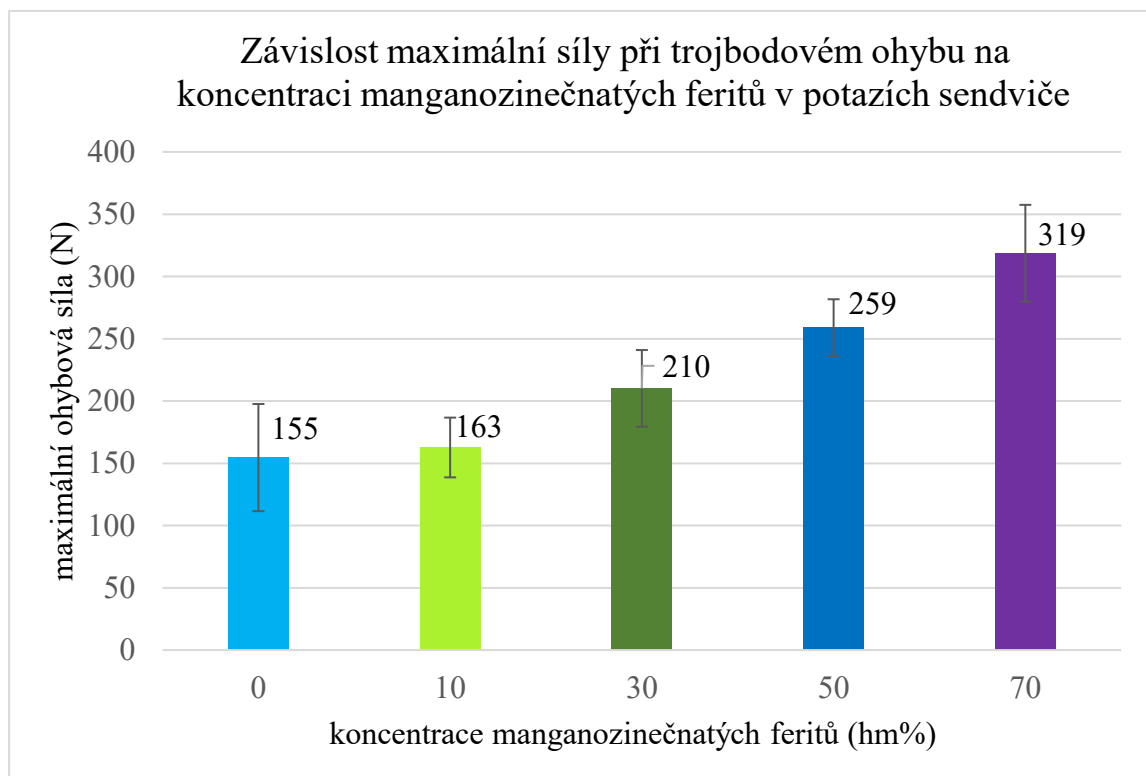


Obrázek 60: Graf závislosti modulu pružnosti v ohybu na koncentraci uhlíkových sazí v potazích sendviče při trojbodovém ohybu.

Dle zkušeností při výrobě sendvičových panelů je ale tato hodnota s největší pravděpodobností daná kvalitou výroby. U sendvičového panelu SEND3 došlo při spojování potahů a jádra k zatečení pryskyřice do buněk voštiny. Na základě teoretických poznatků je takové zatečení nevhodným jevem, neboť dochází k navýšení hmotnosti výrobku. Nicméně vzhledem k naměřeným výsledkům právě tento sendvič vykazoval nejlepší spojení mezi jádrem a voštinou a vydržel největší ohybovou zátěž ze všech vyrobených sendvičů.

Podobný je i průběh závislosti modulu pružnosti v ohybu na koncentraci uhlíkových sazí. Zde je ale významný nárůst mezi hodnotami modulu pružnosti v ohybu pro sendvič SEND4 s koncentrací 5 hm% (370 MPa) a pro sendvič SEND5 s koncentrací 10 hm% (718 MPa).

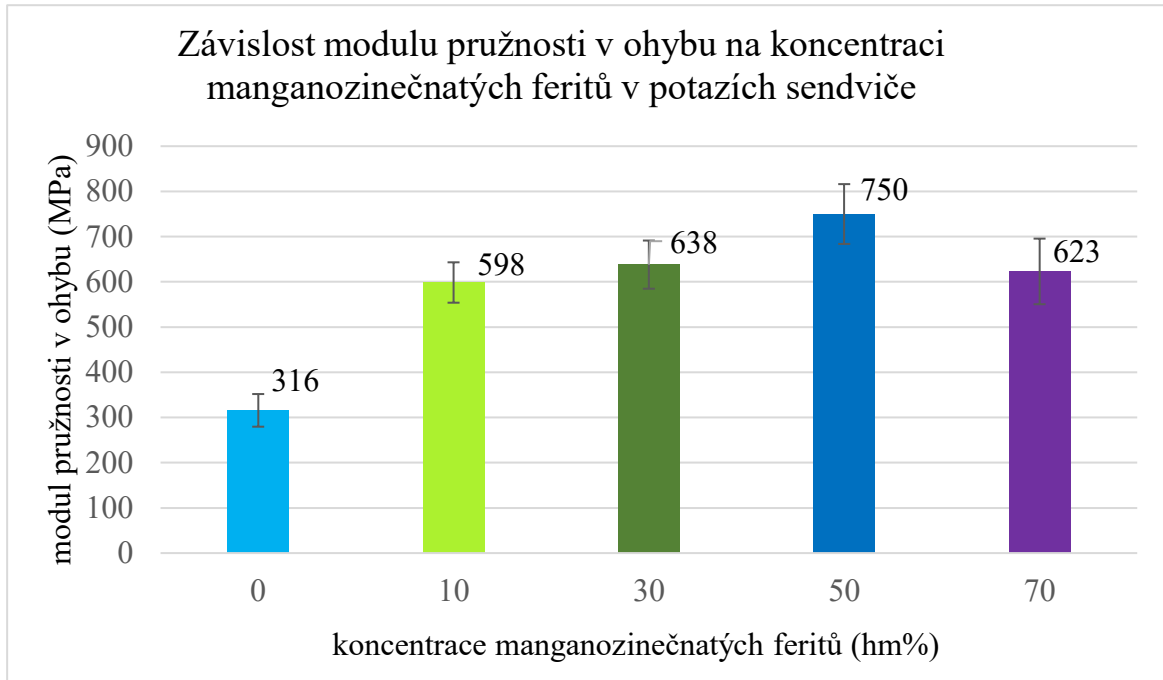
Průměrná maximální síla v ohybu dosažena při měření sérií zkušebních těles z panelů s potahy plněnými manganozinečnatými ferity je v závislosti na koncentraci tohoto plniva uvedena na obrázku 61. Z tohoto grafu je patrný postupný nárůst maximální síly s rostoucí koncentrací MnZn feritů.



Obrázek 59: Graf závislosti maximální síly na koncentraci manganozinečnatých feritů v potazích sendviče při trojbodovém ohybu.

V podobném trendu roste s koncentrací manganozinečnatého plniva také naměřený průměrný ohybový modul pružnosti (obrázek 63). Rozdíl je ale v poklesu hodnoty při nejvyšší koncentraci plniva, tedy 70 hm% manganozinečnatých feritů (SEND11). Modul pružnosti v ohybu značí míru odporu vůči deformacím, které je dané těleso schopno při

tomto druhu namáhání dosáhnout. Pokles modulu pružnosti u poslední koncentrace (což vede k nižší ohybové tuhosti) je dán tím, že potahy tohoto sendviče SEND11 jsou vyrobeny pouze ze dvouvrstvého laminátu.



Obrázek 60: Graf závislosti modulu pružnosti v ohybu na koncentraci uhlíkových sazí v potazích sendviče při trojbodovém ohybu.

## 9 DISKUZE VÝSLEDKŮ A NÁVRHY NA ZLEPŠENÍ

Vyrobené sendviče byly otestovány v elektromagnetickém poli v rozsahu frekvencí 2 až 20 GHz pomocí anténového dvouportového vektorového analyzátoru a dále zkouškou trojbodového ohybu. Dílčí výsledky jsou uvedeny v příslušných kapitolách.

Z hlediska elektromagnetické stínivosti bylo zjištěno, že koncentrace sazí 1 hm % nijak neovlivňuje chování sendvičového panelu v proměřeném frekvenčním pásmu. Průběhy křivek pro neplněný sendvič SEND2 a sendvič s 1 hm% CB v potazích SEND3 se ve všech vyhodnocovaných závislostech překrývají. U 5 hm% (SEND4) a 10 hm% (SEND5) již lze pozorovat změnu vlastností a posun rezonančních frekvencí oproti neplněnému (čistému) sendviči SEND2. Sendvič SEND5 má relativně ustálený průběh všech zobrazených závislostí a při frekvencích 6 až 12 GHz vykazuje velmi dobré stínící vlastnosti (dle obrázku 37). Zajímavějších výsledků by teoreticky mohla dosáhnout vyšší koncentrace sazí, například 15 hm%. Takové hmotnostní zastoupení ale znamená velmi vysokou viskozitu systému pryskyřice-tužidlo-plnivo, a proto se zde otvírá možnost využití jiné technologie než ruční laminace.

Pro sendviče s potahy plněnými manganozinečnatými ferity je závěr takový, že rostoucí koncentrace plniva zvyšuje ustálenost vlastností, zároveň ale dochází ke snížení hodnoty rozptylového parametru  $S_{11}$  (dB) při rezonanční frekvenci (která se vlivem plnění posouvá do nižších hodnot). Z naměřených výsledků také vyplývá, že s rostoucím plněním roste také absorpční složka stínění na úkor odrazivosti.

Ohybové vlastnosti vyrobených sendvičových struktur jsou velmi nízké. Naměřené hodnoty maximální síly jsou řádově ve stovkách Newtonů což odpovídá namáhání zátěží o hmotnosti v řádek desítek kilogramů. Naměřená síla však vzhledem k průběhu měření udává spíše sílu nutnou k porušení rozhraní mezi laminátovým potahem a voštinovým jádrem. Přes to je u sendvičů s potahy s plnivem MnZn znatelný trend nárůstu maximální ohybové síly při rostoucí koncentraci plniva, čímž se také potvrdila modelová závislost vytvořena v databázi Ansys Granta EduPack (kapitola 5.4). U uhlíkových sazí tato závislost nelze ani potvrdit ani vyvrátit vzhledem k vysokým hodnotám naměřeným pro SEND3 s 1 hm% sazí. U tohoto sendviče došlo při spojování potahu a jádra k výraznějšímu zatečení pryskyřice do buněk voštiny, oproti sendvičům ostatním. Z tohoto důvodu také sendvič vydržel největší zatížení ohybovou silou ( $467 \text{ N} \pm 31 \text{ N}$ ).

Jednotlivé lamináty ani sendviče nebyly vyráběny v pořadí dle rostoucí koncentrace. Tento postup byl volen z toho důvodu, aby bylo vyloučeno zlepšení mechanických vlastností na základě praktického zdokonalování se ve výrobní technologii. I přes to ale výsledky naznačují, že ke zvýšení mechanických vlastností s rostoucím plnivem dochází. Nutno však podotknout, že výchozí sendvič SEND2 bez plnění, který měl být směrodatný při pozorování vlivu plniva na ohybové vlastnosti byl poškozen při výrobě zkušebních těles vodním paprskem.

Prostor pro zlepšení vlastností sendvičů se tedy nabízí hlavně v použité technologii výroby. Spoj vzniklý lepením samostatných předvyrobených laminátů k jádru by byl určitě pevnější při použití pěny jako jádrového materiálu. Pro tento výzkum byla ale hliníková voština zajímavá hlavně proto, že i sendvič bez plniva vykazuje určité stínící vlastnosti, dané právě vlastnostmi hliníku a jeho orientací vůči směru šíření elektromagnetických vln (ty naráží na tenké hrany hliníkové plechu tvořícího buňky voštiny). Vhodnější metodou by bylo použití předimpregnovaných tkanin – prepregů. Tyto tkaniny jsou předem impregnovány matricí následně jsou udržovány v chladu, aby nedošlo k jejich síťování při pokojové teplotě. Výroba z nich pak probíhá nastříháním potřebného množství vrstev v daných rozměrech, tyto vrstvy se na sebe pokládají a následně se za zvýšené teploty a tlaku zpracovávají v lise nebo autoklávu. Prepregy by ale musely být impregnovány matricí s obsahem požadovaného množství plniva, které navíc musí být co nejlépe dispergováno a distribuováno v ploše i objemu tkaniny. Technologie výroby prepregů probíhá dvěma způsoby. Buďto odléváním pryskyřice na nosný materiál, který poté společně s tkaninou prochází mezi válci, kde dochází k impregnaci tkaniny. Druhá možnost je ponoření tkaniny do nízko-viskózního roztoku pryskyřice. Impregnované tkaniny jsou následně opatřeny z obou stran fólií, která zabraňuje jejich slepení, namotány na cívky a poté chlazeny až do jejich použití. Impregnace prepregů matricí s plnivem by mohla být technologicky náročná.

Ke zlepšení soudržnosti by určitě prospělo využití voštiny s menšími buňkami. Při této experimentální výrobě byla použita voština s relativně velkými buňkami o straně hexagonu 8 mm. Kontaktních ploch (hran) pro vytvoření adhezního spojení mezi jádrem a potahy tedy bylo méně, než kdyby byla použita voština s menšími buňkami.

## ZÁVĚR

Diplomová práce v kapitolách teoretické části pojednává o kompozitních materiálech jako takových, o materiálech jejich výztuží a matric a o jejich využití v běžných aplikacích. Dále jsou zahrnuty informace o sendvičových prvcích. Tedy o materiálech tvořených jádrem a svrchními potahy, kdy jsou využity právě kompozitní lamináty. Do matric kompozitních materiálů lze také přidat plniva ke změně elektromagnetických vlastností a elektrické vodivosti. Tohoto se využívá pro výrobu kompozitních materiálů, které dokážou stínit elektromagnetické záření. Těmto plnivům a jejich využití se teoretická část také věnuje. Poslední kapitola teoretických poznatků ukazuje problematiku chování sendvičových struktur při ohybovém zatížení. Zvláště pak rozdíl v napětích přenášených jádrem sendviče (smyková napětí) a potahy sendviče (normálová napětí – tah a tlak).

V praktické části byly vyrobeny lamináty ze čtyř vrstev jednosměrně orientované skelné tkaniny, která byla v jednotlivých vrstvách kladena tak, aby nová vrstva byla položena kolmo na vrstvu předchozí. Jako matrice byla využita epoxidová matrice a k ní určené tužidlo. Do matrice byla pro jednotlivé lamináty přimíchávána i plniva v různých koncentracích. Vyrobeny byly dvojice laminátů bez plnění, plněné uhlíkovými sazemi (CB) v koncentraci 1, 5 a 10 hm%, a plněné manganozinečnatými ferity (MnZn) v koncentraci 10, 30, 50 a 70 hm%. Z těchto dvojic laminátů a z hliníkové voštiny byly následně vyrobeny sendviče pomocí lepení stejnou pryskyřicí jako byla ta výrobní. Kvůli vysoké viskozitě síťovacího systému při použití 70 hm% MnZn feritů byly potahy tohoto sendviče (SEND11) vyrobeny pouze ze dvou vrstev.

Na vyrobených panelech o rozměrech 300 x 300 mm byla změřena účinnost stínění vůči elektromagnetickému záření na základě rozptylových parametrů. V těchto vlastnostech vykazuje vhodné vlastnosti sendvič plněný největší koncentrací sazí (SEND5 CB 10 hm %) a sendviče s vyššími koncentracemi manganozinečnatých feritů (SEND10 MnZn 50 hm%, SEND11 MnZn 70 hm%). U těchto sendvičů bylo dosaženo celkové účinnosti stínění okolo  $SE \approx 30$  dB, což již je hodnota vhodná pro běžné aplikace v potřebách stínění elektrotechnických přístrojů.

Poté byly sendviče řezány pomocí vodního paprsku, kdy z každého panelu bylo vyrobeno pět zkušebních těles. Ta byla proměřena zkouškou trojbodového ohybu. Největší vliv na ohybovou pevnost měla kvalita výroby sendviče. U plnění MnZn ferity také rostla maximální ohybová síla se zvyšující se koncentrací tohoto plniva.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [3] ASHBY, Michael F. *Materials selection in mechanical design*. Fifth edition. Amsterdam: Elsevier, 2017. ISBN 978-0081005996.
- [4] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-704-3273-X.
- [5] MALLICK, P.K. *Composites engineering handbook*. New York: Marcel Dekker, 1997. ISBN 08-247-9304-8.
- [6] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [7] KAUFMANN, Marcus, Per WENNHAGE a Dan ZENKERT. *Integrated Cost/Weight Optimization of Aircraft Structures* [online]. Stockholm, Sweden: Licentiate Thesis, 2008 [cit. 2021-03-23]. ISBN 978-91-7178-888-7. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/225672129\\_Integrated\\_costweight\\_optimization\\_of\\_aircraft\\_structures](https://www.researchgate.net/publication/225672129_Integrated_costweight_optimization_of_aircraft_structures)
- [8] BAMBACH, Mike R. Direct Comparison of the Structural Compression Characteristics of Natural and Synthetic Fiber-Epoxy Composites: Flax, Jute, Hemp, Glass and Carbon Fibers. *Fibers* [online]. 2020, 8(10), 62 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: doi:10.3390/fib8100062
- [9] Dual Laminate FRP GRP Storage Tank Vessel Container. *Made-in-China: Connecting Buyers with Chinese Suppliers* [online]. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://chngrp.en.made-in-china.com/product/LyCnzwOKyRVo/China-Dual-Laminate-FRP-GRP-Storage-Tank-Vessel-Container.html>
- [10] KOMPOZITNÍ PROFILY PREFEN: Profily PREFEN jsou termosetové prvky složené ze dvou převládajících fyzikálních látek o složení „pojivo/výztuha“ = „pryskyřice/vlákna“ vyrobené technologií pultruze (tažení). *PREFA KOMPOZITY* [online]. [cit. 2021-03-24].

Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/produkty/zakladni-vyrobky/kompozitni-profil-y-prefen/>

[11] New Materials Could Lead to Recyclable Wind Blades. *NREL: Transforming ENERGY* [online]. 19. 3. 2019 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/news/program/2019/new-materials-could-lead-to-recyclable-wind-blades.html>

[12] 6. Kompozitní materiály. *Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní, ČVUT* [online]. 2014 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)

[13] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1

[14] CAMPBELL, Flake C. *Structural Composite Materials*. Novelty, Ohio, USA: ASM International, 2010. ISBN 978-161-5031-405

[15] WANBERG, J. *Composite Materials Fabrication Handbook 2*. Stillwater: Wolfgang Publications Inc., 2010. ISBN 978-1-929133-93-2

[16] KAMAN, Mete Onur, Murat Yavuz SOLMAZ a Kadir TURAN. Experimental and Numerical Analysis of Critical Buckling Load of Honeycomb Sandwich Panels. *Journal of Composite Materials* [online]. 2010, 44(24), 2819-2831 [cit. 2021-03-26]. ISSN 0021-9983. Dostupné z: doi:10.1177/0021998310371541

[17] LEHMHUS D., BUSSE M., HERRMANN A., KAYVANTASH K. *Structural Materials and Processes in Transportation*, 1. New York: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2013, ISBN: 978-3527327874

[18] ALTAN, Mihrigul, 2018. *Thermoplastic Foams: Processing, Manufacturing, and Characterization*. In: [online]. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.71083

[19] DERRADJI, Mehdi, Jun WANG a Wenbin LIU. 5 - Fiber-Reinforced Phthalonitrile Composites. 2018. *Phthalonitrile Resins and Composites: Properties and Applications* [online]. 2018. William Andrew Publishing, 2018, 2018, s. 241-294 [cit. 2021-04-02]. ISBN 9780128129661. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812966-1.00005-6>

- [20] BITZER, T. N. *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*. 1st ed. London: Chapman & Hall, 1997, 233 s. ISBN 978-94-011-5856-5
- [21] CEL COMPONENTS S.R.L.: *Honeycomb and Composite Panels, Sandwich Panels with Aluminum, Thermoplastic honeycombs and Foam cores* [online]. VIA CA' DELL'ORBO SUD 4, 40055 CASTENASO (BO) ITALY: MediaticaWeb, 2021 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.honeycombpanels.eu/en/home>
- [22] UMER, R., E. M. WAGGY, M. HAQ a A. C. LOOS. Experimental and numerical characterizations of flexural behavior of VARTM-infused composite sandwich structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. 2012, **31**(2) [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: doi:10.1177/0731684411431357
- [23] ABDI, B. a S. AZWAN. Flatwise compression and flexural behavior of foam core and polymerpin-reinforced foam core composite sandwich panels. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. Elsevier, 2014, 138-144 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.08.004>
- [24] GROVE, S.M. An investigation of the skin/core bond in honeycomb sandwich structures using statistical experimentation techniques. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2016, **37**(5), 804-812 [cit. 2021-04-03]. ISSN 1359-835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2005.07.005
- [25] BESPATYKH, Yu. I. a N. E. KAZANTSEVA. Electromagnetic properties of hybrid polymer composites. *Journal of Communications Technology and Electronics* [online]. 2008, **53**(2), 143-154 [cit. 2021-04-08]. ISSN 1064-2269. Dostupné z: doi:10.1134/S1064226908020034
- [26] CHUNG, D.D.L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials: Review. *CARBON* [online]. State University of New York, Buffalo, USA: Pergamon, 2001, **39**, 279 - 285 [cit. 2021-04-08].
- [27] PHAN, C.H., M. MARIATTI a Y.H. KOH. Electromagnetic interference shielding performance of epoxy composites filled with multiwalled carbon nanotubes/manganese zinc ferrite hybrid fillers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2015, (401), 472-478 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmmm.2015.10.067

- [28] GEETHA, S., K. K. SATHEESH KUMAR, Chepuri R. K. RAO, M. VIJAYAN a D. C. TRIVEDI. EMI shielding: Methods and materials-A review. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2009, **112**(4), 2073-2086 [cit. 2021-04-08]. ISSN 00218995. Dostupné z: doi:10.1002/app.29812
- [29] MOURITZ, A.P. Advances in understanding the response of fibre-based polymer composites to shock waves and explosive blasts. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2019, 125 [cit. 2021-04-08]. ISSN 1359835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2019.105502
- [30] LUO, Hui, Fu CHEN, Fang WANG, Xian WANG, Weiyong DAI, Sheng HU a Rongzhou GONG. Preparation and microwave absorption properties of honeycomb core structures coated with composite absorber. *AIP Advances* [online]. 2018, **8**(5) [cit. 2021-04-08]. ISSN 2158-3226. Dostupné z: doi:10.1063/1.5005163
- [31] C393/C393M. *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. 11. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States: ASTM International, 2011.
- [32] NANOTUBES AND CARBON FIBERS. *The World of Nanoscience: A GLIMPSE INTO THE WORLD OF NANOSCIENCE* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://worldofnanoscience.weebly.com/nanotube--carbon-fiber-overview.html>
- [33] BAUHOFER, Wolfgang a Josef Z. KOVACS. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites. *Composites Science and Technology* [online]. 2009, (69), 1486–1498 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2008.06.018
- [34] JING, X. a W. ZHAO. The effect of particle size on electric conducting percolation threshold in polymer/conducting particle composites. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS* [online]. 2000, (19), 377 – 379 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: doi:10.1023/A:1006774318019
- [35] UKSHE, Alexander, Alexander GLUKHOV a Yury DOBROVOLSKY. Percolation model for conductivity of composites with segregation of small conductive particles on the grain boundaries. *Journal of Materials Science* [online]. 2020, 55(15), 6581-6587 [cit. 2021-04-08]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-020-04408-w

[36] SMC sandwich panels: Lean process opens doors: Patented process enables compression molding at lower pressures, saving capital equipment costs for panel fabrication. *Composites World: Delivering the Global Composites Market* [online]. 2.1.2012 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/smc-sandwich-panels-lean-process-opens-doors>

[37] SANKARAN, Sowmya, Kalim DESHMUKH, M. Basheer AHAMED a S.K. KHADHEER PASHA. Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2018, roč. 114, s. 49–71. ISSN 1359-835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2018.08.006

[38] KAZANTSEV, Yu.N., A.V. LOPATIN, N.E. KAZANTSEVA, A.D. SHATROV, V.P. MAL'TSEV, J. VILČÁKOVÁ a P. SAHA. Broadening of Operating Frequency Band of Magnetic-Type Radio Absorbers by FSS Incorporation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 2010, roč. 58, č. 4, s. 1227–1235. ISSN 0018-926X. Dostupné z: doi:10.1109/tap.2010.2041316

[39] *Ferrites and accessories: General – Definitions* [online]. In: . EPCOS AG, TDK Group, 2017, s. 27 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/531568/419f8df165fa780842566ab55510a8ce/pdf-generaldefinitions.pdf>

[40] Lightweight Epoxy-Based Composites for EMI Shielding Applications. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2020, 49(3), 1702-1720 [cit. 2021-04-09]. ISSN 0361-5235. Dostupné z: doi:10.1007/s11664-019-07687-5

[41] FOJTL, Ladislav. *Vliv materiálového složení a tvaru na vybrané fyzikální vlastnosti sendvičových konstrukcí*. Zlín, 2016. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická

[42] WEI, XingYu, Jian XIONG, Jie WANG a Wu XU. New advances in fiber-reinforced composite honeycomb materials. *Science China Technological Sciences* [online]. 2020, 63(8), 1348-1370 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1674-7321. Dostupné z: doi:10.1007/s11431-020-1650-9

[43] SUTHERLAND, L.S., F. ALIZADEH a C. GUEDES SOARES. Flexural testing of sandwich laminates for steel-composite joints. *Maritime Technology and*

*Engineering* [online]. Londýn: Taylor & Francis Group, 2015, , 637-643 [cit. 2021-04-09]. ISSN 978-1-138-02727-5. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.4051.2726

[44] KHAN, Zaffar M., Rahim JAN a M. Bilal KHAN. OPTIMIZATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE TRANSMISSION THROUGH SANDWICH COMPOSITES WITH DIFFERENT CORE MATERIALS IN KU-BAND. *Society for the Advancement of Materials and Process Engineering (SAMPE)* [online]. Department of Aeronautics and Astronautics, Institute of Space Technology, Islamabad, Pakistan., 2016, , 12 [cit. 2021-04-09].

[45] *LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE LH 160, TUŽIDLA H 146: Návod k použití, technické listy* [online]. Havel Composites [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/products/154/050206e5f796ebadf1631d0f0cadea0f31632e45.pdf>

[46] Řezání vodním paprskem. *GUMEX: pružné partnerství* [online]. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzby/profily-a-vyroba-tesneni-75/rezani-vodnim-paprskem-46>

[47] RAGHVENDRA, Singh Yadav, Ivo KUŘÍTKA a Jarmila VILČÁKOVÁ. *Advanced spinel ferrite nanocomposites for electromagnetic interference shielding applications* [online]. Elsevier, Technology and Engineering Materials Science, 2020 [cit. 2021-5-8]. ISBN 978-0-12-821290-5.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$A$	Poměrná část pohlcené intenzity elektromagnetického vlnění
A/m	Ampér na metr
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
$B$	Magnetická indukce
$b$	Šířka sendviče
CB	Carbon Black (uhlíkové saze)
CIP	Carbonyl Iron Powder (prášek karbonylového železa)
Co	Kobalt
CVD	Chemical Vapor Deposition (chemická depozice par)
dB	Decibel
$E$	Modul pružnosti v tahu
EM	Elektromagnetický
EVA	Etylenvinylacetát
$F$	Zatěžující síla
$f$	Frekvence
Fe	Železo
$f_r$	Rezonanční frekvence
$G$	Modul pružnosti ve smyku
Gd	Gadolinium
GPa	Gigapascal
$H$	Intenzita magnetického pole
$h$	Výška sendviče
H/m	Henry na metr
$K_0$	Ohybová tuhost
kg/m <sup>3</sup>	Kilogram na metr krychlový



kPa	Kilopascal
$l$	Vzdálenost podpěr
mm	Milimetr
Mn	Mangan
MPa	Megapascal
MWCNT	Multi-Walled Carbon Nanotubes (více-vrstvé uhlíkové nano-tuby)
N	Newton
Ni	Nikl
NR	Natural Rubber (přírodní kaučuk)
PC	Polykarbonát
PE	Polyetylen
PES	Polyethersulfon
PET	Polyethylentereftalát
PIR	Polyisocyanurate
PMI	Polymetacrylimid
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PU	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
$R$	Poměrná část odražené intenzity elektromagnetického vlnění
RTM	Resin Transfer Molding
$S$	Vzdálenost podpěr při zkoušce tříbodovým ohybem
$S_{11}, S_{21}$	Rozptylové parametry
SAN	Styren-acrylonitrile
$SE$	Shielding Efficiency (účinnost stínění)
$SE_A$	Účinnost stínění daná pohltivostí

SEM	Scanning Electron Microscope (skenovací elektronový mikroskop)
$SE_R$	Účinnost stínění daná odrazivostí
SMC	Sheet Molding Compaund
SWCNT	Single-Walled Carbon Nanotubes (jedno-vrstvé uhlíkové nano-tuby)
T	Tesla
$T$	Poměrná část prošlé intenzity elektromagnetického vlnění
$t_i$	Tloušťka vrstev sendviče
VARTM	Vacuum Resin Transfer Molding
W	Wolfram
$y$	Celkový průhyb nosníku
$y_M$	Průhyb potahů nosníku
$y_T$	Průhyb jádra nosníku
Zn	Zinek
$\sigma$	Napětí v potahu
$\mu'$	Relativní skutečná složka magnetické permeability
$\mu''$	Relativní imaginární složka magnetické permeability
$\bar{\mu}$	Komplexní magnetická permeabilita
$\mu$	Magnetická permeabilita
$\mu\text{m}$	Mikrometr
$\tau_S$	Maximální pevnost jádra ve smyku
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsia

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Oblasti aplikačního využití kompozitních materiálů. Dle [21].....</i>	13
<i>Obrázek 2: Hmotnostní zastoupení použití kompozitů v letadlech společnosti Airbus v letech 1970 až 2010. [7].....</i>	13
<i>Obrázek 3: Příklady použití kompozitních výrobků s vláknovou výztuží. a) stavební profily, b) tlaková nádoba, c) list větrné elektrárny při výrobě. [9, 10, 11] .....</i>	14
<i>Obrázek 4: Některé možné uspořádání vláknové výztuže: a – jednosměrné uspořádání, b – tkanina, c – rohož, d – víceosá výztuž, e – krátká vlákna orientovaná, f – krátká vlákna neorientovaná [12] .....</i>	15
<i>Obrázek 5: Graf pevnosti v tlaku vláknových kompozitů (a), graf tuhosti v tlaku vláknových kompozitů (b). [8] .....</i>	17
<i>Obrázek 6: Schématické znázornění sendviče (v tomto případě s voštinovým jádrem). Dle [16] .....</i>	19
<i>Obrázek 7: Graf srovnávající vybrané materiály jader sendvičů z hlediska závislosti ohybového modulu pružnosti a hustoty.....</i>	20
<i>Obrázek 8: Uzavřená (vlevo) a otevřená (vpravo) struktura buněk pěny. Dle [18].....</i>	21
<i>Obrázek 9: Některé tvary buněk voštinových struktur používaných v sendvičích. Dle [41].....</i>	22
<i>Obrázek 10: a) hliníková voština, b) polykarbonátová voština, c) aramidová voština. [21] .....</i>	22
<i>Obrázek 11: Adhezni zaoblení znázorněno schematicky (vlevo), skutečné adhezni zaoblení (vpravo). Dle [24].....</i>	23
<i>Obrázek 12: Nejpoužívanější technologie výroby sendvičů. Dle [1, 16].....</i>	24
<i>Obrázek 13: Řez vchodovými dveřmi domu vyrobeny SMC technologií. Dle [36] .....</i>	24
<i>Obrázek 14: SEM snímek kompozitu plněného MnZn ferity (vlevo), znázornění jednovrstvých (uprostřed) a vícevrstvých (vpravo) uhlíkových nano-tub. [25, 32] .....</i>	26
<i>Obrázek 15: Teoretická perkolační křivka (vlevo), perkolační křivka kompozitu s matricí PP/EVA plněného uhlíkovými sazemi (vpravo). Dle [35] .....</i>	28
<i>Obrázek 16: Vlevo: elektrická a magnetická část elektromagnetického pole šířícího se ve vlně daným směrem. Vpravo: graf závislosti magnetické indukce na intenzitě magnetického pole zobrazující permeabilitu pro materiály feromagnetické (<math>\mu_f</math>), paramagnetické (<math>\mu_p</math>), diamagnetické (<math>\mu_d</math>) a vakuum (<math>\mu_0</math>). Dle [28, 39] .....</i>	29
<i>Obrázek 17: Schéma dějů při dopadu elektromagnetické vlny na objekt. Dle [28] .....</i>	31
<i>Obrázek 18: Elektromagnetické stínění – materiál, který zcela odráží vlny (vlevo), materiál, který zcela pohlcuje vlny (vpravo). Dle [29] .....</i>	33
<i>Obrázek 19: Graf účinnosti stínění v závislosti na frekvenci. S-0 = 0 mg CIP, S-0.5 = 100 mg CIP, S-1 = 200 mg CIP. Dle [30] .....</i>	34
<i>Obrázek 20: Průběh normálových a tečných napětí v sendvičovém prvku. Dle [2] .....</i>	36
<i>Obrázek 21: Průhyb sendvičového nosníku. [41].....</i>	37
<i>Obrázek 22: Poruchy vláknové výztuže (nahore), poruchy částicové výztuže (dole). Dle [3] .....</i>	38

<i>Obrázek 23: Druhy selhání sendvičových struktur. Dle [3]</i> .....	39
<i>Obrázek 24: Průběh ohybového momentu a posouvajících příčných sil při trojbodovém ohybu (vlevo), čtyřbodovém čtvrtinovém ohybu (uprostřed), čtyřbodovém třetinovém ohybu (vpravo)</i> .....	40
<i>Obrázek 25: Schéma orientace výztuže laminátů v potazích sendviče a popis jednotlivých potahových materiálů a materiálu jádra</i> .....	42
<i>Obrázek 26: Závislost ohybového modulu pružnosti na hustotě pro sendviče s MnZn ferity v potazích syntetizované pomocí databáze Ansys Granta EduPack</i> .....	44
<i>Obrázek 27: Schéma technologie ruční laminace za použití vakua. 1 – připojení na vakuovou vývěvu, 2 – vakuovací fólie, 3 – odsávací rohož, 4 – perforovaná separační fólie, 5 – strhávací tkanina, 6 – těsnicí pásek, 7 – naseparovaná forma, 8 – kompozitní laminát. Dle [5]</i> .....	45
<i>Obrázek 28: a) separační vosk nanesen na formě, b) vyleštěná separovaná forma</i> .....	46
<i>Obrázek 29: a) skelná tkanina nasycena epoxidovou matricí, b) přiložená strhávací tkanina, c) přiložená odsávací rohož</i> .....	46
<i>Obrázek 30: a) odsávání vzduchu z prostoru pod vakuovací fólií, b) uzavření vakuovací hadice při transportu formy do vyhřívané pece, c) umístění laminátu v peci, d) schéma vyhřívaného zařízení Vacucell</i> .....	47
<i>Obrázek 31: Adhezí spojení, kterého bylo dosaženo na vyrobeném sendviči mezi krycím potahem a voštinou</i> .....	48
<i>Obrázek 32: a) sendvič opatřen zatím pouze jedním potahem, b) voština před přilepením k sendviči, c) všechny vyrobené sendvičové panely</i> .....	49
<i>Obrázek 33: Schéma rozměrů a polohy zkušebních těles na panelu (vlevo nahoře), panel s předkreslenými dráhami řezu (vpravo nahoře), schéma zařízení pro řezání vodním paprskem (dole) [46]</i> .....	51
<i>Obrázek 34: Podřezaná hrana spodního potahu sendviče po řezání vodním paprskem (nahore), jakostně lepší hrana horního potahu sendviče po řezání vodním paprskem (dole)</i> .....	52
<i>Obrázek 35: Zkušební tělesa nařezaná ze sendvičových panelů</i> .....	52
<i>Obrázek 36: Schéma principu anténového měřicího zařízení PNA-L N5230A. Dle [37]</i> ...	53
<i>Obrázek 37: (A) měřicí zařízení pro měření parametrů účinnosti elektromagnetického stínění PNA-L N5230A, (B) detail na prostor pro umístění zkušebního vzorku. [47]</i> .....	53
<i>Obrázek 38: Graf závislosti rozptylového parametru <math>S_{11}</math> na frekvenci pro sendviče s potahy plněnými uhlíkovými sazemi</i> .....	54
<i>Obrázek 39: Graf závislosti rozptylového parametru <math>S_{11}</math> na frekvenci pro sendviče s potahy plněnými manganozinečnatými ferity</i> .....	55
<i>Obrázek 40: Graf závislosti rozptylového parametru <math>S_{21}</math> na frekvenci pro sendviče s potahy plněnými uhlíkovými sazemi</i> .....	56
<i>Obrázek 41: Graf závislosti rozptylového parametru <math>S_{21}</math> na frekvenci pro sendviče s potahy plněnými manganozinečnatými ferity</i> .....	56
<i>Obrázek 42: Procentuální zastoupení reflexe, transmise a absorpce elektromagnetického stínění pro sendvič neplněný a plněný uhlíkovými sazemi při frekvenci 6 GHz</i> .....	58

<i>Obrázek 43: Procentuální zastoupení reflexe, transmise a absorpce elektromagnetického stínění pro sendviče plněné manganozinečnatými ferity při frekvenci 6 GHz.</i>	58
<i>Obrázek 44: Procentuální zastoupení reflexe, transmise a absorpce elektromagnetického stínění pro sendvič neplněný a plněné uhlíkovými sazemi při frekvenci 9 GHz.</i>	59
<i>Obrázek 45: Procentuální zastoupení reflexe, transmise a absorpce elektromagnetického stínění pro sendviče plněné manganozinečnatými ferity při frekvenci 9 GHz.</i>	59
<i>Obrázek 46: Připravená zkušební tělesa pro zkoušku třibodovým ohybem. Horní řada zleva: SEND2, SEND3 CB 1 hm%, SEND4 CB 5 hm%, SEND5 CB 10 hm%. Spodní řada: SEND7 MnZn 10 hm%, SEND9 MnZn 30 hm%, SEND10 MnZn 50 hm%, SEND11 MnZn 70 hm%.</i>	62
<i>Obrázek 47: Delaminace horního potahu sendviče SEND2 (bez plniva) v místě prvotního průchodu vodního paprsku.</i>	63
<i>Obrázek 48: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND2 bez plniva.</i>	64
<i>Obrázek 49: Zkušební těleso ze sendviče SEND2 zatěžované trojbodovým ohybem.</i>	65
<i>Obrázek 50: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND3 CB 1 hm%.</i>	65
<i>Obrázek 51: Lokální stlačení potahu zkušební tělesa ze SEND3 CB 1 hm%.</i>	66
<i>Obrázek 52: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND4 CB 5 hm%.</i>	67
<i>Obrázek 53: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND5 CB 10 hm%.</i>	68
<i>Obrázek 54: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND7 MnZn 10 hm%.</i>	69
<i>Obrázek 55: Porušení zkušební tělesa (Zkouška 3) ze SEND7 MnZn 10 hm%.</i>	69
<i>Obrázek 56: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND9 MnZn 30 hm%.</i>	70
<i>Obrázek 57: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND10 MnZn 50 hm%.</i>	71
<i>Obrázek 58: Graf závislosti síly na průhybu pro sendvič SEND11 MnZn 70 hm%.</i>	72
<i>Obrázek 59: Graf závislosti modulu pružnosti v ohybu na koncentraci uhlíkových sazí v potazích sendviče při trojbodovém ohybu.</i>	74
<i>Obrázek 60: Graf závislosti maximální síly na koncentraci uhlíkových sazí v potazích sendviče při trojbodovém ohybu.</i>	74
<i>Obrázek 61: Graf závislosti maximální síly na koncentraci manganozinečnatých feritů v potazích sendviče při trojbodovém ohybu.</i>	75
<i>Obrázek 62: Graf závislosti modulu pružnosti v ohybu na koncentraci uhlíkových sazí v potazích sendviče při trojbodovém ohybu.</i>	76

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1: Srovnání vlastností vybraných materiálů vláken. [5, 6, 13] .....</i>	16
<i>Tabulka 2: Výhody, nevýhody a použití vybraných reaktoplastických matric. [1, 5].....</i>	18
<i>Tabulka 3: Permeability vybraných materiálů. [39] .....</i>	29
<i>Tabulka 4: Vybrané stínící materiály a jejich charakteristiky. [26, 27, 28] .....</i>	33
<i>Tabulka 5: Frekvenční pásma, jejich rozsahy a aplikační využití. [37] .....</i>	35
<i>Tabulka 6: Vlastnosti použité pryskyřice a tužidla. Dle [45] .....</i>	43
<i>Tabulka 7: Rozměry použité voštiny .....</i>	48
<i>Tabulka 8: Přehled vyrobených laminátů a sendvičů.....</i>	50
<i>Tabulka 9: R T A pro sendvič bez plnění a sendviče plněné uhlíkovými sazemi (CB) při vybraných frekvencích. ....</i>	57
<i>Tabulka 10: R T A pro sendviče plněné manganozinečnatými ferity (MnZn) při vybraných frekvencích. ....</i>	57
<i>Tabulka 11: Hodnocení materiálů dle účinnosti stínění. Dle [47] .....</i>	60
<i>Tabulka 12: Účinnost stínění pro vybrané sendviče.....</i>	60
<i>Tabulka 13: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND2.....</i>	64
<i>Tabulka 14: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND3 CB 1 hm% .....</i>	66
<i>Tabulka 15: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND4 CB 5 hm% .....</i>	67
<i>Tabulka 16: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND5 CB 10 hm% .....</i>	68
<i>Tabulka 17: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND7 MnZn 10 hm%...70</i>	
<i>Tabulka 18: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND9 MnZn 30 hm%...71</i>	
<i>Tabulka 19: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND10 MnZn 50 hm%.72</i>	
<i>Tabulka 20: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb sendviče SEND11 MnZn 70 hm%.73</i>	
<i>Tabulka 21: Souhrn průměrných hodnot zkoumaných veličin u ohybu sendvičových prvků .....</i>	73

