



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**LETECKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# **VYUŽITÍ MIKROVLNNÉHO OHŘEVU PŘI VYTVZOVÁNÍ LEPIDEL A KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ**

APPLICATION OF MICROWAVE HEATING FOR CURING OF ADHESIVES AND COMPOSITE  
MATERIALS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**KLÁRA DVOŘÁČKOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF KLEMENT, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Studentka: Klára Dvořáčková

kteřá studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Využití mikrovlnného ohřevu při vytvrzování lepidel a kompozitních materiálů**

v anglickém jazyce:

### **Application of microwave heating for curing of adhesives and composite materials**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mikrovlnný ohřev se uplatňuje v řadě průmyslových odvětví a představuje určitou alternativu k metodě vytvrzování kompozitních materiálů v autoklávu, která je zdlouhavá a energeticky náročná. Při mikrovlnném ohřevu se materiál prohřívá rovnoměrně a rychle v celém objemu, což vede ke značným energetickým úsporám.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je popsat princip mikrovlnného ohřevu, jeho přednosti a omezení, a shromáždit dosažitelné údaje o jeho použití v letecké výrobě při vytvrzování lepidel a kompozitních materiálů.

Dalším cílem je posouzení možnosti zabudování mikrovlnného ohřevu do stávajícího laboratorního autoklávu Leteckého ústavu.

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení garanta

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Klement, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 7. 11. 2013

L.S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá mikrovlnnou technologií a možnostmi jejího využití při vytvrzování lepidel a kompozitních materiálů. První část obsahuje souhrn teoretických poznatků. Je zde popsán princip mikrovlnného ohřevu, konstrukce mikrovlnných zařízení a možnosti uplatnění této technologie pro vytvrzování kompozitních struktur. Druhá část práce je věnována praktickému ověření teoretických předpokladů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Mikrovlnný ohřev, vytvrzování, autokláv

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis concerns the microwave technology and the possibilities for its use in the curing of adhesives and composite materials. The thesis is divided into two main parts. The first part summaries theoretical findings about microwave technology. There is the principle of microwave heating described as well as constructions of microwave devices. Also the possibilities of using this technology for the curing of composite structures are mentioned. The second part of the thesis is devoted to the practical verification of the theoretical assumptions.

## **KEYWORDS**

Microwave heating, the curing, autoclave

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DVOŘÁČKOVÁ, K. *Využití mikrovlnného ohřevu při vytvrzování lepidel a kompozitních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Letecký ústav, 2014. 41 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. JOSEF KLEMENT, CSc.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Využití mikrovlnného ohřevu při vytvrzování lepidel a kompozitních materiálů* jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne 26. května 2014

---

Klára Dvořáčková

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefu Klementovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

---

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b>	<b>11</b>
<b>TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>12</b>
<b>1. Mikrovlnný ohřev</b>	<b>12</b>
1.1 Elektromagnetické vlnění .....	12
Mikrovlny .....	12
1.2 Principy mikrovlnného ohřevu .....	13
Dipolární polarizace .....	13
Vodivostní děje .....	14
Magnetické efekty .....	14
1.3 Dělení materiálů z hlediska působení záření .....	14
Materiály odrážející mikrovlny .....	15
Transparentní materiály .....	15
Materiály absorbující mikrovlny .....	15
Smíšené materiály .....	15
1.4 Mikrovlnná zařízení .....	15
Magnetron .....	18
1.5 Variabilní frekvence mikrovlnného ohřevu .....	19
1.6 Výhody ohřevu .....	19
1.7 Využití mikrovlnného ohřevu .....	19
<b>2. Vytvrzování</b>	<b>20</b>
2.1 Využití mikrovlnné technologie .....	20
Vytvrzování kompozitních materiálů .....	21
Vytvrzování lepidel .....	22
<b>3. Řešení autoklávu</b>	<b>24</b>
3.1 Předpokládané přínosy mikrovlnné jednotky .....	24
3.2 Nevýhody zavedení mikrovlnné jednotky .....	24
<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>25</b>
<b>1. Použité přístroje</b>	<b>25</b>



<b>2. Vytvrzované vzorky</b>	<b>26</b>
2.1 Pyskyřice MGS L 285 s tvrdidlem H 287 .....	26
2.2 Kompozitní materiál se skleněným vláknem .....	27
2.3 Kompozitní materiál s uhlíkovým vláknem .....	27
<b>3. Vlastní měření</b>	<b>28</b>
3.1 Pyskyřice MGS L 285 s tvrdidlem H 287 .....	28
A) Standardní vytvrzování .....	28
B) Působení elektromagnetického pole .....	29
C) Dotvrzování pomocí mikrovln .....	31
D) Vytvrzování pomocí mikrovln .....	32
E) Srovnání naměřených tvrdostí .....	34
3.2 Kompozitní materiál se skleněným vláknem .....	35
3.3 Kompozitní materiál s uhlíkovým vláknem .....	36
<b>ZÁVĚR</b>	<b>37</b>
<b>Seznam literatury</b>	<b>38</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>40</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>40</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>41</b>

## ÚVOD

Mikrovlnný ohřev je jedním ze způsobů tepelné úpravy materiálů. Díky svojí efektivnosti, vysoké kvalitě zpracování, možnosti automatizace a přizpůsobování se novým procesům nachází uplatnění téměř ve všech zpracovatelských oborech. Často nahrazuje nebo doplňuje klasický konvenční ohřev.

V letecké výrobě kompozitních materiálů nabízí mikrovlnná technologie alternativu k metodě vytvrzování v autoklávu. Použitím mikrovln se proces vytvrzování výrazně zkrátí a přinese velké energetické úspory. Mikrovlnné vytvrzování je však nutné přizpůsobit tomuto procesu a nalézt optimální podmínky pro daný materiál a tvar vytvrzovaných předmětů.

Tato práce se zabývá rozborem mikrovlnného ohřevu a možností jeho uplatnění při vytvrzování kompozitních materiálů.

V teoretické části bakalářské práce jsou popsány základní principy a konstrukce mikrovlnného zařízení, je zde uvedeno rozdělení materiálů z hlediska působení mikrovln, a jsou zmíněny nejnovější poznatky a využití této technologie. Tato práce také uvádí výsledky některých výzkumů, ve kterých bylo srovnáváno vytvrzování pomocí autoklávu s mikrovlnným vytvrzováním. Na závěr teoretické části je posouzena možnost a vhodnost zabudování mikrovlnné jednotky do stávajícího autoklávu Leteckého ústavu.

V experimentální části práce je provedeno praktické ověření teoretických předpokladů. Na vzorcích z epoxidové pryskyřice bylo provedeno srovnávací měření. Vzorky vytvrzované za studena jsou porovnávány se vzorky dotvrzovanými při zvýšené teplotě. Dotvrzování probíhalo standardním postupem dle výrobce i pomocí mikrovln. Na vzorcích z kompozitních materiálů byla ověřena možnost použití mikrovlnné technologie při vytvrzování.

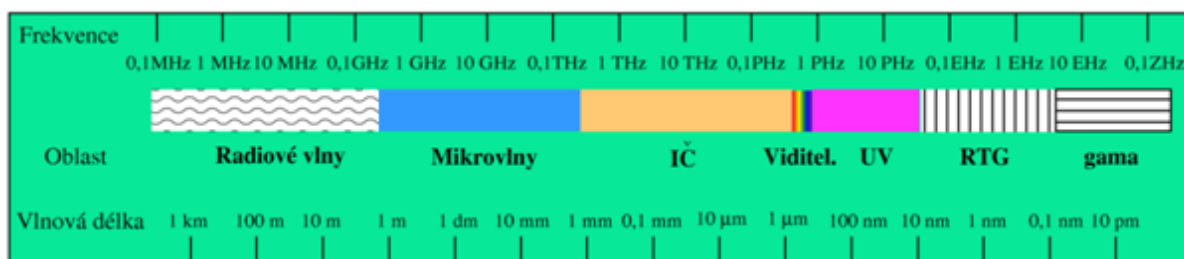
# TEORETICKÁ ČÁST

## 1. MIKROVLNNÝ OHŘEV

### 1.1 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ

Pomocí elektromagnetického vlnění se přenáší energie ze zdroje ke spotřebiči. K základním vlastnostem elektromagnetického vlnění patří schopnost polarizace, odraz a ohyb vlnění a interference [6].

Podle vlnové délky se rozděluje záření na rádiové vlny, mikrovlny, infračervené záření, viditelné světlo, ultrafialové záření, rentgenové záření a gama záření. Základní rozdělení elektromagnetického vlnění nalezneme na obrázku 1 [6].



Obrázek 1 – Elektromagnetické spektrum [14]

Teoretický objev elektromagnetického vlnění poprvé popsal James Clerk Maxwell v roce 1886. Odvodil vlnovou rovnici pro dvě základní složky vytvářející elektromagnetické vlny – vektor elektrické intenzity  $\mathbf{E}$  a vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Oba tyto vektory jsou na sebe a na směr šíření vlny kolmé. Díky jejich existenci je v okolí nabitých částic, které se pohybují se zrychlením, proměnné elektrické pole vyvolávající zároveň proměnné magnetické pole [1, 7, 12].

Existenci elektromagnetického vlnění poprvé demonstroval Heinrich Hertz v roce 1888. Ke svým pokusům sestavil aparaturu, která produkovala a zároveň detekovala mikrovlny ve spektru velmi krátkých vln [1, 7, 12].

### MIKROVLNY

Mikrovlny jsou elektromagnetickým vlněním o frekvenci od 0,3 GHz do 300 GHz a vlnové délce přibližně od 1 mm do 1 m [1, 8].

O využití mikrovln se zasloužil Percy Spencer, který se zabýval bezdrátovou telegrafií a v průběhu druhé světové války konstruoval magnetrony. V roce 1945 zpozoroval, že

mikrovlny vznikající v magnetronu jsou schopny ohřívat materiály. O dva roky později bylo pod jeho vedením na trhu představeno první mikrovlnné zařízení pro ohřev potravin [5, 7].

Efektivnost ohřevu je závislá na frekvenci mikrovln. Nejúčinnější frekvence mikrovlnného ohřevu vody je 22 GHz. Při této hodnotě dochází k nejrychlejšímu ohřevu materiálů obsahujících vodu, ale pouze v povrchových vrstvách ohřivaného předmětu. Mikrovlny jsou absorbovány v již tenké povrchové vrstvě předmětů, a tak nedochází k rovnoměrnému ohřevu. V praxi se proto používají mikrovlny s frekvencemi, při kterých je ohřev stále rychlý a zároveň je hloubka průniku vlnění dostatečně veliká. Nejběžnější frekvencí mikrovlnného ohřevu je 2450 MHz. Této frekvenci vlnění odpovídá vlnová délka přibližně 12,2 cm. Mimo tuto hodnotu se často používají frekvenční pásma kolem 915 MHz s vlnovou délkou asi 33 cm. Výhodou této frekvence je přibližně dvojnásobná hloubka průniku mikrovln, což umožňuje ohřev větších těles. Pro aplikace požadující pouze povrchový ohřev se používají frekvence kolem 5,8 GHz (5 cm hloubka vniku mikrovln) nebo 24,13 GHz (1,4cm) [5, 7, 8, 11].

## 1.2 PRINCIPY MIKROVLNNÉHO OHŘEVU

Mikrovlnný ohřev se uplatňuje u elektricky nevodivých nebo málo vodivých materiálů. Ohřivaný materiál vkládáme do vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, které je tvořeno působením mikrovln. V elektromagnetickém poli dochází k polarizaci, vodivostním mechanismům a k magnetickým efektům uvnitř materiálů. Zvyšuje se vnitřní energie molekul a materiál se postupně ohřívá. Při dokonalém mikrovlnném ohřevu je rozložení mikrovln zcela rovnoměrné v celé ohřívací oblasti a teplo vzniká stejnoměrně v celém objemu materiálu. Výskyt vlnění je závislý na konstrukci zařízení a na materiálech uvnitř ohřívací komory. Intenzita, s jakou bude daný předmět výkon absorbovat, záleží na velikosti, tvaru, na dielektrické konstantě a permitivitě předmětu. Kromě samotného předmětu je důležitá především frekvence a intenzita elektromagnetického pole a konstrukce zařízení. U mnoha materiálů je poměrná permitivita závislá na teplotě a frekvenci. Pro většinu materiálů roste permitivita s frekvencí. Teplo, které v ohřívaných produktech vzniká, se postupně šíří. Prostupem tepla mohou být ohřáté předměty, na které mikrovlny jinak nepůsobí, a okolní prostředí ohřívací komory [1, 5, 8, 11].

Pokud necháme mikrovlny na materiál působit příliš dlouho, může dojít k přehřátí nebo poškození ohřívaného materiálu. Naopak pokud bychom ohřívali prázdný prostor, magnetron by se ničil.

Podle funkce, ke které jsou mikrovlnná zařízení určena, se jednotlivé konstrukce a velikosti zařízení liší.

### DIPOLÁRNÍ POLARIZACE

Tento mechanismus mikrovlnného ohřevu se projevuje u látek, které mají stálý a nenulový elektrický dipólový moment. Mezi tyto látky patří například voda, etanol nebo metanol. Působením elektrického pole vzniká v atomech nesymetrické rozložení náboje. Díky nesymetrickému rozložení náboje dochází k ději nazývanému dipolární polarizace. Podle způsobu, jakým se polarizace vytváří, rozlišujeme polarizaci elektronovou, iontovou a orientační. Elektronová je založena na vzniku dipólového momentu v jednotlivých atomech. Iontová na posunutí kladných iontů ve směru a záporných proti směru elektrického pole.

Orientační polarizace způsobuje natačení dipólů ve směru vnějšího elektrického pole [12].

Především orientační polarizace se uplatňuje při mikrovlnném ohřevu. Molekuly a jejich polarizované dipóly jsou v materiálech zpravidla neuspořádány. Jsou natočeny náhodně do všech směrů. Jakmile vložíme polarizovaný dipól do elektrického pole, okamžitě změni svoji orientaci ve směru tohoto pole. Je to pro něho energeticky výhodnější. Dipóly reagují na každou změnu orientace elektrického pole. Vysokofrekvenční elektrické pole elektromagnetické vlny nutí dipóly k velmi rychlé rotaci. V makroskopickém měřítku tak vzniká teplo [5, 11, 12].

### VODIVOSTNÍ DĚJE

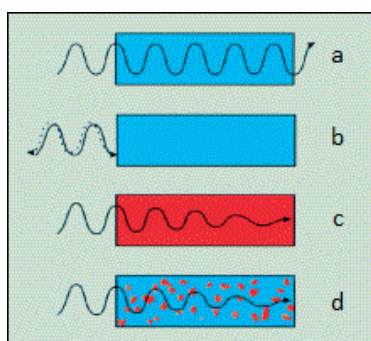
Vodivostní děje se uplatňují především při ohřevu dostatečně koncentrovaných roztoků silných elektrolytů. K těmto látkám patří například vodný roztok NaCl. Působením elektrického pole vznikají v iontech těchto materiálů poměrně velké proudy. Samotný ohřev materiálů je pak způsoben srážkami urychlených iontů mezi sebou a s neutrálními molekulami. Elektrická vodivost je u řady látek závislá na teplotě. Při nízkých teplotách se u vodného roztoku uplatní primárně dipolární polarizace, při vyšších teplotách dochází k vodivostním mechanismům [12].

### MAGNETICKÉ EFEKTY

K těmto efektům dochází u feromagnetik s dostatečně nízkou elektrickou vodivostí. Vhodným materiálem, ve kterém dochází k magnetickým efektům mikrovlnného ohřevu, je například ferit. Při ohřevu hrají velkou roli posuny a rotace magnetických momentů způsobených vlivem magnetického pole [12].

## 1.3 DĚLENÍ MATERIÁLŮ Z HLEDISKA PŮSOBENÍ ZÁŘENÍ

Podle reakce materiálů na působení mikrovln rozlišujeme čtyři skupiny materiálů. Působení mikrovln na různé druhy materiálů je znázorněno na obrázku 2.



Obrázek 2 – Působení mikrovlnného záření na různé druhy materiálů [2]  
 a – transparentní materiál, b – materiál odrážející vlnění,  
 c – materiál absorbující záření, d – smíšený materiál

## MATERIÁLY ODRÁŽEJÍCÍ MIKROVLNY

Mikrovlnný ohřev se neuplatňuje při ohřevu velkých předmětů s vysokou elektrickou vodivostí, kovů. Hloubka vniku elektromagnetického vlnění o frekvenci v řádu GHz je u kovů extrémně malá – maximálně v mikrometrech. V důsledku toho je mikrovlnné záření odraženo a k ohřevu kovu nedochází. Z tohoto důvodu se pro konstrukci mikrovlnných zařízení používají kovy [1, 2, 12].

Jiná situace však nastane, pokud do mikrovlnného pole vložíme tenké vrstvičky kovů např. tenké hliníkové fólie, kovová vlákna nebo pozlacený porcelán. Tenkými vrstvičkami kovu prochází magnetický indukční tok. Magnetický indukční tok se vlivem elektromagnetického pole velmi rychle mění. Díky těmto změnám vznikají velmi intenzivní vířivé proudy. Kovový povrch se následně extrémně rychle zahřívá a dochází k jeho jiskření. Během tohoto procesu se vypařují rozžhavené částičky kovu. Emitované elektrony jsou pak urychlovány proměnným elektrickým polem. Pokud dojde k dostatečně silné emisi elektronů, v pracovním prostoru mikrovlnného zařízení dochází k ionizaci molekul. Tento proces pozorujeme jako plazmový výboj uvnitř mikrovlnného zařízení [12].

## TRANSPARENTNÍ MATERIÁLY

Na tyto materiály mikrovlny rovněž nepůsobí. Mikrovlny jimi pronikají, aniž by v nich došlo k reakci nebo absorpci mikrovln. K jejich ohřevu dochází pouze prostupem tepla od ohřívaného předmětu. Pro tuto vlastnost se často používají na výrobu pomocných částí mikrovlnného zařízení např. pro tepelné izolace nebo jsou z nich vyrobeny ohřívací nádoby. Do této skupiny materiálů patří například polypropylen, teflon, křemičité sklo, plasty nebo papír [1, 2, 5, 11].

## MATERIÁLY ABSORBUJÍCÍ MIKROVLNY

Materiály, které mikrovlny absorbují, můžeme pomocí mikrovlnného zařízení zahřívát. Do této skupiny patří většina ostatních materiálů. Nejběžnějším zástupcem je voda [1, 11].

## SMÍŠENÉ MATERIÁLY

Smíšené materiály jsou pro vlnění částečně transparentní, částečně vlnění pohlcují nebo je částečně odražejí. Jsou to materiály, které jsou složeny alespoň ze dvou popsanych fází.

## 1.4 MIKROVLNNÁ ZAŘÍZENÍ

Mikrovlnné zařízení se skládá ze tří hlavních částí:

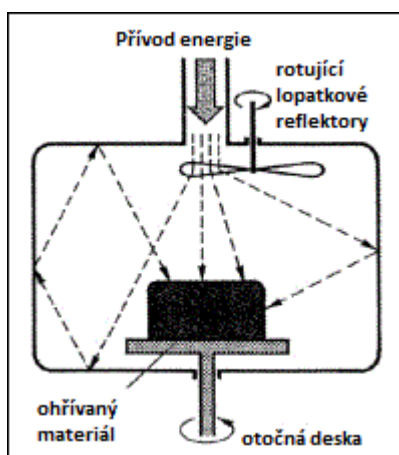
- generátoru elektromagnetického vlnění napojeného na zdroj elektrické energie
- vlnovodu
- ohřívací komory pro umístění ohřívaných předmětů

Zdroj elektrické energie dodává energii do generátoru a zaručuje správný chod ohřevu. Dodaná energie umožňuje generátoru elektromagnetického vlnění vyprodukovat mikrovlnné záření o určité frekvenci. Nejběžněji používaným zdrojem mikrovlnného záření je magnetron

---

nebo klystron [11].

Magnetrony s nízkým výkonem pro laboratorní i běžné použití produkující mikrovlny o frekvenci 2450 MHz mohou mít regulovatelný výkon o velikosti přibližně od 1 do 6 kW. Magnetrony s výkonem asi do 2 kW jsou chlazeny vzduchem. Magnetrony s vyššími výkony musí být chlazeny vodou, což klade vyšší nároky na řídicí techniku. Požadavky na vyšší výkon se obvykle realizují paralelním řazením více magnetronů o výkonech 1,5 kW. Není výjimkou zapojení 100 a více magnetronů. Toto řešení je cenově nejvýhodnější. Výstupního výkonu u permanentních magnetů magnetronů je dosaženo použitím tyristorové kontroly anodového napětí. Vysokovýkonné systémy magnetronů používané pro frekvence 915 MHz mívají výkon vyšší než 100 kW. Tyto systémy používají elektromagnety, které mění anodový proud [1, 2, 4, 11].



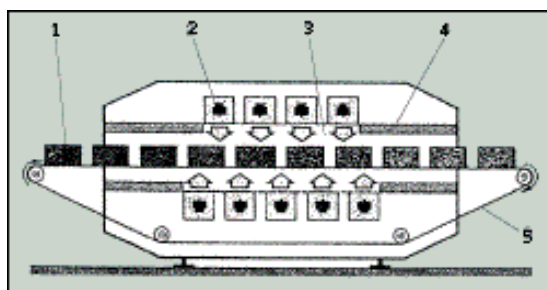
Obrázek 3 – Schéma uspořádání ohřivací komory [1]

Z magnetronu jsou vyprodukované mikrovlny vedeny přímo nebo vlnovodem do ohřivací komory. Vlnovod musí mít vhodné rozměry. Pro frekvenci vlnění 2450 MHz mívají vlnovody velikost přibližně 86 x 43 mm. U ústí vlnovodu bývá umístěn rozdělovač vlnění. Rozdělovač směřuje mikrovlny do ohřivacího prostoru a přitom je rozptyluje do různých směrů. Zabraňuje také zpětnému odrazu vlnění do magnetronu [11].

Ohřivací komory jsou kovové skříně uspořádané tak, aby jejich vnitřní prostor, určený pro vkládání ohřivaných předmětů, mohl rezonovat se vstupním vysokofrekvenčním zářením. Během ohřevu uvnitř ohřivací komory dochází k interakci ohřivaného materiálu a mikrovln. Mikrovlny se zde rozptylují, při dopadu na kovovou stěnu se odrážejí a při kontaktu s ohřivaným materiálem dochází k jejich absorpci. Rozložení vlnění závisí na rozměrech ohřivací komory, na frekvenci vlnění i na ohřivaných předmětech uvnitř komory. Aby bylo rozmístění elektromagnetického vlnění co nejvíce rovnoměrné, může být ohřivací prostor vybaven rotující podložkou, lopatkovým reflektorem nebo jinými součástmi. Konkrétní ohřivací komory jsou konstruovány dle požadované funkce zařízení. Nejjednodušší ohřivací komorou je jednoduchá dutina s alespoň jedním rozměrem větším než vlnová délka záření tj. přibližně 12,2 cm pro frekvence 2450 MHz. Tuto podobu mají běžné mikrovlnné trouby pro domácí ohřev potravin. Základní schéma uspořádání mikrovlnné ohřivací komory můžeme vidět na obrázku 3. Ohřivací komory mohou být uzpůsobeny složitějšímu kontinuálnímu zpracování. Obrázek 4 schematicky znázorňuje uspořádání mikrovlnného tunelového zařízení. V tomto zařízení jsou předměty umístěné na dopravním pásu

a kontinuálně procházejí ohřívacím tunelem. Ohřívací tunel je tvořený několika na sebe navazujícími mikrovlnnými moduly, které umožňují požadované odstupňování teplot [1, 11].

Běžné konstrukční materiály pro mikrovlnné komory jsou nerezové oceli nebo hliník. Hliník je přijatelným kompromisem mezi náklady a vysokou elektrickou vodivostí. Dobrá elektrická vodivost je žádoucí v případech, kdy chceme snížit energetické ztráty pomocí nastavení proudu procházejícím stěnami ohřívací komory. Dveře komory musí být z materiálů odrážející nebo tlumící vlnění a zajišťující elektrický kontakt s okolním povrchem. Ve dveřích mohou být malé otvory, kterými můžeme pozorovat průběh ohřevu. Pokud jsou otvory ve dveřích dostatečně malé, působící záření jimi nemůže proniknout. Pro frekvenci záření 2450 MHz nesmí být velikost otvorů větší než 10 mm. Pro konstrukci větších otvorů je nutné použít materiály absorbující záření nebo materiály zabraňující úniku vlnění. U složitějších zařízení je někdy třeba, aby byly dveře chlazeny vodou. Uzavření dveří musí být automaticky kontrolováno a při jejich náhodném otevření musí dojít k okamžitému odpojení zdroje záření [1, 11].



Obrázek 4 – Schéma uspořádání mikrovlnného tunelového ohřívacího zařízení [2]

1 - ohřívání materiálů, 2 - mikrovlnný modul,  
3 - ohřívací tunel, 4 - materiál absorbující přebytečné mikrovlny, 5 - transportní pás

Vzhledem k tomu, že materiály zahřívání v mikrovlnném zařízení ztrácejí teplo z povrchu do relativně chladného prostoru trouby, je důležité věnovat pozornost izolaci pracovního prostoru. Zejména při vysokých teplotách dochází k velkému úniku tepla do okolí. Obecně izolační materiál musí být pro vlnění transparentní a zároveň musí mít dostatečnou elektrickou vodivost. Pokud se izolace ztlačí spojuje s mikrovlnami, mikrovlnná energie může být oslabena a účinnost ohřevu se sníží. Proto se někdy izolace umísťuje mimo ohřívací komoru. Vnější izolace však ztrácí smysl, zahřívají-li se příliš malé předměty vzhledem k velikosti ohřívací skříně. Alternativou je použití hybridních systémů. Tyto systémy umožňují například pomocí přídavného topného zařízení zvýšit teplotu okolního prostředí. Aplikace kombinující mikrovlnný ohřev společně s konvenčním ohřevem jsou mnohem účinnější [11].

Kromě zmíněných součástí může být mikrovlnné zařízení vybaveno dalšími komponenty např. měřičem aktuálního příkonu, teploty, časovým spínačem, regulátorem příkonu a vlnění, osvětlením pracovního prostoru, chlazením apod. [11].

Z bezpečnostních důvodů musí mikrovlnného záření i celý pracovní prostor být odstíněn a utěsněn proti prosáknutí a úniku záření [4].

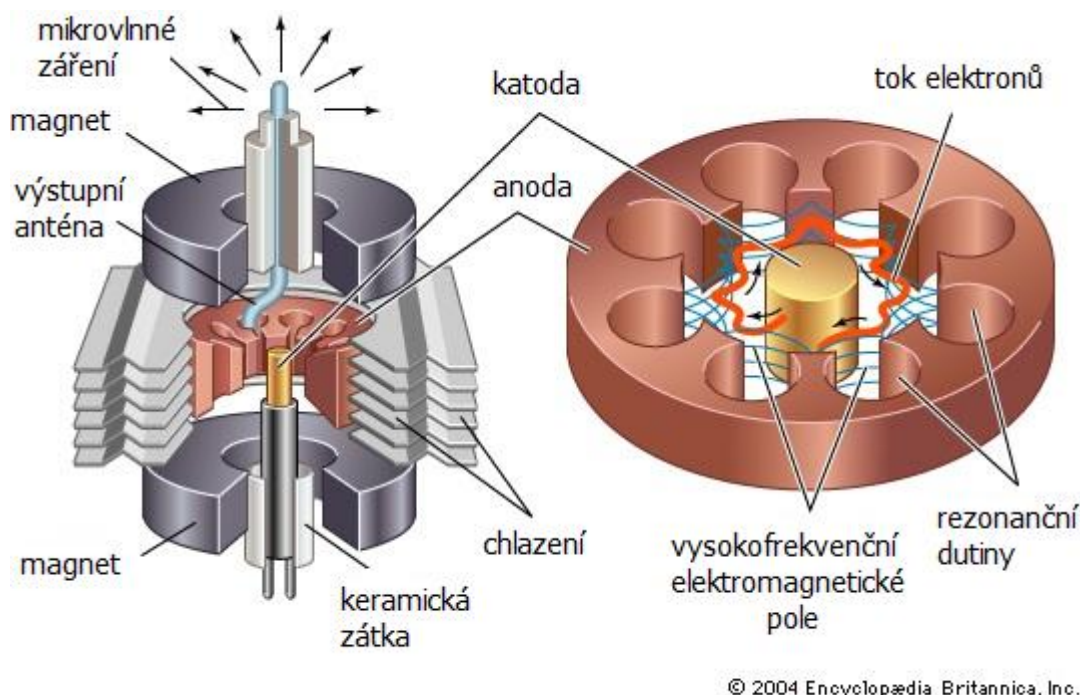
Celková účinnost je závislá na konstrukci zařízení i na materiálu a velikosti ohřívání předmětů. U mikrovlnných zařízení pro domácí ohřev, která mají vstupní příkon asi 800W, se hodnota účinnosti pohybuje přibližně kolem 50%. Pouze polovina energie se spotřebuje na



přeměnu tepla v ohřivaném předmětu. Přibližně 5% příkonu se spotřebuje na chlazení a osvětlení zařízení. Dalších 10% jsou ztráty v transformátoru, ztráty v magnetronu jsou asi 27% a vazební ztráty jsou přibližně 8% [1].

## MAGNETRON

Magnetron je výkonová vakuová elektronka, která je schopná generovat elektromagnetické vlnění v oblasti mikrovln. Uspořádání magnetronu je zobrazeno na obrázku 5 [1].



Obrázek 5 – Uspořádání magnetronu [13]

Základ magnetronu tvoří velmi silný prstencový permanentní magnet. Tento magnet obklopuje vakuovou trubici s rezonančními dutinami. Z jedné strany je na vakuové trubici připojena žhavicí katoda, z druhé vlnovod, kterým jsou vyprodukované mikrovlny odváděny. Na vyhřívanou střední katodu je přiváděno napětí v řádu několika voltů, na kovovou válcovou anodu opatřenou sudým počtem rezonančních dutin je přiváděno napětí v řádu kilovoltů. Ze žhavicí katody jsou emitovány elektrony. Následný tok elektronů není ovládán mřížkou, ale vnějším magnetickým polem. Magnetické pole společně s působením rezonančních dutin uvede elektrony do vysokofrekvenčních kmitů. Z jedné z rezonančních dutin je vysokofrekvenční elektromagnetické záření odváděno výstupní anténou, která záření uvolňuje do vlnovodu nebo přímo do ohřivací komory [1, 15].

Dalšími částmi magnetronu je keramická zátka oddělující vlnovod a vakuum, chlazení, vysokonapěťová dioda, transformátor a kondenzátor [1, 15].

Magnetron dosahuje účinnosti kolem 65%, ale frekvence generovaných kmitů není zcela přesná. Pro generování přesné frekvence kmitů se používá klystron, jehož účinnost je však asi poloviční [15].

## 1.5 VARIABILNÍ FREKVENCE MIKROVLNNÉHO OHŘEVU

Jednou z možností, jak zvýšit účinnost mikrovlnného ohřevu, je použití variabilní frekvence. Technologie variabilní frekvence mikrovlnného ohřevu spočívá v produkování mikrovln s frekvencemi v rozmezí obvykle kolem 1 GHz. Frekvenční pásmo je rozděleno na přibližně 5000 jednotlivých frekvencí, které se v průběhu ohřevu přibližně každých 25 milisekund střídají. Běžné střední frekvence jsou vybrány z C – skupiny (5,8 – 7,0 GHz) nebo z X – skupiny (7,3 – 8,7 GHz). Díky měnící se frekvenci elektromagnetického pole se výkon absorbuje ve větším objemu materiálu a tak dochází k rovnoměrnějšímu ohřevu. Technologie variabilních frekvencí mikrovln umožňuje selektivní zahřívání a dovoluje použití kovů v mikrovlnné troubě [9].

Variabilní frekvence mikrovlnného procesu nacházejí uplatnění např. při vytvrzování lepidel ve vláknové optice a optoelektronickém průmyslu [9].

## 1.6 VÝHODY OHŘEVU

Výhodou mikrovlnného ohřevu je nízká spotřeba energie, rychlost procesu, vysoká účinnost, úspora výrobního prostoru, možnost automatizace, bezpečnost a ekologie.

U většiny klasických ohřevů je zahříván povrch předmětu a od něho se teplo šíří. Mikrovlnným ohřevem jsou materiály zahřívány v celém svém objemu. Díky tomu je možné dosáhnout vysoké rovnoměrnosti prohřátí a přesněji regulovat teplotu. Tento druh ohřevu také umožňuje dosáhnout vyšší teploty uvnitř produktu než na jeho povrchu. Další důležitou výhodou mikrovlnného ohřevu je možnost zpracování výrobků přímo v obalech. Moderní vysokofrekvenční mikrovlnné technologie zajišťují čistý provoz bez prachu, hluku, pachu, vibrací a úniku záření. Nezpůsobují negativní zvýšení teploty ani vlhkost, neznečišťují ovzduší a neohrožují lidské zdraví. Mikrovlnnou technologii lze plně automatizovat i pro kontinuální zpracování. Použitím mikrovlnné technologie se zvyšuje jakost výrobku, jeho prodejnost a konkurenceschopnost [1, 8, 11].

## 1.7 VYUŽITÍ MIKROVLNNÉHO OHŘEVU

Mikrovlnný ohřev se využívá téměř ve všech zpracovatelských oborech. Umožňuje modernizaci postupů a aplikaci nových výrobních systémů. Často může doplňovat klasický konvenční ohřev.

Uplatnění nachází při předeřevu, dehydrataci, vulkanizaci, vytvrzování, tavení, rozmrazování, vaření, pečení, pražení, pasterizaci, spojování, vypalování apod. Zpracovávají se jím potraviny, krmiva, chemikálie, keramika, guma, polymery, plasty, kompozity, barviva, farmaceutika, dřevo, textil, stavební hmoty a mnoho dalších materiálů [2, 4, 8].

## 2. VYTVRZOVÁNÍ

Vytvrzování kompozitních struktur pomocí autoklávu je základem kompozitního průmyslu a jen těžko by se bez něho obešla kvalitní letecká výroba. Vytvrzování uvnitř autoklávu je energeticky i časově náročné. Proto se objevuje snaha alespoň částečně tuto nákladnou výrobu nahradit jinými způsoby. Výroba termosetů a termoplastů stále častěji nabízí možné alternativy. Čím dál větší pozornost se klade na vytvrzování v peci a kromě tohoto řešení se začíná vyvíjet také mikrovlnné vytvrzování [9].

V konvenčních nebo od povrchu zahřívajících systémech, jako je autokláv, je zahříván povrch předmětů a od něho se teplo šíří skrz materiál. Doba trvání procesu je určena rychlostí tepelného toku uvnitř struktury. Průtok tepla závisí na konkrétních materiálech, na tepelné vodivosti, hustotě a viskozitě. Při vytvrzování v autoklávu dosáhnou hrany, rohy a jiné tvarové části předmětu nastavené teploty dříve než jeho jádro. Zahřívání probíhá nerovnoměrně, což může zvyšovat napětí uvnitř vytvrzeného produktu. Z tohoto důvodu se teplota v autoklávu a konvenčních troubách musí navyšovat pozvolna. Pomalé navyšování teploty může být obtížné a činí vytvrzování časově i energeticky náročným [9].

### 2.1 VYUŽITÍ MIKROVLNNÉ TECHNOLOGIE

Mikrovlnná technologie na rozdíl od konvenčních ohřevů zahřívá objemově. Tepelná energie se působením elektromagnetického vlnění produkuje poměrně rovnoměrně a rychle v celém objemu součásti. Díky tomu je možné lépe kontrolovat a regulovat teplotu. Spotřeba energie je přitom nižší a vytvrzovací čas kratší. Mikrovlnnou technologií lze také zahřívát pouze konkrétní části produktu a tak se maximalizuje účinnost procesu vytvrzování [2, 8, 9].

Mikrovlnné vytvrzování vyžaduje minimální délku rozběhu na nastavení požadované teploty, proces má menší tepelné zpoždění a po vypnutí nenastává pomalé ochlazování ohřívacího zařízení. Mikrovlnnou technologií lze však užívat pouze pro některé nekovové materiály [9].

Použití mikrovlnné technologie pro vytvrzování vyžaduje určité přizpůsobení tomuto procesu. Pro vytvrzování v mikrovlnné troubě nemůžeme použít stejný postup a parametry jako jsou použité v autoklávu. Je nutné vytvořit specifický proces, který je vhodný pro mikrovlnné zařízení a současně vyhovující ohříváním předmětům [9].

Klíčem úspěchu mikrovlnného vytvrzovacího procesu je měření a regulace teploty. Teplotu lze snímat pomocí termočládku umístěného na součásti. Umístění přímo na součásti je nezbytné, protože se teplota ohřívajícího produktu od teploty okolního prostředí a zařízení výrazně liší. Pro větší přesnost je možné použít i více termočládků. Pokud bychom chtěli regulovat teplotu v rámci vytvrzovaného dílu, můžeme použít stínění odrážející mikrovlny [9].

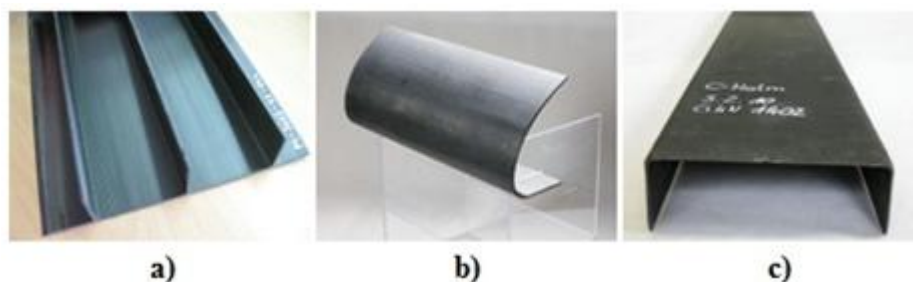
### VYTVRZOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Použitím mikrovlnného ohřevu pro vytvrzování kompozitních materiálů se začala zabývat společnost GKN Aerospace (Velká Británie) v roce 2009 poté, co tato společnost získala zařízení přizpůsobené tomuto procesu od firmy Vötsch Industrietechnik GmbH (Německo). Cílem zkoumání bylo otestovat schopnosti stroje, který zahřívá určitý prostor a zjistit odlišnosti oproti klasickému vytvrzování v autoklávu [9].



Obrázek 6 – Mikrovlnná pec Hephaistos firmy Vötsch [9]

Mikrovlnná pec Hephaistos firmy Vötsch, ve které se kompozitní materiály vytvrzovaly, je zobrazena na obrázku 6. Toto zařízení měří 1,8 m v průměru, jeho délka je 3 m a poskytuje teploty až 400°C. Experimentální měření a vyhodnocování probíhalo od roku 2011. K měření byly použity vyztužené profily tloušťky 4 až 5 mm používané pro vztlakové klapky letadel. Příklady profilů, na kterých bylo měření provedeno, jsou zobrazeny na obrázku 7 [9].



Obrázek 7 – Příklady vytvrzovaných profilů [9]  
a) žebrový profil, b) C – profil, c) U – profil

První výsledky měření společnosti GKN jsou velice slibné. Použitím mikrovlnné technologie se energie potřebná na vytvrzení snížila o 80 % a vytvrzovací čas se zkrátil o 40 %. Celková doba cyklu byla 4,5 hodiny, vytvrzovací teplota 180°C a teplota zařízení 80°C. Tlak v mikrovlnné peci byl asi 0,7 MPa. Kvalita vytvrzených laminátových součástí přitom byla srovnatelná s kvalitou produktů, které byly vytvrzeny pomocí autoklávu [9].

### VYTVRZOVÁNÍ LEPIDEL

Mikrovlnný ohřev lepidla je regulovatelný ohřívací proces, ve kterém silné dipólové skupiny jako jsou např. epoxidové skupiny, sledují orientaci elektromagnetického mikrovlnného pole. V mikrovlnném poli dochází k lokálnímu přehřívání na molekulární úrovni. Vzniká tepelný rozdíl mezi polárními skupinami uvnitř molekuly a ostatními nepolárními částmi molekuly. Čím silnější je dipólový moment, tím rychleji probíhají vytvrzovací reakce [8, 10].

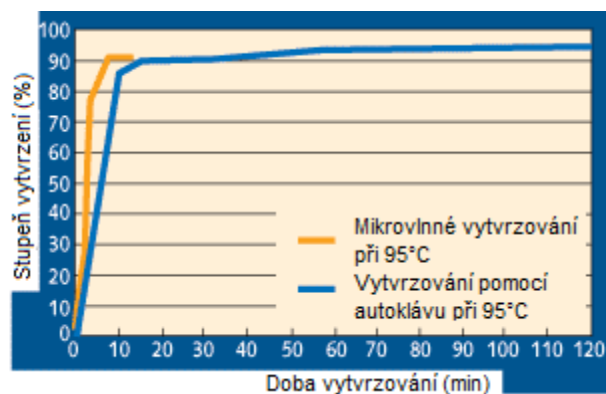
U vytvrzování lepidel je pozorována vyšší rychlost reakce během mikrovlnného ohřevu ve srovnání s konvenčním ohřevem při stejné teplotě a koncentraci složek. Vytvrzovací reakce lze navíc dosáhnout už při malých výkonech. Vytvrzování samotných lepidel pomocí variabilní frekvence mikrovln je obvykle 2 až 10 krát rychlejší než vytvrzování metodami konvenčního ohřevu. U výroby epoxidových vysokonapěťových izolátorů se použitím mikrovln zkracuje formovací proces o 15 až 45% [2, 8, 10].

V tabulce 1 je časové srovnání vytvrzení lepidel při použití konvenčního procesu vytvrzování a použití mikrovlnné technologie s variabilní frekvencí. Lepidla, na kterých bylo měření prováděno, patří k běžně používaným lepidlům. Lepidlo A se používá pro spojování a zpevňování sítě optických vláken. Kromě lepidla A byla pro měření použita epoxidová adheziva, duální UV/tepelná vytvrzovací lepidla a silikonové zalévací hmoty. Postup vytvrzování byl zvolen podle návodu výrobce daného lepidla. [9].

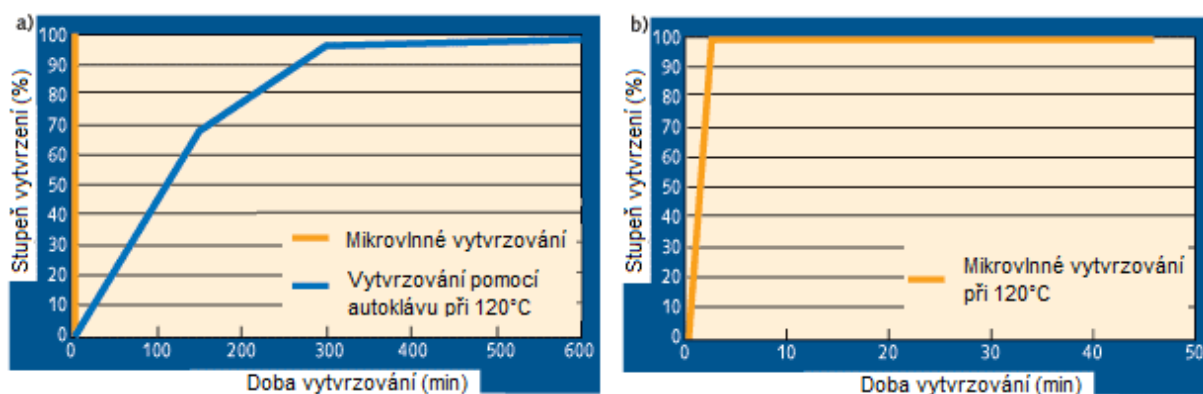
Tabulka 1 – Časové srovnání vytvrzování lepidel [9]

Lepidlo	Konvenční vytvrzování		VFM vytvrzování	
	Čas	Teplota	Čas	Teplota
A	5 min	120°C	45 sec	120°C
B	5 min	150°C	1 min	150°C
C	30 min	125°C	3 min	125°C
D	30 min	125°C	2 min	125°C
E	60 min	125°C	6 min	125°C
F	60 min	100°C	5 min	100°C
G	15 min	120°C	5 min	120°C
H	10 min	120°C	1 min	120°C
I	15 min	125°C	1 min	125°C
J	10 min	120°C	3 min	120°C

Na obrázcích 8 a 9 je zobrazeno srovnání stupně vytvrzení lepidla A. Stupně vytvrzení jsou pro jednotlivá lepidla ekvivalentní. Při běžném vytvrzování lepidla A je po 30min při 95°C stupeň vytvrzení 90%. Při použití variabilní frekvence mikrovlnné technologie a teploty 95°C nastane 90% vytvrzení již za 7 minut. Data na grafu také ukazují, že k plnému vytvrzení dochází až po mnoha cyklech. Vazby po úplném vytvrzení mají nižší pevnost a jsou více náchylné k absorpci vlhkosti. Proto je rozumné vytvrzovat do 90 až 95%. Pokud vytvrzujeme lepidlo A při 120°C, je rozdíl ve vytvrzovacích metodách patrnější. Běžné vytvrzování trvá 5 minut. Při použití mikrovlnné technologie je vytvrzování zkráceno na necelou minutu [9].



Obrázek 8 – Srovnání vytvrzování lepidel při 95°C [9]



Obrázek 9 – Srovnání vytvrzování lepidel při 120°C [9]

Dle zmíněných dat použití mikrovlnné technologie při vytvrzování lepidel vede ke značnému zkrácení vytvrzovacího procesu a současně k úsporám energie.

### 3. ŘEŠENÍ AUTOKLÁVU

Jedním z cílů této práce je posouzení možnosti zabudování mikrovlnného ohřevu do laboratorního autoklávu Leteckého ústavu. Pokud by byl autokláv rozšířen o mikrovlnnou jednotku, otevřely by se nové možnosti jeho použití.

Schéma daného autoklávu je zobrazeno v příloze 1. Vnitřní průměr pracovního prostoru je 73 cm, jeho délka 180 cm.

#### 3.1 PŘEDPOKLÁDANÉ PŘÍNOSY MIKROVLNNÉ JEDNOTKY

V daném autoklávu lze materiály zahřívat při maximální teplotě 170°C. Pokud bychom zahřívali pomocí mikrovln, teplota ohříváných předmětů by dle jejich velikosti, materiálu a době ohřevu mohla mnohonásobně překročit teplotu 170°C, přičemž by se teplota autoklávu výrazně nezvýšila. Díky tomu by bylo možné využít zařízení i pro ohřev termoplastů a jiných materiálů, které vyžadují vyšší teploty. Aby byla teplota v autoklávu rovnoměrná, zařízení vyžaduje cirkulaci vzduchu. Mikrovlnný ohřev uplatňuje působení mikrovln, které proudění vzduchu neovlivňuje. Cirkulace vzduchu a problematické chlazení autoklávu při mikrovlnném zahřívání proto nejsou potřeba. Díky tomu by použití mikrovlnné technologie vedlo ke značným energetickým úsporám, ke zjednodušení procesu a bylo by možné ohřívát na vyšší teploty. Další výhodou zavedení mikrovlnného ohřevu je objemové zahřívání produktů bez přímého ohřevu pracovního prostoru nebo samotného zařízení.

Maximální tlak, při kterém lze daný autokláv provozovat, je 0,7 MPa. Pokud bychom chtěli tuto hodnotu plně využít, bylo by třeba tomuto tlaku přizpůsobit i konstrukci mikrovlnné jednotky.

#### 3.2 NEVÝHODY ZAVEDENÍ MIKROVLNNÉ JEDNOTKY

Největší nevýhodou konstrukcí mikrovlnných zařízení je problematické zajištění rovnoměrného rozložení a působení mikrovln. Vznik stojatého elektromagnetického vlnění je ovlivněn rozměry pracovní komory, frekvencí generovaných mikrovln i vlastnostmi ohříváných předmětů. Průběh teploty se pro jednotlivé předměty liší dle jejich materiálového složení, rozměrů a aktuální teploty. Mikrovlnná jednotka autoklávu by musela mít rozměry vyhovující mikrovlnné technologii, samotnému autoklávu i pokud možno ohříváním předmětům. Tato jednotka by také měla být schopna předměty zahřívat na vyšší teploty a fungovat při vyšším tlaku. V případě nesplnění těchto parametrů by mikrovlnný ohřev nebyl rovnoměrný a nebyla by využita kapacita autoklávu.

Nevýhodou mikrovlnné technologie je rovněž nemožnost použití tohoto typu ohřevu k zahřívání materiálů obsahujících kovy.

Daný autokláv nebyl konstruován pro působení elektromagnetického pole mikrovln. Není zde zaručeno neindukování napětí v kovových částech stroje a není zaručena nepropustnost pro vlnění. Provoz mikrovlnné jednotky by proto nebyl bezpečný.

# EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentálního měření bylo ověřit teoretické předpoklady účinnosti a vhodnosti použití mikrovlnného ohřevu při vytvrzování lepidel a kompozitních materiálů. Na vybraných vzorcích z materiálů používaných v letecké výrobě motorových letadel byla provedena srovnávací měření. V rámci těchto měření byla vytvrzována laminátová pryskyřice obsahující tvrdidlo. Tento materiál jsme vytvrzovali standardním konvenčním ohřevem a pomocí mikrovln. Hodnotícím srovnávacím kritériem vytvrzení byla tvrdost materiálu. V dalších měřeních byl prověřen vliv působení elektromagnetického pole na kompozitní materiály.

K experimentálnímu ohřevu pomocí mikrovlnné technologie jsme použili domácí mikrovlnnou troubu. Mikrovlnné trouby jsou univerzálním přístrojem pro počáteční laboratorní vyšetřování. Nicméně tato zařízení jsou konstruována pro domácí ohřev potravin obsahujících vodu a nejsou určena pro provoz při vysokých teplotách. Také nemají regulaci teploty a obecně mají velmi primitivní regulátor výkonu. Ačkoli jsou mikrovlnné trouby užitečné pro počáteční testování, z experimentálních měření mohou vyplývat velmi zavádějící výsledky. Obecně se měření zpřesní s rostoucími otáčkami reflektoru. Naopak přesnost měření bude horší při zahřívání malých předmětů, ve kterých se rozptýlí jen malá část mikrovlnné energie [11].

## 1. POUŽITÉ PŘÍSTROJE

- Mikrovlnné zařízení: Mikrovlnná trouba Zanussi model ZM17M

K ohřevu a vytvrzování materiálu pomocí mikrovlnné technologie byla použita mikrovlnná trouba Zanussi. Toto zařízení pomocí velmi jednoduché regulace příkonu ovlivňuje množství vytvářených mikrovln. Podle nastaveného příkonu se mikrovlny produkují v určitých časových intervalech. Dle četnosti těchto intervalů je dán průběh a rychlost samotného ohřevu. Maximální výkon trouby je 700 W. Frekvence generovaného záření je 2450 MHz.

- Teploměr: Digitální IR teploměr CEM IR 98

Rozsah měření teploměru je od  $-35^{\circ}\text{C}$  do  $260^{\circ}\text{C}$ , přesnost měření  $\pm 2\%$ .

Pomocí infračerveného paprsku jsme zjišťovali teplotu vzorků. Toto měření zachytí pouze povrchovou teplotu vzorku a je velmi citlivé na přesné namíření na daný povrch. Nicméně stanovení teploty je velmi rychlé a bezkontaktní, díky čemuž nedochází k velkým tepelným ztrátám a ovlivnění vzorku.

- Měřidlo tvrdosti: Analogový přístroj pro měření tvrdosti Shore D

Stupnice Shore D je vhodná pro srovnávací měření tvrdosti tvrdé gumy a umělohmotných materiálů, akrylového skla, tuhých plastů, vinylových desek, polystyrenu apod. Rozsah stupnice je od 0 do 100 [-].



## 2. VYTVRZOVANÉ VZORKY

Jako vzorky použijeme 3 různé materiály:

- Laminátovou pryskyřici MGS L 285 s tvrdidlem H 287
- Kompozitní materiál se skleněnými vlákny
- Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny

### 2.1 PRYSKYŘICE MGS L 285 S TVRDIDLEM H 287

Laminátové pryskyřice se používají např. pro výrobu kluzáků, motorových letadel, lodí a nářadí. Provozní teplota pryskyřice bez tepelného zpracování je  $-60$  až  $50^{\circ}\text{C}$ , po tepelné úpravě  $-60^{\circ}\text{C}$  až  $80^{\circ}\text{C}$ . Tepelné zpracování pryskyřice probíhá standardními vytvrzovacími metodami. Podle typu laminovaného materiálu (např. sklo, uhlík, aramidová vlákna) je doba zpracování cca od 45 min do 4 hodin při teplotách v rozmezí 10 až  $50^{\circ}\text{C}$ . Epoxidové pryskyřice MGS L 285 mají extrémně dobrou fyziologickou kompatibilitu a dobré mechanické a termické vlastnosti. Pokud se použije pryskyřice společně s tvrdidly, je zaručena úplná impregnace vyztužených vláken a další speciální vlastnosti. Systém laminované pryskyřice se vyznačuje vysokou statickou a dynamickou zatížitelností [16].

Pro smíchání pryskyřice a tvrdidla jsou dány přesné poměry, v jakých musí být tyto složky obsaženy. Hmotnostní poměr laminátové pryskyřice k tvrdidlům H 287 je  $100 : 40 \pm 2$ , objemový poměr je  $100 : 50 \pm 2$ . Nepřesné dávkování vede k neúplnému vytvrzení a ke zhoršení mechanických vlastností produktů. Kromě přesného dávkování je důležité, aby byla pryskyřice s tvrdidlem důkladně promíchána [16].

Po smíchání pryskyřice s tvrdidlem naléváme materiál do formy a necháváme ztuhnout 24 hodin při pokojové teplotě  $23^{\circ}\text{C}$ . Poté tepelně zpracujeme. Doba a teplota dotvrzování je pro jednotlivé pryskyřice a tvrdidla různá. Při použití laminátové pryskyřice MGS L 285 s tvrdidlem H 287 standardními metodami dotvrzujeme 15 hodin při teplotě  $60^{\circ}\text{C}$ . Některé mechanické vlastnosti vytvrzeného materiálu jsou zapsané v tabulce 2 [16].

Tabulka 2 – Mechanické vlastnosti pryskyřice MGS L 285 s tvrdidlem H 287 [16]

Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Rázová houževnatost [kJ/m <sup>2</sup> ]	Poměrné prodloužení [%]
1,18 – 1,20	3000 – 3300	110 – 120	70 – 80	120 – 140	45 – 55	5,0 – 6,5

Rozměry vzorku:

- Vzorky lité do silikonové formy: přibližně 3 x 15 x 100 mm
- Vzorky ohříváné v mikrovlnné troubě viz měření 3.1 B): přibližně 3 x 15 x 40 mm

## 2.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁL SE SKLENĚNÝM VLÁKNEM

Složení materiálu:

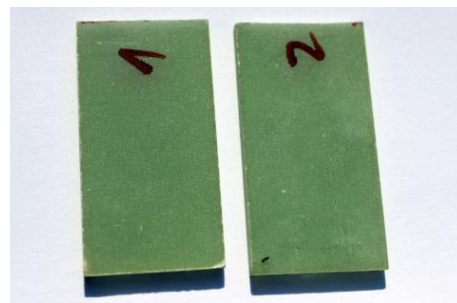
- 10 vrstev skleněné tkaniny Interglas 92.125, 280 g/m<sup>2</sup>, Kepr 2/2
  - objemový podíl vláken asi 40 %
- Epoxidová pryskyřice MGS L285 + tvrdidlo H 286

Standardní vytvrzování:

- Vakuově při přetlaku 80 kPa, 12 hod při 23°C a následné dotvrzení 12 hod při 55°C

Rozměry vzorku:

- Přibližně 3 x 25 x 50 mm



Obrázek 10 – Vzorky z kompozitního materiálu se skleněným vláknem

Fotografii vzorku z tohoto materiálu nalezneme na obrázku 10.

## 2.3 KOMPOZITNÍ MATERIÁL S UHLÍKOVÝM VLÁKNEM

Složení materiálu:

- Vláknó Tenax HTS 5631, 12k, uspořádání jednorozměrné
  - objemový podíl vláken přibližně 70%
- Epoxidová pryskyřice MGS L285 + tvrdidlo H 287

Standardní výroba a vytvrzování:

- Mokrě vrstvení vláken do dvojdílných forem stahovaných svěrkami
- Vytvrzované za pokojové teploty

Rozměry vzorku:

- Přibližně 4 x 20 x 50 mm



Obrázek 11 – Vzorky z kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem

Fotografii vzorku z tohoto materiálu nalezneme na obrázku 11.

### 3. VLASTNÍ MĚŘENÍ

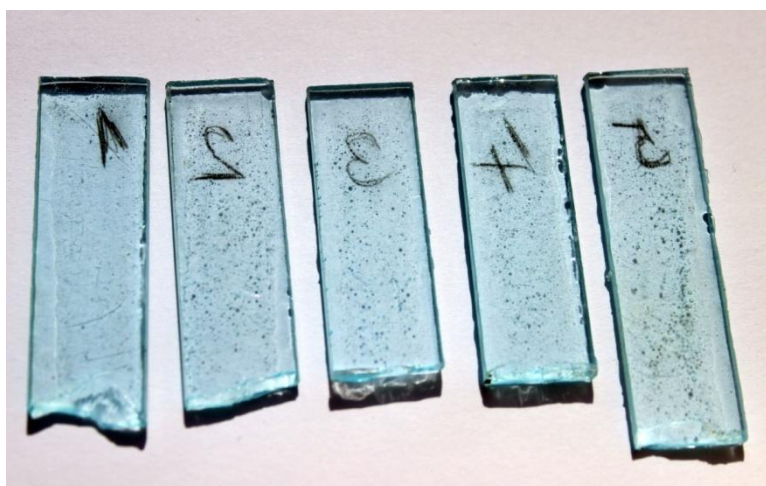
#### 3.1 PRYSKYŘICE MGS L 285 S TVRDIDLEM H 287

##### A) STANDARDNÍ VYTVRZOVÁNÍ

Pro standardní vytvrzení jsme aplikovali postup dle výrobce. Po důkladném promíchání pryskyřice s doporučenou dávkou tvrdidla jsme odlévali vzorky do silikonových forem. V těchto formách se materiál 24 hodin vytvrzoval při pokojové teplotě. Následně jsme vzorky dotvrzovali 15 hodin při teplotě 60°C. Před a po dotvrzení jsme zaznamenali tvrdost podle Shore D stupnice. Naměřené tvrdosti jsou zapsány v tabulce 3. Vzorky použité při tomto měření jsou zobrazeny na obrázku 12.

Tabulka 3 – Tvrdost pryskyřice při vytvrzování standardními metodami

Označení vzorku	Tvrdost vzorku před dotvrzením [-]	Tvrdost vzorku po dotvrzení [-]			
		1. Měření	2. Měření	3. Měření	Průměrná hodnota
1	84,0	86,5	87,5	86,5	86,8
2	83,5	86,5	87,0	87,5	87,0
3	84,5	86,0	86,0	86,0	86,0
4	83,5	86,0	86,5	85,5	86,0
5	84,0	87,5	86,0	86,5	86,5
Průměrná hodnota	<b>83,9</b>	86,5	86,6	86,4	<b>86,5</b>



Obrázek 12 – Vzorky z pryskyřice po standardním vytvrzování

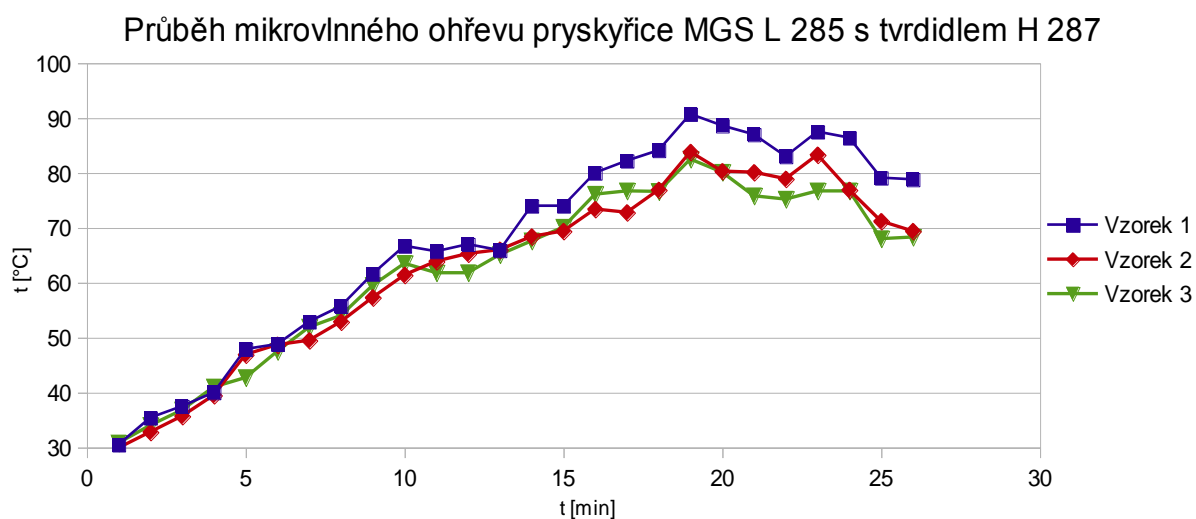
Průměrná tvrdost vzorku před dotvrzováním byla 83,9, po dotvrzení 86,5. Dotvrzením materiálu došlo k nárůstu jeho tvrdosti o 2,6 jednotek stupnice Shore D.

**B) PŮSOBENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE**

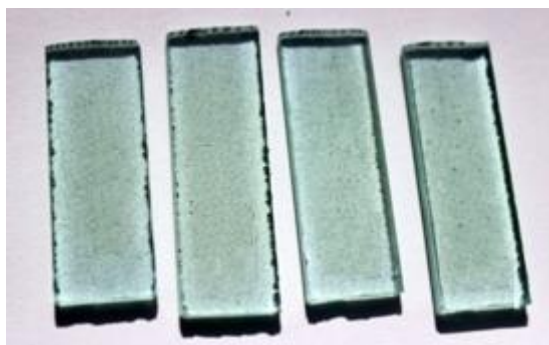
Abychom zjistili reakci pryskyřice na elektromagnetické pole, prováděli jsme kontrolní ohřev vzorků v mikrovlnné troubě. Zahřívání jsme vzorky, které byly standardně vytvrzené obdobně jako v měření A). Při nastavení minimálního příkonu mikrovlnné trouby jsme zaznamenávali průběh teploty. Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 4. Průběh teploty je znázorněn na obrázku 13. Vzorky použité při tomto měření jsou zobrazeny na obrázku 14.

Tabulka 4 – Průběh mikrovlnného ohřevu vzorku z pryskyřice

	t [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Vzorek 1	t <sub>1</sub> [°C]	21	31	35	38	40	48	49	53	56
Vzorek 2	t <sub>2</sub> [°C]	24	30	33	36	40	47	49	49	53
Podklad	t <sub>3</sub> [°C]	26	30	34	37	41	43	48	52	54
	t [min]	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Vzorek 1	t <sub>1</sub> [°C]	62	67	66	67	66	74	74	80	82
Vzorek 2	t <sub>2</sub> [°C]	57	61	64	65	66	68	69	73	73
Podklad	t <sub>3</sub> [°C]	60	64	62	62	65	68	70	76	77
	t [min]	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Vzorek 1	t <sub>1</sub> [°C]	84	91	87	87	83	88	86	79	79
Vzorek 2	t <sub>2</sub> [°C]	77	84	80	80	79	83	77	71	69
Podklad	t <sub>3</sub> [°C]	77	83	80	76	75	77	77	68	68



Obrázek 13 – Průběh mikrovlnného ohřevu pryskyřice



Obrázek 14 – Vzorky z pryskyřice ohříváné působením mikrovln

V tomto měření jsme ověřili, že dipóly epoxidových molekul sledují orientaci působícího pole a mohou být pomocí mikrovln ohříváné.

V určitých oblastech grafického řešení je vidět teplotní prodleva. Materiál se v těchto úsecích neohřívá nebo jeho teplota dokonce klesala. Tato prodleva je způsobena nerovnoměrnou produkcí a rozložením mikrovln, ochlazováním materiálu při odečítání teplot, nepřesným stanovením teploty a chybou měření.

Při regulaci příkonu domácí mikrovlnné trouby se mění intervaly odběru výkonu. Mikrovlnné zařízení produkuje mikrovlny pouze v určitých intervalech. Při použití dané mikrovlnné trouby byla velikost těchto intervalů značná. Při nastavení minimálního příkonu stroj přibližně 40 sekund neprodukoval a poté asi 3 – 5 sekund produkoval mikrovlny. V okamžicích, kdy nebyly produkovány mikrovlny, nedocházelo k ohřevu.

Pro měření teploty vzorků bylo nutné proces mikrovlnného ohřevu vzorků přerušovat. Během proměřování teplot se vzorky ochlazovali. Rychlost ochlazování je závislá na gradientu teplot. Jelikož při vyšších teplotách byl teplotní gradient větší, docházelo k rychlejšímu ochlazování vzorků. Také kvůli ochlazování pozorujeme, že křivky jednotlivých vzorků v grafech nesplývají.

Nerovnoměrné rozložení elektromagnetického pole uvnitř mikrovlnné trouby způsobuje rozdílný ohřev vzorků. Kvůli nepřesnému pokrytí mikrovln se teplota v rámci jednoho vzorku lišila až o 3°C. Teplota jednotlivých vzorků se přitom lišila až o 11°C.

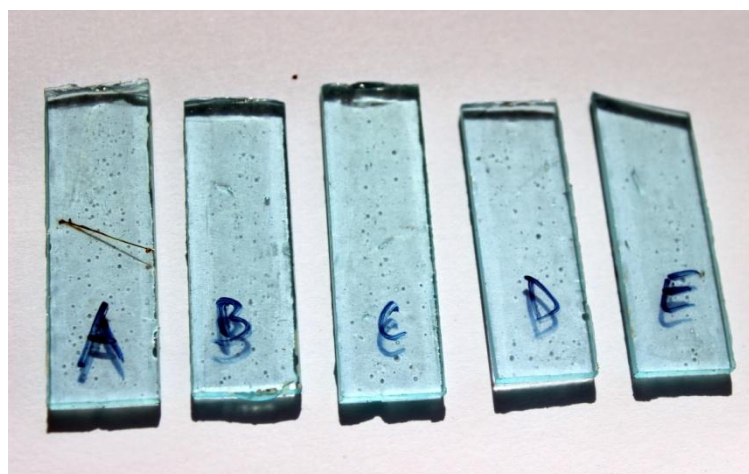
### C) DOTVRZOVÁNÍ POMOCÍ MIKROVLN

Při měření C jsme aplikovali obdobný postup jako při standardním vytvrzování. Vzorky jsme odlévali do silikonových forem a ponechali 24 hodin při pokojové teplotě. Následně jsme prováděli dotvrzování v mikrovlnné troubě.

Mikrovlnné zařízení jsme nastavili na minimální příkon, se kterým se vzorky zahřívaly po dobu 2,5 hodiny. Jejich teplota přitom nepřesáhla 100°C. Před dotvrzením, po 1 a po 2,5 hodinách ohřevu jsme zaznamenali tvrdost podle stupnice Shore D. Naměřené tvrdosti jsou zapsány v tabulce 5. Vzorky použité při tomto měření jsou zobrazeny na obrázku 15.

Tabulka 5 – Tvrdost pryskyřice po dotvrzení pomocí mikrovln

Označení vzorku	Tvrdost před dotvrzováním [-]				Tvrdost po 1 hodině ohřevu [-]	Tvrdost po 2,5 hodinách ohřevu [-]			
	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota	Naměřená hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota
A	81	81	81	81,0	86	87,5	87,5	87,5	87,5
B	80	81	82	81,0	86	86,5	88,0	87,5	87,3
C	81	81	82	81,3	86	88,0	89,0	87,5	88,2
D	80	80	80	80,0	86	87,0	89,0	87,5	87,8
E	80	80	80	80,0	86	86,6	87,0	88,0	87,2
Průměrná hodnota	80,4	80,6	81,0	<b>80,7</b>	<b>86,0</b>	87,1	88,1	87,6	<b>87,6</b>



Obrázek 15 – Vzorky z pryskyřice dotvrzené pomocí mikrovln

Průměrná tvrdost vzorků před dotvrzováním byla 80,7. Po 1 hodině ohřevu se průměrná tvrdost zvýšila na 86,0, po 1,5 hodině dalšího zahřívání byla průměrná tvrdost 87,6. Během mikrovlnného ohřevu tedy došlo k nárůstu tvrdosti o 6,9 jednotek stupnice Shore D. K podstatnému navýšení tvrdosti došlo v první hodině ohřevu.

**D) VYTVRZOVÁNÍ POMOCÍ MIKROVLN**

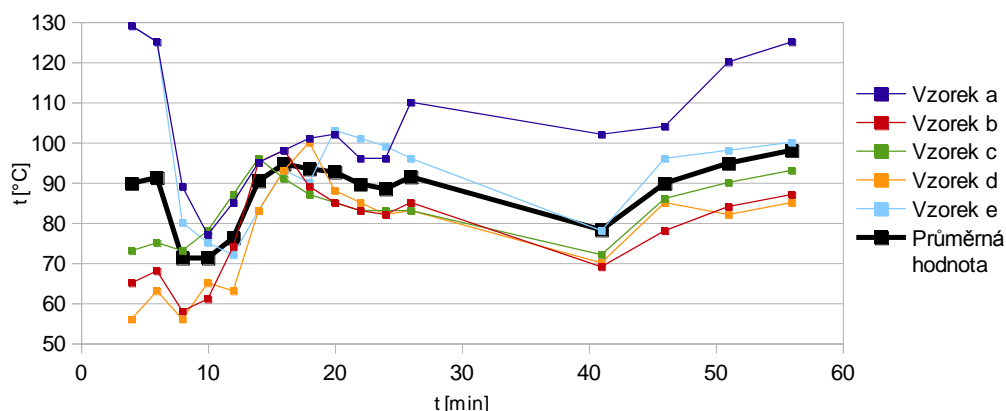
V tomto měření jsme vzorky ihned po odlití vytvrzovali pomocí mikrovln.

Celková doba mikrovlnného ohřevu byla asi 1 hodinu. V průběhu ohřevu jsme zaznamenávali teplotu vzorků. Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 6, jejich grafické znázornění nalezneme na obrázku 16.

Po 26 minutách ohřevu a po 56 minutách ohřevu jsme měřili tvrdost vzorků. Hodnoty tvrdosti jsou zapsány v tabulce 7. Vzorky, které byly použity pro toto měření, jsou zobrazeny na obrázku 17.

Tabulka 6 – Teplota pryskyřice při mikrovlnném vytvrzování

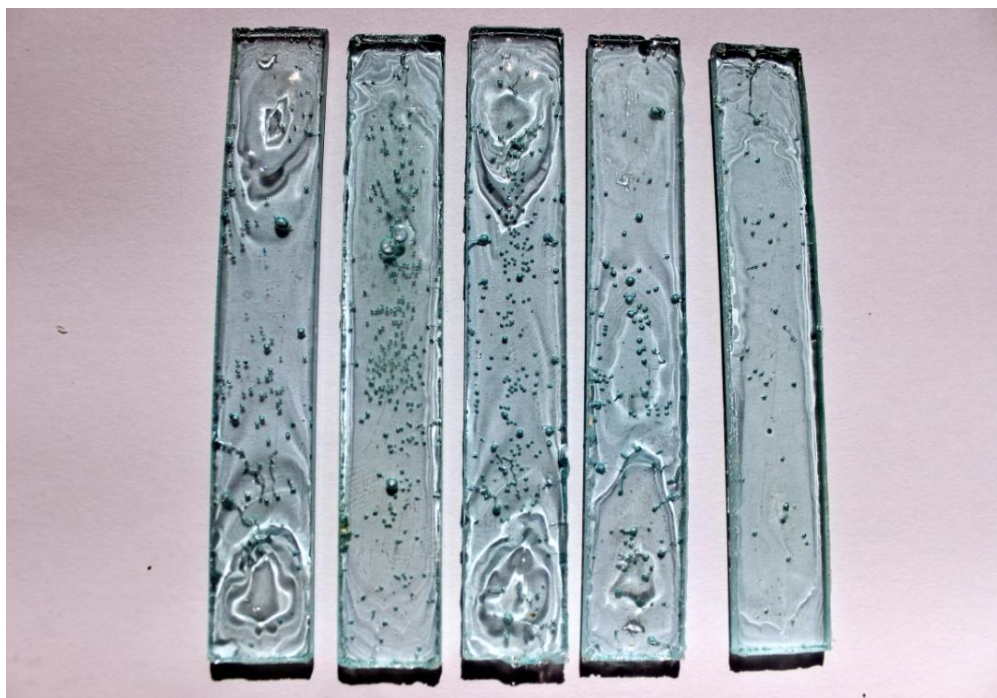
t [min]	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	41	46	51	56
Vzorek	Teplota vzorků: t [°C]															
a	129	125	89	77	85	95	98	101	102	96	96	110	102	104	120	125
b	65	68	58	61	74	95	98	89	85	83	82	85	69	78	84	87
c	73	75	73	78	87	96	91	87	85	83	83	83	72	86	90	93
d	56	63	56	65	63	83	93	100	88	85	82	83	70	85	82	85
e	129	125	80	75	72	83	93	90	103	101	99	96	78	96	98	100
Průměrná hodnota	89,8	91,2	71,2	71,2	76,2	90,4	94,6	93,4	92,6	89,6	88,4	91,4	78,2	89,8	94,8	98,0



Obrázek 16 – Průběh teploty pryskyřice při vytvrzování

Tabulka 7 – Tvrdost pryskyřice při mikrovlnném vytvrzování

Označení vzorku	Tvrdost vzorku po 26 min ohřevu [-]				Tvrdost vzorku po 56 min ohřevu [-]			
	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota
a	84	85	84	84,3	88	87	87	87,3
b	75	83	85	81,0	86	86	87	86,3
c	84	85	85	84,7	87	87	85	86,3
d	84	80	84	82,7	86	85	85	85,3
e	83	83	84	83,3	85	85	86	85,3
Průměrná hodnota	82,0	83,2	84,4	<b>83,2</b>	86,4	86,0	86,0	<b>86,1</b>



Obrázek 17 – Vzorčky pryskyřice vytvrzené pomocí mikrovln

Nahrazení standardního postupu vytvrzování mikrovlnným ohřevem vedlo ke značnému zkrácení procesu a přitom byla výsledná tvrdost vzorků srovnatelná. Po necelé hodině mikrovlnného ohřevu při nastavení minimálního příkonu byla naměřena tvrdost přibližně 86,1 jednotek podle stupnice Shore D.

Během vytvrzování se však v materiálu vytvořili významné deformace. Na Obrázek 17 můžeme pozorovat nerovnoměrné rozložení materiálu s velkými vzduchovými bublinkami uvnitř struktury. Rozdíl ve výšce profilu je až 1 mm, průměr bublin dosahuje až 2 mm a místy tyto bubliny vytvořili centimetrové i delší trhliny. Kvůli tomuto nevhodnému uspořádání lze očekávat, že materiálové charakteristiky např. pevnost nebo houževnatost budou podstatně horší. Také lze usoudit, že v materiálu s touto strukturou bude redukovat mnohonásobně větší napětí a snadněji dojde k dalšímu poškození.

Deformace, které ve vzorcích vznikly, jsou způsobeny nerespektováním výrobního postupu doporučeného výrobcem a nerovnoměrným ohřevem. Na obrázku 16 je zaznamenáno, jak se časový průběh i teplota jednotlivých vzorků výrazně lišili. Protože byl materiál ihned po odlití vytvrzován za vysokých teplot, došlo ke shlukování vzduchu uvnitř struktury. Také celkové množství vzduchu uvnitř struktury je oproti ostatním výrobním postupům mnohonásobně větší. Při takto vysokých teplotách ihned po odlití materiál ztuhl velice rychle a vzduch pak ve struktuře zůstal.

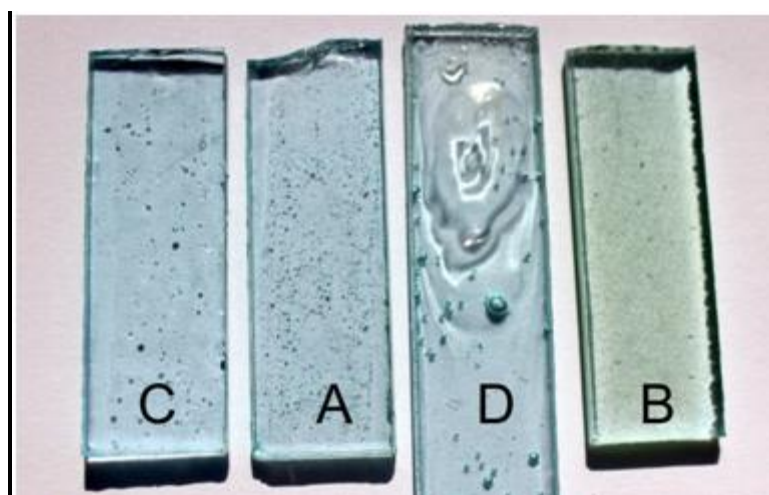


### E) SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH TVRDOSTÍ

Souhrn naměřených tvrdostí je zaznamenán v tabulce 8, na obrázku 18 je porovnání struktury vzorků.

Tabulka 8 – Tvrdost pryskyřice při jednotlivých měřeních

Provedené měření	Stav vzorků	Naměřená tvrdost
Měření A: standardní vytvrzování	24 hod při pokojové teplotě	83,9
	24 hod při pokojové teplotě, následně dotvrzení 15 hod při teplotě 60°C	<b>86,5</b>
Měření C: dotvrzování pomocí mikrovln	24 hod při pokojové teplotě	80,7
	24 hod při pokojové teplotě, následně 1 hod mikrovlnného ohřevu	86,0
	24 hod při pokojové teplotě, následně 2,5 hod mikrovlnného ohřevu	<b>87,6</b>
Měření D: mikrovlnné vytvrzování	26 min mikrovlnného ohřevu	83,2
	56 min mikrovlnného ohřevu	<b>86,1</b>



Obrázek 18 – Porovnání vzorků z epoxidové pryskyřice:  
C, A, D, B – označení vzorku podle měření

Konečné tvrdosti vzorků při různých metodách vytvrzování jsou srovnatelně velké. Jejich velikost je přibližně 87 jednotek stupnice Shore D. Tvrdosti vzorků 24 hodin po odlití se nepatrně liší. Je to způsobeno rozdílným výrobním postupem vzorků a nepřesným časováním 24 hodin.

Použitím mikrovlnného ohřevu bylo výsledné tvrdosti dosaženo v podstatně kratším čase. K dotvrzení i celkovému vytvrzení stačila 1 hodina ohřevu. Při dotvrzování byla výsledná struktura srovnatelná se strukturou získanou standardním dotvrzováním 15 hod při teplotě 60°C. Při mikrovlnném vytvrzování ihned po odlití vznikla deformovaná struktura. Mikrovlnné vytvrzení dané pryskyřice ihned po odlití není proto vhodné.

Vzorek B je jinak zbarvený. Barevné odlišení od ostatních je způsobeno nepřesnostmi vzniklými během výroby vzorku.

### 3.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁL SE SKLENĚNÝM VLÁKNEM

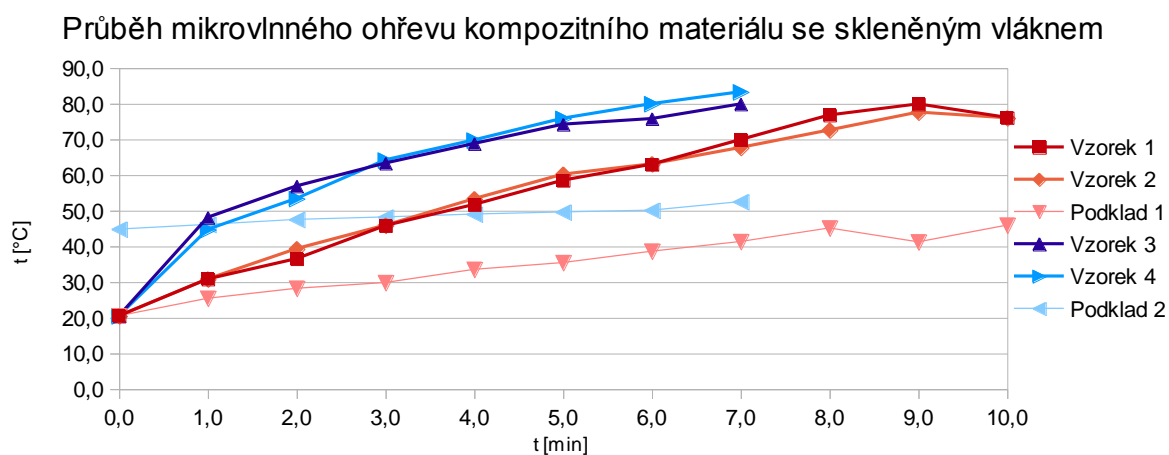
Vzorky kompozitního materiálu se skleněným vláknem byly ohřívány při příkonu nastaveném na 250 W. Naměřené teploty jsou zaznamenány v tabulce 9. Průběh teploty je znázorněn na obrázku 19

Podle naměřených hodnot můžeme usoudit, že v elektromagnetickém poli dochází k ohřevu kompozitního materiálu se skleněným vláknem.

Měření teploty jsme prováděli dvakrát. V obou měřeních byla zaznamenána také teplota podkladu, na kterém byly vzorky umístěny. Teplota podkladu je zde uvažována jako vliv prostředí. Jelikož měly vzorky malou tloušťku, byl vliv prostředí významný. Rozdílný průběh teplot je zaznamenán v grafickém řešení pro obě měření.

Tabulka 9 – Průběh mikrovlnného ohřevu kompozitního materiálu se skleněným vláknem

1. MĚŘENÍ	t [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vzorek 1	t <sub>1</sub> [°C]	21	31	37	46	52	59	63	70	77	80	76
Vzorek 2	t <sub>2</sub> [°C]	21	31	39	46	53	60	63	68	73	78	76
Podklad	t <sub>3</sub> [°C]	21	25	28	30	34	35	39	41	45	41	46
2. MĚŘENÍ	t [min]	0	1	2	3	4	5	6	7			
Vzorek 1	t <sub>1</sub> [°C]	21	48	57	63	69	74	76	80			
Vzorek 2	t <sub>2</sub> [°C]	21	45	53	64	70	76	80	83			
Podklad	t <sub>3</sub> [°C]	45	46	48	48	49	50	50	53			



Obrázek 19 – Průběh mikrovlnného ohřevu kompozitního materiálu se skleněným vláknem

### 3.3 KOMPOZITNÍ MATERIÁL S UHLÍKOVÝM VLÁKNEM

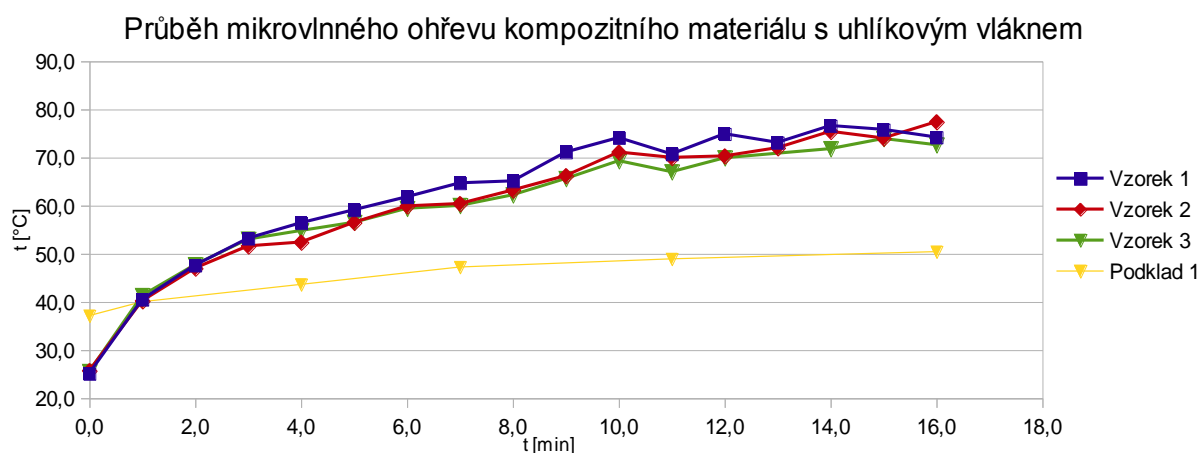
Při příkonu 250 W dochází k extrémně rychlému nárůstu teplot uvnitř uhlíkového kompozitního materiálu. Přibližně po 3 minutách ohřevu vystoupala teplota vzorku nad 100°C. Proto jsme tento materiál zahřívali při nastavení minimálního příkonu mikrovlnné trouby. Naměřené teploty vzorků jsou zaznamenány v tabulce 10. Průběhy teplot vzorků jsou znázorněny na obrázku 20.

Z počátku ohřevu došlo k prudkému navýšení teploty. Později se hodnota teploty přibližně ustálila na 75°C.

Teplota vzorků z kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem se působením elektromagnetického pole rychle zvyšovala. Během zahřívání na povrchu vzorku docházelo k jiskření. V uhlíkových vláknech se indukovaly vířivé proudy, které tento vzorek velice rychle zahřívaly.

Tabulka 10 – Průběh mikrovlnného ohřevu kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem

	t [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Vzorek 1	t <sub>1</sub> [°C]	25	41	48	53	56	59	62	65	65
Vzorek 2	t <sub>2</sub> [°C]	26	40	47	52	52	57	60	60	63
Vzorek 3	t <sub>3</sub> [°C]	26	41	48	53	55	57	59	60	62
Podklad	t <sub>4</sub> [°C]	37	40			44			47	
	t [min]	9	10	11	12	13	14	15	16	
Vzorek 1	t <sub>1</sub> [°C]	71	74	71	75	73	77	76	73	
Vzorek 2	t <sub>2</sub> [°C]	66	71	70	70	72	75	74	77	
Vzorek 3	t <sub>3</sub> [°C]	66	69	67	70		72	74	73	
Podklad	t <sub>4</sub> [°C]			49					50	



Obrázek 20 – Průběh mikrovlnného ohřevu kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá mikrovlnným ohřevem a jeho využitím při vytvrzování. Jsou zde zmíněny základní principy mikrovlnného ohřevu a je popsána konstrukce mikrovlnných zařízení.

Mikrovlnný ohřev lze uplatnit v celé řadě průmyslových odvětví. Hlavními výhodami mikrovlnné technologie jsou nízké energetické náklady, rychlost procesu, možnost selektivního zahřívání, čistý a nehluký provoz, bezpečnost, možnost automatizace a kontinuálního zpracování.

Vytvrzování lepidel a kompozitních materiálů je energeticky i časově náročný proces. Pokud nahradíme klasický konvenční ohřev mikrovlnnou technologií, celý proces vytvrzování se výrazně zrychlí a bude energeticky méně náročný. Konkrétní úspory energie a času jsou závislé na pracovním postupu, na vytvrzovaných předmětech i na konstrukci a parametrech mikrovlnného zařízení. Dosažitelné energetické a časové úspory se pohybují v širokém rozmezí. Mohou dosahovat od několika nezajímavých procent až po hodnoty kolem 80 %. Zajištění rovnoměrného mikrovlnného ohřevu však bývá problematické. Jak již bylo zmíněno, mikrovlnná technologie je citlivá na konstrukci a parametrech mikrovlnných zařízení i na vlastnostech ohříváných předmětů. Materiálové složení, tvar a rozměry ohříváných produktů hrají zásadní roli a dokonce i během ohřevu mění aktuální rozložení působícího elektromagnetického pole.

V této práci se také zabývám možností zabudování mikrovlnné jednotky do stávajícího autoklávu Leteckého ústavu. Předpokládaným přínosem zavedení mikrovlnné jednotky je možnost zahřívání předmětů na vyšší teploty při výrazně nižších energetických nákladech. Nevýhodou by naopak byla problematická konstrukce takového zařízení. Nejvhodnějším konstrukčním řešením by se zdálo umístit mikrovlnnou komoru do pracovního prostoru autoklávu, generátor vlnění ponechat mimo autokláv a mikrovlny mezi generátorem a ohřívacím prostorem dopravovat ve vlnovodu. Konstrukce takové jednotky by sice byla možná, nicméně příliš by se nelišila od konstrukce samostatného mikrovlnného zařízení. Zavedení mikrovln přímo do pracovního prostoru autoklávu není zcela vhodné. V autoklávu by nevznikalo rovnoměrné stojaté vlnění potřebné k optimálnímu ohřevu a není zaručena bezpečnost provozu. Kdybychom v autoklávu chtěli zahřívát klasickým odporovým ohřevem i pomocí mikrovln, museli bychom konstrukci celého autoklávu pozměnit tak, aby vyhovovala oběma typům ohřevu.

Pro ověření teoretických předpokladů byla v rámci experimentálního řešení provedena srovnávací měření při vytvrzování laminátové pryskyřice MGS L 285 s tvrdidlem H 287. Podle naměřených dat můžeme usoudit, že použití mikrovlnné technologie vedlo ke snížení energetických nákladů a ke zkrácení procesu vytvrzování. Naměřená tvrdost vzorků vytvrzovaných konvenčním ohřevem a pomocí mikrovln byla přitom srovnatelná. Při mikrovlnném vytvrzování ihned po odlití však došlo ke zniku deformované struktury. Poškození vzorků bylo způsobeno nerovnoměrným rozložením mikrovln uvnitř použitého zařízení a nerespektováním výrobního postupu doporučeného výrobcem.

Kromě pryskyřice jsme experimentálně měřili průběh teploty při mikrovlnném zahřívání kompozitních materiálů se skleněným a uhlíkovým vláknem. Oba tyto materiály se v mikrovlnném poli zahřívají a proto bychom tento druh ohřevu mohli pro jejich vytvrzování využít.

## SEZNAM LITERATURY

- [1] ČERNÝ, V. Elektrický ohřev mikrovlnný (7). *Elektro: Časopis pro elektrotechniku*. roč. 2005, č. 05., str. 56. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26310](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26310)
- [2] ČERNÝ, Václav. Elektrický ohřev mikrovlnný (8). *Elektro: Časopis pro elektrotechniku*. roč. 2005, č. 06, str. 64-65. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26362](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26362)
- [3] ČERNÝ, Václav. Elektrický ohřev mikrovlnný (9). *Elektro: Časopis pro elektrotechniku*. roč. 2005, č. 07, str. 56. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektricky-ohrev-mikrovlnny-9-26398.html>
- [4] ČERNÝ, Václav. Elektrický ohřev mikrovlnný (10 – dokončení). *Elektro: Časopis pro elektrotechniku*. roč. 2005, č. 08, str. 104-105. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26411](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26411)
- [5] KOŠŤÁL, J. Mikrovlnka mýtů zbavená aneb je důvod k obavám?. *ELEKTRO: časopis pro elektrotechniku*. 2005, č. 07, s. 20-30. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26377](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26377)
- [6] GYMNÁZIUM BRNO KŘENOVÁ 36. *Elektromagnetické vlnění* [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.gymkren.cz/download/ucebni-texty/fyzika/f24.pdf>
- [7] NOHAVOVÁ, T., T. JEŽKOVÁ a T. MARKOVÁ. FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ ČVUT V PRAZE. *Mikrovlny*. [2009]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2008-2009/Leto09/proc/mikrovlny.pdf>
- [8] ROMILL, spol. s r.o. *Mikrovlnný ohřev* [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.romill.cz/cz/mikrovlny>
- [9] SLOAN, J. Microwave: An alternative to the autoclave?: Aerospace composites manufacturer GKN evaluates microwave oven practicality and cost-effectiveness. *Composites world: High-Performance Composites* [online]. 2011, č. 05 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/microwave-an-alternative-to-the-autoclave>
- [10] GEISLER, B., B. ADAMS a I. AHMAD. Variable frequency microwave curing. *Solid State Technology: Insights for Electronics Manufacturing* [online]. 2002, č. 04 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://electroi.com/blog/2002/04/variable-frequency-microwave-curing/>
- [11] BRADSHAW, S.M., E.J. van WYK a J.B. de SWARDT. Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1998, s. 202-212. Dostupné z: <http://www.saimm.co.za/Journal/v098n04p201.pdf>

- [12] KOHOUT, Jiří. *"Mikrovlny" podpořené jednoduchými pokusy*. Plzeň, 2009. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Pedagogická. Vedoucí práce PaedDr. Gerhard Höfer, CSc.
- [13] HUEI, S., L. SCHENGXU a L. W. KEAT. *Microwave Tubes* [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://microwavetubes.iwarp.com/index.html>
- [14] Elektromagnetické spektrum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2014 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9\\_spektrum](http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum)
- [15] Magnetron. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2012 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetron>
- [16] HEXION. Laminating resin MGS L 285: Hardeners MGS 285, 286, 287. Stuttgart, 2006.

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Schéma autoklávu

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Elektromagnetické spektrum [14].....	12
Obrázek 2 – Působení mikrovlnného záření na různé druhy materiálů [2].....	14
Obrázek 3 – Schéma uspořádání ohřívací komory [1] .....	16
Obrázek 4 – Schéma uspořádání mikrovlnného tunelového ohřívacího zařízení [2].....	17
Obrázek 5 – Uspořádání magnetronu [13] .....	18
Obrázek 7 – Příklady vytvrzovaných profilů [9].....	21
Obrázek 6 – Mikrovlnná pec Hephaistos firmy Vötsch [9] .....	21
Obrázek 8 – Srovnání vytvrzování lepidel při 95°C [10].....	23
Obrázek 9 – Srovnání vytvrzování lepidel při 120°C [10].....	23
Obrázek 10 – Vzorky z kompozitního materiálu se skleněným vláknem .....	27
Obrázek 11 – Vzorky z kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem.....	27
Obrázek 12 – Vzorky z pryskyřice po standardním vytvrzování .....	28
Obrázek 13 – Průběh mikrovlnného ohřevu pryskyřice .....	29
Obrázek 14 – Vzorky z pryskyřice ohřívané působením mikrovln.....	30
Obrázek 15 – Vzorky z pryskyřice dotvrzené pomocí mikrovln.....	31
Obrázek 16 – Průběh teploty pryskyřice při vytvrzování.....	32
Obrázek 17 – Vzorky pryskyřice vytvrzené pomocí mikrovln .....	33
Obrázek 18 – Porovnání vzorků z epoxidové pryskyřice:.....	34
Obrázek 19 – Průběh mikrovlnného ohřevu kompozitního materiálu se skleněným vláknem	35
Obrázek 20 – Průběh mikrovlnného ohřevu kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem..	36

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Časové srovnání vytvrzování lepidel [10].....	22
Tabulka 2 – Mechanické vlastnosti pryskyřice MGS L 285 s tvrdidlem H 287 [16] .....	26
Tabulka 3 – Tvrdost pryskyřice při vytvrzování standardními metodami .....	28
Tabulka 4 – Průběh mikrovlnného ohřevu vzorku z pryskyřice .....	29
Tabulka 5 – Tvrdost pryskyřice po dotvrzení pomocí mikrovln .....	31
Tabulka 6 – Teplota pryskyřice při mikrovlnném vytvrzování .....	32
Tabulka 7 – Tvrdost pryskyřice při mikrovlnném vytvrzování.....	32
Tabulka 8 – Tvrdost pryskyřice při jednotlivých měřeních .....	34
Tabulka 9 – Průběh mikrovlnného ohřevu kompozitního materiálu se skleněným vláknem ..	35
Tabulka 10 – Průběh mikrovlnného ohřevu kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem ..	36