

# **Studium strukturálních změn v polymerech po svařování ultrazvukem**

Bc. Adam Kubita

---

Diplomová práce  
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Adam Kubita  
Osobní číslo: T18312  
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství  
Studijní obor: Výrobní inženýrství  
Forma studia: Prezenční  
Téma práce: Studium strukturálních změn v polymerech po svařování ultrazvukem

### Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Experimentální svařování za změny technologických parametrů
3. Modelování transientního teplotního pole polymerů
4. Laboratorní zkoušky za účelem posouzení strukturálních a chemických změn v materiálu (metody vibrační spektroskopie – FTIR, IRED, Ramanova spektroskopie..)
5. Vyhodnocení získaných dat a statistické zpracování

Forma zpracování diplomové práce: Tisková/elektronická

Seznam doporučené literatury:

1. Šuba, O. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 2010. 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
2. Švehla, Š., Figura Z. Ultrazvuk v technologii. Bratislava: Alfa 1984. 521 s.
3. Maňková, I.. Progressivní technologie. Viena. Košice 2000. ISBN 80-7099-430-4.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: 2. ledna 2020  
Termín odevzdání diplomové práce: 15. května 2020

L.S.

---

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
děkan

---

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

Ve Zlíně dne 10. února 2020

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

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

### **Prohlašuji,**

- že jsem 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**

Tato diplomová práce se zabývá studiem strukturálních změn v polymerech po svařování ultrazvukem. Teoretická část je věnována problematice a rozdělení svařování termoplastů, ultrazvukovému svařování a spektroskopickým metodám. V praktické části je popsána příprava vzorků pro měření. Dále je řešena analýza struktury materiálu po ultrazvukovém svařování na FTIR spektrometru a rentgenová difrakční analýza. Na závěr je navržena simulace teplotního pole. V práci jsou shrnuty změny ve struktuře materiálu a rozdíly mezi amorfními a semikrystalickými polymery při ultrazvukovém svařování.

Klíčová slova: ultrazvukové svařování, struktura materiálu, spektroskopie, teplotní pole

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the study of structural changes in polymer after ultrasonic welding. The theoretical part is focused on the issue and distribution welding of thermoplastics, ultrasonic welding and spectroscopy methods. In the practical part is describe preparation of samples for experiment. Following part is focused on material structure analysis after ultrasonic welding on FTIR spectrometer and X-ray diffraction analysis. In conclusion, this part describes simulation of temperature field. In the thesis are summarized structural change in material and differences between amorphous and semicrystalline polymers after ultrasonic welding.

Keywords: ultrasonic welding, material structure, spectroscopy, temperature field

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí své diplomové práce doc. Ing. Libuši Sýkorové Ph.D. za její odborné vedení, rady a pomoc při vypracování, kterou mi poskytovala během psaní práce. Dále své rodině a přítelkyni za podporu během celého studia. Poděkování patří také panu Ing. Janu Volejníkovi za možnost využití ultrazvukového svařovacího zařízení ve firmě Plastika a.s. se sídlem v Kroměříži.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ</b> .....	<b>11</b>
1.1 DODÁNÍ TEPLA VEDENÍM.....	12
1.1.1 Svařování horkým tělesem.....	12
1.2 DODÁNÍ TEPLA KONVEKČÍ.....	14
1.2.1 Svařování horkým plynem .....	14
1.2.2 Svařování extruderem .....	14
1.3 DODÁNÍ TEPLA ZÁŘENÍM.....	15
1.3.1 Svařování infračerveným paprskem.....	15
1.3.2 Svařování laserem .....	16
1.4 DODÁNÍ TEPLA TŘENÍM .....	18
1.4.1 Svařování třením za rotace.....	18
1.4.2 Vibrační svařování .....	20
1.4.3 Vysokofrekvenční svařování.....	20
<b>2 SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM</b> .....	<b>22</b>
2.1 ULTRAZVUK .....	22
2.2 VÝHODY A NEVÝHODY .....	23
2.2.1 Výhody .....	23
2.2.2 Nevýhody .....	23
2.3 POUŽITÍ V PRŮMYSLU .....	23
2.4 TERMOPLASTY .....	24
2.4.1 Plniva.....	24
2.4.2 Aditiva.....	24
2.4.3 Separační činidla .....	25
2.4.4 Vlhkost .....	25
2.4.5 Kombinace materiálů .....	25
2.5 ZAŘÍZENÍ.....	26
2.5.1 Generátor.....	27
2.5.2 Konvertor .....	27
2.5.3 Booster .....	28
2.5.4 Sonotroda .....	28
2.5.5 Přípravky .....	29
2.5.6 Řízení procesu.....	30
2.6 DESIGN SVAROVÝCH PLOCH .....	31
2.6.1 Usměrňovač energie.....	32
2.6.2 Konstrukční řešení svarů.....	32
2.7 SVAŘOVACÍ PARAMETRY.....	33
2.7.1 Frekvence .....	34
2.7.2 Svařovací čas.....	34
2.7.3 Svařovací tlak.....	35
2.7.4 Amplituda.....	35

<b>3</b>	<b>SPEKTROSKOPICKÉ METODY</b> .....	<b>36</b>
3.1	POUŽITÍ METOD .....	36
3.2	INFRAČERVENÁ VIBRAČNÍ SPEKTROSKOPIE .....	37
3.2.1	Typy vibrací .....	38
3.2.2	Infračervené spektrometry.....	39
3.3	RAMANOVA SPEKTROSKOPIE .....	40
3.3.1	Ramanovy spektrometry .....	41
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>EXPERIMENT</b> .....	<b>44</b>
5.1	POLYMERY .....	44
5.1.1	Chemická struktura polymerů .....	44
5.1.2	Vlastnosti použitých polymerů.....	45
5.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	47
5.2.1	Vstříkování zkušebních těles.....	47
5.2.2	Výroba přípravku pro obrábění .....	49
5.2.3	Frézování návarových hran .....	51
5.2.4	Svařování vzorků.....	52
5.2.5	Obrábění v místě svaru.....	54
5.2.6	Úprava délky vzorků .....	56
5.3	ANALÝZA STRUKTURY MATERIÁLU .....	57
5.3.1	Infračervená vibrační spektroskopie .....	57
5.3.2	Rentgenová difrakční analýza .....	60
5.4	SIMULACE TEPLOTNÍHO POLE .....	64
5.4.1	Úvod k simulacím teplotního pole .....	64
5.4.2	Modelování teplotního pole .....	65
5.4.3	Výstupy a porovnání .....	66
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>72</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>76</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>77</b>
	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>79</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>80</b>



## ÚVOD

S postupným častějším využíváním polymerů v praxi docházelo ke zvyšování složitosti výrobků. V případech, ve kterých už nestačilo běžné vstřikování, muselo docházet k dalším dodatečným výrobním operacím. Plastové výrobky mohou mít celou škálu požadavků danou např. zákazníky, designery, normami, materiálovými či výrobními podmínkami. Pokud tyto požadavky a geometrii není možné zajistit přímo vstřikováním či jinou základní technologií, je nutné používat dodatečné výrobní, či montážní postupy, které poskytnou uspokojivý technologický výsledek. Tím také docházelo ke vzniku výrobních linek, kde výrobek vzniká postupně od vstřikování, přes různé montážní sekce, povrchové úpravy, až ke konečnému výsledku.

Jedním z požadavků na úpravu výrobků z plastů může být spojování. Zde je možné nalézt celou škálu možností, jako je lepení, nýtování, šroubové spoje, nebo svařování. Jednotlivé principy se výrazně liší a mají své výrazné přednosti i nedostatky. Volba metody závisí na celé řadě faktorů např. cena, pevnost spoje, fyzikální a chemické vlastnosti prostředí (vlhkost, teplota, agresivní činidla), výrobní možnosti a další. Důvody pro spojování plastů mohou být požadavky na složité celky, velké díly, montáž na místě použití, materiálovou rozmanitost, tvarovou diverzitu apod.

Svařování plastů je jednou z předních metod pro jejich spojování, kde je možné získat pevný, nepropustný, nerozebíratelný spoj. V průmyslu je možné a také často využívané, zařazení procesu svařování do výrobních linek, kde je možné zajistit konstantní podmínky pro vznik kvalitního spojení. Princip svařování plastů vychází ze svařování kovů a je možné mezi nimi najít řadu stejných či podobných technologií. Jednotlivé typy svařování polymerů je možné dělit např. dle způsobu dodání energie.

V průběhu let se ukázaly přednosti ultrazvukového svařování, které se prosadilo především při velkosériové výrobě, kde vyniká vysokou produktivitou. Svařovat ultrazvukem je možné také kovy. Využívá se zde mechanického kmitání o vysoké frekvenci. Metodu je možné využít u celé řady materiálů a v různých průmyslových odvětvích. Klady při použití této metody jsou vysoká rychlost svařování, čistota procesu i okolí, žádné vnější tepelné ovlivnění, velká životnost nástrojů za předpokladu, že jsou vyrobeny z kvalitních materiálů, minimální údržba, možnost vytvářet složité spoje, či zabudování do automatizovaných linek.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

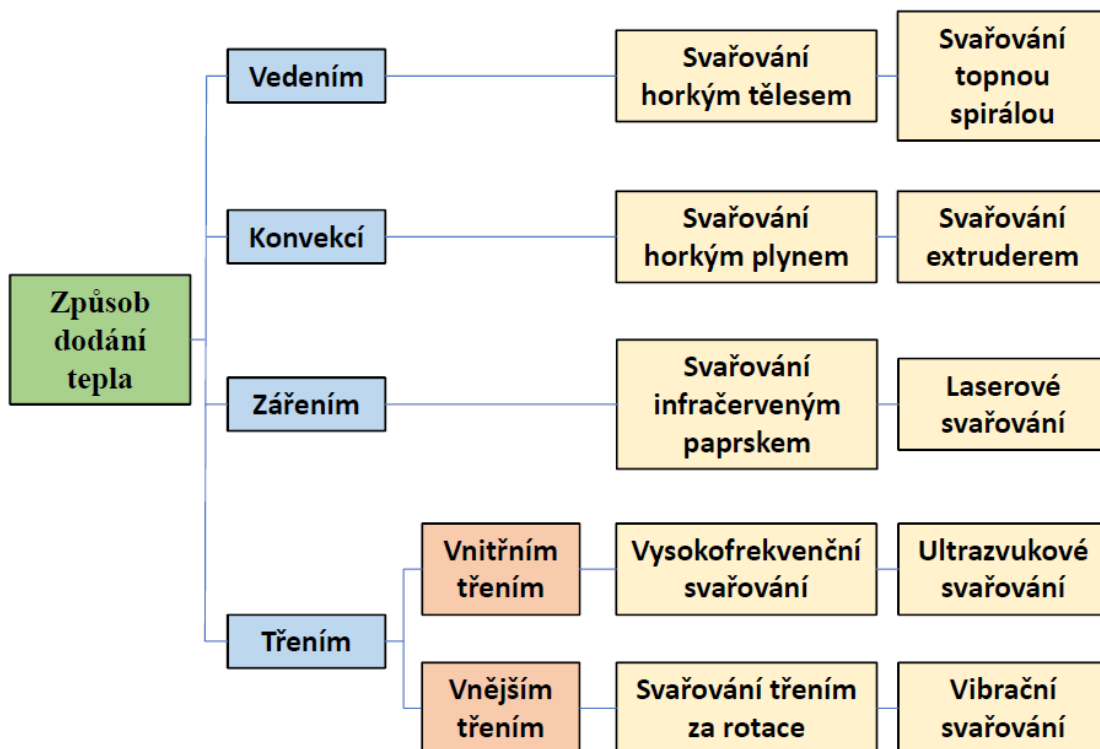
## 1 SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ

Při svařování termoplastů dochází k vytvoření nerozebíratelného spoje, a to při využití tepla a tlaku působícího v určitém čase. Při vytváření spoje musí být plasty ve tvárném stavu. Procesu svařování se využívá ve všech průmyslových oblastech. Používá se např. v automobilovém průmyslu, stavebnictví, výrobě technických dílů, elektroprůmyslu, lékařství, obalovém průmyslu, a spoustě dalších. Svařování termoplastů lze dělit (viz Obr. 1) podle druhu dodávání tepla:

- Vedením
- Konvekcí neboli prouděním
- Zářením
- Třením

Proces svařování je možné rozdělit na tři části:

- Ohřev
- Spojení dílů pod tlakem
- Chlazení spoje [3, 4]



Obr. 1 Rozdělení svařování termoplastů dle způsobu dodání tepla [4]

Při volbě svařovací metody je nutné brát zřetel na:

- Svařovaný materiál
- Geometrii výrobku
- Kvalitu svarů
- Hospodárnost, ekonomičnost
- Počet kusů výrobků
- Pevnostní požadavky svaru
- Požadavky na těsnost svaru [4]

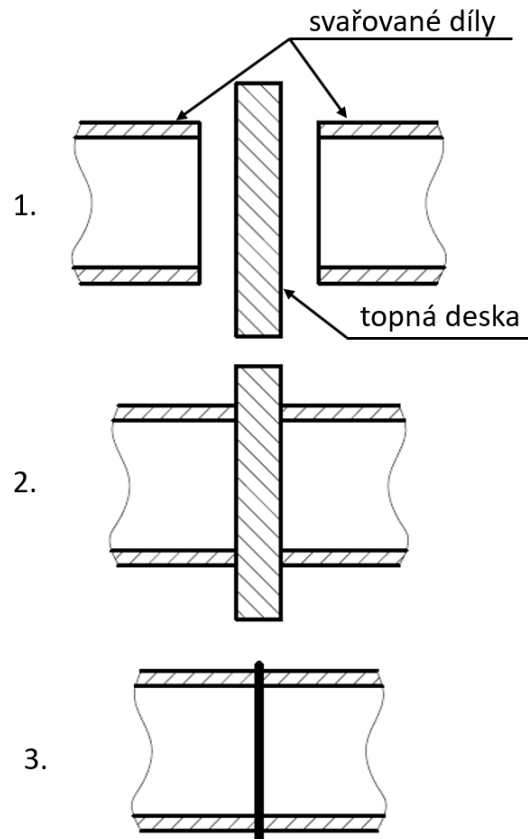
Jednotlivé svařovací procesy mají vliv na kvalitu výsledných výrobků. Také mohou mít vliv na strukturu materiálu v místě svaru, která se může lišit od základního materiálu. Při některých svařovacích metodách dochází k silnému tepelnému záření, které by mohlo ovlivňovat strukturu polymeru, nebo by mohlo docházet k degradaci materiálu. U jiných metod, např. pomocí tření, se nedodává teplo z vnějšího prostředí, a tím by mohly být metody šetrnější. Navíc u třecích metod dochází k mechanickému promíchání molekul, což je důležité pro vytvoření homogenní struktury výsledného svaru a vznik strukturálních spletenců molekul. Dále budou některé svařovací metody rozebrány pro vytvoření přehledu jednotlivých svařovacích procesů. [3]

## 1.1 Dodání tepla vedením

### 1.1.1 Svařování horkým tělesem

Svařování horkým tělesem označované také jako horká deska, svařování na zrcadlo, metoda hot plate nebo heated tool. Jedná se o široce používanou techniku svařování vstříkovaných nebo vytlačovaných dílů. Schéma metody je zobrazeno na Obr. 2. Při procesu se využívá topná deska pro ohřev a roztavení svařované plochy (Obr. 2–1.). Jakmile je plocha dostatečně roztavena (Obr. 2–2.), tak je horká deska odstraněna a součásti jsou spojeny tlakem (Obr. 2–3.). Při návrhu topných zařízení je nutné dbát na co nejrovnoměrnější rozložení tepla po pracovní ploše. [1, 3]

Může se využívat kontaktního a bezkontaktního ohřevu. Při kontaktním ohřevu se využívají výměnné desky s PTFE povrchovou úpravou. [4]



Obr. 2 Svařování horkým tělesem [15]

Výhody metody jsou:

- Jednoduchý proces
- Snadná kontrolovatelnost procesu
- Vysoká opakovatelnost
- Vysoká pevnost
- Nízké pnutí
- Mohou se svařovat různé druhy termoplastů [1, 4]

Nevýhody jsou:

- Vysoké náklady na nástroje u složitých svarů
- Velké přetoky
- Dlouhé časy procesu
- Ulpívání materiálu na topné desce
- Spotřeba energie [1]

## 1.2 Dodání tepla konvekcí

### 1.2.1 Svařování horkým plynem

Metodu je možné dělit na ruční svařování s použitím horkovzdušné pistole a na svařování pomocí tvarového rozvaděče. Svar se vytváří přidávkou svařovacího materiálu. Ten bývá nejčastěji ze stejného polymeru jako svařované polotovary. Kvalita přídavného materiálu by měla minimálně odpovídat jakosti materiálu, ze kterého jsou vyrobeny díly. Jako topného média se využívá plyn, nejčastěji vzduchu. U vyšší technologické náročnosti svarů se využívá dusíku. Při ručním svařování vznikají nároky na zkušenou obsluhu. Na její zkušenosti závisí kvalita svaru. Metoda má velké využití při kusové výrobě, opravách výrobků a montáži přímo u zákazníka. U sériové výroby se využívá méně. Nejčastější svařované materiály jsou PP, PE, PVC. [1, 3]

Mezi výhody patří vysoká pevnost svaru, a to i u technických plastů. Mezi nevýhody patří vysoká spotřeba energie, nutnost řešení odsávání zplodin v pracovním prostředí a u některých aplikací požadavky na inertní plyn. Po svařování může být potřebné dokončování svařených ploch. [3, 4]

### 1.2.2 Svařování extruderem

Jedná se o ruční, případně částečně mechanizovanou metodu. Přídavný materiál ve formě struny nebo granulátu v plastifikační komoře extruderu uvede do tvárného stavu. Jako tepelný zdroj je využíván horký plyn. Pro správné vytvoření svaru je nutné, aby byl plastifikovaný přídavný materiál přitlačován do svarové zóny, což se děje různými způsoby. Využívá se k tomu tzv. botička, nebo se materiál pěchuje ručně, případně se využívá válečkového systému. V případě botičky je nutné svařovat s konstantní silou a v pomyslné kolmici s rovinnou svaru. Tato metoda je náročná na zkušenosti obsluhy.

Metodou se provádí opravy plastových dílů a využívají se pro svařování potrubí, tvarovek, deskových konstrukcí. Primárně se využívá pro malosériové výrobky [1, 2]

## 1.3 Dodání tepla zářením

### 1.3.1 Svařování infračerveným paprskem

Princip je podobný svařování trubek natupo. Rozdíl mezi těmito metodami je, že u svařování infračerveným paprskem nedochází ke kontaktu mezi svařovaným materiálem a zdrojem tepla. Díky tomu nedochází k deformaci svařované části, a navíc se do svaru nevnáší nečistoty z tepelného zářiče, nedochází k přichytávání taveniny na ohříváč. Výhodou IR metody je také menší výronek materiálu vůči svařování natupo, také dochází k úspoře času při svařování až o 70 %. Vliv na absorpci záření má jak výběr materiálu, tak i jeho aditiva. [3]

Dnes se tato metoda používá převážně pro materiály PE, PP, PA, PET, PMMA, PS, E-CTFE, PFA. [3]

Zdrojem IR záření bývají halogenové, keramické nebo foliové zářiče, které jsou přinýtovány k základně a jsou vloženy ve vyfrézované drážce. Příklad infračerveného zářiče se svařovaným dílem jsou zobrazeny na Obr. 3. [4]



Obr. 3 Infračervený zářič se svařovaným dílem [17]

Využití této metody v průmyslu se nachází především v oblasti rozvodů medicinálních kapalin, farmaceutickém průmyslu, biotechnologiích a automobilovém průmyslu. [4]

Výhody:

- Pevnost svaru
- Svařování rozdílných materiálů
- Složité geometrie
- Bezkontaktní ohřev, nedochází k přichytávání taveniny
- Bez otřepů
- Minimální přetoky

Nevýhody:

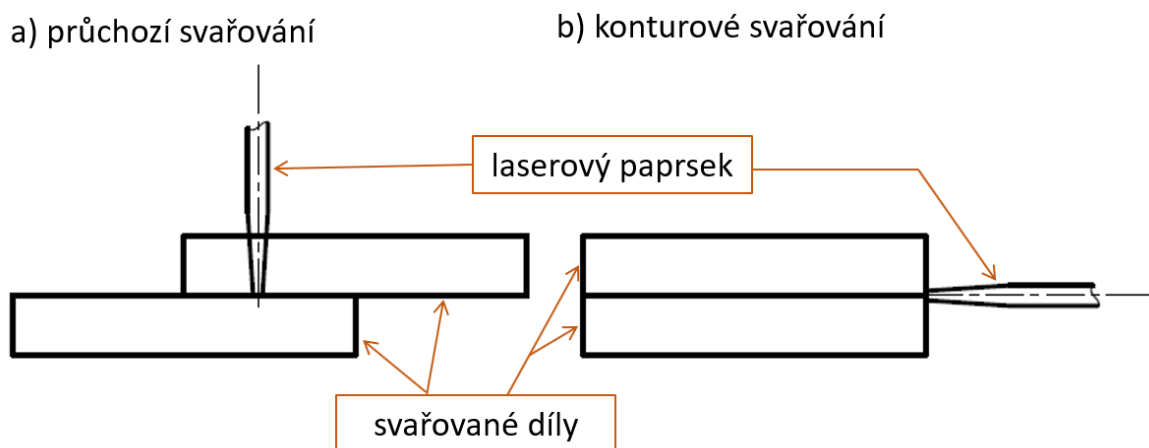
- Životnost IR zářičů [3,4]

### 1.3.2 Svařování laserem

Při svařování laserovým paprskem se mění elektromagnetická energie laserového záření na teplo, které provede ohřev svařovaných dílů. Při procesu se část světla odrazí od svařované plochy (reflexe), část projde do určité hloubky (transmise) a část se změní v teplo (absorpce).

Metoda se může dělit na (viz Obr. 4):

- Průchozí
- Konturové [4]

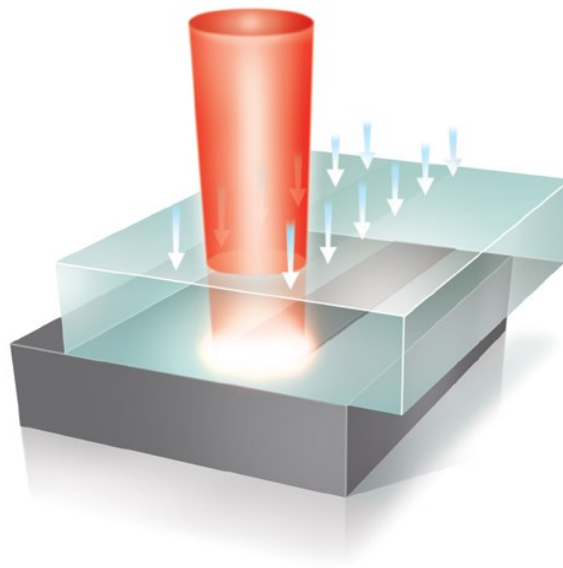


Obr. 4 Průchozí a konturové svařování [4, 21]

Při průchozí metodě svařování se spojují transparentní a netransparentní součásti (viz Obr. 5). Díly jsou upnuty do přípravku. Při spuštění procesu, laser prochází transparentním dílem až dojde k netransparentní části, kde začne tavit polymer. [1]

Při konturovém svařování jsou proti sobě upnuty díly a laserová hlava je vedena podél linie spoje. Tak se nataví obě svařované plochy a dochází ke vzniku spoje. [1]





Obr. 5 Průchozí svařování laserem [16]

Svařovací proces ovlivňuje:

- Druh materiálu
- Přísady v plastu
- Povrchové úpravy
- Vlnová délka laseru
- Intenzita laseru, výkon
- Rychlost pohybu paprsku [4]

Mezi výhody patří:

- Snadná automatizace
- Velmi dobré možnosti nastavení procesu
- Možnost plynotěsného svaru
- Bezkontaktní metoda
- Vysoká rychlost
- Bez vibrací
- Ohřev přesně v místě svaru [3, 4]

Nevýhody mohou být:

- Náklady na vybavení
- Náročnost na přípravky

- Omezené tloušťky výrobků [3, 4]

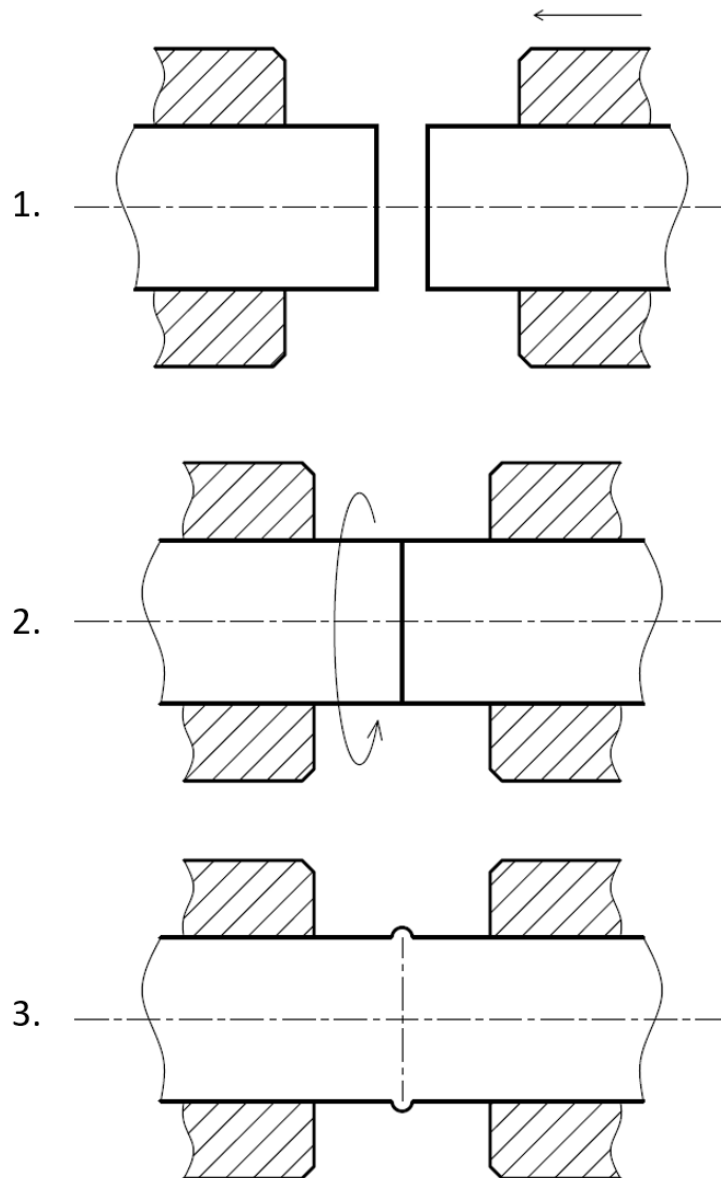
Pro laserové svařování jsou vhodné materiály jako ABS, PMMA, PC, SAN, PBT + PET, a jejich kombinace. Vhodné jsou především amorfni termoplasty, u kterých je při vhodných kombinacích materiálu a vlnové délky laseru možné dosáhnout pronikání paprsku až nad 100 mm. U semikrystalických materiálů je tato hodnota značně menší. Krystalické struktury způsobují vícenásobnou nesměrovou reflexi. Díky tomu se optická dráha prodlužuje, navíc se paprsek rozšiřuje a tím se snižuje intenzita záření. [3]

## 1.4 Dodání tepla třením

### 1.4.1 Svařování třením za rotace

Proces při, kterém dochází k přeměně mechanické energie na energii tepelnou. Teplo vzniká třením mezi svařovanými povrchy. Svařovací stroje jsou speciální stroje, podobné soustružům. Polotovary se upínají do pevného uložení a sklíčidla provádějí rotační pohyb. Kde otáčky bývají od  $1800 \text{ min}^{-1}$  do  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Třecí rychlost se pohybuje v rozmezí  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  až po  $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Po zahřátí materiálu na svařovací teplotu, musí dojít k ukončení vzájemného pohybu mezi svařovanými částmi. To je možno provést dvěma způsoby. Buď se uvolní pevné uložení, nebo se pohybující část zastaví. Uvolnění pevného uložení je častější způsob. Po zastavení vzájemného pohybu se svařované části drží pod tlakem až do vychladnutí spoje. Metoda vhodná pro materiály jako PS, ABS, PMMA, PC, PA, PP, PE a PVC. [2]

Svařovací proces můžeme rozdělit do několika úkonů viz Obr. 6. Nejprve dochází k upnutí a následnému přísunu svařovaných dílců k sobě. Po tomto procesu dochází k rotaci jedné z upnutých částí. Po zahřátí rotujícího dílu následuje zastavení rotace, nebo uvolnění druhé části. Po vyrovnání otáček dochází k ochlazení dílů a ke vzniku svaru.



Obr. 6 Svařování třením za rotace [18]

Tato technologie je vhodná pouze pro polotovary s válcovým tvarem. Metodu je výhodné použít pro plasty, které způsobují komplikace při jejich svařování z důvodu nevhodných tepelných vlastností, např. vysoce plněné polyamidy. [2]

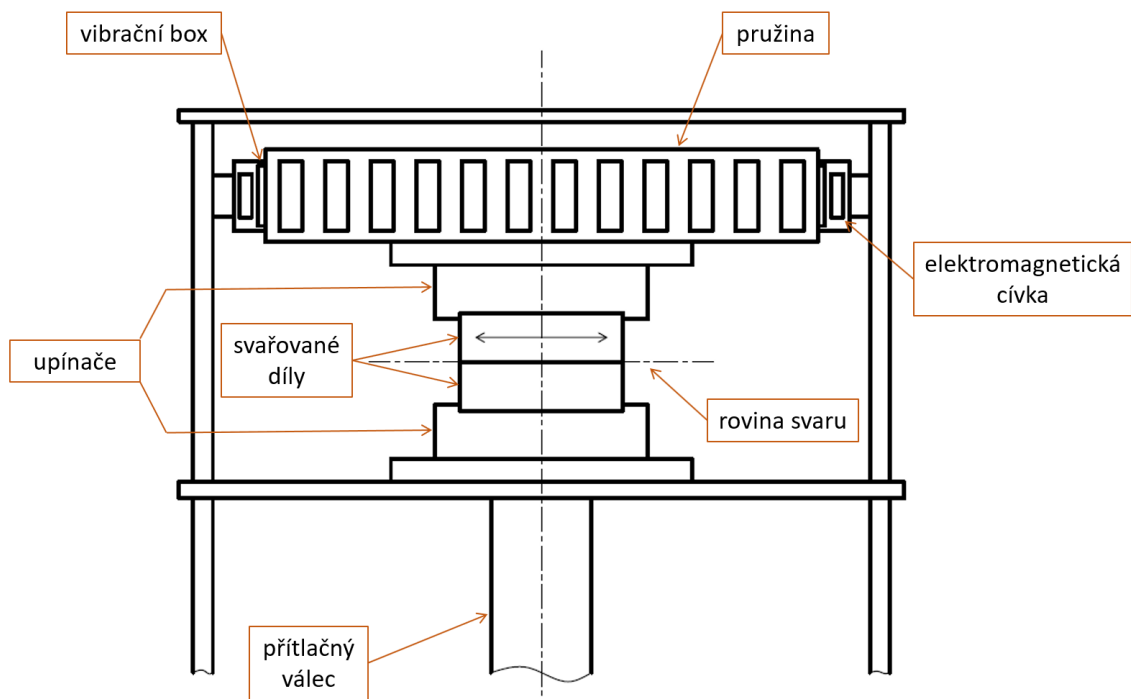
Pro optimální průběh svařování se provádí úprava svarové plochy, na které se vytvoří kužel s úhlem stěny  $1^\circ$  až  $1,5^\circ$ . Provádí se tak z důvodu rovnoměrného ohřevu, jelikož v ose tělesa je minimální třecí rychlost. [1]

### 1.4.2 Vibrační svařování

Dochází zde k pohybu jednoho ze svařovaných dílců, který se pohybuje rovnoběžně se svařovanou plochou, s dostatečným tlakem působícím na druhý dílec. Díky tření se vytváří dostatečné teplo, které způsobí roztavení plastu a vznik svaru. Oproti ultrazvukovému svařování se zde používají nižší frekvence, vyšší amplitudy a vyšší upínací síly. Směr působení vibrací je zde v opačném směru. Schéma vibračního svařování je zobrazeno na Obr. 7 [2]

Mezi výhody může patřit krátká doba cyklu, energetická účinnost, možnost svařovat velké části, svařování bez přídavného materiálu, vytváří hermetická utěsnění svaru. [1]

Nevýhodou mohou být pořizovací náklady, díly by měly být dostatečně tuhé, aby se zabránilo deformaci při svařování, nemohou být svařovány díly s vysokými a zároveň tenkými stěnami. [1]



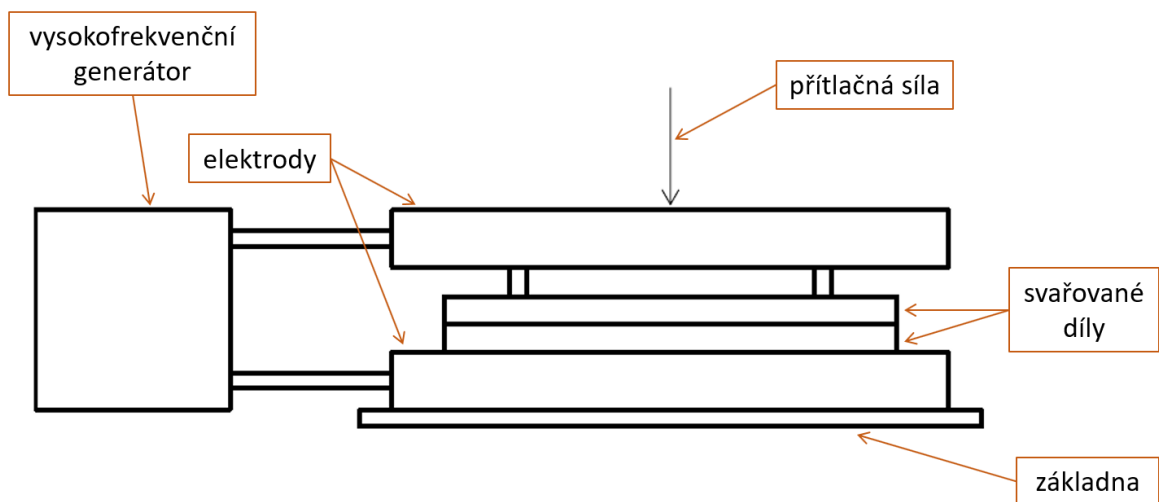
Obr. 7 Schéma vibračního svařování [19]

### 1.4.3 Vysokofrekvenční svařování

Metoda funguje na principu ohřívání materiálu pomocí vysokofrekvenčního proudu proudícího mezi dvěma elektrodami, při současném působení tlaku. Termoplast tvoří dielektrikum a mezi dvěma elektrodami tvoří kondenzátor. Svařovací zařízení fungují na frekvenci 27,12 MHz, jejich příkony se pohybují od 1,5 kW až po několik desítek kW. Nejdůležitějším parametrem pro tento druh svařování jsou dielektrické vlastnosti svařovaného termoplastu.

Schéma sestavy svařovacího zařízení je zobrazeno na Obr. 8. Nejvhodnějším materiálem pro vysokofrekvenční svařování je PVC, na kterém byla tato metoda uvedena do praxe. Ale je možné také svařovat některé další plasty, jako jsou PVDC, EVA, ABS nebo PET. [1]

Výhodou metody je především vysoká rychlost svařování. Proces se provádí bez přídavku materiálu. Díky tvaru elektrod se teplo přenáší co nejbližší oblasti svaru a nedochází tak k ovlivnění okolního materiálu. Teplo se vytváří na svařovaných plochách, směrem k venkovním plochám dílu teplota klesá. Pevnost svarů je na velmi vysoké úrovni. U metody je možné použít tvarované elektrody a tím vytvářet designové svary, např. ve tvaru švů. Zlepšení odvodu tepla je možné za pomoci chladících kanálů v elektrodách. Negativa metody se nachází především v omezené míře použitelných materiálů. Metoda se používá především na výrobu folií a textilií. [1]



Obr. 8 Schéma vysokofrekvenčního svařování [20]

## 2 SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM

Ultrazvukové svařování je jednou z častých metod pro svařování termoplastů v průmyslu. Teplo je do svaru dodáváno pomocí mechanického kmitání. Metoda využívá vysokofrekvenční ultrazvukovou energii, kde se frekvence ultrazvuku pohybuje v rozpětí 15 až 70 kHz. Ultrazvuk vytváří mechanické kmity o nízké amplitudě v rozmezí 1 až 25  $\mu\text{m}$ . Tření generuje teplo na rozhraní svařovaných součástí. Tím dochází k roztavení termoplastu. Po zastavení působení ultrazvuku a za působení tlaku, dochází k ochlazení roztaveného plastu a tím vzniká svar. Jedná se o velmi rychlou techniku svařování, kdy doba svaření dílu se pohybuje od 0,1 sekund do 1 sekundy. [1, 10]

Optimální proces přenosu ultrazvukové energie musí zohlednit geometrii svařované součásti, místo svaru a také schopnost materiálu absorbovat ultrazvukové vlny. Čím blíže je místo svaru ke zdroji vibrací, tím méně je energie ztraceno absorpcí v materiálu. Pokud je vzdálenost svaru od zdroje menší než 6,4 mm, tak se proces nazývá jako svařování v blízkém poli. Metoda se používá pro krystalické a málo tuhé termoplasty, které mají schopnost absorpce velké energie. Pokud je tato vzdálenost větší než 6,4 mm, tak se proces nazývá jako svařování ve vzdáleném poli. Tato metoda je vhodná pro amorfní a tuhé termoplasty. [1, 2]

Vytvářené teplo je obvykle nejvyšší na povrchu spoje. Je to způsobeno povrchovými nerovnostmi svařovaného dílu, které způsobují větší namáhání a vzniká tam větší třecí síla než v objemu materiálu. Často se při aplikacích ultrazvukového svařování využívá energetických usměrňovačů. Ty jsou v podobě návarové hrany umístěny na povrchu svařovaných ploch. Během svařování působí vibrace kolmo ke svařované ploše a ostrá hrana je tlačena do svařované plochy. V tomto místě dochází k bodovému kontaktu a největší koncentraci energie. [1, 2]

### 2.1 Ultrazvuk

Ultrazvuk se může definovat jako kmitavá mechanicko-akustická energie. Jeho frekvenční pásmo se pohybuje nad slyšitelností lidského ucha, nad 20 kHz. Energie ultrazvuku působí na prostředí pomocí ultrazvukových kmitů. Ty se v prostředí šíří a mohou vyvolávat fyzikální, chemické a jiné změny prostředí. Střídavé tlaky ultrazvukového kmitání mohou způsobovat různé typy namáhání, vznik napětí a další efekty. Ty se projevují v prostředí vznikem sekundárních účinků jako je vznik kavitace, tepla a deformací. [8]

## 2.2 Výhody a nevýhody

### 2.2.1 Výhody

Svařování ultrazvukem je jednou z populárních svařovacích metod používaných v průmyslu. Proces je rychlý, ekonomicky výhodný, je zde snadná možnost automatizace a hodí se pro velkosériovou výrobu. Vyznačuje se možností produkce až 60 výrobků za minutu. V konkurenci s ostatními metodami se svařovací časy řadí mezi nejkratší. Vytváří se konzistentní, vysoce pevné svary. Není zde potřeba použití dodatečné ventilace na odvod zplodin nebo přebytečného tepla. [1]

Tento proces je energeticky účinný, a to má za následek vyšší produktivitu s nižšími náklady oproti jiným metodám. Nástroje lze rychle měnit, což má příznivý vliv na flexibilitu. Běžně se metody využívá ve zdravotnictví. Jelikož se při procesu do svaru nezavádí kontaminanty nebo zdroje degradace, které by mohly ovlivnit biologickou kompatibilitu zdravotnického prostředku. [1, 2, 10]

### 2.2.2 Nevýhody

Nevýhodou metody je omezení maximální velikosti svařovaných dílů. Dále je nutné mít ideálně navržené díly, včetně energetických usměrňovačů, to prodražuje náklady na polotovary. Ultrazvukové vibrace mohou rovněž poškodit elektrické součásti umístěné ve výrobku. Riziko poškození je možné snižovat použitím vyšších frekvencí. Dále je nutné počítat s vyššími náklady za nástroje pro svařování a také nutností pořízení přípravků pro každý svařovaný díl. [1, 2]

## 2.3 Použití v průmyslu

Ultrazvukové svařování se používá téměř ve všech hlavních průmyslových odvětvích, ve kterých se díly z termoplastů spojují ve velkých sériích. Je to např.:

- Automobilový průmysl: části světlometů, palubní desky, tlačítka a spínače, palivové filtry, nádoby na kapaliny, zámky bezpečnostních pásů, plastové části klíčů
- Zdravotnický průmysl: filtry, katetry, ochranné pomůcky
- Elektronický průmysl: vypínače, prepínače, sensory, zakrytování součástek
- Balení: sáčky, zkumavky, blistry, kartonové obaly na tekutiny [1]

Metodu je možné použít pro bodové svařování, kontinuální svařování, navařování kovových inzerťů a další specifické operace. [1]

## 2.4 Termoplasty

### 2.4.1 Plniva

Plniva přítomná v termoplastech zvyšují tuhost materiálu. Zvyšují sílu přenosu ultrazvukové energie, ale při větším obsahu plniva dochází k problému s homogenitou svaru. Zlepšení svařitelnosti je nejvíce patrné u semikrystalických materiálů. Plniva v obsahu do 20 % polymeru je bezproblémové svařit. Při obsahu plniva blížíciho se 35 % může být na rozhraní svařovaných materiálů nedostatek termoplastu vůči plnivu, tím nemusí dojít ke spolehlivému hermetickému utěsnění. Při obsahu 40 % a více plniva se vlákna hromadí v místě svaru a je zde nedostatek volného termoplastu k dobrému spojení dílců. [1, 2]

Dlouhá vlákna se mohou při přípravě polotovarů (vstříkovaní) seskupovat tak, že může docházet lokálně k jejich zhuštění. To je nežádoucí u návarové hrany, kde by tento problém způsoboval špatné svaření. Tento problém je možné eliminovat použitím krátkých vláken.

Plniva, při obsahu nad 10 %, mohou působit jako abrazivní částice. Tím může docházet k opotřebení sonotrod. Proto je u těchto materiálů doporučováno použití sonotrod vyrobených z tvrzené oceli, nebo titanových slitin. U plněných termoplastů může být také nutné použití svářeček s vyšším výkonem. [1, 2]

### 2.4.2 Aditiva

Přísady jako změkčovadla, lubrikanty, retardéry hoření, barviva atd. sice zlepšují zpracování plastů nebo jejich celkové vlastnosti, ale často zhoršují svařitelnost materiálů. [1]

Maziva snižují koeficient tření mezi molekulami polymeru, což vede ke snížení produkce tepla. Tento účinek se ovšem v praxi příliš neprojevuje, jelikož koncentrace maziv jsou příliš nízké a jsou rozptýleny v celkovém objemu materiálu. [1]

Změkčovadla zlepšují pružnost, měkkost a snižují tuhost plastů při zpracování. Snižují mezimolekulární přitažlivé síly a tím narušují přenos vibrační energie. Tím dochází ke zhoršení svařitelnosti. [1]

Všechny přísady přidávané ve větším množství do materiálu, snižují poměr obsahu polymeru vůči ostatním složkám. Dostatek základního polymeru je žádoucí pro tvorbu kvalitního



spoje. Proto je nutné optimálně volit celkové složení materiálu při navrhování výrobků pro ultrazvukové svařování. [1]

### 2.4.3 Separáční činidla

Další nepříznivý vliv mohou mít prostředky používané při výrobě polotovarů. Jedná se o chemické prostředky používané na ochranu vstřikovacích forem, separáční činidla pro lepší odformování apod. Tím že by povlak zůstal na povrchu svařovaných ploch by mohl sniřovat homogenitu svaru. Vliv těchto prostředků je při sériové výrobě nízký. [1, 2]

### 2.4.4 Vlhkost

Kvalitu spoje ovlivňuje také vlhkost obsařená v některých plastech. Voda vázaná v polotovarech se při svařování odpaří a pokud zůstane zachycená ve svaru, tak vzniká pórovitost ve svaru. To může způsobovat pohledové defekty, slabou pevnost svaru nebo špatné hermetické uzavření svaru. Z těchto důvodů je ideální provádění svařování ihned po výrobě polotovarů. Pokud to není možné, je nutné skladování výrobků v suchém stavu. Popřípadě v polyethylenových sáčcích. Nebo je možné využít sušárny pro celé polotovary, zde je nutné dbát na to, aby nedocházelo k degradaci polymeru. [1, 2]

### 2.4.5 Kombinace materiálů

U svařování různých materiálů by rozdíl teplot tavení neměl překročit 22 °C. Oba materiály by navíc měly mít podobnou molekulární strukturu. Při svařování materiálů s vysokým rozdílem teplot tavení, by docházelo k tomu, že jeden materiál by byl už ve formě taveniny a tlakem by ze spoje vytekl, zatímco druhý materiál by se ani neroztavil. Tím by došlo k vytvoření velmi špatného spoje, nebo by se díly nemusely svařit vůbec. [1,2]

Svařovat by se měli pouze chemicky kompatibilní materiály, které obsahují podobné molekulární skupiny. Svařitelnost několika kombinací materiálů je uvedena viz Tab. 1. [1]

Tab. 1 Porovnání svařitelnosti materiálů [1]

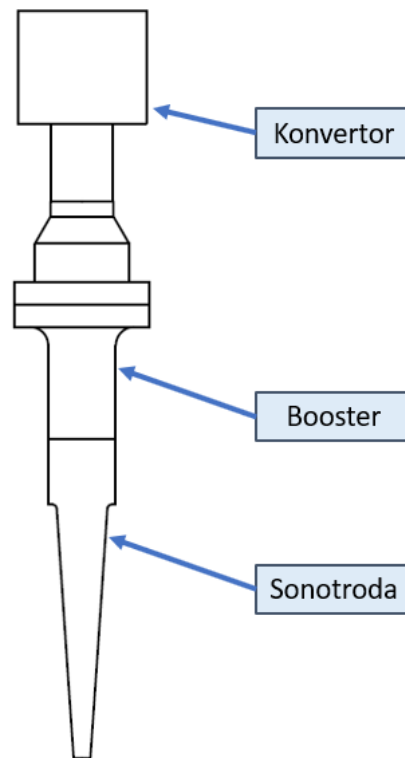
	ABS	ABS/PC	PA	PES	PPO	PC	PC/PE	PBT	PET	PEEK	PEI	PE	PPS	PP	PS	PVC	PTFE	SAN
ABS	✓	✓													✗			✗
ABS/PC	✓	✓				✓	✗											
PA			✓															
PES				✓														✗
PPO					✓	✗									✓			
PC		✓			✓	✓	✗											
PC/PE		✗			✓	✓	✓	✗										
PBT						✓	✓	✓										
PET								✓	✓									
PEEK									✓	✓								
PEI										✓	✓							
PE											✓	✓						
PPS												✓	✓					
PP													✓	✓				
PS	✗			✓										✓	✓			✗
PVC															✓	✓		
PTFE																	✓	✓
SAN	✗			✗											✗			✓

✓	výborná svařitelnost
✗	svařitelné

### 2.5 Zařízení

Zařízení pro svařování se skládá z generátoru, konvertoru, měniče, sonotrody, svařovacích přípravků pro srovnání dílů, a dále z rámu pro ustavení jednotlivých komponent. Svařovací systém může být rozdělen na oscilační soustavu, která je upnuta v rámu svařovacího stroje, k tomu je připojen generátor, ovládací a řídicí jednotka. Schéma oscilační soustavy je zobrazeno na Obr. 9. [1]



Obr. 9 Schéma oscilační soustavy [13]

### 2.5.1 Generátor

Generátor má za úkol převádět běžné napětí (50 Hz) na vysokofrekvenční střídavé napětí. Obvykle převádí na hodnoty frekvence 20 kHz. Amplituda se může měnit v rozsahu od 1 % až po 100 %. Změnu lze provádět i při průběhu svařování, změna se provádí buď okamžitě, po krocích, nebo nastavenými profily průběhu. K zařízení bývá připojena řídicí jednotka sloužící pro nastavování stroje. Generátory jsou dostupné s různou úrovní ovládní, od základních až po mikroprocesorem řízené. Jejich výkony se pohybují od 100 W do 6000 W. [1, 9]

### 2.5.2 Konvertor

Konvertor neboli měnič je klíčovou složkou ultrazvukového svařovacího systému. Má za úkol převod elektrické energie na mechanické kmity využitě pro svařování. Měnič se skládá z několika piezoelektrických kroužků, které jsou vloženy mezi dvěma kovovými bloky, obvykle z titanu. Mezi každým kroužkem je umístěna kovová destička, která tvoří elektrodu. Při působení elektrického signálu se disky rozšiřují a stahují. Frekvence kmitání může být

od 15 kHz až do 70 kHz. V praxi jsou ale jedny z nejčastějších frekvence 20 kHz a 40 kHz. [1, 9]

### 2.5.3 Booster

Booster, ampliměnič, nebo také transformátor. Jedná se o masivní kovovou součástku namontovanou mezi konvertorem a sonotrodou. Obvykle je vyrobena z titanu, nebo ušlechtilých ocelí. Úkolem součástky je měnit amplitudu konvertoru, kterou následně předává dále na sonotrodu. Amplitudu může, jak zesilovat, tak i zeslabovat. Směr a poměr změny určuje geometrie nástroje. Pokud je upnut nástroj za užší konec k sonotrodě a s širším koncem ke konvertoru dochází k navýšení amplitudy. V opačném případě dochází ke snížení amplitudy ve stejném poměru. V praxi jsou dostupné ampliměniče s různými transformačními poměry. Boostery mají na svém těle vyznačeny hodnoty poměrů, buď číselně nebo barevnými značkami. Sekundární funkcí dílu je uchycení oscilační soustavy do stroje. [1, 9]

### 2.5.4 Sonotroda

Jedná se o akustický nástroj, který přenáší mechanické kmity na obrobek. V sériové výrobě je vyrobena vždy na míru každému výrobku. Stejně jako boostery jsou i sonotrody odstupňované a jsou schopny svou geometrií měnit amplitudu vibrací, mají tedy vlastní transformační poměr. Příčné rozměry sonotrod jsou omezené. Dalším jejich úkolem je také přenášet svařovací síly do výrobku. Sonotrody musí být velmi přesně vyrobeny. Musí dobře znít a nelze je jen tak změnit nebo zkrátit. Jsou realizovatelné v mnoha formách, viz Obr. 10:

- Kulaté a hranaté
- Protážené nebo kompaktní
- S otvorem nebo plné
- S 3D konturou nebo geometrické
- Hladké nebo zdrsňené [1, 9]

Mohou se vyrábět z různých materiálů:

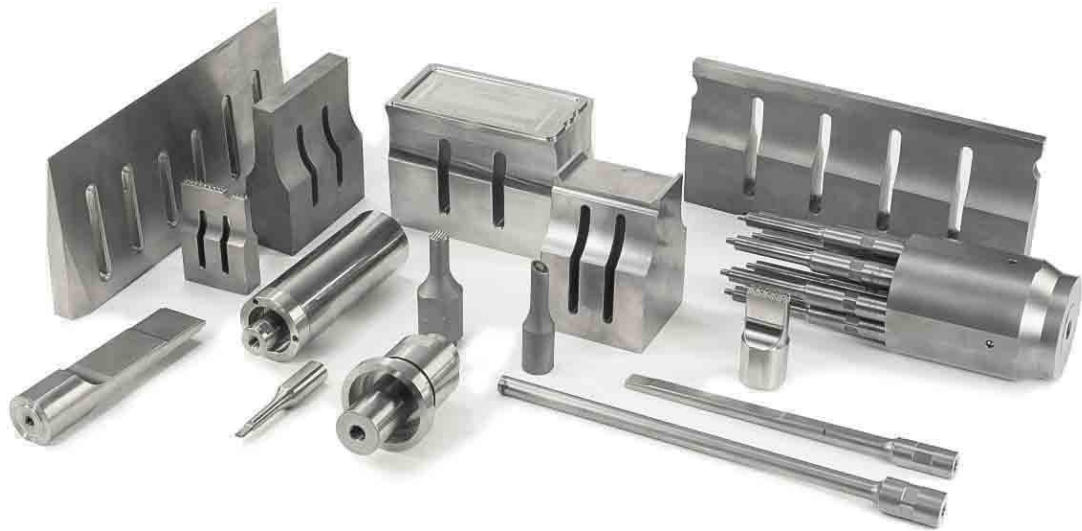
- Hliník – používá se při větších rozměrech, při prototypové výrobě nebo při potřebě rychlého dodání. Mezi výhody patří především jeho cenová dostupnost, snadno se obrábí, má dobré akustické vlastnosti. Mezi nevýhody patří špatná povrchová odolnost.

- Ocel – využívá se pro aplikace vyžadující velkou odolnost. Hodí se např. pro zavařování kovových inzertů nebo při svařování vysoce plněných plastů. Avšak hodí se pouze pro aplikace využívající malou amplitudu kmitů.
- Titan – materiál vyznačující se výbornými akustickými vlastnostmi a vysokou odolností povrchu. Nevýhoda spočívá především v ceně materiálu a náročné obrobiteľnosti. [1, 9]

Vyrobené sonotrody mohou mít různé povrchové úpravy. Mohou být pokoveny nebo povlakovány, což výrazně zlepšuje jejich odolnost při velkých sériích výrobků. [1]

Mohou být vyrobeny i pro netypické aplikace:

- S vakuovým otvorem
- Jako bloková sonotroda s prsty
- S integrovaným přidržovačem
- Jako nůž
- S nepřilnavou ochrannou vrstvou [1,9]



Obr. 10 Sonotrody v různých provedeních [11]

### 2.5.5 Přípravky

V praxi jsou při ultrazvukovém svařování velmi důležité přípravky. Svařované díly musí být během procesu svařování drženy v konstantní pozici. Musí být udržován rovnoměrný tlak na díl. To zajišťuje kvalitu a opakovatelnost procesu. Přípravky můžeme rozdělit do dvou

kategorií na pevné a flexibilní. Pevné jsou obvykle vyrobeny z oceli nebo hliníku, využívají se nejčastěji u semikrystalických polymerů nebo při svařování ohebných dílců. Také se využívají při zavařování inzertů. Flexibilní přípravky jsou obvykle levnější a vyrábí se z plastů nebo pryže. Jsou použitelné pro svařování amorfních polymerů. Způsobují menší otláčení a poškození plochy svařovaných dílců, neškrábou výrobek. Nevýhodou je, že absorbují více energie než přípravky pevné. Přípravky musí být ideálně navrženy, aby mohlo dojít k jednoduchému a rychlému upnutí dílců a zároveň musí být snadné i vyjmutí hotového výrobku. [1, 2]

### 2.5.6 Řízení procesu

Moderní ultrazvukové svařovací systémy jsou doplněny o intuitivní digitální řídicí panely, kde může probíhat kompletní nastavení svařovacího cyklu, je možné získat statistiku výroby, počet poruch, počet neshodných dílů, grafy průběhu svařovacího cyklu apod. [1]

Na systémech je možné nastavení ukončení cyklu dle konkrétní aplikace. Je možné nastavit vypnutí procesu dle doby působení svařovací energie, dle maximální použité energie, dle úrovně použitého výkonu, nastavení na předem určený posuv, nebo vzdálenost ujetou sonotrodou, také je možné svařování na konečnou výšku výrobku. Individuální nastavení cyklu nabízí celou škálu možností. [2]

Moderní svářečky jsou schopny provádět autodiagnostiku, je snadná jejich automatizace a je zde velká možnost integrace do výrobních linek. Kompletní pohled na ultrazvukovou svářečku je zobrazen na Obr. 11. [1]



Obr. 11 Ultrazvukový svařovací přístroj [12]

## 2.6 Design svarových ploch

Před návrhem svarových ploch je nutné mít dané určité parametry výrobku. Musí být jasné body jako:

- Materiál výrobku
- Konečné požadavky na montáž
- Požadovaná síla svaru
- Nutnost strukturálního svaření
- Hermetické uzavření svaru
- Pohledové požadavky svaru
- Požadavky na přetoky [1]

Pro optimální výsledky při svařování je klíčová konstrukce spojů. Návrh se odvíjí od typu termoplastu, geometrii součásti, požadavech na konečný výrobek. Ideální plocha před svařením by měla mít co nejmenší kontaktní plochu. Zda se musí soustředit ultrazvuková energie. Tím se docílí snížení doby potřebné pro tavení polymeru. Svařované plochy by měly být v těsném kontaktu k sobě navzájem, ale je nutné, aby mohly mezi sebou volně vibrovat

a docházelo tak ke vzniku tření. Plocha dílu v kontaktu se sonotrodou by měla být dostatečně velká, aby docházelo k rovnoměrnému přenosu síly a také aby nedocházelo k povrchovému poškození dílu. V ideálním případě by měli být svařované plochy v jedné rovině, zároveň rovnoběžné s plochou sonotrody. Rovnoběžnost všech uvedených ploch je velmi důležitá u výrobků, na které je kladen důraz na hermeticky uzavřené spoje. [1, 2]

Při návrhu by měl být brán zřetel, aby neměli výrobky ostré hrany. Mohlo by zde docházet ke koncentraci energie a díly by mohly v těchto místech praskat. Nebo by mohlo docházet k tavení materiálu jinde než v místě svaru. Proto by měli být na výrobku dostatečné rádiusy. [1]

### 2.6.1 Usměrňovač energie

Usměrňovač energie lze také označit jako návarové hrany. Jedná se o vystouplou hranu trojúhelníkového průřezu, která je vytvarována na jedné ze svařovaných ploch. Při počátku svařování je největší koncentrace energie právě na vrcholu návarové hrany. Hrana se postupně taví a roztavený materiál se rozprostírá na ploše spoje, kde po ztuhnutí vytváří vazbu. Největší přínos usměrňovačů energie je u amorfních termoplastů. Dobrým návrhem tohoto prvku se zajišťuje, že dojde k roztavení materiálu přesně daného množství a tím lze svařovat přesně a bez přetoků. [1, 2]

U amorfních termoplastů se doporučuje vrchol hrany pod úhlem  $90^\circ$ . Výška by měla být 50 % až 65 % délky základny. Výška se pohybuje v hodnotách od cca 0,1 mm do 0,8 mm. Šířka od 0,2 mm do 1,6 mm. [1]

U semikrystalických materiálů by měl být vrchol pod úhlem  $60^\circ$ . Výška by měla odpovídat 85 % délky základny. Hodnoty šířky jsou od 0,2 mm až do 1,3 mm. [1]

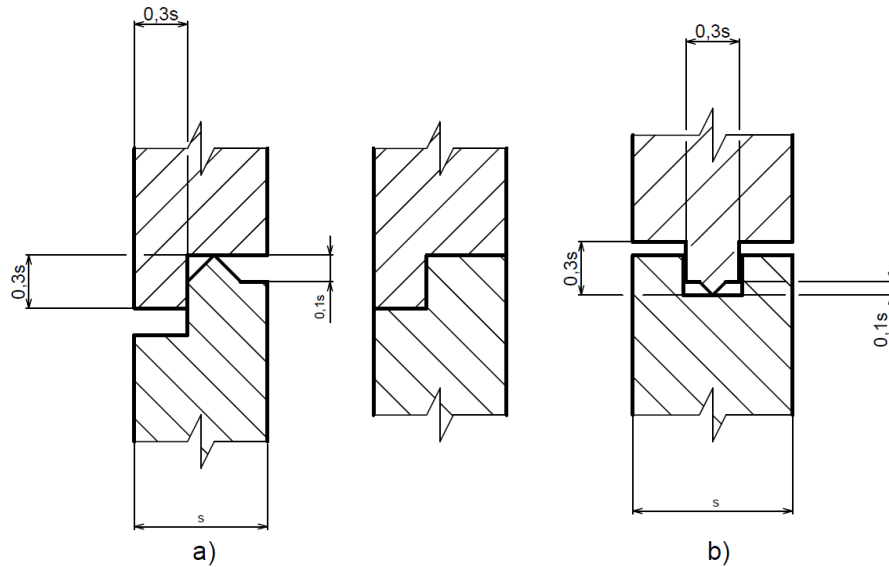
### 2.6.2 Konstruktivní řešení svarů

Existují různé doporučené konstruktivní řešení svaru pro ultrazvukové svařování.

Například se může jednat o:

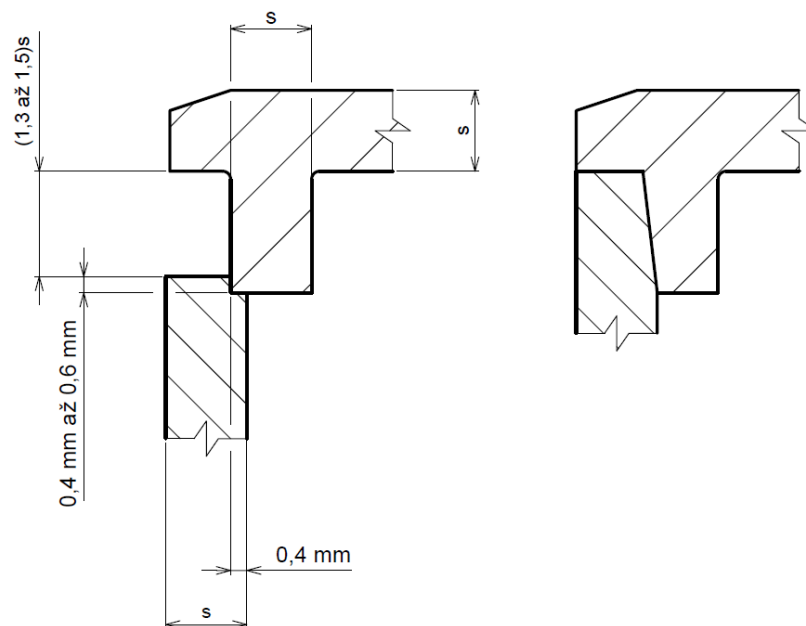
- Břitový styk viz Obr. 12 – jedná se o poměrně jednoduché konstruktivní řešení. Je schopný přenášet vysokou koncentraci energie. Používá se u polymerů, které mají nízkou teplotu tavení. Vhodný např. pro PVC, SAN, PS. Rozdělit ho můžeme na břitový styk s jednoduchým a dvojitým vedením. Druhý případ se používá u svaru pro zajištění lepší těsnosti nebo jako zajištění proti posunutí součástí vůči sobě.





Obr. 12 Břítový styk [3]

- Střížný styk viz Obr. 13 – je vhodný pro polymery s vyšší teplotou tavení. Nebo u látek, které rychle krystalizují. Oproti předchozí konstrukci nabízí výrazně větší provařenou plochu. Tím vzniká vyšší styčná plocha a lepší těsnost vůči plynům. [3]



Obr. 13 Střížný styk [3]

## 2.7 Svařovací parametry

Pro tento proces svařování jsou důležité určité parametry. Jedná se především o frekvenci, dobu svařování, svařovací tlak, doba přidržení po roztavení materiálu, přidržovací síla, síla po spuštění, úroveň výkonu a také amplituda kmitání. [1]

### 2.7.1 Frekvence

V minulosti byla používána především frekvence 20 kHz. Nyní se používá celé spektrum frekvencí, kdy každá má svá specifika pro oblast použití. Každá systémová frekvence má k sobě se hodící generátory a oscilační soustavy. Délka nástrojů je určena potřebnou rezonancí. Při nižších frekvencích je možné použít daleko vyšší výkony, u 20 kHz je to až 6000 W. Pro nízké frekvence je možné vyrobit daleko větší nástroje. Naopak vyšší frekvence jsou schopny svařovat šetrněji. U vyšších frekvencí se používají také menší nástroje, u frekvence 40 kHz jsou nástroje poloviční oproti frekvenci 20 kHz. A díky tomu je možné při procesu používat nižší síly a dosáhnout vyšší přesnosti. Výhodou je také nižší hlučnost. Obecně se vysokofrekvenční svařovací stroje používají pro malé a jemné součástky. Nevýhodou je nízký výkon při svařování ve vzdáleném poli. Porovnání vlivu frekvence je zobrazeno v Tab. 2. [1, 2, 10]

Tab. 2 Porovnání vlivu frekvence na svařovací proces [1]

Frekvence zařízení (kHz)	Výkon zařízení (W)	Parametry procesu
10–20	6000–3000	Vysoké výkony, relativně hlasité, možné poškození dílů
20–30	3000–1000	Kompromis mezi výkonem, hlukem a silou procesu
40–75	1000–400	Velmi tiché, nízké výkony, velmi jemný proces

### 2.7.2 Svařovací čas

Jedná se o časový úsek, od doteku sonotrody do konce působení ultrazvukové energie. Optimální svařovací čas je obvykle volen pokusem a analýzou výrobku. Prodloužení doby svaru obvykle zvyšuje pevnost až do doby dosažení optimálního času. Další zvýšení svařovacího času už pevnost prakticky nezvedá, nebo naopak o něco snižuje. Zároveň dochází ke vzniku přetoku a může dojít k povrchovému poškození výrobku tlakem sonotrody. [1]

### 2.7.3 Svařovací tlak

Zajišťuje dostatečnou statickou sílu pro to, aby mohly mezi svařovanými díly působit vibrace. Po roztavení materiálu zajišťuje přidržení dílů do doby ztuhnutí svaru. Stanovení optimálního tlaku je důležité pro kvalitní svařování. Příliš nízké tlaky vedou ke špatnému přenosu energie, což vede ke dlouhým cyklům. Příliš velký tlak způsobuje vytékání roztaveného materiálu ze svaru. Způsobuje také orientaci polymerních řetězců ve směru proudění taveniny a tím se snižuje konečná pevnost svaru. Také může způsobovat povrchové poškození na výrobku od kontaktu sonotrody. Obvykle se svařování provádí za konstantního tlaku, ale u moderních systémů může docházet ke změně tlaku v průběhu svařování. [1]

### 2.7.4 Amplituda

Amplituda je důležitým parametrem při nastavení svařovacího cyklu. Má vliv na rychlost tavení polymeru. Čím vyšší amplituda, tím rychleji dochází k zahřívání materiálu. Obvykle se používá nejvyšší možná amplituda, která ještě nezpůsobuje poškození svařovaných součástí. Vysoké amplitudy požadují semikrystalické materiály, polymery s vysokou teplotou tavení a využívají se pro svařování ve vzdáleném poli. Nižší amplitudy lze použít při svařování v blízkém poli a pro amorfní polymery. [1, 2]

Nastavení amplitudy je možné mechanicky pomocí boosteru nebo sonotrody, tak se v praxi provádí velké změny. Dále je možné upravovat amplitudu i elektricky, tím se provádí menší doladování. [1]

### 3 SPEKTROSKOPICKÉ METODY

Spektroskopie jako obor zkoumá interakce látek s elektromagnetickým zářením. Z analýzy množství absorbovaného nebo emitovaného záření získává hodnoty o energetických hladinách obsažených ve zkoumaném vzorku. Ze získaných dat lze získat informace o struktuře molekul nebo krystalů, z nichž se daná látka skládá. [5]

Dělení spektroskopických metod:

1. Dle vlnových délek elektromagnetického záření

- Radio-spektroskopie
- Submilimetrová spektroskopie
- Optická spektroskopie
- Rentgenová spektroskopie
- Spektroskopie gama záření

2. Dle studovaných látek

- Atomová spektroskopie
- Molekulová spektroskopie
- Spektroskopie krystalů

3. Dle charakteru spektra

- Emisní spektroskopie
- Absorpční spektroskopie
- Ramanova spektroskopie
- Fluorescenční spektroskopie
- Laserová spektroskopie
- Jaderná spektroskopie [5]

#### 3.1 Použití metod

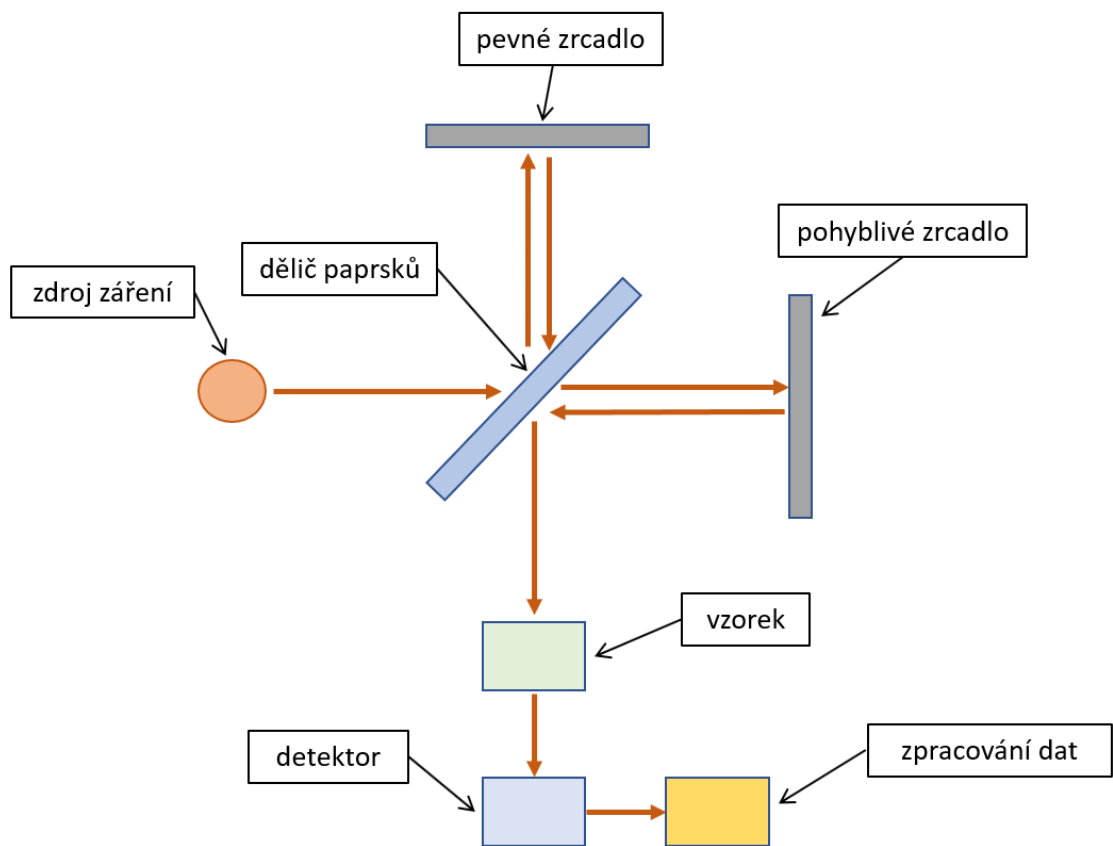
Spektroskopické metody nachází uplatnění v medicíně např. pro identifikaci léků, v obalovém průmyslu pro stanovení čistoty monomerických materiálů, ve forenzní analýze, při kontrole potravin, agrochemii, Další oblastí použití těchto metod se nachází ve výzkumné činnosti, při fyzikálních experimentech a u spousty dalších odvětví. [5]

Významné je využití těchto metod při studiu polymerů. Využívá se pro analýzu chemického složení polymerů. Zajišťuje jak kvantitativní, tak i kvalitativní analýzu. Je jí možné použít

pro určení množství nečistot, aditiv, změkčovadel, plniv a zbytkových monomerů v polymeru. Je možné také zkoumat vlivy prostředí na materiál a změny struktury polymeru v čase. Dále jsou rozebrány principy některých spektroskopických metod, se kterými se můžeme setkat. [7]

### 3.2 Infračervená vibrační spektroskopie

Jedná se o nedestruktivní analytickou metodu, která je schopna identifikace organických i anorganických sloučenin ve zkoumané látce, a to na základě interakce infračerveného záření. Je možné zjišťovat informace o tvaru a struktuře molekul. Lze zkoumat látky jak plynné, kapalně tak i pevné. Tato metoda zkoumá, jak se absorbuje infračervené záření při průchodu vzorkem. Při průchodu záření dochází ke změně rotačně vibračních energetických stavů, které jsou závislé na změně dipólových momentů molekul zkoumané látky. Molekuly jsou složeny z atomů, kde každý atom projevuje vibrace kolem své rovnovážné pozice. Frekvence atomů se mění s hmotností atomů a také s jejich vazebnou silou. Frekvence infračerveného záření může za jistých podmínek rezonovat s vibracemi molekul, a tak se může zároveň část energie absorbovat. Analyzovat nelze látky, které nejsou schopny pohlcovat infračervené záření, jsou to např. kyslík, dusík, vodík, grafit a síra. Schéma infračervených spektrometrů je zobrazeno na Obr. 14. [5, 7, 14]



Obr. 14 Princip infračerveného spektrometru [23]

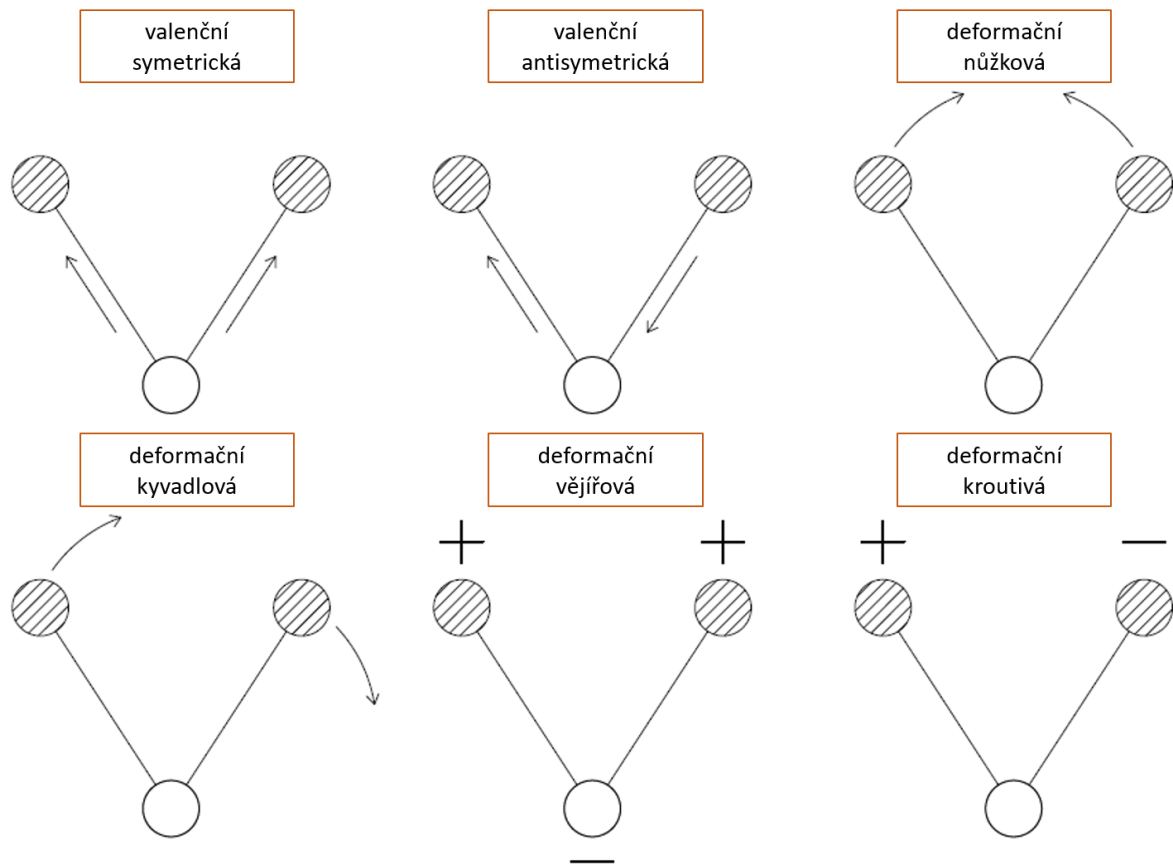
### 3.2.1 Typy vibrací

Vibrace je možné popsat jako průběžné změny délky a úhlů vazeb. Aby bylo možné pozorovat vibraci v infračerveném spektru, musí při vibraci docházet ke změně dipólového momentu. Pozorovatelné jsou obvykle polární vazby, naopak vazby nepolární budou pozorovatelné velmi slabě. Jelikož se při natáhnutí vazby spotřebuje daleko více energie než na ohnutí vazby, jsou frekvence valenčních elektronů vždy na vyšší úrovni, než frekvence odpovídající deformačním vibracím dané funkční skupiny. Některé typy vibrací jsou zobrazeny na Obr. 15. [5]

Dělení vibrací:

1. Valenční (převážně se mění délka vazby)
  - Symetrická
  - Asymetrická
2. Deformační (převážně se mění vazebné úhly)

- Rovinné – nůžkové, kyvadlové
- Mímorovinné – vějířové, krouživé [5]



Obr. 15 Typy vibrací [22]

### 3.2.2 Infračervené spektrometry

Můžeme je rozdělit do tří základních skupin:

- Disperzní infračervené spektrometry – obsahují zdroj infračerveného záření, jedná se o keramickou tyčinku s navinutým odporovým vláknem, které se žhává na teplotu 1000 °C až 1400 °C. Ten následně prochází vzorkem. Vzorek je umístěn v kyvetě z materiálu, který je schopen propouštět infračervené záření, obvykle z halogenidů alkalických kovů, např. KBr, NaCl, CsI, CaF<sub>2</sub>. Dále je v zařízení monochromátor, ten postupně přivádí záření o vybraných vlnových délkách na detektor. Tyto spektrometry jsou v praxi na ústupu, mají nevýhodu v časové náročnosti měření.

- Nedisperzní infračervené spektrometry – analogické k disperzním spektrometrům. Rozdíl je v tom, že nepotřebují monochromátor záření. Monochromatické záření totiž vychází přímo ze zdroje infračerveného záření. Jako zdroj tohoto záření se používají lasery.
- Infračervené spektrometry s Fourierovou transformací (FTIR) – zdrojem záření je jako v předchozích případech keramická tyčinka. Ta po zahřátí emituje infračervené záření, to dopadá na dělič paprsků pod úhlem  $45^\circ$ . 50 % záření projde na pohyblivé zrcadlo a zbylých 50 % se odráží na pevné zrcadlo. Paprsky se následně odrážejí a na děliči paprsků interferují. Intenzita záření je závislá na pohybu zrcadla. Následně je rekombinovaný paprsek odražen do prostoru s kyvetou, která obsahuje vzorek a po průchodu dopadá na detektor. Detektor snímá signál na základě polohy pohyblivého zrcadla. Provedením vyššího počtu skenů se zvýší kvalita spektra, zlepšuje se tím poměr signálu ku šumu. FTIR spektrometry jsou v současnosti jedny z nejpoužívanějších. Jsou schopny z krátkého měřicího času získat kvalitní spektrum s vysokým rozlišením. [5, 7, 14]

### 3.3 Ramanova spektroskopie

Tato metoda se řadí stejně jako infračervená spektroskopie mezi nedestruktivní vibrační molekulové spektroskopie. Záření, které rozptýlí molekuly obsahuje fotony, jenž mají stejnou frekvenci jako dopadající záření. Ale může také obsahovat fotony, které mají změněnou nebo posunutou frekvenci. Metoda je založena na tom, že měří posunutou frekvenci fotonů. Posun frekvence je nazýván jako Ramanův jev. [5]

Podstatou metody je dvoufotonový přechod dvěma stacionárními vibračními stavy molekuly. Vzorek se ozáří monochromatickým paprskem, nejčastěji laserem. Podstatná část paprsků se od vzorku elasticky odrazí. Odražené záření má stejnou vlnovou délku jako záření dopadající. Velmi malá část paprsků se od vzorku neelasticky odrazí. Díky tomu je možné pozorovat posun vlnové délky mezi dopadajícím a odraženým zářením. [5, 6]

Rozdíl v Ramanově spektroskopii vůči infračervené spektroskopii je v tom, že musí být aktivní daný vibrační mód v Ramanově spektru, během vibračního pohybu je nutná změna polarizovatelnosti. Oproti infračervené spektroskopii, kde je základní podmínka změna dipólového momentu. [6, 7]



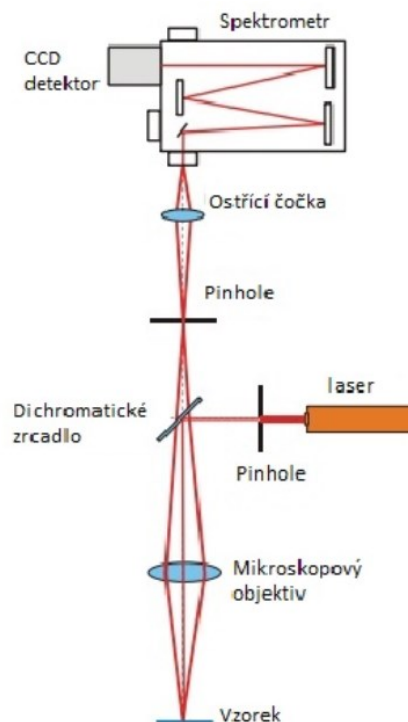
Metodu lze použít pro analýzu plynných, kapalných i pevných látek. Mezi výhody patří prakticky nulová úprava vzorků před měřením. Navíc nabízí vysoký poměr informací, které je možné získat ze spektrálních knihoven. [5]

### 3.3.1 Ramanovy spektrometry

Pro praktické měření se využívá Ramanových spektrometrů. Jejich schéma je zobrazeno na Obr. 16. Obecně se tyto spektrometry skládají ze: zdroje excitujícího záření (laseru), komory, sběrné optiky, detektoru a disperzního prvku nebo interferometru dle metody. Aby bylo možné pozorovat Ramanova spektra, je nezbytné separovat Ramanovo rozptýlené záření do jednotlivých vlnových délek. Zde se toho dosahuje za pomoci fokusace Ramanova signálu na mřížku, ta má za úkol rozdělit jednotlivé vlnové délky. Následně se tento paprsek fokusuje na plošný CCD detektor. [5, 7]

Spektrometry se dělí na:

- Disperzní Ramanův spektrometr – za zdroj se používá laser s excitačním zářením v UV-Vis oblasti
- Ramanův spektrometr s Fourierovou transformací – za zdroj se využívá laseru s excitačním zářením oblasti vlnových délek blízko infračervené oblasti [5]



Obr. 16 Schéma Ramanovy spektroskopie [24]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍLE PRÁCE

Hlavním požadavkem praktické práce je studium strukturálních změn v polymerech po svařování ultrazvukem. Pro splnění tohoto cíle je nutné připravit vhodné vzorky, které budou následně zkoumány na spektrometrech.

Cíle tedy jsou:

- Zvolit vhodný materiál pro svařování
- Připravit vhodné vzorky pro svařování
- Měření a hodnocení struktury materiálu
- Vyhodnocení naměřených výsledků
- Modelování transientního teplotního pole polymerů

## 5 EXPERIMENT

Při svařování termoplastů je nutné uvažovat, zda a jak může svařovací proces ovlivňovat svařovaný materiál a tím i konečné vlastnosti pro finální výrobek. Problémem při svařování ultrazvukem by mohla být vysoká teplota v místě svaru vytvořená třením svařovaných dílů. Přestože svařování ultrazvukem patří mezi nejrychlejší metody svařování plastů, mohlo by teoreticky docházet ke změně struktury materiálu, případně k mírné degradaci v blízkém okolí svaru. Primárním cílem má být tedy zjištění, zda dochází ke změnám po svařování.

Z důvodu lepšího přenosu ultrazvukové energie a vyšší efektivity ultrazvukového svařování se využívá energetických můstků neboli návarových hran, drážek. Přínosy těchto designových úprav byly prokázány jak při studiu pevnosti svařenců, tak i četným použitím v praxi. Výrazně zlepšují svařitelnost, pevnost spoje, jsou energeticky výhodnější atd. Z toho důvodu je nutné pro tento experiment vytvořit vzorky, které budou tyto energetické můstky obsahovat. Zároveň je v plánu vytvoření i svařenců bez návarových hran, tedy svařováním natupo. To by mohlo ukázat, zda dochází k rozdílným strukturálním změnám mezi těmito typy svařování. Předpokladem je také použití amorfních i semikrystalických polymerů, kde by bylo možné pozorovat, zda se u některé skupiny projevují změny výrazněji.

Samotný experiment se bude skládat z několika částí, je nutné zvolit vhodné materiály, připravit vzorky a provést měření jejich struktury.

### 5.1 Polymery

#### 5.1.1 Chemická struktura polymerů

Polymery se skládají z velké počtu makromolekul spojených vazbami, které vytváří dlouhé řetězce. Za základní stavební jednotky, které se v řetězci stále opakují, jsou považovány tzv. monomery (pro použité materiály viz Obr. 17–20). Základní prvek, který provází polymery je atom uhlíku.

Polymery můžeme rozdělit na plasty a elastomery. Plasty dále dělíme na termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty jsou materiály, které je možné opakovaně převádět do stavu taveniny nebo viskózního toku. Reaktoplasty jsou naopak plasty, které za určitých podmínek (např. působení tepla, vytvrzovací prostředek, tlak) vytváří pevnou trojrozměrnou síť, kterou není možné dále tvářet působením tepla nebo např. tlaku. Výběr materiálu pro experiment musel probíhat ze skupiny termoplastů, ty jediné se dají z polymerů svařovat.

Termoplasty dále dělíme na amorfnní a semikrystalické. Amorfnní termoplasty mají náhodné, nepravidelné uspořádní, makromolekuly vytváří náhodná klubka, která se vzájemně proplétají v celém řetězci. Typickou vlastností je, že jsou po ztuhnutí čiré. Semikrystalické termoplasty vytváří místa s uspořádanými makromolekulami (krystality), které obklopují neuspořádané makromolekuly, stejné jako u amorfnních termoplastů. Po ztuhnutí získávají mléčné zabarvení.

Díky požadavkům na vzorky pro experiment, byly zvoleny 4 druhy polymerních materiálů. Jednalo se o dva amorfnní a dva semikrystalické plasty.

Amorfnní:

- PMMA
- ABS

Semikrystalické:

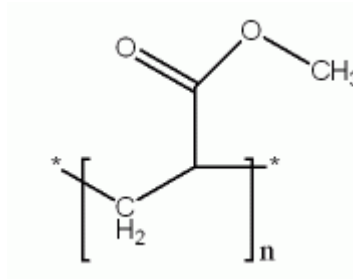
- PP
- PA 6

Svařování je proces, který z podstaty své funkce potřebuje vytvořit takové termodynamické podmínky, při kterých bude možný vznik nových meziatomárních vazeb. Z těchto důvodů bude ve svaru docházet k ovlivnění teplem, případně tlakem. Tyto faktory mohou ovlivňovat samotnou strukturu materiálu. Může docházet k odbourávání nebo štěpení řetězců. Při dlouhodobém působení tepla může docházet k depolymeraci, tedy ke štěpení na nízkomolekulární látky, případně monomer, kde se přerušují polymerní řetězce, ale samotné chemické složení se nemění. Např. by také mohlo docházet k oxidaci polymeru, kdy by v molekulách ubývaly atomy vodíku, a naopak přibývaly atomy kyslíku.

### 5.1.2 Vlastnosti použitých polymerů

- **Polymetylmetakrylát (PMMA)**

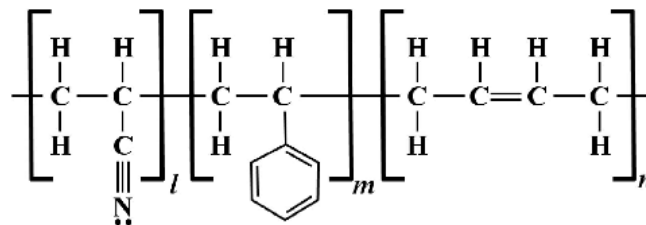
Označuje se také jako plexisklo nebo akrylátové sklo. Má velmi dobré optické vlastnosti a díky tomu se může používat jako náhrada skla. Surový materiál je čirý, lesklý, tvrdý. Dobře odolává povětrnostním vlivům a zvládá působení UV záření. Je vhodný pro citlivé aplikace, protože je biologicky inertní.



Obr. 17 Vzorec PMMA [26]

- **Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)**

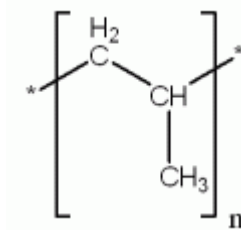
Jedná se o tuhý, houževnatý, málo nasákavý, zdravotně nezávadný kopolymer s dobrou odolností proti mechanickému poškození. Využívá se při výrobě automobilových nárazníků, kufrů, pouzder, dětských hraček, lahví, kuchyňských potřeb.



Obr. 18 Vzorec ABS [27]

- **Polypropylen (PP)**

Patří mezi nejběžněji využívané plasty. Vyznačuje se dobrou kombinací tuhosti, pružnosti a odolnosti vůči nárazům. Využívá se např. pro výrobu kabelové izolace, nebo lan a provazů schopných plavat na vodní hladině, v potravinářském průmyslu se využívá pro tvorbu obalů. Má dobrou odolnost vůči UV záření.

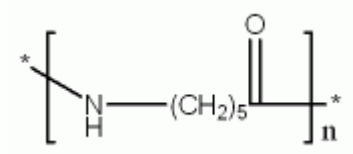


Obr. 19 Vzorec PP [26]

- **Polyamid 6 (PA6)**

Vyznačuje se zajímavou kombinací tvrdosti, pevnosti a zároveň houževnatosti. Jeho nevýhodou je velmi vysoká hygroskopicitá, to znamená, že velmi rychle absorbuje

vzdušnou vlhkost. Jeho vlastnosti jsou vhodné pro použití ve strojírenství, pro výrobu funkčních dílů, např. ozubená kola, řemenice, části mechanismů apod. Jeho další uplatnění můžeme nalézt v textilním průmyslu.



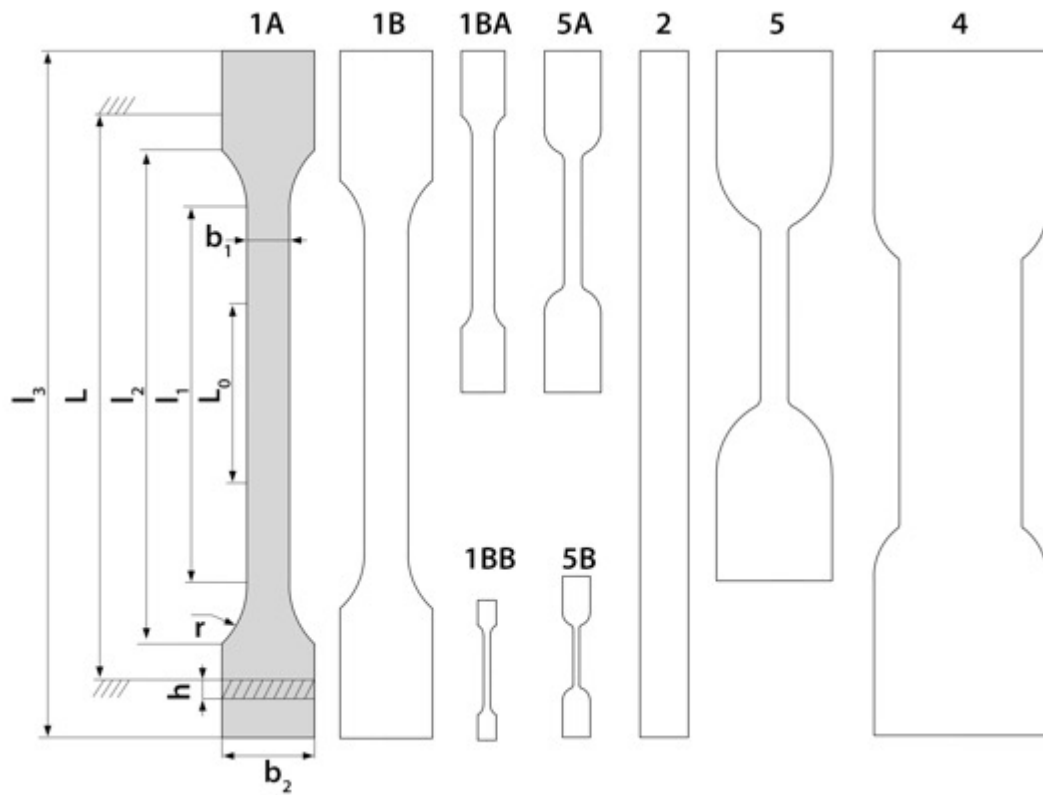
Obr. 20 Vzorec PA 6 [26]

## 5.2 Příprava vzorků

Při přípravě vzorků pro spektroskopické měření muselo proběhnout několik dílčích kroků. Od vstřikování ve tvaru zkušebních těles pro mechanické zkoušky, přes řezání a obrábění těchto vzorků, až po jejich svařování a následné konečné frézování.

### 5.2.1 Vstřikování zkušebních těles

Polotovary (viz Obr. 22) pro přípravu vzorků byly připraveny metodou vstřikování. Roztavený polymer byl vstřikován do formy pro normalizovaná zkušební tělesa. Kde je jejich tvar a rozměr dán normou ČSN EN ISO 527-1. Různé tvary zkušebních tělísek jsou zobrazeny na Obr. 21.



Obr. 21 Různé tvary zkušebních tělísek [4]

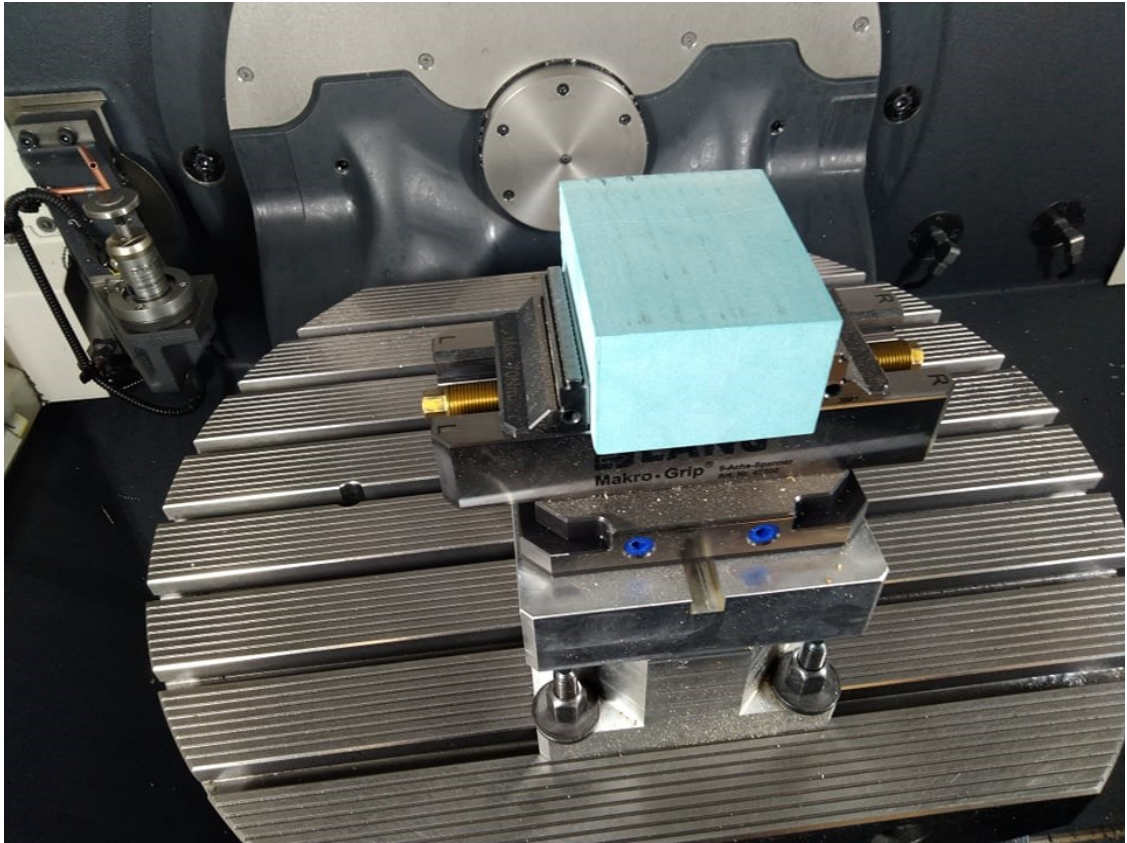




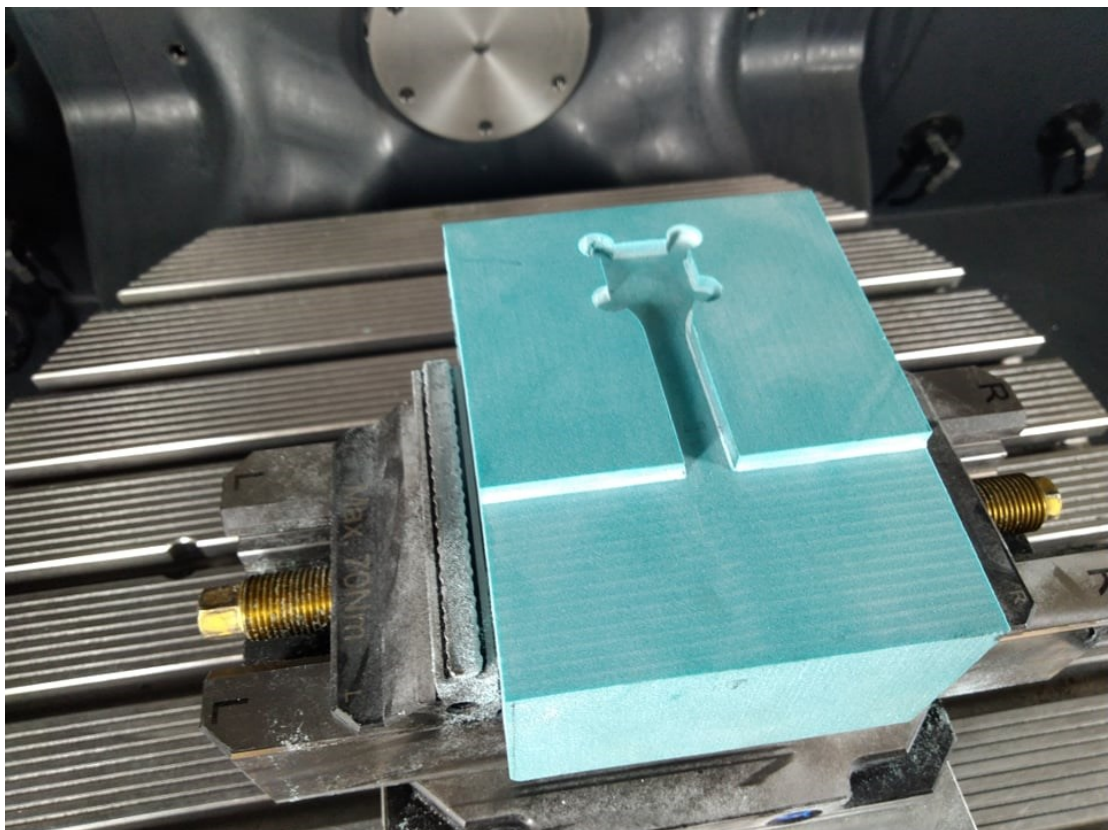
Obr. 22 Odformované zkušební těleso pro další zpracování

### 5.2.2 Výroba přípravku pro obrábění

Pro obrábění vzorků bylo nutné vyřešit jejich upnutí do obráběcího centra. Byl navržen přípravek upínající se do čelistí svěráku umístěném na pohyblivém stole obráběcího centra DMG MORI DMU 50. Materiál přípravku byl zvolen Necuron, ten se vyznačuje snadnou obrobiteľností a hodí se pro výrobu prototypů. Materiál na přípravek a jeho upnutí je vidět na Obr. 23. Hotový přípravek je vidět na Obr. 24.



Obr. 23 Polotovár přípravku a jeho upnutí



Obr. 24 Vytvořený přípravek pro frézování návarových hran

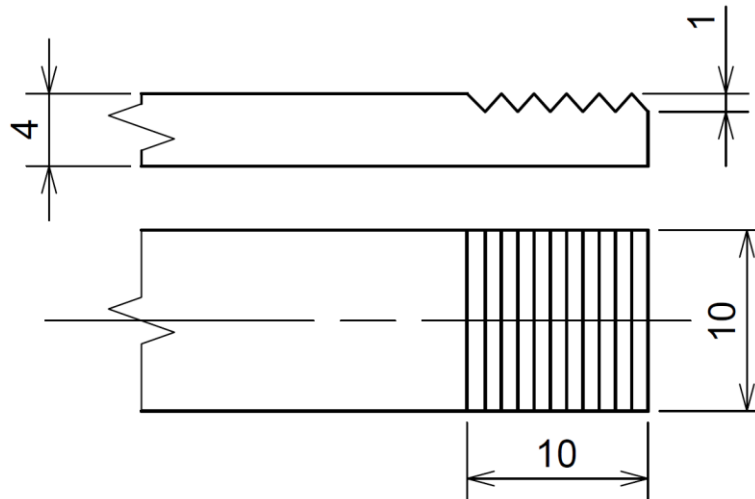
Použité obráběcí centrum (viz Obr. 25) disponuje možností pětiosého simultánního obrábění. Obrobek je osazen na naklápěcím rotačním stole s možností zatížení až 300 kg. V centru je umístěn zásobník na 30 nástrojů. Vřeteno může dosahovat až 20 000 ot/min. Zařízení disponuje komplexním chladicím systémem s možností nastavení dle požadované aplikace. Obráběcí centrum DMG MORI DMU 50 bylo použito nejen pro výrobu přípravku, ale také pro vytvoření návarových hran na polotovarech před svařováním a také při odfrézování nepotřebné části vzorku před spektroskopickým měřením. [25]



Obr. 25 DMG MORI DMU 50 [25]

### 5.2.3 Frézování návarových hran

Dle 3D modelu požadovaného tvaru byl v softwaru NX 12 vytvořen program pro obrábění. Do přípravku se následně vkládaly rozřezaná zkušební tělesa, která byla následně frézována. Kvůli minimálnímu tepelnému ovlivnění při obrábění byla spuštěna chladicí emulze. Úhlu na drážkách bylo dosaženo pomocí naklápění stolu a jako nástroj byla zvolena ostrá fréza průměru 6 mm. Schéma požadovaného tvaru je zobrazeno na Obr. 26.



Obr. 26 Schéma návarových hran

#### 5.2.4 Svařování vzorků

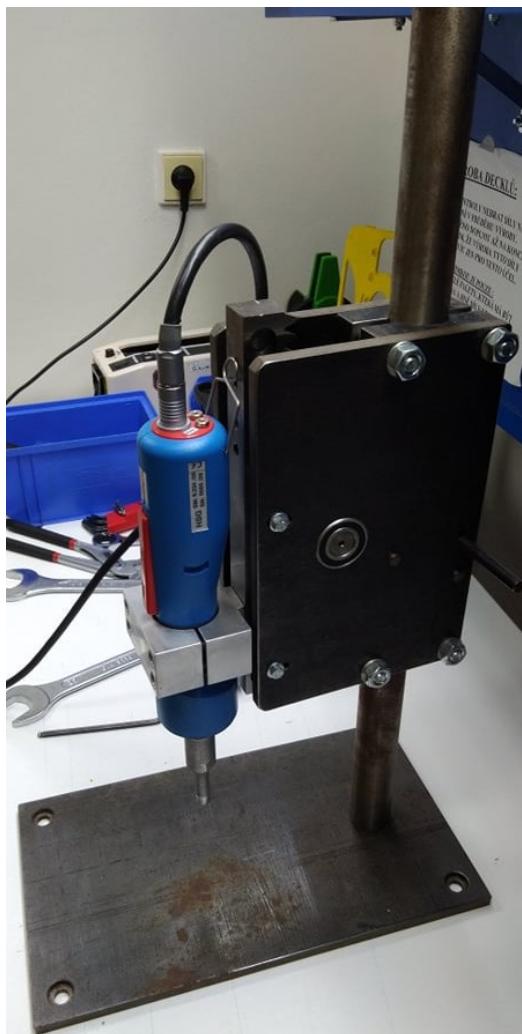
Svařování probíhalo ve firmě PLASTIKA a.s. na ruční ultrazvukové svářečce Herrmann HSG. Podobné typy svářeček se používají pro malosériovou výrobu, nebo pro opravy. Jedná se o kompaktní a přenosná zařízení.

Svářečka byla umístěna ve sloupovém stojanu (viz Obr. 27), vytvořeném na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně. Masivní stojan s hřebenovým mechanismem zajišťuje stabilní a tuhou konstrukci, kdy je možné optimálně přenést kmity do dílů. Konstantní přitlačná síla je zajištěna pomocí momentového klíče. Svařované díly byly upevněny v upínacím přípravku (viz Obr. 28), kde byly díly upevněny pomocí šroubu. Příklady svařených vzorků jsou zobrazeny na Obr. 29.

Pro samotné svařování jsou důležité svařovací parametry. Jejich vliv byl podrobně probrán v teoretické části. Svařovány byly vzorky jak s návarovou hranou, tak i natupo. Zde byly nastaveny hodnoty:

- Přitlačná síla: 343 N, což odpovídá nastaveným 8 Nm na momentovém klíči
- Amplituda kmitů: 80 %, to odpovídá hodnotě 8,8  $\mu\text{m}$  (max 11  $\mu\text{m}$  u této sonotrody)
- Frekvence kmitů: 35 kHz
- Svařovací energie: lišila se u jednotlivých materiálů
  - PMMA – 25 J
  - ABS – 50 J
  - PP – 100 J
  - PA 6 – 50 J





Obr. 27 Ultrazvuková svářečka ve stojanu



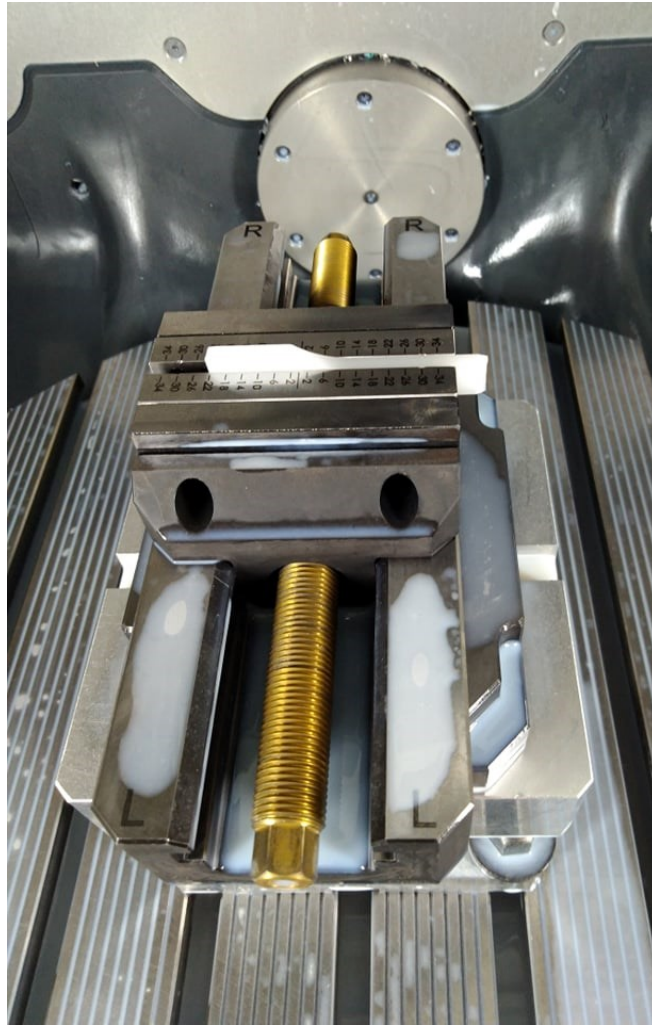
Obr. 28 Upínací přípravek



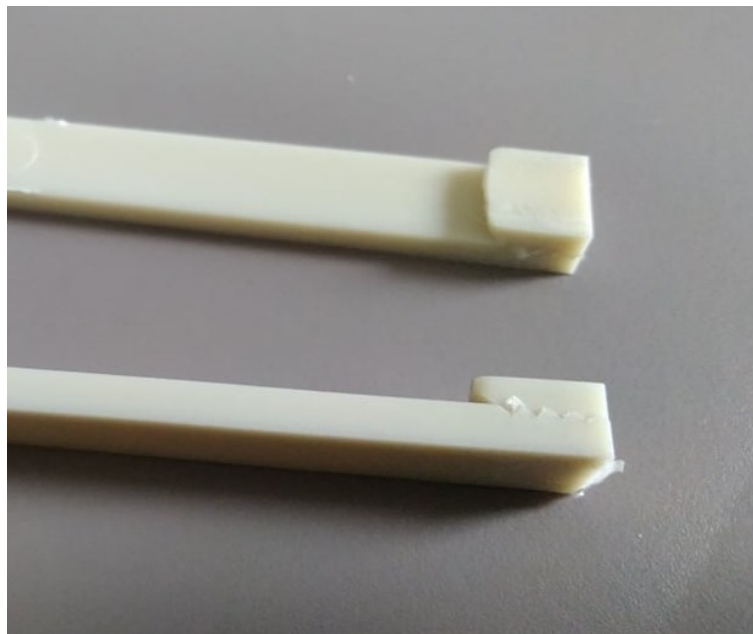
Obr. 29 Vzorky po svařování

#### 5.2.5 Obrábění v místě svaru

Po svařování byla ze vzorků odstraněna přebytečná část materiálu za svarem. To bylo provedeno pomocí štípacích kleští. Následně se zkrácený vzorek upnul do svěráku obráběcího centra (viz Obr. 30). A potom bylo provedeno odfrézování materiálu v místě svaru – přeplátování testovacích těles. Obrábění probíhalo za dostatečného chlazení pomocí emulze, aby nedocházelo k tepelnému ovlivnění vzorků. Dotykové plochy svěráku obsahovaly zasouvací kolíky. Tyto kolíky byly nastaveny na tvar obráběných těles a díky nim bylo možné docílit konstantního upínání. Stav vzorků na konci této operace je vidět na Obr. 31.



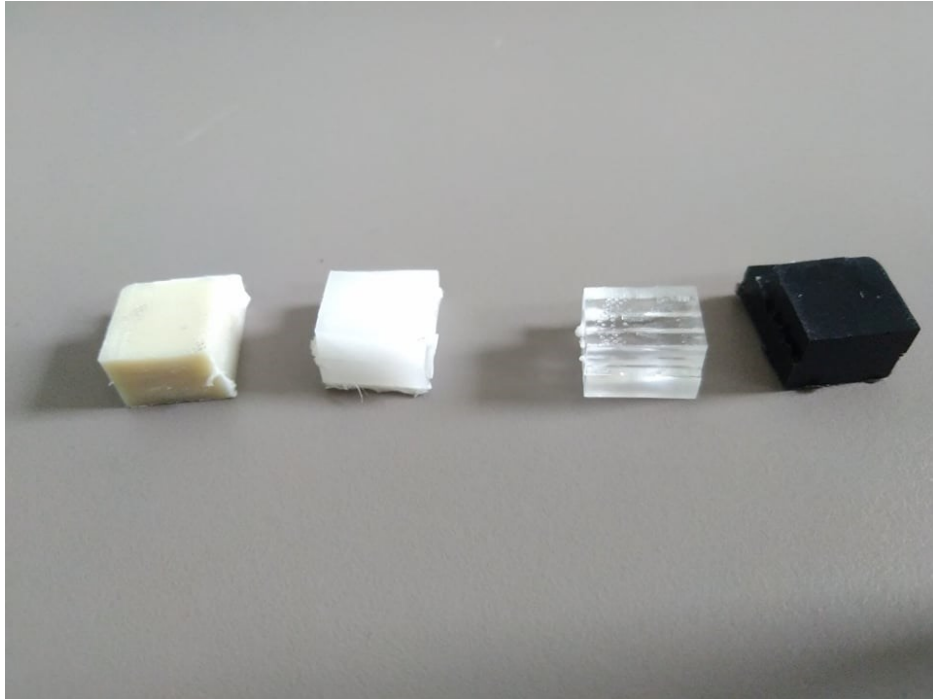
Obr. 30 Upnutí svařených vzorků



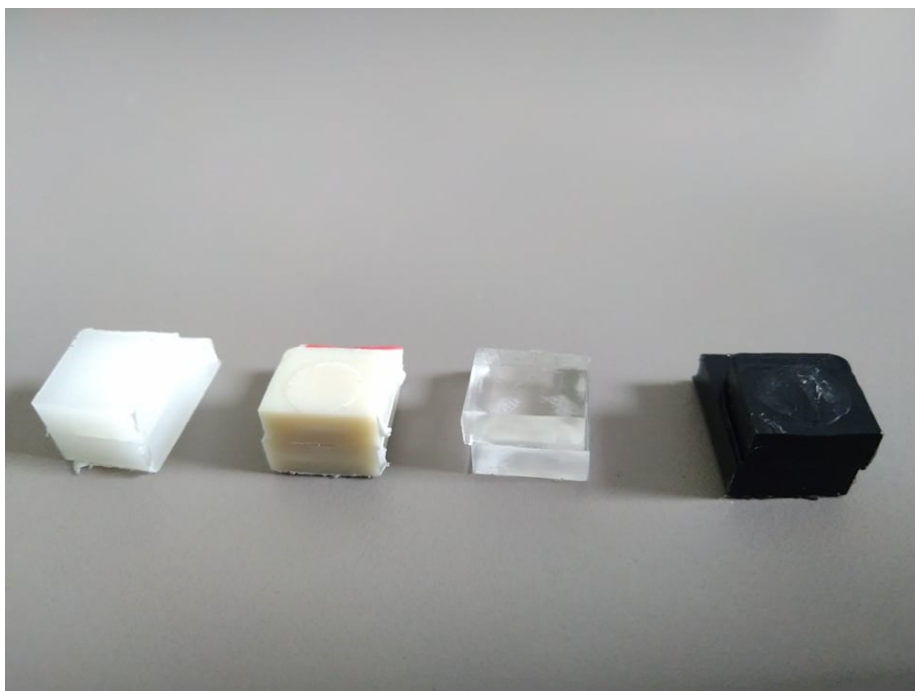
Obr. 31 Stav vzorků po zarovnání

### 5.2.6 Úprava délky vzorků

Na závěr byly vzorky zkráceny na délku použitelnou ve spektrometrech. To bylo provedeno nůžkami na plech, z důvodu zabránění tepelného ovlivnění, např. tření vytvořené pilou. Vytvořené vzorky jsou zobrazené na Obr. 32 a na Obr. 33.



Obr. 32 Dokončené vzorky s návarovou hranou



Obr. 33 Dokončené vzorky svařené natupo



### 5.3 Analýza struktury materiálu

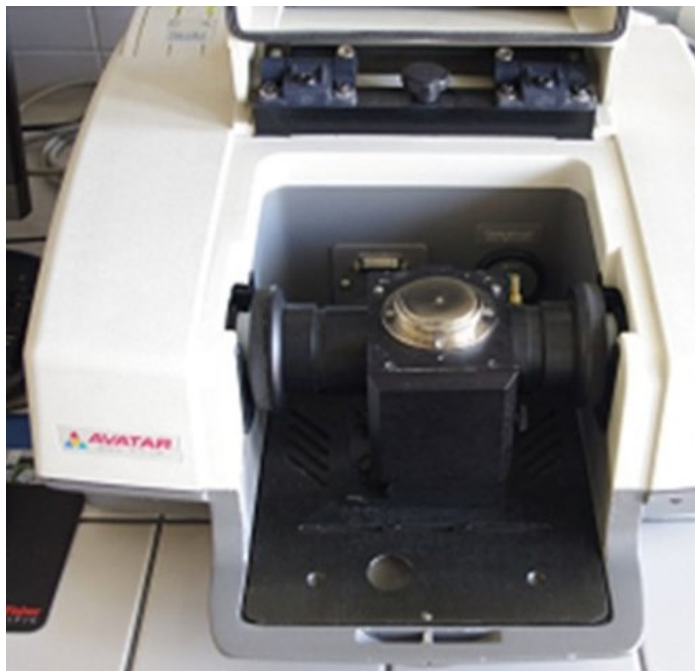
Pro stanovení struktury materiálu po svařování ultrazvukem byly použity dvě metody, jednalo se o:

- Infračervenou vibrační spektroskopii
- Rentgenovou difrakční analýzu

#### 5.3.1 Infračervená vibrační spektroskopie

Tato metoda se využívá pro nedestruktivní analýzu organických i anorganických látek. Analýza je založena na různé interakci infračerveného záření. Je schopna měřit vzorky v plynném, kapalném i pevném skupenství. Jako označení pro tuto metodu se využívá zkratka FTIR. Princip měření vychází z absorpce infračerveného záření, které je vysíláno z přístroje na měřený vzorek. Následně dochází ke změnám stavu rotačně vibračních molekul, v závislosti na změně dipólových momentů. Metodu nelze použít při měření látek neabsorbujících infračervené záření, jako jsou kyslík, dusík, vodík, grafit nebo síra.

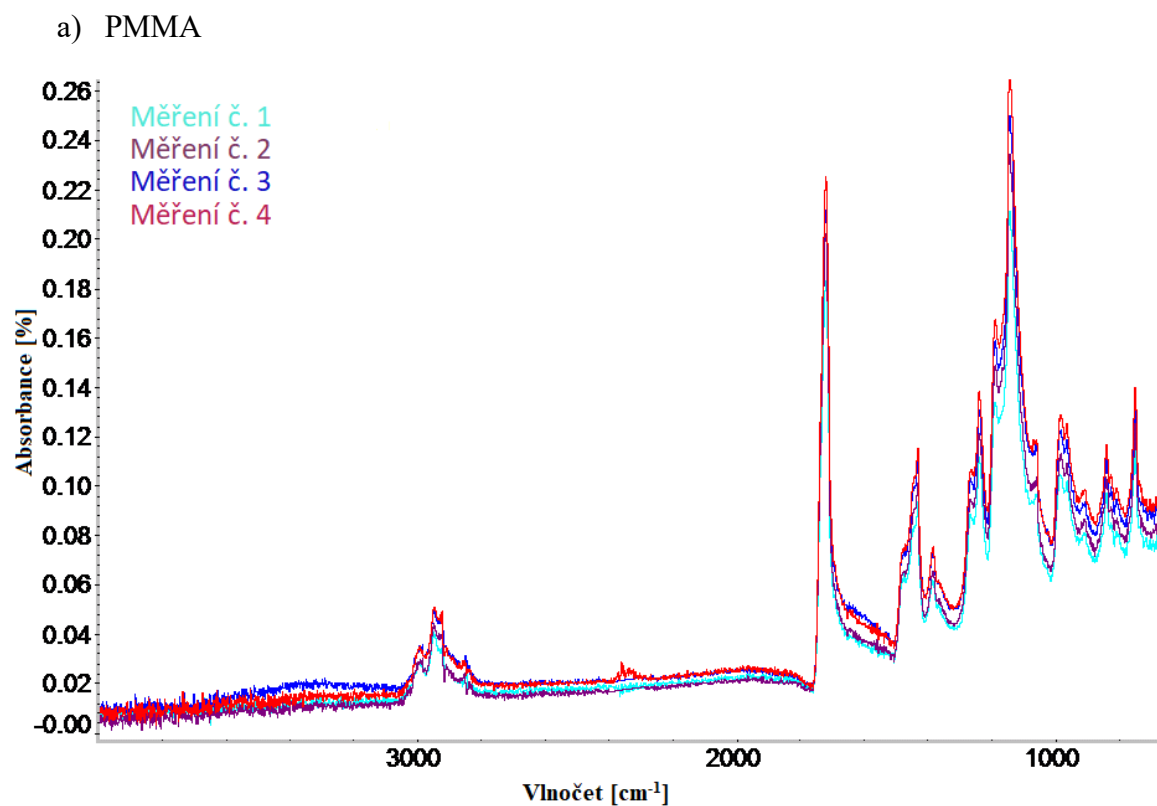
Měření struktury touto metodou probíhalo na přístroji Nicolet Avatar 320 ATR (viz Obr. 34). Toto zařízení pracuje s Fourierovou transformací. A je schopné pronikat do hloubky vzorku v rozsahu desetin až jednotek mikrometrů.



Obr. 34 Nicolet Avatar 320 ATR

Výsledky měření jsou znázorněny v podobě grafu, který je sestaven ze závislosti intenzity (absorbance) IR záření na vlnové délce záření. Jako jednotky pro intenzitu se využívají procenta. Pro popis infračerveného záření se využívá vlnočeta, s jednotkou  $\text{cm}^{-1}$ , která označuje tzv. reciproký centiment. V praxi se metody používá tak, že každá zkoumaná látka má své specifické spektrum dle svého složení a chemických vazeb. Kde po zjištění těchto hodnot se následně porovnává s knihovnami spekter.

Měření touto metodou proběhlo na vzorcích PMMA a PP. Tedy jednom amorfnním a jednom semikrystalickém polymeru.



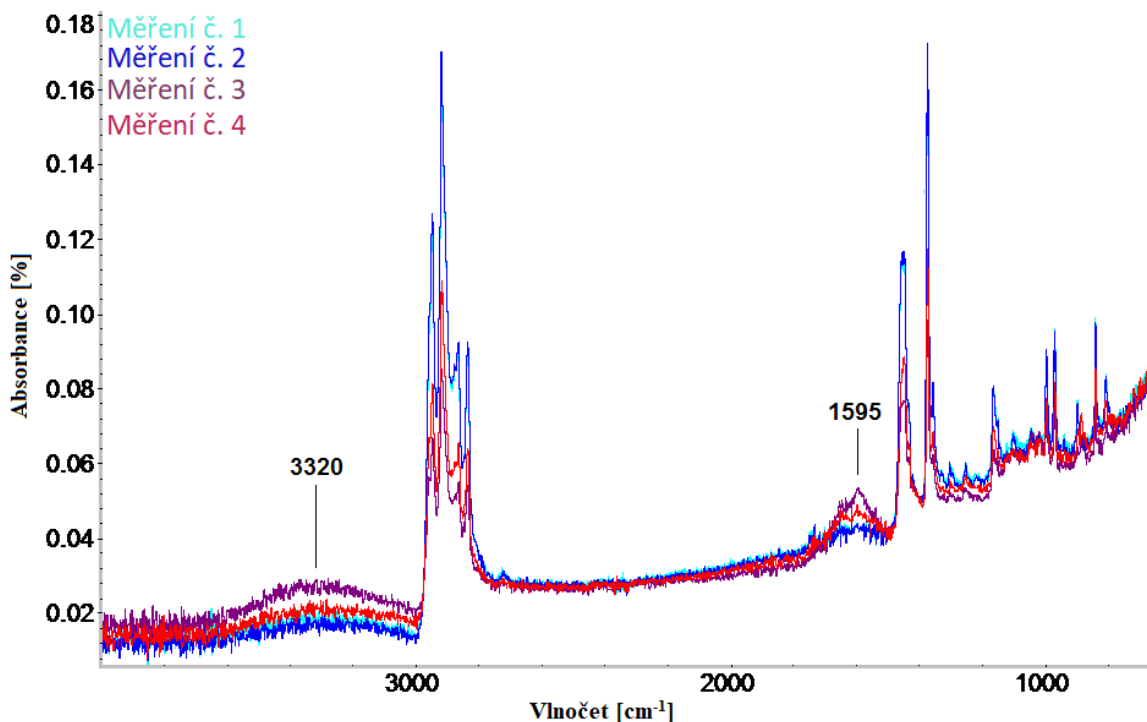
Obr. 35 Výsledky FTIR pro PMMA

Pro zjištění struktury vzorku PMMA byly provedeny 4 měření. Měření č. 1 probíhalo na vzorku, který byl pouze odřezán ze vstříknutého tělíška. Měření č. 2 probíhalo na referenčním kusu, u kterého bylo provedeno srovnání hrany pomocí obráběcího centra. Následovalo měření dvou svařovaných vzorků. U měření č. 3 se jednalo o svařenec opatřený návarovými hranami a měření č. 4 probíhalo na vzorku svařeném bez návarových hran, tzv. natupo.

Z naměřeného grafu (Obr. 35) je patrný minimální rozdíl mezi svařeným a nesvařeným vzorkem. Pouze u vlnočtu na hodnotě 3400 až 3200  $\text{cm}^{-1}$  došlo ke změně. To může ukazovat na

mírné zvýšení počtu -O-H vazeb. To lze přisuzovat svařování za atmosférických podmínek a možné navázání kyslíku ze vzduchu.

b) PP



Obr. 36 Výsledky FTIR pro PP

U analýzy PP byly provedeny čtyři měření. Kde měření č. 1 byl vzorek, který byl odřezán ze vstříknutého tělíska, č. 2 byl vzorek u kterého bylo provedeno srovnání hrany pomocí CNC obráběcího centra. Následovalo měření svařených vzorků. Měření č. 3 bylo provedeno na svařenci opatřeném návarovými hranami. A poslední měření č. 4 bylo provedeno na vzorku, který byl svařen natupo, bez návarových hran.

Dle grafu naměřených spekter (Obr. 36), je možné usuzovat, že došlo k určitým spektrálním změnám. V bodě hodnoty vlnočtu  $1595\text{ cm}^{-1}$  je možné pozorovat zvýšené množství ketonových vazeb. V místě pod hodnotou  $3000\text{ cm}^{-1}$  je pozorovatelný úbytek  $-\text{CH}_3$ , který může způsobovat rozpad postranního řetězce. Dále v blízkosti této hodnoty je možné pozorovat úbytek  $-\text{CH}_2$  vazby, což může indikovat štěpení hlavního řetězce. Dále je patrný nárůst -O-H vazeb u hodnoty  $3320\text{ cm}^{-1}$ , který může souviset s degradací polymerního řetězce.

### 5.3.2 Rentgenová difrakční analýza

Za účelem posouzení krystalické struktury polymerů po svařování ultrazvukem bylo využito rentgenové difrakční analýzy. Vzorky byly měřeny na difraktometru PANalytical X'Pert PRO viz Obr. 37. Napětí, při kterém experiment probíhal bylo 40 kV a proud byl 30 mA.

Rentgenové difraktometry jsou zařízení, které jsou schopny vykreslovat rozptyly na elektrodech krystalické hmoty, a to díky působícímu rentgenovému záření s vysoce monochromatickým paprskem a přesně danou vlnovou délkou. Uspořádání použitého difraktometru je tzv. Bragg-Brentovo rozložení. Zde se vzorek umísťuje doprostřed kruhové komory, kde při měření okolo vzorku plynule obíhá zdroj i detektor RTG záření. [29]

Principem metody je rozptyl a interference rozptýleného záření. Na atomy v určitém krystalu dopadá vlna primárního záření, jádra zůstávají v klidu bez rozkmitu, ale rozpohybují se elektrony svým kmitáním o stejné frekvenci, tak jako primární záření, a tím se z nich stávají zdroje sekundárního záření. Tento typ rozptylu se označuje jako koherentní. Průběhem metody dochází ke skládání vln, označované jako interference. Výstupem interference je difrakce (soubor vln), ty se následně šíří od krystalu v určených směrech. RTG záření má vlnovou délku srovnatelnou se vzdáleností mezi jednotlivými mřížkovými rovinami. Po průběhu difrakce nastává proces tzv. pružného rozptylu, tzn. vlnová délka dopadajícího a rozptýleného záření se rovnají. Jednotlivé roviny rozptýlí jen velmi malou část záření. Ale dostatečnou intenzitu pro kvalitní pozorování vytvoří velký počet těchto rovin. Výsledkem pozorování je difrakční obraz zkoumaného krystalu. [29]



Obr. 37 Difraktometr PANalytical X'Pert PRO [28]

Pro měření touto metodou bylo důležité nařezat vzorky na tenké části ideálně bez tepelného ovlivnění zkoumaného materiálu. Pro přípravu vzorků zde byla použita pásová pila PROMA PPK – 90U viz Obr. 38. Jedná se o pilu vhodnou pro řezání běžných materiálů jako např. hliníku, neželezných kovů, ocelí, plastů atd. Příkon stroje má hodnotu 400 W, maximální rozměry obrobku při 90 ° řezu jsou 90 x 120 mm. Je možné nastavit řeznou rychlost na 20/29/50 m/min.

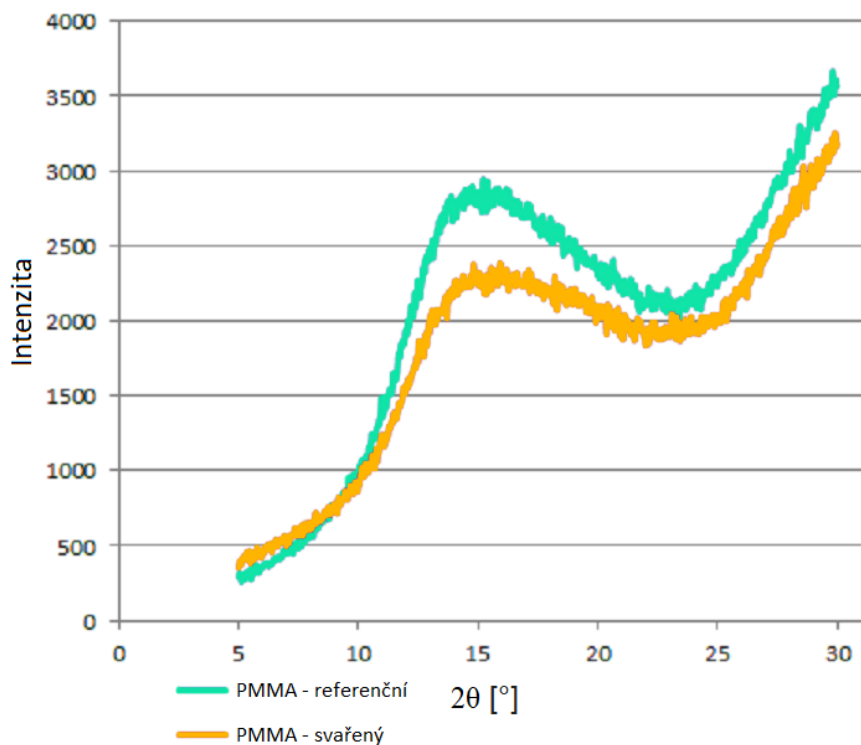


Obr. 38 Pila PROMA PPK – 90U [31]

Ve výsledcích měření jsou vidět na grafech porovnání mezi referenčním a svařeným dílem. Na ose x u grafu se nachází hodnoty úhlů natočení senzorů  $2\theta$  a osa y náleží intenzitě absorpce záření. Na základě měření touto metodou je možné získat poznatky o tom, jak se změnilo krystalické zastoupení vzorku.

Měřeny byly materiály:

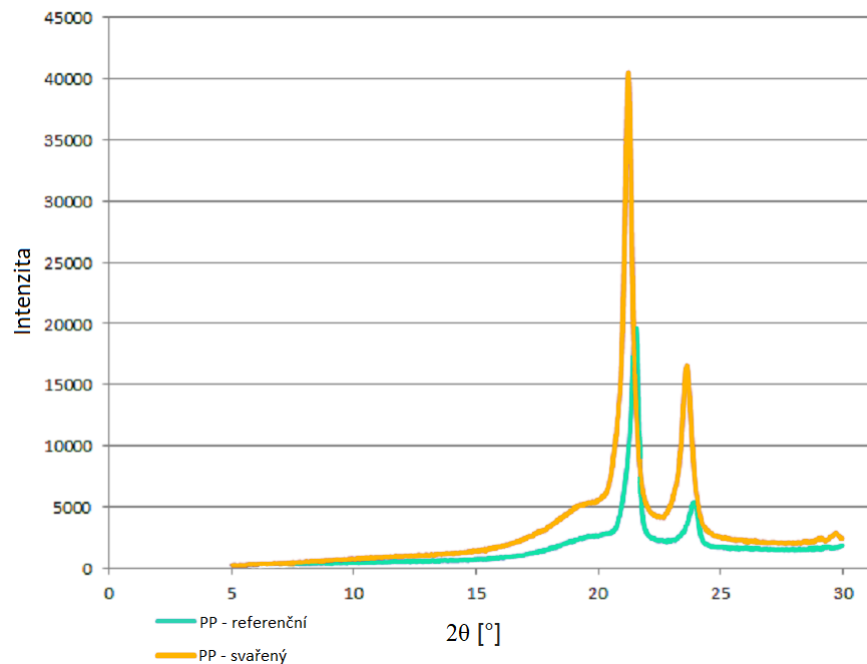
a) PMMA



Obr. 39 RTG difraktometrie - PMMA

PMMA je materiál amorfní, tudíž ani pomocí difraktometrie nevykazuje krystalickou strukturu. Měření bylo provedeno jako informativní – zkušební. Změna krystalické struktury nastala ani po svařování vzorků. Hodnoty intenzity se oproti krystalickým materiálům pohybují cca 10x menší. Výsledky difraktometrie jsou zobrazeny na Obr. 39.

b) PP



Obr. 40 RTG difraktometrie – PP

Z analýzy bylo zjištěno, že základní referenční PP má strukturu krystalickou z 69,32 %. U svaženého vzorku došlo k mírnému zmenšení krystalického podílu, a to na hodnotu 68,44 %. Došlo tedy k mírnému úbytku krystalické části o cca 0,9 % viz Obr. 40.

## 5.4 Simulace teplotního pole

### 5.4.1 Úvod k simulacím teplotního pole

V praxi může docházet k situacím, kdy je zapotřebí napodobit reálný stav nebo popsat určitý technický problém, k tomu nám mohou sloužit simulace a modelování. Simulační systém musí mít znaky reálného problému, např. rozměry systému, fyzikální veličiny, termofyzikální data, patřičné okrajové podmínky. Vytváření modelů je velmi komplexní činnost, kde je nejprve nutné zadat určité vstupní parametry. Jako jsou:

- Geometrie
- Okrajové podmínky
- Fyzikální, termofyzikální, chemické veličiny
- Software



Po zadání vstupních parametrů a následném výpočtu, se získá výstupní model skutečného děje nebo procesu. Ten musí být následně hodnocen, zda je správný, či adekvátní a odpovídá skutečnosti. To může být provedeno experimentem, měřením, nebo na základě zkušenosti, či jiného podobného modelu. V případě že simulace neodpovídá představám, či skutečnosti, je nutné vrátit se zpět do vstupních podmínek, či do výpočtového systému a ty následně upravit.

Časté problémy, které mohou znehodnotit adekvátnost simulace jsou např.:

- Špatným 3D modelem s chybami mezi navázanými uzly. Nepřesností geometrie, která se následně aplikuje do simulačního softwaru.
- Nevhodným zesíťováním modelu, kde je nevhodně zvolený tvar, velikost, či špatná orientace.
- Výpočetní technika má vliv pouze na rychlost výpočtu. O jeho přesnosti nerozhoduje.
- Nejsilnější vliv na přesnost hotových simulací mají termofyzikální veličiny, jejichž hodnoty jsou základem pro výpočet. Proto je nutné zadávat hodnoty co nejvíce odpovídající skutečnosti.
- Žádná simulace se neobejde bez částečných nebo výrazných zjednodušení, které pomáhají urychlit výpočet. Proto je nutné počítat s tím, že žádný simulovaný proces není úplně shodný a je nutné provádět kontrolu výsledků a v praxi počítat s odchylkami modelu.

#### 5.4.2 Modelování teplotního pole

Praktické modelování teplotního pole při svařování ultrazvukem by mohlo být řešeno v softwaru COSMOS/M, případně v jiném konečně prvkovém systému. Ideálním výstupem analýzy teplotního pole by bylo získání přehledu o tom, jak vypadá teplota v průběhu svařování jak na povrchu, tak uvnitř materiálu.

Pro tvorbu modelu ultrazvukového svařování by bylo vhodné počítat se změnou fyzikálních vlastností materiálu na základě změny teploty (měrné teplo, tepelná vodivost), což např. program COSMOS/M umožňuje na základě teplotních křivek. Pro tvorbu tohoto modelu by bylo vhodné uvažovat, že teplotní profil se v materiálu šíří ve všech směrech stejně.

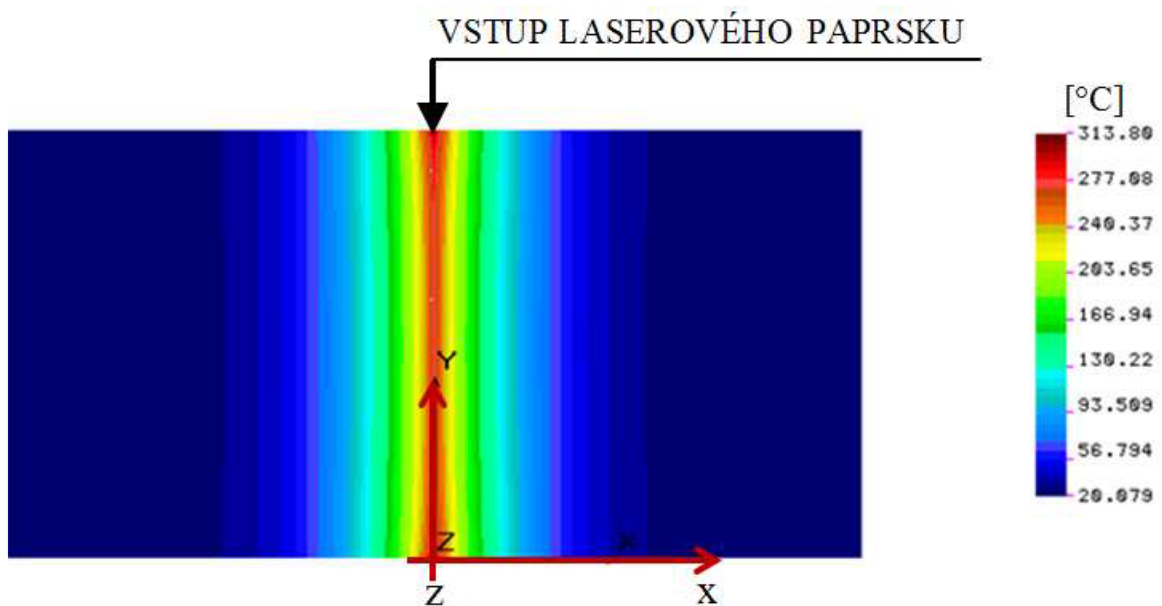
Dalším parametrem vstupujícím do výpočtu by měla být uvažována počáteční teplota, tedy 20 °C. Vstupujícím parametrem by měla být také geometrie svařovaných těles na kterých

bude model postaven, dále by měli být uvažovány vlastnosti: hustota materiálu, tloušťka vzorku.

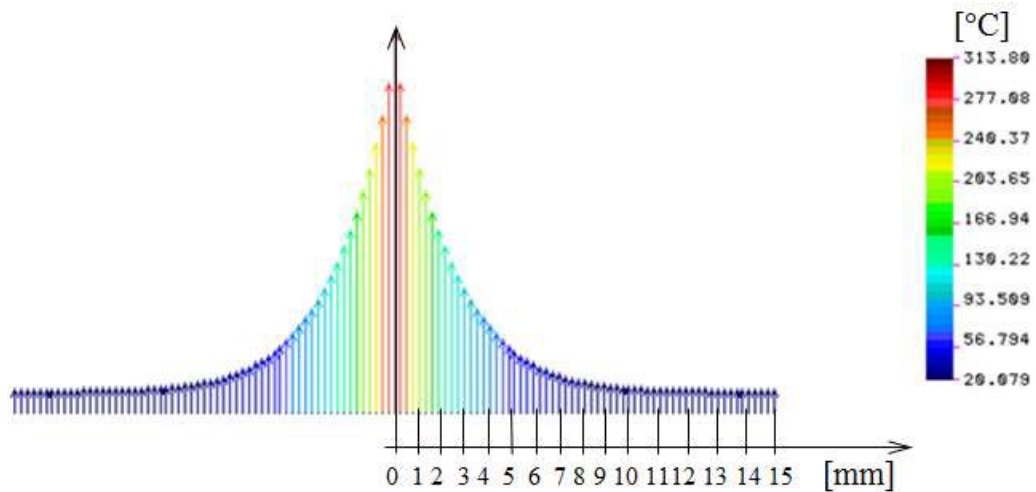
Do simulace by bylo vhodné také zahrnout fázový stav materiálu a s tím související fyzikální vlastnosti. Teplota na rozhraní vytvořená ultrazvukem při svařování musí dosahovat takových hodnot, aby byl polymer plastický a mohlo dojít k jeho spojení. Nezastupitelnou roli zde hraje také tlak sonotrody působící na svařované součásti. Ovšem průběh teploty při tomto procesu je málo prozkoumaný a můžeme se pouze domnívat, jak vysokých teplot je polymer při svařování schopný dosahovat.

### 5.4.3 Výstupy a porovnání

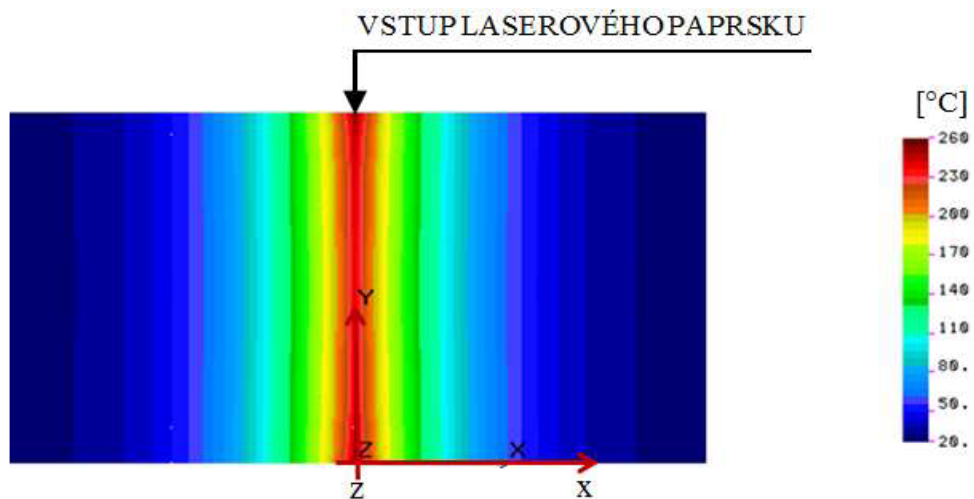
Výstupem teplotních analýz mohou být grafické znázornění, na kterých vidíme průběh teploty, jak se šíří v materiálu od zdroje tepla. Tím je možné získat povědomí o tom jakých teplot dosahuje materiál na povrchu i uvnitř vzorku a případně díky tomu upravovat patřičné parametry. Příklad výstupu z teplotní analýzy je na Obr. 41 až 44. Jedná se o model řezání pomocí laseru.



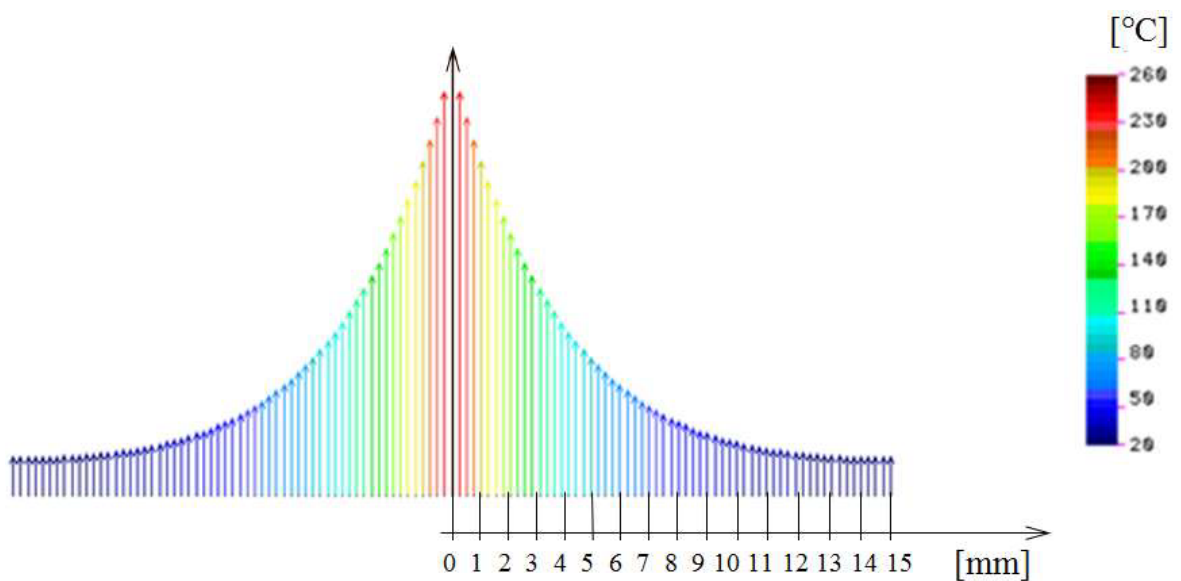
Obr. 41 Teplotní pole PMMA [30]



Obr. 42 Závislost teploty z místa řezu k vnějším okrajům u PMMA [30]



Obr. 43 Teplotní pole PP [30]



Obr. 44 Závislost teploty z místa řezu k vnějším okrajům u PP [30]

Mezi svařováním ultrazvukem a obráběním laserem můžeme nalézt určité rozdíly i spojitosti. U simulace teplotního pole při svařování ultrazvukem se dá odhadovat, že by nemohlo u stejných materiálů docházet k dosažení tak vysokých teplot, jako u obrábění laserem. Z fyzikální podstaty nemůže docházet prakticky k odpařování polymerů při ultrazvukovém svařování. Tudíž by teplota zobrazená simulací musela být podstatně nižší. Ovšem pokud bude uvažován tvar svařených vzorků tak, jako by mezi nimi procházel laserový paprsek, pravděpodobně by bylo dosaženo podobného tvaru teplotního pole. Tedy, že od místa svaru, kde se materiál nachází v plastickém stavu, dochází k postupnému snižování teploty, až k okraji vzorku.

## ZÁVĚR

Svařování je v praxi velmi široká a často používaná průmyslová technologie pro spojování plastů. V dnešní době je celá řada možností, jak plasty svařovat, a proto byly v teoretické části rozebrány možnosti svařovacích technologií a jejich principy. Jednotlivé možnosti byly pro přehlednost rozděleny dle způsobu dodání tepla. Dále byla podrobně popsána technologie svařování ultrazvukem, princip technologie, její výhody a nevýhody, možnosti uplatnění v praxi a průmyslu, používaná zařízení a nástroje, vhodné termoplasty a jejich kombinace, design svarových ploch a dále také možnosti ovlivnění výrobku pomocí nastavení svařovacích parametrů. Následně byly ukázány možnosti spektroskopických měření, a to z důvodu plánu zjišťovat chemickou strukturu polymerů, kde některé typy byly důkladněji rozebírány, protože následně musela být volena vhodná technologie pro dané podmínky.

Úvod praktické části byl věnován rozebrání chemické struktury polymerů. Základem pro následné zkoumání musela být příprava vzorků. S ohledem na dřívější práce byly voleny vhodné plasty, u kterých byla popsána jejich chemická struktura a dále byly řešeny jejich fyzikální vlastnosti s ohledem pro praktické použití a pro jejich možné svařování ultrazvukem. Následně proběhlo vstřikování plastů do dutiny formy vyhotovené pro zkušební tělíska s rozměry dle normy ČSN EN ISO 527-1.

Dalším krokem byla samotná příprava pro ultrazvukové svařování. U některých vzorků byla požadována změna geometrie, požadavek na vytvoření návarové hrany, která zajišťuje snadnější svařitelnost a vyšší pevnost spoje. Rozměry, a především výška geometrie návarových hran byla volena s ohledem na předešlé zkoumání, kde se ukázala jako nejlepší volba 1 mm výšky hrany. Zároveň mělo dojít k přeplátování, a to v délce 10 mm po délce zkušebního tělesa. Tento rozměr je volen s ohledem na velikost sonotrody v ultrazvukové svářečce.

Návarové hrany bylo v plánu obrábět na CNC obráběcím centru DMG MORI DMU 50. Pro uchycení vzorků musel být vytvořen upínací přípravek. Ten byl navržen v softwaru NX 12 a následně byl obroben z materiálu Necuron na stejném CNC centru. Po úspěšném vytvoření přípravku byl vytvořen program pro obrábění samotných vzorků. Následně byla tělíska obráběna se spuštěným chlazením pomocí emulze.

Příprava návarových hran třískovým obráběním může ovlivňovat výsledky zkoumání. Přestože kvalita povrchu byla na vynikající úrovni, teoreticky může docházet ke vzniku mikrotrhlin, které mohou ovlivňovat výslednou pevnost spoje. To by se patrně projevilo nejvíce u méně přesných obráběcích center, případně pokud by nedocházelo k dokonalému upnutí

v přípravku, či svěráku. Nejlepší cestou k řešení tohoto problému by bylo vytvoření vložek v požadovaném tvaru, které by bylo možné vložit do vstřikovací formy.

Po přípravě vzorků následovalo svařování na ruční ultrazvukové svářečce typu Herrmann HSG ve firmě PLASTIKA a.s. se sídlem Kroměříž. Pro zajištění požadované kvality svařovaných vzorků bylo nutné provést optimalizaci svařovacích parametrů, tj. amplitudy, času, přítlačné síly atd. Následně byly svařeny vybrané varianty vzorků, hladké plochy a plochy s vyfrézovanými drážkami na jedné straně zkušebního tělíška, které sloužily jako energetické můstky a jak již bylo dříve ověřeno, docházelo u takto svařených vzorků k podstatnému zvýšení hodnot pevnosti svaru.

Předpokladem pro studium strukturálních změn v materiálu po svaření ultrazvukem byla nutná příprava těchto vzorků, především vytvořit jejich řezy v místě svaru. Po důkladném zvážení padla volba na odfrézování přebytečné části svaru. Abychom co nejvíce minimalizovali zahřátí materiálu a tím možný vznik strukturálních změn, byla do místa řezu přiváděna chladicí emulze. Následně byly vzorky upraveny na konečnou délku vhodnou pro analytické přístroje.

Strukturální zkoumání probíhalo nejprve pomocí infračervené vibrační spektroskopie s Fourierovou transformací, tedy FTIR. Zde byly měřeny vzorky po vstřikování, dále vzorky ovlivněné chladicí kapalinou, a následně svařené díly jak natupo, tak s návarovými hranami. Z grafických záznamů jednotlivých metod, můžeme konstatovat, že při svařování PMMA docházelo k minimálním strukturálním změnám, pravděpodobně pouze mohlo dojít k navázání malého množství vzdušného kyslíku na rozhraní svaru. To může být odhadováno z naměřených hodnot, které ukázala vyšší počet -O-H vazeb. U materiálu PP je možné najít znaky štěpení postranních řetězců a také degradace hlavního polymerního řetězce. Tyto změny probíhají pouze v blízkosti svaru. Zjištěné výsledky naznačují, že při svařování u amorfních polymerů nedochází ke změnám chemické struktury, zatímco u semikrystalických ke změnám dochází. Toto tvrzení by však bylo vhodné podrobit dalšímu zkoumání, s použitím vícero zástupců jednotlivých polymerních skupin. Dále je možné pozorovat, že u vzorků opatřených návarovými hranami dochází k výraznějším strukturálním změnám než u materiálů svařených natupo.

Rentgenová difrakční analýza měla za cíl posuzovat podíl krystalické fáze v polymeru po svařování. U materiálu PMMA šlo o zkušební měření, jelikož se jedná o materiál amorfní, a tudíž nelze u něj zjišťovat podíl krystalické fáze. U polymeru PP byla naměřena mírná změna

krystalického podílu. Došlo k jeho snížení o méně než 1 %. Je tedy otázkou, zda se jedná o výraznou změnu, která nemohla být způsobena rozdílem mezi svařovaným vzorkem a vzorkem pouze vstříkovaným.

Na závěr praktické části byl proveden teoretický rozbor simulace teplotního pole, jak by mohl vypadat v případě ultrazvukového svařování. Jako vhodný výpočetní software byl uvažován konečně prvkový systém COSMOS/M. Tato simulace by mohla vytvořit bližší představu o šíření energie při procesu ultrazvukového svařování. Z toho důvodu by bylo velice zajímavé řešit konkrétní modely např. v dalších závěrečných pracích.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TROUGHTON, Michael John. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. 2nd ed. Norwich, NY: William Andrew, c2008, 1 online zdroj (xxii, 590 p.). PDL handbook series. ISBN 9780815519768. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780815515814>
- [2] ROTHEISER, Jordan. *Joining of plastics: handbook for designers and engineers*. 3rd ed. Munich: Hanser Publishers, c2009, xxxii, 592 s. ISBN 9783446407862.
- [3] LOYDA, Miloslav. *Svařování termoplastů. 2., dopl. a rozš. vyd.* Praha: UNO Praha, 2011, 530 s. ISBN 9788090494909.
- [4] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů*. 2015. ISBN 9788088058779.
- [5] LINDON, John C., George E. TRANTER a David W. KOPPENAAL. *Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry*. Amsterdam: Elsevier, c2010, 1 online zdroj (3 v. (xxxvii, 3233 p.)). ISBN 9780123744135. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/reference-works/9780123744135>
- [6] CHALMERS, John M., Howell G. M. EDWARDS a Michael D. HARGREAVES. *Infrared and Raman spectroscopy in forensic science*. Chichester: Wiley, 2012. DOI: 9781119962328. Dostupné také z: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781119962328>
- [7] SIEBERT, Friedrich a Peter HILDEBRANDT. *Vibrational spectroscopy in life science*. Weinheim: Wiley-VCH, c2008, x, 310 s. Tutorials in biophysics. DOI: 9783527621347. Dostupné také z: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9783527621347>
- [8] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění. 2. vyd.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 1999, 102 s. ISBN 8070825189.
- [9] Ultrasonic welding technology, Herrmann Ultraschall, 2015. Základní seminář.
- [10] BENATAR, Avraham. *Welding*. Munich: Hanser Publishers, c2001, 128 s. Plastics pocket power. ISBN 1569903336.
- [11] Typy sonotrod [online]. Ultratech s.r.o., ©2018 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://ultratech.cz/ultrazvukove-svarovani/>



- [12] HIQ Dialog [online]. Herrmann Ultraschall, ©2020 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.herrmannultraschall.com/en/products/ultrasonic-welding-machines/weld-machines-hiq-production-series/>
- [13] Schéma oscilační soustavy [online]. firmy.mmspektrum.com, ©2020 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/spojovani-a-rezani-ultrazvukem.html>
- [14] LAMPMAN, Gary M. *Spectroscopy: international edition*. 4th ed. Belmont, Calif.: Brooks/Cole Cengage Learning, c2010, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 9780538734189.
- [15] Svařování horkým tělesem [online]. Filiz Plastik, ©2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://filizplastik.com.tr/technical-informations/welding-methods>
- [16] Průchozí laserové svařování [online]. DENZ BIO-Medical GMBH, ©2019 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: [http://www.denz-bio-medical.com/webshop/images/product\\_images/original\\_images/laser-welding.jpg](http://www.denz-bio-medical.com/webshop/images/product_images/original_images/laser-welding.jpg)
- [17] Infračervený zářič se svařovaným dílem [online]. Accessibility Statement for BNP Media, ©2020 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://www.assemblymag.com/articles/92727-infrared-welder-assembles-cylindrical-plastic-parts>
- [18] Svařování třením za rotace [online]. techminy.com, ©2016-2018 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://techminy.com/friction-welding/>
- [19] Schéma vibračního svařování [online]. Welder Referer, ©2020 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <http://www.welderreferer.com/friction-or-vibration-welding/>
- [20] BLUNT, Jane a N. C. BALCHIN. *Health and safety in welding and allied processes*. 5th ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002, 1 online zdroj (vii, 261 pages). ISBN 9781591246077. Dostupné také z: <http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHSWAPE02>
- [21] EBNESAJJAD, Sina a Pradip R. KHALADKAR. *Fluoropolymers applications in chemical processing industries: the definitive user's guide and databook*. Norwich, N.Y.: William Andrew, c2005, 568 s. Plastics design library. ISBN 9780815517290. Dostupné také z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFACPITD3/fluoropolymers-applications>

- [22] KANIA, Patrik. *Infračervená spektrometrie* [online]. [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Infra%C4%8Derven%C3%A1+spektrometrie.pdf?redirected>
- [23] PATRIZI, Barbara, Mario SICILIANI DE CUMIS, Silvia VICIANI a Francesco D'AMATO. Dioxin and Related Compound Detection: Perspectives for Optical Monitoring. *International Journal of Molecular Sciences* [online]. 2019, **20**(11) [cit. 2020-01-06]. DOI: 10.3390/ijms20112671. ISSN 1422-0067. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/11/2671>
- [24] Ramanova spektroskopie [online]. LAO - průmyslové systémy s.r.o., ©2014 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/mereni-spektralnich-charakteristik-98/ramanova-spektroskopie-216>
- [25] Obráběcí centrum DMG MORI DMU 50 [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu>
- [26] Chemické vzorce [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://fyzika.ft.utb.cz/klic/>
- [27] OKADA, Takumi, Michael C. FAUDREE, Naoya TSUCHIKURA a Yoshitake NISHI. Improvement of Low-Temperature Impact Value of Sandwich-Structural (CFRP/ABS/CFRP) Laminate Plies by Homogeneous Low-Energy Electron Beam Irradiation (HLEBI). *MATERIALS TRANSACTIONS* [online]. 2016, **57**(3), 305-311 [cit. 2020-04-04]. DOI: 10.2320/matertrans.M2015332. ISSN 1345-9678. Dostupné z: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/57/3/57\\_M2015332/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/57/3/57_M2015332/_article)
- [28] RTG difraktometr [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.icsp.nat.fau.eu/philipspanalytical-xpert-pro-mpd-powder-diffractometer/>
- [29] ČAPKOVÁ, P., RTG difrakce v materiálovém výzkumu. KMT TU Liberec. [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/MSS/Vyukove\\_texty\\_XRD.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/MSS/Vyukove_texty_XRD.pdf)
- [30] KNEDLOVÁ, Jana. Studium integrity povrchu polymerních materiálů při obrábění laserem. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2018, 142 strany. Dostupné také z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/43756>

- 
- [31] PROMA PPK – 90U [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.promacz.cz/ppk--90u-pasova-pila-na-kov.html>
- [32] ČSN EN ISO 527-1. Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2020, 28 s.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
E-CTFE	Ethylene-chlorotrifluoroethylene
PFA	Perfluor alkoxyalkan kopolymer
IR	Infračervené
PA	Polyamid
PET	Polyethyltereftalát
PMMA	Polymethylmethakrylát
PS	Polystyren
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PC	Polykarbonát
SAN	Styrén akrylonitril
PBT	Polybutylen tereftalát
EVA	Ethylenvinylacetát
PVDC	Polyvinylidenchlorid
KBr	Bromid draselný
NaCl	Chlorid sodný
CsI	Jodid cesný
CaF <sub>2</sub>	Fluorid vápenatý
UV	Ultrafialové
RTG	Rentgenové

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Rozdělení svařování termoplastů dle způsobu dodání tepla [4] .....	11
Obr. 2 Svařování horkým tělesem [15].....	13
Obr. 3 Infračervený zářič se svařovaným dílem [17] .....	15
Obr. 4 Průchozí a konturové svařování [4, 21].....	16
Obr. 5 Průchozí svařování laserem [16] .....	17
Obr. 6 Svařování třením za rotace [18].....	19
Obr. 7 Schéma vibračního svařování [19] .....	20
Obr. 8 Schéma vysokofrekvenčního svařování [20].....	21
Obr. 9 Schéma oscilační soustavy [13].....	27
Obr. 10 Sonotrody v různých provedeních [11] .....	29
Obr. 11 Ultrazvukový svařovací přístroj [12].....	31
Obr. 12 Břítový styk [3].....	33
Obr. 13 Střížný styk [3] .....	33
Obr. 14 Princip infračerveného spektrometru [23].....	38
Obr. 15 Typy vibrací [22] .....	39
Obr. 16 Schéma Ramanovy spektroskopie [24] .....	41
Obr. 17 Vzorec PMMA [26].....	46
Obr. 18 Vzorec ABS [27] .....	46
Obr. 19 Vzorec PP [26].....	46
Obr. 20 Vzorec PA 6 [26].....	47
Obr. 21 Různé tvary zkušebních tělísek [4].....	48
Obr. 22 Odformované zkušební těleso pro další zpracování .....	49
Obr. 23 Polotovár přípravku a jeho upnutí .....	50
Obr. 24 Vytvořený přípravek pro frézování návarových hran.....	50
Obr. 25 DMG MORI DMU 50 [25] .....	51
Obr. 26 Schéma návarových hran.....	52
Obr. 27 Ultrazvuková svářečka ve stojanu .....	53
Obr. 28 Upínací přípravek .....	53
Obr. 29 Vzorky po svařování.....	54
Obr. 30 Upnutí svařených vzorků.....	55
Obr. 31 Stav vzorků po zarovnání .....	55
Obr. 32 Dokončené vzorky s návarovou hranou .....	56

Obr. 33 Dokončené vzorky svařené natupo.....	56
Obr. 34 Nicolet Avatar 320 ATR.....	57
Obr. 35 Výsledky FTIR pro PMMA.....	58
Obr. 36 Výsledky FTIR pro PP .....	59
Obr. 37 Difraktometr PANalytical X'Pert PRO [28] .....	61
Obr. 38 Pila PROMA PPK – 90U [31] .....	62
Obr. 39 RTG difraktometrie - PMMA.....	63
Obr. 40 RTG difraktometrie – PP.....	64
Obr. 41 Teplotní pole PMMA [30] .....	66
Obr. 42 Závislost teploty z místa řezu k vnějším okrajům u PMMA [30] .....	67
Obr. 43 Teplotní pole PP [30].....	67
Obr. 44 Závislost teploty z místa řezu k vnějším okrajům u PP [30] .....	67

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Porovnání svařitelnosti materiálů [1] .....	26
Tab. 2 Porovnání vlivu frekvence na svařovací proces [1].....	34

## SEZNAM PŘÍLOH