

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** B0715A270013 – Strojní inženýrství  
**Studijní specializace:** Strojírenské materiály a technologie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Ultrazvukové svařování polymerních materiálů**

**Autor:** Ondřej KÁCA  
**Vedoucí práce:** Prof. Dr. Ing. Antonín KŘÍŽ, IWE.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

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

Jméno a příjmení: **Ondřej KÁCA**  
Osobní číslo: **S19B0627P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenské materiály a technologie**  
Téma práce: **Ultrazvukové svařování polymerních materiálů**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Zásady pro vypracování

1. Polymerní materiály, členění, technologické zpracování, dopad na svařování
2. Rozdělení způsobů svařování, charakteristika jednotlivých metod v aplikaci na plasty
3. Charakteristika ultrazvukového svařování plastů, princip, použité stroje
4. Praktické testy ultrazvukového svařování termoplastů s upraveným povrchem
5. Vyhodnocení vytvořených svarových spojů
6. Diskuse výsledků
7. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**  
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

TROUGHTON Michael J. *Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide. William Andrew.* 2008. ISBN: 0815515812, 9780815515814.

LOYDA, Miloslav; ŠPONER, Vlastimil; ONDRÁČEK, Ladislav. *Svařování termoplastů. 2. vyd. Praha: UNO Praha,* 2011.

JUREZ, Gallego, GRAFF, Karl, F., *Power ultrasonics Applications of high-intensity ultrasound.*, Woodhead Publishing. 2014. ISBN: 1782420282, 978-1-78242-028-6

GREWELL, D., BENATAR, A., PARK, J., *Plastics and Composites Welding Handbook.*, Carl Hanser Verlag, München, 2003. ISBN: 9781569903131

SEKANINA, Vladislav., *Studium pevnosti svařovaných spojů.* Zlín, 2018. Diplomová práce. UTB. Vedoucí práce Libuše SÝKOROVÁ.

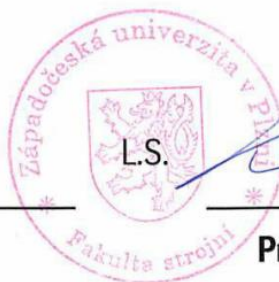
Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Šimeček**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání bakalářské práce: **6. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2021**



**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, IWE za odborné vedení, trpělivost, poskytnutý čas a rady při tvorbě této bakalářské práce.

Především bych rád poděkoval panu Zdeňkovi Vondrovi ze společnosti MS Ultrasonic Technology Group za jeho pomoc, rady a veškerý čas, který věnoval této práci.

V neposlední řadě děkuji firmě PETOKOV s.r.o. za výrobu aretačních přípravků a úpravy všech polotovarů vzorků.

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Káca	<b>Jméno</b> Ondřej	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Prof. Dr. Ing Kříž, IWE.	<b>Jméno</b> Antonín	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST – KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Ultrazvukové svařování polymerních materiálů		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	86	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	81	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	5
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Bakalářská práce se věnuje polymerním materiálům a jejich spojování, se zaměřením na ultrazvukové svařování termoplastů. Bakalářská práce obsahuje základní popis polymerních materiálů, rozdělení a popis technologií spojování polymerních materiálů a podrobný popis ultrazvukového svařování s následným experimentem, zaměřujícím se na vliv svařovacích parametrů na pevnost spoje.</p>
<p><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>ultrazvukové svařování, polymerní materiály, plasty, polypropylen, PP, vliv svařovacích parametrů</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Káca	Name Ondřej	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Dr. Ing Kříž, IWE.	Name Antonín	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Ultrasonic welding of polymeric materials		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	86	<b>TEXT PART</b>	81	<b>GRAPHICAL PART</b>	5
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The bachelor's thesis deals with polymeric materials and their joining, with a focus on ultrasonic welding of thermoplastic materials. It contains a basic description of polymeric materials, division and description of technologies for joining polymeric materials and a detailed description of ultrasonic welding with subsequent experiment, dealing with the effects of welding parameters on the strength of the joint.
<b>KEY WORDS</b>	ultrasonic welding, polymeric materials, plastics, polypropylene, PP, influence of welding parameters

## Obsah

1. Úvod.....	16
2. Cíl práce .....	17
3. Polymery .....	18
3.1. Charakteristika polymerů .....	18
3.2. Rozdělení polymerů.....	19
3.2.1. Chování při zahřátí.....	20
3.2.2. Struktura polymerů .....	20
3.3. Příklady termoplastů a jejich popis .....	22
3.4. Technologické zpracování polymerních materiálů.....	23
4. Svařování polymerních materiálů .....	24
4.1. Princip svařování .....	24
4.2. Rozdělení svařování termoplastů.....	25
4.2.1. Přímé svařování .....	25
4.2.2. Nepřímé svařování .....	25
4.2.3. Způsob dodání tepla .....	26
4.2.3.1. Dodání tepla vedením.....	26
4.2.3.2. Dodání tepla prouděním .....	30
4.2.3.3. Dodání tepla zářením .....	32
4.2.3.4. Dodání tepla třením .....	33
5. Ultrazvukové svařování.....	35
5.1. Ultrazvuk .....	35
5.1.1. Zdroje ultrazvuku .....	36
5.2. Ultrazvukové svařovací zařízení .....	37
5.3. Proces ultrazvukového svařování .....	40
5.4. Zásady ultrazvukového svařování .....	44
5.4.1. Svařitelnost termoplastů.....	44
5.4.2. Energetický usměrňovač .....	46
5.4.3. Svařovací parametry .....	46
5.5. Využití ultrazvukového svařování v průmyslu.....	49
6. Praktická část.....	52
6.1. Příprava experimentu.....	53
6.1.1. Zhotovení polotovarů pro zkušební vzorky. ....	53
6.1.2. Zhotovení aretačního přípravku.....	56



6.1.3.	Příprava a seznámení se svařovacím zařízením.....	58
6.1.4.	Tahová zkouška .....	62
6.1.5.	Statistické zpracování naměřených hodnot.....	65
6.2.	Proces optimalizace .....	67
6.2.1.	Svařování s proměnnou hodnotou amplitudy „A“ .....	68
6.2.2.	Úprava energetických usměrňovačů – krok č.2.....	70
6.3.	Testování .....	71
6.3.1.	Svařování s proměnnou hodnotou amplitudy „A“ .....	71
6.3.2.	Svařování s proměnnou hodnotou rychlosti svařování „v“ .....	73
6.4.	Diskuze výsledků.....	75
7.	Závěr.....	79
7.1.	Doporučení pro další výzkum.....	80
8.	Použitá literatura .....	81
	PŘÍLOHA č. 1.....	83
	PŘÍLOHA č. 2.....	84
	PŘÍLOHA č. 3.....	85
	PŘÍLOHA č. 4.....	86

## Přehled použitých zkratk a symbolů

Označení	Rozměr	Význam
A	$\mu\text{m}, \%$	Amplituda
ABS		Akrylonitril-butadien-styrén
aj.		A jiné
ASA		Akrylonitril-styren-akrylát
EU		energetický usměrňovač
f	Hz	Frekvence
F	N	Svařovací síla
IR		Infračervený (=infrared)
LCP		Liquid crystal polymer
např.		Například
obr.		Obrázek
ot.	$\text{min}^{-1}$	Otáčky
PA		Polyamid
PB		Polybutylen
PBT		Polybutylen-tereftalát
PC		Polykarbonát
PE		Polyetylen
PE-HD		Polyetylen – vysokohustotní
PE-LD		Polyetylen – nízkohustotní
PES		Polyéthersulfon
PET		Polyetylentereftalát
PMMA		Polymethylmetakrylát
POM		Polyoxymetylen
PP		Polypropylen
PPR		Random Polypropylen
PPS		Polyfenylensulfid
PS		Polystyrén
PVC		Polyvinylchlorid
PVDF		Polyvinylidenfluorid
Resp.		Respektive
s	mm	Dráha nástroje
SAN		Styrén-akrylonitril

$t$	s	Čas
$T$	s	Perioda kmitů
$T_g$	°C	Teplota zeskelnění
$T_f$	°C	Teplota viskózního toku
$T_m$	°C	Teplota tání
$T_d$	°C	Teplota degradace
$v$	mm/s	Rychlost svařování
$w$	m/s	Velikost fázové rychlosti vlnění
$\alpha$	(1)	Součinitel teplotní roztažnosti
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Hustota
$\lambda$	m	Vlnová délka

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma makromolekuly [20].....	18
Obrázek 2: Přejídnové teploty pro amorfí a semikrystalické polymery [16] .....	19
Obrázek 3: Rozdělení polymerů [3] .....	20
Obrázek 4: Tvar makromolekuly polymeru - a) lineární, b) rozvětvený, c) zesíťovaný [3]....	21
Obrázek 5: Schéma nadmolekulární struktury polymerů, a) amorfí; b) semikrystalické [19] .....	22
Obrázek 6: Přímé svařování [22] .....	25
Obrázek 7: Nepřímé svařování [22] .....	26
Obrázek 8: Rozdělení technologií svařování plastů dle způsobu dodávání tepla do místa svaru [25] .....	26
Obrázek 9: Princip svařování na tupo horkým tělesem [22].....	27
Obrázek 10: Princip polyfúzního svařování [22] .....	28
Obrázek 11: Princip svařování elektrotvarovkou [22] .....	30
Obrázek 12: Ruční svařování horkým plynem [22] .....	30
Obrázek 13: Svařování horkým plynem s rychlotrýskou [28] .....	31
Obrázek 14: Svařování extrudérem (ruční, šnekový extrudér) [25].....	31
Obrázek 15: Elektromagnetické spektrum [29] .....	32
Obrázek 16: Princip svařování IR papřskem [30].....	33
Obrázek 17: Rotační svařování [25].....	34
Obrázek 18: Princip vibračního svařování; A - ohřev rotačním, kmitavým pohybem; B - ohřev lineárním, kmitavým pohybem [24].....	34
Obrázek 19: Vlnový pohyb [32].....	36
Obrázek 20: Princip ultrazvukové svářečky [13].....	37
Obrázek 21: Popis ultrazvukové svářečky [13] [31].....	37
Obrázek 22: Generátor [31].....	38
Obrázek 23: Ultrazvukový rezonátor [17] .....	38
Obrázek 24: Měnič [31] .....	39
Obrázek 25: Zesilovače [31] .....	39
Obrázek 26: Sonotroda [32] .....	40
Obrázek 27: Aretační přípravek [31] .....	40
Obrázek 28: Upnutí svařovaných dílů [11] .....	41
Obrázek 29: Kontakt sonotrody se svařovaným díle [11].....	41
Obrázek 30: Aplikace svařovací síly [11] .....	41
Obrázek 31: Svařování [11] .....	42
Obrázek 32: Tuhnutí svarového spoje [11] .....	42

Obrázek 33: Svařený díl [11] .....	42
Obrázek 34: Průběh svařovacího procesu (tupý spoj) [5] .....	43
Obrázek 35: Ultrazvukové svařování; a) v blízkém poli, b) ve vzdáleném poli [5] .....	44
Obrázek 36: Svařitelnost amorfních termoplastů [5] .....	46
Obrázek 37: Poloha energetického usměrňovače při svařování [5] .....	46
Obrázek 38: Zobrazení velikosti amplitudy na konci sonotrody [5] .....	47
Obrázek 39: Ultrazvukové svařování palubní desky [31] .....	50
Obrázek 40: Ultrazvukové svařování obalů [31] .....	50
Obrázek 41: Nařezané polotovary o rozměru 200x30x4 mm, dole PVC, uprostřed PE-HD, nahore PP [17] .....	53
Obrázek 42: Porovnání řezů [17] .....	54
Obrázek 43: Svarová plocha po natavení a přetržení vzorku [17] .....	55
Obrázek 44: Rentgenový sken vzorku [17] .....	55
Obrázek 45: Horní díl [17] .....	55
Obrázek 46: Horní díl vzorku; vlevo fotka dílu, vpravo 3D model dílu [17] .....	56
Obrázek 47: Aretační přípravek č. 1 [17] .....	56
Obrázek 48: Test aretačního přípravku č. 1; výsledkem je odchlípnutí a posunutí spodního dílu vzorku [17] .....	57
Obrázek 49: Aretační přípravek č. 2 (před úpravou hloubky drážek) [17] .....	57
Obrázek 50: Test aretačního č. 2 – před úpravou; výsledkem je nerovnoběžně svařený vzorek [17] .....	58
Obrázek 51: Aretační přípravek č. 2 (po úpravě drážek a vypodložení) [17] .....	58
Obrázek 52: Ultrazvuková svářečka MS sonxTOP GENESIS [31] .....	59
Obrázek 53: Průběh svařování vzorku č.18; svařovací síly (červená křivka); dráha sonotrody (tmavě modrá křivka); reálná hodnota amplitudy v % (tyrkysová křivka) [17] .....	61
Obrázek 54: Průběh svařování vzorku č.60; svařovací síly (červená křivka); dráha sonotrody (tmavě modrá křivka); reálná hodnota amplitudy v % (tyrkysová křivka) [17] .....	61
Obrázek 55: Trhací zařízení Zwick Roell Z005 [17] .....	63
Obrázek 56: Svařený vzorek upnutý v upínacích čelistech a průběh deformace zatíženého vzorku [32] .....	64
Obrázek 57: Návrh vypodložení svařence v upínacích čelistech při zkoušce tahem [5] .....	64
Obrázek 58: Deformační křivky vzorků s různými parametry svařování [17] .....	65
Obrázek 59: Zkušební vzorek s výchozími parametry [17] .....	66
Obrázek 60: Nevhodně svařené vzorky [17] .....	67
Obrázek 61: Horní díl vzorku – úprava energetických usměrňovačů – krok č. 1 [17] .....	68
Obrázek 62: Horní díl vzorku – úprava energetických usměrňovačů – krok č. 2 [17] .....	70

Obrázek 63: Stopa od sonotrody na horním díle vzorku; vlevo fotka dílu; vpravo snímek ze světelného mikroskopu (zvětšeno 25x) [17] .....	73
Obrázek 64: Deformační křivky vzorků svařené s parametry svařování: $A = 90 \%$ ( $38,3 \mu\text{m}$ ), $s = 0,4 \text{ mm}$ , $v = 1,5 \text{ mm/min}$ .....	73
Obrázek 65: Graf tahové zkoušky vzorků svařené s parametry svařování: $A = 90 \%$ , $s = 0,4 \text{ mm}$ , $v = 1,0 \text{ mm/min}$ [17] .....	75
Obrázek 66: Vliv amplitudy na pevnost spoje [17].....	76
Obrázek 67: Naměřené hodnoty $F_{\text{MAX}}$ při proměnné hodnotě rychlosti svařování "v" [17] ...	77
Obrázek 68: Svařovací čas v závislosti na rychlosti svařování [17] .....	77
Obrázek 69: Vzorky po přetržení [17] .....	78

## Seznam tabulek

Tab. 1: Vliv tvaru makromolekuly na konečné vlastnosti PE [19] .....	21
Tab. 2: Svařovací čas členěný podle fází v závislosti na tloušťce stěny [22] .....	28
Tab. 3: Svařovací čas členěný podle fází v závislosti na vnějším průměru trubky [22] .....	29
Tab. 4: Hodnoty svařování pro svařování extrudérem [22] .....	32
Tab. 5: Svařitelnost termoplastů v blízkém a ve vzdáleném poli (1 - nejlepší, 5 - nejhorší) [5] .....	45
Tab. 6: Specifikace laserové řezačky Transon TS6090 .....	53
Tab. 7: Celková délka svaru "L"; .....	55
Tab. 8: Specifikace ultrazvukové svářečky MS sonxTOP GENESIS [31].....	59
Tab. 9: Specifikace použitého rezonátoru .....	60
Tab. 10: Specifikace ultrazvukového rezonátoru .....	62
Tab. 11: Specifikace trhacího stroje Zwick Roell Z005.....	63
Tab. 12: Parametry svařování a výsledky měření spojů s různými parametry .....	65
Tab. 13: Mechanické vlastnosti PP .....	66
Tab. 14: Proces optimalizace; délka svaru $L = 250 \text{ mm}$ .....	67
Tab. 15: Proces optimalizace – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda $A = 70 \%$ ; dráha nástroje $s = 0,4 \text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 1,5 \text{ mm/min}$ .....	69
Tab. 16: Proces optimalizace – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda $A = 80 \%$ ; dráha nástroje $s = 0,4 \text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 1,5 \text{ mm/min}$ .....	69
Tab. 17: Proces optimalizace – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda $A = 90 \%$ ; dráha nástroje $s = 0,4 \text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 1,5 \text{ mm/min}$ .....	69
Tab. 18: Proces optimalizace – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda $A = 100 \%$ ; dráha nástroje $s = 0,4 \text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 1,5 \text{ mm/min}$ .....	70
Tab. 19: Testování – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda $A = 70 \%$ ; dráha nástroje $s = 0,4 \text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 1,5 \text{ mm/min}$ .....	71

Tab. 20: Testování – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda $A = 80\%$ ; dráha nástroje $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 1,5\text{ mm/min}$ .....	72
Tab. 21: Testování – proměnná rychlost svařování „v“; amplituda $A = 90\%$ ; dráha nástroje $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 1,5\text{ mm/min}$ .....	72
Tab. 22: Testování – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda $A = 100\%$ ; dráha nástroje $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 1,5\text{ mm/min}$ .....	72
Tab. 23: Testování – proměnná rychlost svařování „v“; amplituda $A = 90\%$ ; dráha nástroje $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 1,0\text{ mm/min}$ .....	74
Tab. 24: Testování – proměnná rychlost svařování „v“; amplituda $A = 90\%$ ; dráha nástroje $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 1,5\text{ mm/min}$ .....	74
Tab. 25: Testování – proměnná rychlost svařování „v“; amplituda $A = 90\%$ ; dráha nástroje $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 2,0\text{ mm/min}$ .....	74
Tab. 26: Testování – proměnná rychlost svařování „v“; amplituda $A = 90\%$ ; dráha nástroje $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování $v = 2,5\text{ mm/min}$ .....	75

## 1. Úvod

Způsob výroby, technologie a kvalita současných plastových materiálů jde rychlým tempem dopředu. V současné době je snahou co nejvíce zredukovat hmotnost a snížit náklady na materiál, a proto se ocelové, litinové nebo slitinové materiály nahrazují plastovými materiály. Při tom se nabízí otázka, jak tyto materiály účinně, ale také ekonomicky efektivně spojit.

Tato bakalářská práce se zabývá spojováním polymerních materiálů pomocí technologie ultrazvukového svařování, která se vyvíjí už od šedesátých let minulého století a postupem času se začala využívat v mnoha průmyslových odvětvích. Zejména je to automobilový, lékařský, textilní, potravinářský průmysl a využití nachází i při výrobě elektrických přístrojů a v obalové technice.

V šedesátých letech, kdy ultrazvukové svařování vzniklo, se používalo převážně ke svařování amorfních termoplastů. Tento druh termoplastů byl díky své nízké teplotě tavení snadno svařitelný. Vlivem stále se rozšiřujícího používání termoplastů se vyvíjela i technologie ultrazvukového svařování a našla uplatnění i při svařování semikrystalických termoplastů. Dalším vývojem se technologie stala poměrně uživatelsky jednoduchou a zároveň má spoustu možností, jak upravovat parametry svařování a docílit tak konkurenceschopnosti, univerzálnosti a možnosti rychle reagovat na nově vznikající polymerní materiály.

Praktická část bakalářské práce se věnuje ultrazvukovému svařování polymerních materiálů. Hlavním úkolem je analyzovat, jak jednotlivé svařovací parametry ovlivňují pevnost a kvalitu provedeného svaru s přihlédnutím na jakost povrchu spojovaných dílů. Výsledkem je nalezení optimálních svarových parametrů, při kterých má svarový spoj maximální pevnost a kvalitu a zároveň svařované díly mají vysokou jakost povrchu.



## **2. Cíl práce**

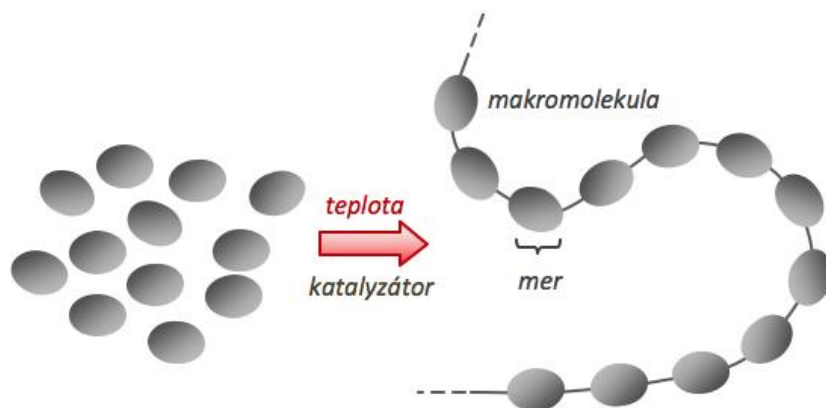
Cílem bakalářské práce je definování a určení ideálních parametrů při ultrazvukovém svařování vybraného polymerního materiálu. Úkolem je analyzovat, do jaké míry jednotlivé procesní parametry ovlivňují pevnost svarového spoje a povrch svařovaného dílu a na základě výsledků navrhnout optimální nastavení zkoumaných svařovacích veličin.

## 3. Polymery

### 3.1. Charakteristika polymerů

Polymer je organická látka, syntetického nebo přírodního původu. Díky tomu polymery představují chemickou stavebnici, která umožňuje neobyčejnou proměnlivost struktur i vlastností výsledných látek. Syntetické polymery vyvinuté v první polovině 20. století vytvořily revoluci v rozvoji leteckého, automobilového, lékařského či sportovního průmyslu a prakticky ve všech ostatních průmyslech. Přidáním různých aditiv k polymeru vznikají plasty nebo elastomery. Tyto materiály se vyrábějí v hojném množství po celém světě. Dnes je kladen důraz nejen na zlepšování jejich vlastností, ale zároveň i na efektivní využití tohoto materiálu, aby se snížila zátěž na životní prostředí. [1] [20]

Výroba syntetických makromolekulárních látek probíhá díky polymeraci, polyadici a polykondenzaci, což jsou polymerní reakce neboli jednoduché chemické reakce, které se vícekrát opakují. Vlivem toho vzniká z nízkomolekulární sloučeniny zvané monomer vysokomolekulární látka zvaná polymer. Aby se polymer stal plastem, musí se smíchat s aditivem a převést do formy vhodné k dalšímu technologickému zpracování, např. do formy granulí, tablet apod. Jednoduše řečeno, polymer představuje chemickou látku, zatímco plast je technický materiál s vhodnými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Polymery mohou být přírodní látky, a to na bázi celulózy, škrobu, bílkovin nebo kaučuku. [2]



Obrázek 1: Schéma makromolekuly [20]

### Přechodové teploty

Polymerní materiály se v závislosti na teplotě mohou nacházet v tuhém nebo kapalném stavu (neplatí pro zesíťované polymery: reaktoplasty, pryže, které jsou netavitelné). Pro polymery je charakteristický ještě přechodový stav, mezi stavem sklovitým a kapalným, tzv. stav *kaučukovitý*. Vlastnosti polymerů jsou tedy podobně jako jiné materiály závislé na teplotě. V určité oblasti teplot se ale tyto změny zrychlují a mohou se měnit dokonce skokem. Takové oblasti se nazývají přechodovými teplotami a v závislosti na teplotě se polymer může nacházet ve stavu sklovitém, kaučukovitém nebo kapalném. [5]

Při ultrazvukovém svařování dochází ke zvyšování teploty a vlastnosti materiálů se mění. Amorfní termoplasty nemají definovaný bod tání  $T_m$ . To znamená, že pozvolna přecházejí ze sklovitého stavu přes teplotu  $T_g$  do kaučukovitého stavu a následně do roztaveného stavu bez předčasného zpevnění. To samé platí i v opačném směru, při kterém je tuhnutí pozvolné. Díky této vlastnosti se amorfní termoplasty pomocí ultrazvukového svařování velmi dobře svařují.

Oproti tomu semikrystalické termoplasty jsou charakterizovány skokovým přechodem z pevného do tekutého stavu po dosažení teploty tání  $T_m$  a velice rychlým tuhnutím v důsledku náhle krystalizace molekul. To jsou z hlediska ultrazvukového svařování negativní vlastnosti a semikrystalické termoplasty se z pravidla svařují hůře než amorfny termoplasty. [5] [11] [18]

$T_g$ .....*Teplota zesklenní*

- u termoplastů, reaktoplastů a elastomerů určuje, jestli je materiál ve stavu sklovitém (pod  $T_g$ ), nebo kaučukovitém (nad  $T_g$ )
- u amorfny plastů je v rozpětí teplot a vlivem toho se obtížně určuje

$T_f$ .....*Teplota viskózního toku*

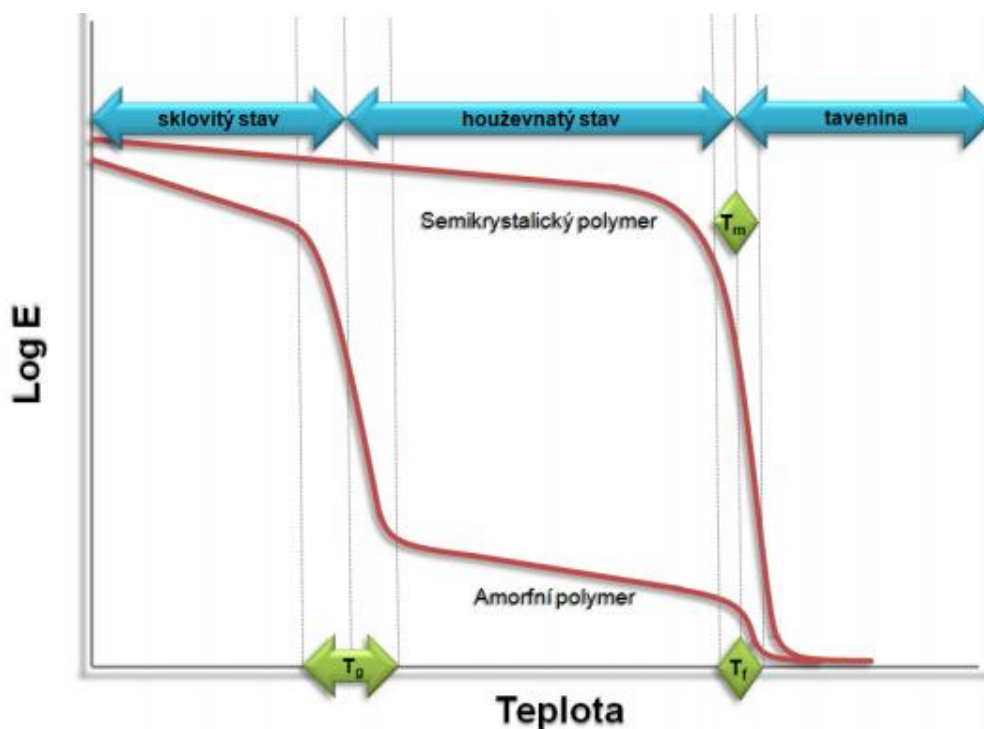
- nad touto teplotou amorfny plasty přechází ve viskózní kapalinu

$T_m$  ....*Teplota tání (bod tání)*

- nad  $T_m$  rychle přecházejí krystalické plasty v taveninu

$T_d$ .....*Teplota degradace*

- podstatně se mění vlastnosti plastů (vlivem teploty, záření aj.) [8]

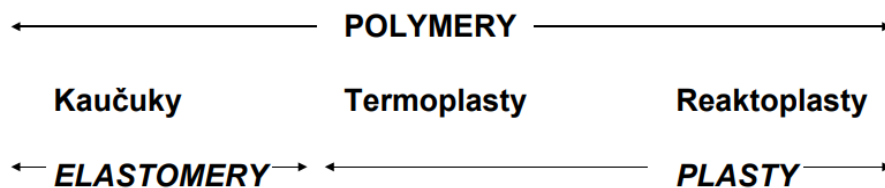


Obrázek 2: Přechodové teploty pro amorfny a semikrystalické polymery [16]

E... modul pružnosti v tahu (MPa)

### 3.2. Rozdělení polymerů

Základní dělení polymerů je na elastomery a plasty. Elastomery, jak už název vypovídá, jsou elastické materiály, které lze malou silou značně deformovat, aniž by se porušily. Pro tuto bakalářskou práci nejsou použitelné, protože je nelze svařovat. Plasty se dělí z hlediska chování při zahřátí a struktury. [3]



Obrázek 3: Rozdělení polymerů [3]

### 3.2.1. Chování při zahřátí

Vlivem rostoucí a snižující teploty mají plasty různé vlastnosti a rozdělují se na termoplasty, reaktoplasty.

*Termoplasty* se mohou ohřát a převést z pevného stavu do taveniny nebo viskózního toku. Následným ochlazováním pod teplotu měknutí  $T_m$  (semikrystalické plasty), resp. teplotu viskózního toku  $T_f$  (amorfní plasty) tuhnou a přecházejí zpět do pevného stavu. Tento proces ohřátí a ochlazování nemění chemické struktury, a lze ho využít opakovaně, a proto je základem pro recyklaci plastů. [1]

*Reaktoplasty* lze zahřívat, přičemž měknou a dají se tvářet, ale pouze po omezenou dobu. Pokud se v zahřívání pokračuje, dochází k chemickým reakcím. To vede k zesítnění makromolekul neboli ke spojení mnoho řetězců v jeden nekonečný. Tento proces se nazývá vytvrzení a je nevratný. Polymer tímto ztrácí termoplastický charakter. Zvyšováním teploty nad teplotu vytvrzení reaktoplasty nepřechází do kaučukovitěho stavu, ale dojde jen k rozpadu hmoty (degradaci). [1]

Principem ultrazvukového svařování je převést materiál v místě svaru do kaučukovitěho stavu a následně díly přidržit pomocí sonotrody pod určitým tlakem, kdy dochází k tuhnutí. Proto je technologie ultrazvukového svařování vhodná pro termoplasty, které je možné převést ze stavu pevného do kaučukovitěho a opačně. Naopak reaktoplasty touto technologií svařovat nelze. [3] [5] [8]

### 3.2.2. Struktura polymerů

#### Tvar makromolekul

Rozlišuje se lineární, rozvětvený a zesíťovaný tvar makromolekuly.

*Lineární makromolekuly* vzniknou seřazením jednotlivých monomerů za sebou, tak že vytvoří jednoduchý řetězec. Tyto řetězce jsou všelijak zkroucené v prostoru, nejčastěji do tvaru spirály nebo klubíčka. Plasty s lineárními makromolekulami mají vyšší hustotu, protože lineární řetězce dokážou lépe vyplnit prostor. Tyto materiály jsou vhodné ke svařování, protože jsou v tuhém stavu houževnaté a dobře rozpustné a tavitelné. Touto strukturou disponují převážně termoplasty. Příkladem je PE-HD. [3] [8] [19]

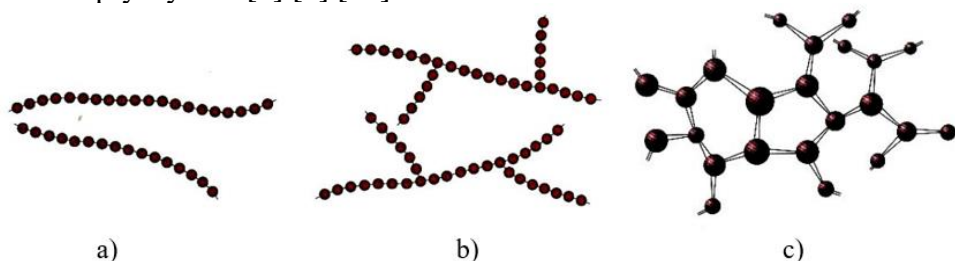
*Rozvětvené makromolekuly* se vyznačují tím, že z hlavního řetězce vycházejí vedlejší (větve). Tyto vedlejší řetězce mohou mít další větve. Tyto plasty se vyznačují menší hustotou oproti lineárním, protože se k sobě makromolekuly nemohou natolik přiblížit a prostor není kompaktně vyplněný. Tento druh struktury se nachází jak u termoplastů, tak u reaktoplastů. Příkladem je PE-LD. [3] [8] [19]

Některé druhy plastů, jako je např. PE je možné vyrobit jak s lineárním, tak rozvětveným tvarem makromolekuly. Z tabulky č. 1 je patrné, jaký má vliv tvar makromolekuly na vlastnosti PE.

Tab. 1: Vliv tvaru makromolekuly na konečné vlastnosti PE [19]

Typ polyetylenu a jeho vlastnosti	Tvar makromolekuly
PE-HD – vysokohustotní polyetylen	lineární
Tvrdsí, tužší a nepatrně křehčí Hustota $\rho = 970 \text{ kg/m}^3$ Vyšší teplota tání $T_m = 130 - 135 \text{ }^\circ\text{C}$ Vyšší pevnost	
PE-LD – nízkohustotní polyetylen	rozvětvený
Měkčí a ohebnější Hustota $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$ Nižší teplota tání $T_m = 105 - 110 \text{ }^\circ\text{C}$ Nižší pevnost	

Zesíťované makromolekuly jsou tvořené prostorovou sítí, která se skládá z kombinace lineárních a rozvětvených makromolekul. Vlivem prostorové sítě nejsou plasty s tímto typem makromolekul rozpustné ani tavitelné a mají nízkou odolnost proti rázovému namáhání. Díky tomu materiály s tímto druhem struktury není možné svařovat pomocí ultrazvukového svařování. Naproti tomu jsou vysoce tvrdé, tuhé a odolné vůči zvýšeným teplotám. Příkladem mohou být různé silikonové pryskyřice. [3] [8] [19]



Obrázek 4: Tvar makromolekuly polymeru - a) lineární, b) rozvětvený, c) zesíťovaný [3]

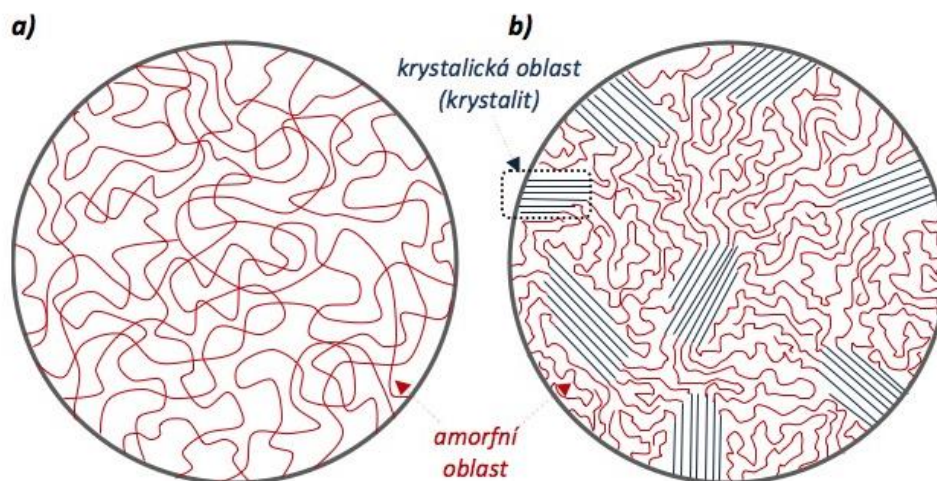
## Nadmolekulární struktura

Struktura plastů může být amorfní nebo krystalická.

*Amorfní* (sklovitý) stav termoplastů se vyznačuje nahodilým umístěním makromolekul čili bez uspořádání. Vyznačují se tvrdostí, křehkostí a vysokou pevností. Jejich výhodou je možnost výroby v čířem nebo průhledném provedení. Součinitel teplotní roztažnosti  $\alpha$  je menší než u krystalických plastů. Amorfní termoplasty lze charakterizovat teplotou zesíťování  $T_g$ , což je hranice mezi tuhým a kaučukovitým stavem. Disponují vyšším součinitelem tření, což vede k lepší svařitelnosti ultrazvukem. Mezi termoplasty s amorfní strukturou se řadí např. ABS, PC a PVC. [1] [2] [8]

*Krystalické* termoplasty mají určitý stupeň uspořádanosti. Ten se označuje jako stupeň krystalinity (pohybuje se od 40 do 90 %), a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí, které jsou mezi amorfními oblastmi. Nikdy nemůže dosáhnout 100 %, a část polymeru vždy zůstane v amorfním stavu, proto se krystalické termoplasty označují jako *semikrystalické*. [1] [2] [8]

*Semikrystalické* termoplasty jsou např. PE, PP, PET. Pro vznik semikrystalické struktury je nutná tvorba krystalizačních zárodků, na nichž poté rostou krystality. Tomuto jevu se říká nukleace. Ta nastává při ochlazování taveniny, která má amorfni strukturu. Díky řízené nukleaci, tj. dosažení co nejvyššího stupně krystalinity a zároveň jemnozrné struktury, se vyznačují houževnatostí, vysokou pevností a modulem pružnosti. Semikrystalické termoplasty jsou charakterizovány teplotou tání  $T_m$ , což je teplota, při které plast přechází z pevné do kapalné fáze. Tuto teplotu mají semikrystalické termoplasty zpravidla vyšší a zároveň disponují lepší absorpcí vibrační energie. To má za následek vyšší spotřebu elektrické energie, která se musí vynaložit pro roztavení materiálu. [1] [2] [8]



Obrázek 5: Schéma nadmolekulární struktury polymerů, a) amorfni; b) semikrystalické [19]

Z výše uvedených informací je patrné, že použití technologie ultrazvukového svařování je poměrně omezené, z důvodu netavitelnosti mnoha plastových materiálů. Vzhledem k této skutečnosti se svařují pouze některé druhy termoplastů. Ty musí mít lineární případně rozvětvený tvar makromolekuly. Pokud materiál splňuje tyto vlastnosti, může být svařován. Pro ultrazvukové svařování plastů však platí, že plasty s amorfni strukturou jsou díky menší spotřebě elektrické energie, nižší teplotě tavení, pozvolnému tání a pomalejšímu tuhnutí lépe svařitelné než termoplasty se semikrystalickou strukturou.

### 3.3. Příklady termoplastů a jejich popis

#### Polypropylen – PP

Tento termoplast je semikrystalický středně pevný a houževnatý materiál s hustotou  $\rho = 900 - 910 \text{ kg/m}^3$ . V poslední letech dochází k jeho častějšímu použití, z důvodu zvýšených mechanických vlastností vlivem vyztužování pomocí plniv, převážně skelnými vlákny nebo kuličkami. Dále je také velmi dobře recyklovatelný, což je v dnešní době velice přínosné. Polypropylen je pod teplotou  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  velice křehký a má nízkou pevnost, nad teplotou  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  je naopak velice měkký. Jinak se jedná o tuhý a pevný materiál, který odolává chemickým látkám, nenavlhá, lze barvit, je ekonomicky dostupný a dobře svařitelný. Mezi nevýhody polypropyleny patří zejména hořlavost, pod bodem mrazu křehne, podléhá oxidaci a není vhodný k lepení. Tento materiál je vhodný pro výrobu vláken. Použití nachází v obalové technice, domácích spotřebičích, v automobilním průmyslu zejména na přístrojové desky, nárazníky, lopatky ventilátoru, komponenty klimatizační jednotky, víka zavazadlového prostoru a mnoho dalšího. [32] [5]



## **Polyethylen – PE**

Výrobou lze docílit dvou variant PE a to nízkohustotní, označený jako PE-LD a vysokohustotní označený jako PE-HD. Je charakteristický nižší pevností a tuhostí, ale vysokou houževnatostí. Hustota PE je  $\rho = 920 - 970 \text{ kg/m}^3$ . Díky jeho elektroizolačním vlastnostem se používá jako izolant. Výborně odolává rozpouštědlům a je dobře svařitelný. PE je hořlavý plast, který při hoření odkapává a málo odolává UV záření a povětrnostním vlivům. Používá se pro výrobu lahví, domácích potřeb, fólií a trubek. [32]

## **Polyvinylchlorid – PVC**

Termoplast PVC má amorfni strukturu. Vyznačuje se vyšší pevností a tuhostí. Za nízkých teplot výrazně klesá tažnost a vrubová houževnatost. Hustota se pohybuje v rozmezí  $\rho = 1300 - 1400 \text{ kg/m}^3$ . Neměkčený PVC je tvrdý, nažloutlý a průsvitný. Měkčený pak ohebný a tažný. Hoří obtížně a je samozhášivý. Jedná se o oproti PE a PP odolný materiál vůči povětrnostním vlivům, naopak nedisponuje tak dobrými elektroizolačními vlastnostmi jako PE, ale je stejně dobře svařitelný. Neměkčený PVC se používá pro výrobu trubek. Z měkčeného PVC se vyrábí desky, podlahové krytiny a koženka. Oba typy PVC se používají v potravinářství v podobě obalů a fólií. [32] [5]

### **3.4. Technologické zpracování polymerních materiálů**

Ke zpracování polymerů se používá řada technologií. Do volby technologie vstupuje spousta faktorů, jako např. technologické vlastnosti zpracovávaného polymerního materiálu, tvar a funkce výrobku. Podle vztahu mezi plastem vstupujícím do procesu a výsledkem tohoto procesu lze technologie rozdělit do následujících skupin. [34]

*Tvářecí technologie* zahrnuje takové technologie, které mění výchozí tvar zásadním způsobem. To znamená, že dochází ke značnému přemístování částic materiálu. Tváření probíhá za působení teploty a tlaku nebo obou vlivů současně. Do tvářecích technologií patří vstřikování, vytlačování, lisování, válcování, ale i odlévání a vypěňování apod. Výsledkem může být konečný výrobek nebo polotovar. [34]

*Tvarovací technologie* zahrnuje takové technologie, u kterých se většinou vychází z polotovaru a plast mění svůj tvar bez velkého přemístování částic. Vliv teploty a tlaku se může, ale nemusí uplatňovat. Patří sem tvarování desek, výroba dutých těles (vyfukování), ohýbání trubek, obrábění plastů, spojování a spékání plastů atd. [35]

*Doplňkové technologie* slouží k úpravě vlastností hmoty před zpracováním (míchání a hnětení, sušení, granulace, předehev atd.) nebo naopak k úpravě finálních výrobků (potiskování, natírání atd.) a také recyklace. [34]

## 4. Svařování polymerních materiálů

Svařování se řadí mezi nerozebíratelné druhy spojení dvou nebo více dílů. Přivedením určitého množství energie, nejčastěji v podobě tepla jsou spojované díly v místě styku roztaveny a následným tuhnutím spojovaných materiálů spojeny. Technologie svařování se liší převážně ve způsobu dodání tepla a energie do místa svaru. Různé způsoby svařování si dále vynutila potřeba svařovat velké množství různých druhů materiálu při ještě větší potřebě různého konstrukčního uspořádání svařovaného uzlu. [21]

Dnes už vedle svařování kovových materiálů mají nenahraditelné místo i plasty. Díky jejich neustálému vývoji a zlepšování vlastností (jak mechanických, tak fyzikálních) patří plasty mezi nejvýznamnější nekovové konstrukční materiály a používají se ve všech možných průmyslových odvětvích, jako je strojírenství, elektrotechnika, stavebnictví, chemie, potravinářství a další. To si vynutilo technický pokrok i ve spojovacích technologiích, jako je svařování plastů. Svařování plastů nachází uplatnění ve všech zmíněných odvětvích a v mnoha jiných, např. v textilním průmyslu, v obalové technice (svařování fólií), ve spojování trubek, ve stavebnictví při výrobě různých stavebních prvků, a mnoha dalších plastových komponentů. [27]

### 4.1. Princip svařování

Svařování je technologický postup, při kterém se využívá teplo a tlak. Ve svařovací zóně spojovaných ploch se nachází materiál ve viskózně-tekutém stavu. Tuto technologii můžeme v případě polymerních materiálů využít jen pro termoplasty, které se dají přivedeným teplem převést do plastického nebo tekutého stavu. V takovém to stavu dochází k promíchání makromolekul ve spoji a po ochlazení, které je součástí procesu, k obnově jejich přitažlivých sil. Základními parametry při svařování jsou teplota, tlak a čas. Všechny tři veličiny se musí vzájemně přizpůsobit druhu svařovaného termoplastu, použité technologii a podmínkám prostředí. Svařování termoplastů uplatňuje množství různých technologií, z nichž většina metod je odvozena od svařování kovů. [24]

#### Základní parametry svařování

Základními parametry svařování je *teplota, tlak, čas*. Musí se vzájemně přizpůsobit s ohledem na chemicko-fyzikální vlastnosti svařovaných termoplastů, druh použité svařovací technologie a na podmínky prostředí. [22]

*Teplota* je veličina, která se mění nejen s druhem termoplastu, ale i s metodou svařování. Vlivem ochlazování prostředím musí být nastavená teplota u některých metod vyšší než u jiných. Např. u materiálu PP je teplota horkého tělesa při svařování polyfúzí 250 – 270 °C, při svařování na tupo 200 – 220 °C a při svařování horkým plynem a přídavným materiálem rychlotryskou je teplota horkého plynu 300 – 340 °C (měřeno 5 mm uvnitř trysky). Svařovací teploty pro různé typy termoplastů a stejné metody jsou také často rozdílné, např. při svařování polyfúzí je pro PE-LD teplota 190 – 200 °C a pro PE-HD teplota 250 – 270 °C. [22]

*Tlak* neboli svařovací síla je nezbytnou součástí svařování termoplastů. Díky tomu dochází k řádnému promíchání tekutých částí spojovaných dílů. Musí vždy působit na spojovaných plochách svařovaných dílů. Vyvození svařovací síly se liší od druhu metody svařování. Pokud se jedná o ruční svařování, musí tuto svařovací sílu vynaložit svářeč. V případě strojního svařování může být síla vyvozena mechanicky (tlačné pružiny, soustava pák), hydraulicky nebo v případě moderních svářeček pneumaticky. [22]

*Čas* je hodnota, u které je snahou jí dodržet co nej přesněji. Bohužel u některých ručních metod, jako u svařování horkým plynem, rychlotryskou nebo extruderem je čas odvozen od rychlosti svařování, kterou řídí svářeč. Naopak u vysoce automatizovaných svařovacích metod jako je



svařování polyfúzí, svařování na tupo a svařování ultrazvukem je čas přesně vymezen a musí být dodržen. [22]

### Směrnice DVS

Na konci 90. let v ČR stále nebyla normalizace postupů pro svařování plastů. V té době se české svářečské školy ústně dohodly na používání postupů německého svazu pro svařovací techniku DVS. Dle těchto postupů se řídila i řada evropských zemí. Postupem času se stav mění a dochází ke zpracovávání evropských norem, které často přebírají postupy a řešení DVS. [22]

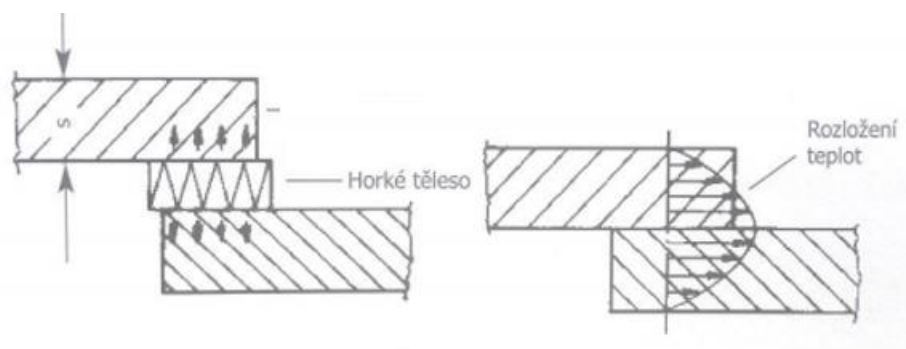
DVS 2207 je řada norem týkajících se spojování termoplastických materiálů. Zahrnuje svařování desek, trubek a potrubních komponentů z PE-HD a PP. Norma se zabývá svařováním na tupo, polyfúzním svařováním, svařováním horkým plynem a extrudérem. Součástí normy jsou pravidla pro přípravu, postupy svařování a metody pro testování. [22]

## 4.2. Rozdělení svařování termoplastů

Je několik možností dělení metod svařování. Jednou z nich je na *přímé* a *nepřímé svařování*. To určuje, kam se dodává požadovaná energie (teplo). Podrobněji je tato možnost dělení metod svařování popsána v kap. 4.2.1. a 4.2.2. Další možností dělení metod je podle *způsobu dodání tepla* (energie) do místa svaru. Tento způsob dělení je mnohem podrobnější než předchozí. Podrobněji je tato možnost dělení metod svařování popsána v kap. 4.2.3.

### 4.2.1. Přímé svařování

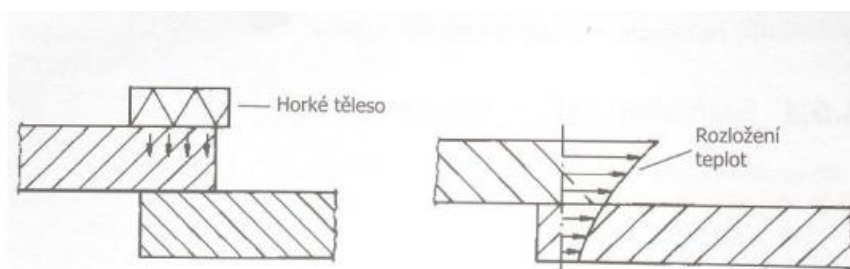
Potřebné svařovací teplo se přenáší bezprostředně z horkého (nemusí být vždy horké) tělesa na svařovanou plochu materiálu. Rozdělení teplot je výhodné, protože se svařované materiály rovnoměrně ohřívají na celé svařované ploše a teplota směrem od ní rovnoměrně klesá. Touto metodou je možné svařovat i materiály s větší tloušťkou stěny. [22]



Obrázek 6: Přímé svařování [22]

### 4.2.2. Nepřímé svařování

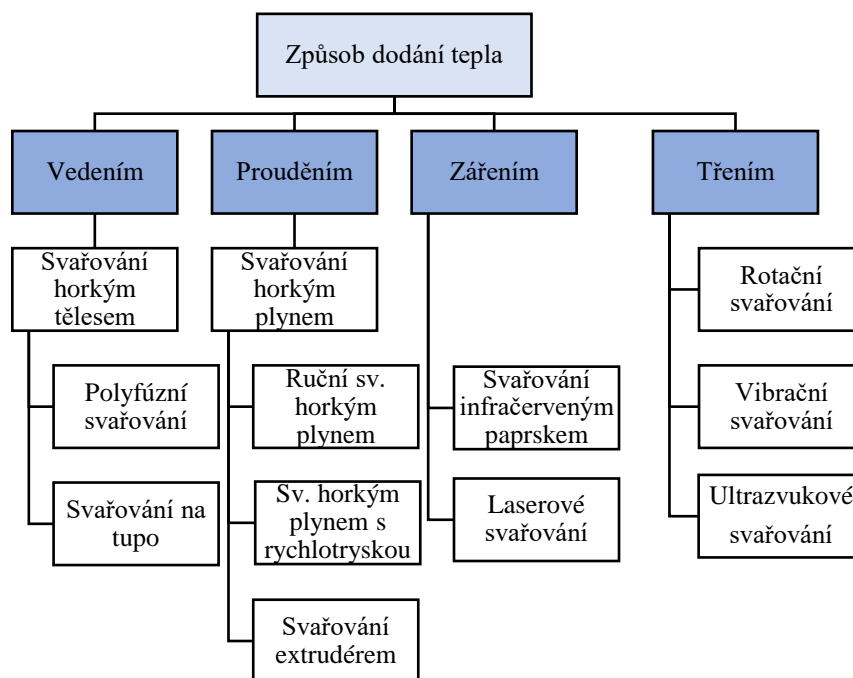
U této metody se horké (nemusí být vždy horké) těleso přímo nedotýká svařované plochy, ale působí z protilehlé strany ke svařované ploše. Svařovací teplo musí projít celou tloušťkou jednoho ze svařovaných materiálů. Nevýhoda oproti přímému svařování je rozložení teplot, protože v místě svaru není nejvyšší teplota, viz obr. 7. Proto se většinou těmito metodami nedají svařovat silnostěnné materiály (tloušťka stěny u přeplátovaného spoje musí být menší než 0,5 mm). [22] [23]



Obrázek 7: Nepřímé svařování [22]

### 4.2.3. Způsob dodání tepla

Druhou z možností dělení technologie svařování termoplastů se dělí dle způsobu dodávání tepla do místa svaru. Nejzákladnější dělení je na dodávání tepla *vedením*, *prouděním*, *zářením* a *třením*. Každý způsob dodávání tepla má zastoupení několika technologiemi. Tyto technologie a jejich rozdělení je nejlépe popsáno na obr. č. 8. [25]



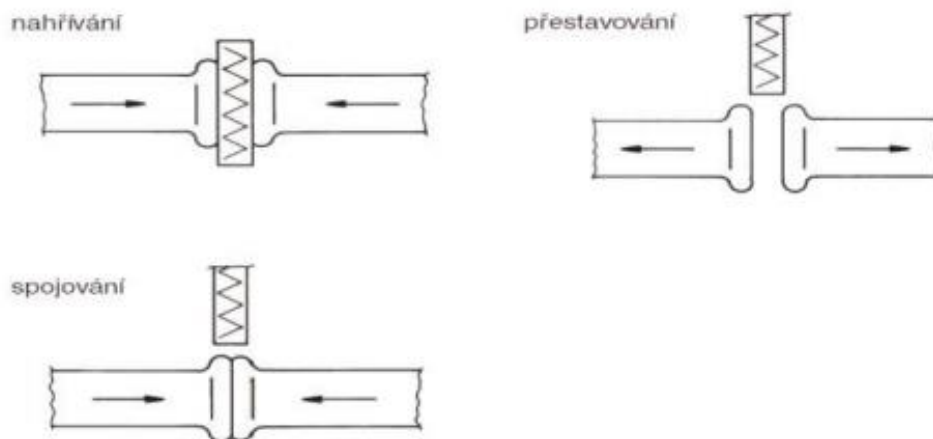
Obrázek 8: Rozdělení technologií svařování plastů dle způsobu dodávání tepla do místa svaru [25]

#### 4.2.3.1. Dodání tepla vedením

Svařované plochy se zahřejí pomocí horkých těles. Ty jsou zpravidla elektricky vyhřívány. Jejich tvar a rozměr je většinou kalibrováný nebo je speciálně přizpůsobený požadavkům. Další možností je zahřívání pomocí elektrické topné šroubovice, která je navinutá v těle tvarovky (spojovací článek, kolínko). Vlastní svařování se provádí ručními svařovacími přístroji nebo stroji s různými stupni mechanizace, případně i automatizace bez použití přídavného svařovacího materiálu. [22]

## Svařování na tupo horkým tělesem

Metoda slouží ke svařování nejčastěji potrubí, ale i desek a profilů. Celý proces probíhá za sousého postavení trubek stejného průměru. Na spojované konce trubek se nasadí zařízení, které drží trubky v sousé poloze a zároveň zajišťuje pohyb v ose. Metoda svařování spočívá v nahřátí čel trubek pomocí horkého tělesa. Po odstranění horkého tělesa se trubky k sobě přitlačí a čeká se, než svar ztuhne. [22]



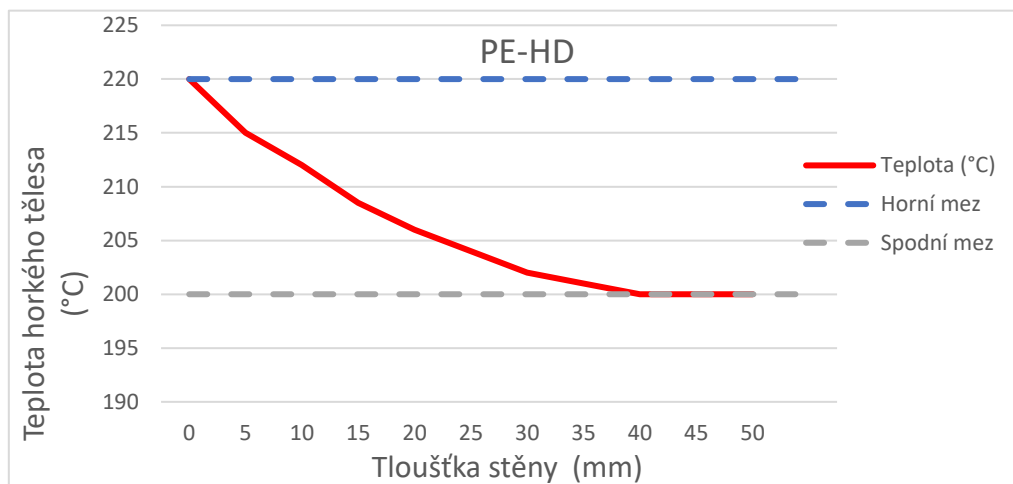
Obrázek 9: Princip svařování na tupo horkým tělesem [22]

Touto metodou svařování se nejčastěji spojují trubky z materiálů PE, PP, PVDF a PB. Desky a profily svařované na tupo jsou nejčastěji z materiálů PE, PP, PVDF, PVC a PMMA.

Stroje pro svařování na tupo se liší především v použití druhu polotovaru a to potrubí, desek nebo profilů. Všechny tři druhy polotovarů mají zastoupení v dílenském provedení, kde je pohyb polotovaru zajištěn ručně, hydraulicky nebo pneumaticky. Pouze u svařování potrubí se stroje vyrábí i v provedení montážním, tj. přenosném. Ruční pohyb, tj. přitlačení trubek je možné pouze v případě je-li použítí trubek beztlaké. [22]

## Parametry svařování na tupo

Parametry svařování nezáleží na typu svařovaného polotovaru (trubky, desky a profily), ale na svařovaném materiálu a tloušťce stěny svařovaného polotovaru. Níže uvedený graf č. 1 a tab. č. 2 znázorňují svařovací parametry pro svařování materiálu PE-HD dle DVS 2207 – díl 1.



Graf 1: Závislost teploty horkého tělesa na tloušťce stěny [22]

S rostoucí tloušťkou stěny polotovaru sice teplota klesá, ale roste svařovací čas. Ten se skládá z několika fází. Čas u všech fází roste s rostoucí tloušťkou stěny.

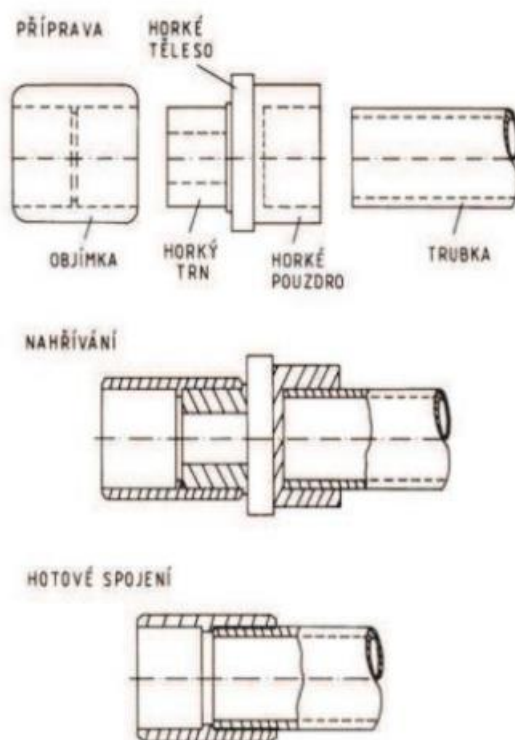
Tab. 2: Svařovací čas členěný podle fází v závislosti na tloušťce stěny [22]

Jmenovitá tloušťka stěny (mm)	Ohřev (s)	Přestavování max. doba (s)	Spojování (s)	Ochlazování (min.)
do 4,5	45	5	5	6
7 - 12	70 - 120	6 - 8	6 - 8	6 - 8
12 - 19	120 - 190	8 - 10	8 - 11	16 - 24
19 - 26	190 - 260	10 - 12	11 - 14	4 - 32

Důležitý parametr je i svařovací síla. Ta se uvádí jak při nahřívání polotovaru, kdy se polotovar přitlačí na horké těleso, tak při samotném spojování. U zmíněného materiálu PE-HD je svařovací síla při nahřívání  $0,02 \text{ N/mm}^2$  a při spojování  $0,15 \text{ N/mm}^2$ . [22]

### Polyfúzní svařování

Technologie slouží pro svařování trubek s tvarovkami (kolínko, spojka, T-kus apod.). Princip polyfúzního svařování spočívá v souběžném ohřevu vnějšího povrchu trubky a hrdla tvarovky na tvarovém horkém tělese (polyfúzním nástavci) a následném zatlačení nahřáté trubky do stejně zahřátého kónického hrdla tvarovky. [22]



Obrázek 10: Princip polyfúzního svařování [22]

### Typy polyfúzního svařování

Typy polyfúzního svařování se rozdělují dle rozměrů polotovaru a zároveň dle velikosti topných nástavců. Metoda je rozdělena do tří typů, označeny A, B a C, které se od sebe liší hlavně postupem. [22]

U *typu A* se neprovádí kalibrace vnějšího povrchu trubky ani vnitřního povrchu tvarovky, proto musí být trubky i tvarovky vyrobeny s přesně tolerovanými rozměry. Rozměry musí být takové, aby vtlačování při nahřívání nebylo příliš namáhavé a nedocházelo k vytlačení příliš nahřátého materiálu. V ČR se jedná o nejvíce rozšířený typ polyfúzního svařování.

U *typu B* se před ohřevem musí konce trubek ořezat, čímž dochází ke kalibraci a zároveň k odstranění zoxidované vrchní vrstvy trubky.

*Typ C* není popsán ve směrnících DVS, ale jedná se o firemní označení, které se dnes obecně používá. Metoda spočívá v přidání odbočky u trubek s průměrem větší jak 50 mm. Princip metody je v navrtání trubky a následného přivaření tvarovky, která z jedné strany kopíruje tvar trubky a z druhé strany má hrdlo, které je totožné s hrdly na tvarovkách typu A. [22]

Touto metodou svařování se nejčastěji spojují trubky z materiálů PE, PP, PVDF a PB. Pro vnitřní rozvody vody a topení se nejčastěji používá polypropylen označený PPR (random polypropylen).

Svařovací zařízení jsou ruční i strojní, liší se především ve velikosti svařovaného průměru. *Ruční* polyfúzní svářečky jsou určeny pro svařování trubek do průměru 63 mm, zpravidla však do 40 mm. Přitlačení trubky a tvarovky musí svářeč vykonat ručně. *Strojní* svářečky jsou určeny pro svařování větších průměrů trubek a to až 110 mm, proto jsou opatřeny přípravky a mechanismy pro vyvození přítlaku. Tyto mechanismy zároveň zabezpečují souosost svařených dílů. [22]

### Parametry polyfúzního svařování

Svařovací parametry pro polyfúzní svařování, teplota, tlak a čas, jsou uváděny pro jednotlivé materiály zvlášť, ale společné zásady je nutno dodržet u všech materiálů. Především se jedná o svařovací teplotu. Na tento parametr jsou kladeny požadavky podobně, jak u svařování na tupo. A to tak, že pro větší průměry se volí nižší teplota v určitém intervalu, ale svařovací čas roste, aby došlo k dokonalému prohřátí. U malých průměrů je to naopak, kdy se volí vyšší teplota a zkracuje se doba ohřevu, aby nedošlo k zborcení tenké stěny trubky. Například pro materiál PE-HD se uvádí interval teplot 250 - 270 °C. Svařovací čas viz tabulka č. 3. [22]

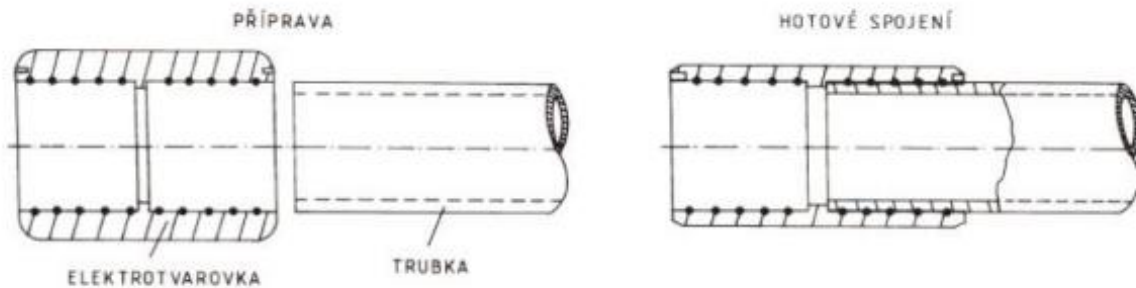
Tab. 3: Svařovací čas členěný podle fází v závislosti na vnějším průměru trubky [22]

Vnější průměr trubky $d_n$ (mm)	Nahřívání (s)	Přestavování max. doba (s)	Ochlazování za fixace (s)	Ochlazování celkem (min.)
16	5	4	6	2
20	5	4	6	2
25	7	4	10	2
32	8	6	10	4

### Svařování elektrotvarovkou

Princip svařování elektrotvarovkou je velice podobné polyfúznímu svařování s tím rozdílem, že odpadá nahřívání trubky a tvarovky na polyfúzním zařízení, protože tvarovka je na vnitřních stěnách vybavena topnou šroubovicí, která má charakter přímo vytápěného ztraceného topného tělesa. Trubka s tvarovkou se sesazuje po ořezání hrdla trubky za studena a až pak se šroubovice připojí ke svářečce. Šroubovicí z odporových drátů prochází elektrický proud, což vede k zahřívání, plastifikaci a roztavení tvarovky i povrchu trubky. Potřebný tlak vzniká zvětšením objemu materiálů při roztavení. Touto metodou se spojují trubky z běžných materiálů, jako je

PE-HD, PE-LD, PPR a PB. Výhoda této metody od předchozích metod je ve svařování velkých průměrů trubek a to až 630 mm. [22]



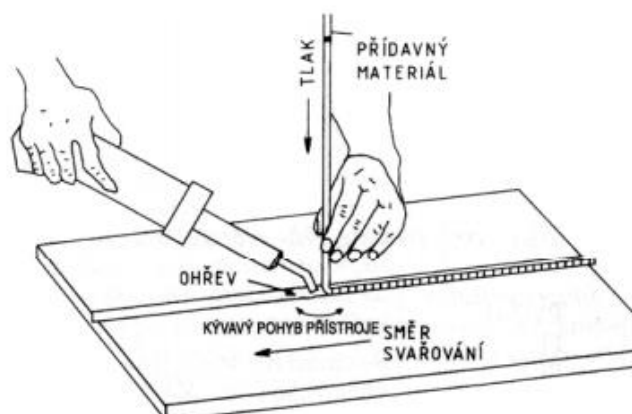
Obrázek 11: Princip svařování elektrotvarovkou [22]

#### 4.2.3.2. Dodání tepla prouděním

Tato metoda spočívá v nahřátí a převedení do plastického stavu spojované materiály pomocí horkého plynu, zpravidla vzduchu a následného spojení pod tlakem. Princip metody svařování plastů horkým plynem je obdobný metodám svařování kovů, např. svařování plamenem s přídavným materiálem nebo svařování obloukem, ale s velice rozdílnými parametry svařování.

Svařování horkým plynem může být *ruční* a s *rychloutryskou*. V obou případech se jedná o ruční svařování. V prvním případě se základní i přídavný materiál ohřívá kývavým pohybem svařovacího přístroje vedeného ve směru svařování. Plastifikovaný přídavný materiál je ručně zatlačován do plastifikovaného základního materiálu. U svařování s rychlotryskou se proud horkého vzduchu dělí. Část ohřívá základní materiál a část přídavný materiál. K plastifikaci dochází přímo před spojením materiálů. Svařovací tryska je na špičce opatřena kluznou patkou, která vyvozuje svařovací sílu. [22]

Metoda svařování horkým plynem (ruční) se používá pro svařování materiálů, např. PE, PP, PVC, PVDF a PMMA. Touto metodou lze svařovat potrubí, desky, profily i folie. Nejčastěji se využívají při opravě plastových dílů automobilů nebo motocyklů. Ruční svařování horkým plynem se používá pro spojování podlahovin z PVC. [22]



Obrázek 12: Ruční svařování horkým plynem [22]





Obrázek 13: Svařování horkým plynem s rychlotryskou [28]

### Svařování extrudérem

Princip technologie svařování extrudérem je velice podobná metodě svařování horkým plynem s rychlotryskou, ale svařování extrudérem je podstatně dokonalejší. Přídavný materiál, který je druhotně stejný se základním materiálem, se zahřívá již v extrudéru a do místa svaru je tak dodáván zcela homogenní a dokonale plastifikovaný. Do místa svaru je přídavný materiál dodáván pod tlakem, který je vyvolán šnekem nebo pístem. To zároveň zabezpečuje jeho plynulé dodávání. [22]

Technologií svařování extrudérem se spojuje velká skupina polotovarů z termoplastů. Potrubí, atypické potrubní tvarovky, konstrukce z desek, utěšňovací pásy, nejčastěji z materiálů PP, PE, ale i z PVC a PVDF. Touto metodou se také provádějí opravy plastových dílů automobilů, motocyklů apod. [22]



Obrázek 14: Svařování extrudérem (ruční, šnekový extrudér) [25]

Metod svařování extrudérem je několik druhů. Liší se od sebe především v tom, jestli se jedná o kontinuální nebo diskontinuální svařování a v podobě použitého přídavného materiálu (drát, granulát). Svařovací parametry jsou však pro všechny velice podobné a mění se s materiálem. Např. v tab. č. 4 jsou uvedené svařovací parametry pro svařování PE-HD při *kontinuálním postupu* svařování s přídavným materiálem v podobě *drátu*. [22]

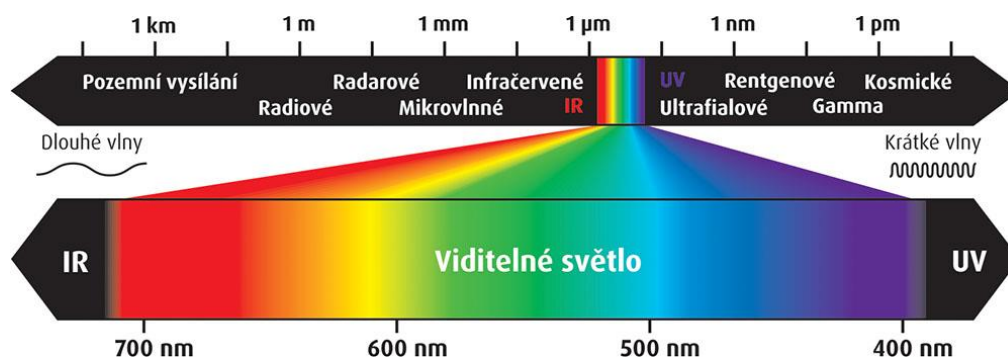
Tab. 4: Hodnoty svařování pro svařování extrudérem [22]

Tloušťka materiálu (mm)	Teplota hmoty (°C)	Teplota horkého vzduchu (°C)	Množství vzduchu (l/min)	Množství přídavného materiálu (kg/h)
0 - 15	200 - 230	250 - 300	≥ 300	0 - 2

### 4.2.3.3. Dodání tepla zářením

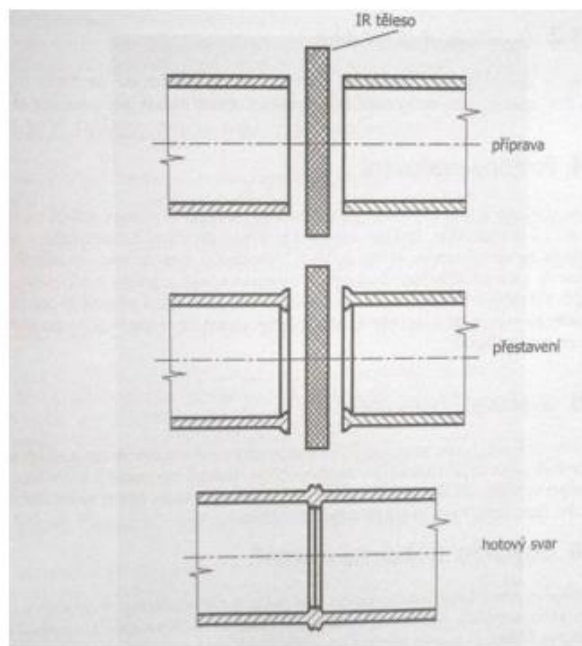
#### Svařování infračerveným paprskem (INFRARED WELDING)

Technologie je založena na bezdotykovém ohřevu čelních ploch trubek a tvarovek infračerveným (dále jen IR) zářičem. Princip technologie svařování IR paprskem je podobný svařování na tupo, s tím rozdílem, že zdroj tepla se nedotýká svařovaných ploch, a tudíž nemůže vnášet nečistoty do svaru. Materiál je ohříván díky absorpci záření. Čím více záření je absorbováno, tím lepší je výsledek svařování. IR paprsky jsou součástí elektromagnetického spektra v rozsahu vlnových délek přibližně 0,8 až 400  $\mu\text{m}$ . Vyzařují teplo a jsou ohraničeny z jedné strany mikrovlnným rozsahem a z druhé viditelným spektrem. Krátkovlnné záření prochází hluboko do materiálu a zajišťuje rovnoměrný ohřev. Středněvlnné záření je absorbováno již venkovní vrstvou a ohřívá tak převážně povrch dílu. Technické plasty ABS, PA, PP, PMMA nebo PC jsou z hlediska svého složení vhodné pro dostatečnou absorpci IR záření. [22] [25]



Obrázek 15: Elektromagnetické spektrum [29]





Obrázek 16: Princip svařování IR paprskem [30]

### Svařování laserem

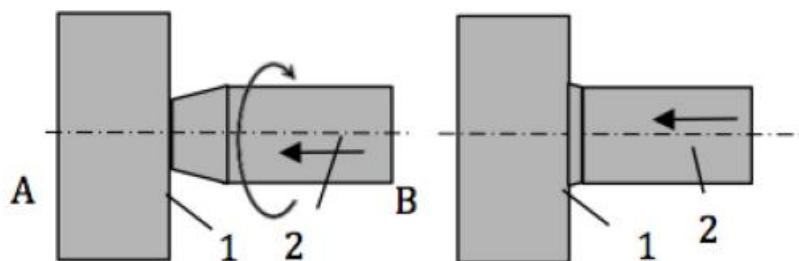
Při laserovém svařování jsou plasty svařeny prostřednictvím laseru (zostřeného světla). Laserové svařování se dělí na *průchozí* a *konturové*. Při průchozím laserovém svařování se využívá transparentního materiálu, ze kterého je jeden díl. Ten se laserem prozáří a nataví se povrch absorpčního materiálu. Díky vedení tepla je natavena též dotyková plocha transparentního materiálu. Při konturovém laserovém svařování jsou proti sobě upnuty oba díly a laser je veden podél spoje, čímž nataví obě dotykové hrany. Pohyb laserového systému je ve většině případů zajištěn robotem. [25]

#### 4.2.3.4. Dodání tepla třením

Tato technologie svařování je založena na přeměně mechanické energie v energii tepelnou, vyvolanou vzájemným třením svařovaných povrchů. Výkon, respektive velikost uvolněného tepla je závislá na koeficientu tření, přitlačné síle a vzájemné rychlosti třecích ploch. Je to dobře regulovatelná metoda svařování. Technologie svařování třením se dělí na *rotační svařování* a *vibrační svařování*. Materiály vhodné pro svařování třením jsou, jak z amorfních, tak ze semikrystalických materiálů, jako je PS, ABS, PMMA, PC, PA, PP, PE a PVC. Polotovary pro svařování třením jsou především rotační součásti nebo polotovary, které se dají upnout do čelistí stroje, např. kruhové profily, tvarové profily. Pro vibrační svařování se volí díly se souměrnou dělicí rovinou. [22]

#### Rotační svařování

U rotačního svařování je jeden díl pevně fixován, např. v čelistech a druhý se otáčí. Otáčky se pohybují v rozmezí 1800 – 3000 min<sup>-1</sup>. Pro výrobky malých průměrů se volí vyšší otáčky, a naopak u velkých průměrů se volí nižší otáčky. Při ohřevu, tj. při otáčení se přitlačná síla volí 20 - 60 % síly při konečném spojování bez tření, kdy se tlak pohybuje v rozsahu 0,07 - 1,4 MPa. [22]

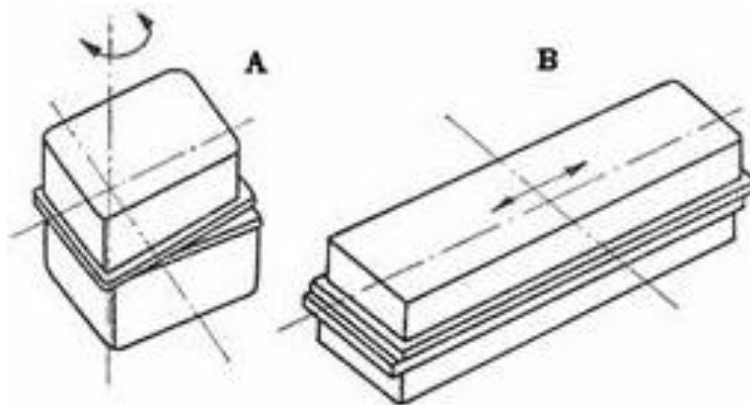


Obrázek 17: Rotační svařování [25]

### Vibrační svařování

Vibrační svařování se od rotačního svařování liší ve vzájemném pohybu dílů. U rotačního svařování je pohyb neměnný, zatímco u vibračního je kmitavý, tj. mění směr. Použití nachází převážně tam, kde nelze použít rotační svařování, tj. u nerotačních dílů a u středních až velkých výrobců.

Základem pro vytvoření energie potřebné pro svaření jsou kmity, ty mohou být vyvozeny buď mechanicky, hydraulicky nebo elektromagneticky. Pracovní frekvence je od 100 do 300 Hz při amplitudě od 0,5 do 2,5 mm. Vždy však musí být dodrženo pravidlo, že pro nízkou amplitudu se musí použít vysoká frekvence a naopak, aby byl zajištěn dostatek energie pro natavení a svařování. Čas, potřebný pro ohřev a natavení povrchu svařovaných částí, je podle velikosti svařovaných dílů od desetin po desítky sekund. V poslední fázi (tlakové) jsou svařované díly k sobě přitlačeny svařovacím tlakem bez vibračního pohybu do konečné pozice a tato tlaková fáze trvá až do úplného ztuhnutí taveniny polymeru v místě svaru. [24]



Obrázek 18: Princip vibračního svařování; A - ohřev rotačním, kmitavým pohybem; B - ohřev lineárním, kmitavým pohybem [24]

### Ultrazvukové svařování

Další technologií svařování termoplastů je ultrazvukové svařování. Vzhledem k tomu, že se jedná o primární téma bakalářské práce, je tato technologie podrobněji popsána v následné kapitole č. 5.

Z této kapitoly je patrné, že technologií pro svařování termoplastů je více, a přesto jsou všechny nepostradatelné. Při pořizování nové technologie je spousta možností, ale je nutné zvážit všechny výhody a nevýhody každé z nich.

## 5. Ultrazvukové svařování

Princip ultrazvukového svařování spočívá ve vysokofrekvenčním tření jedné součásti o druhou. Součásti jsou spojené po zahřátí, vyvolané třením, v místě dotyku za současného působení tlaku nástroje.

Jeden díl je pevně přichycený k základně, druhý je k tomuto dílu přitlačen nástrojem, tzv. sonotrodou. Ta předává vibrační energii o frekvenci 20 – 35 kHz a amplitudou jen několik setin milimetru volnému dílu a působí na něj svařovací silou. Vlivem toho se v místě dotyku zvyšuje teplota a materiál se taví. Po dosažení přednastaveného svařovacího času, působí sonotroda už jen svařovací silou a nastává výdrž, při které svarový spoj tuhne. Celý proces svařování je velice krátký a trvá maximálně jen pár vteřin.

Technologie ultrazvukového svařování je vhodná především pro svařování termoplastů, ale také kovových materiálů, ze kterých se nejčastěji svařují tenké plechy a dráty. Příkladem použití této technologie je spojování elektrických kontaktů z hliníku nebo mědi, především u citlivých elektrických zařízení má tato metoda výhodu, v produkování jen velmi málo tepla. [26]

### 5.1. Ultrazvuk

*„Ultrazvuk spadá do oblasti akustiky a je popsán jako kmitavá mechanicko-akustická energie, která se nachází ve frekvenčním pásmě nad slyšitelností lidského ucha. V ultrazvukové technice se tato hranice stanovila přibližně na 20 kHz. Účinky ultrazvukové energie při šíření ve sledovaném prostředí závisí na intenzitě (amplitudě výchylky), frekvenci kmitů a vlastnostech prostředí.“* [32]

Frekvencí  $f$  je označován počet kmitů hmotného bodu za jednotku času. Zároveň frekvence  $f$  je převrácená hodnota periody  $T$ . [5]

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

$f$ ...frekvence kmitů (Hz)

$T$ ...perioda kmitů (s)

Vzdálenost jednoho kmitu vlnění se nazývá vlnová délka  $\lambda$ , vypočítá se pomocí rovnice (2). [32]

$$\lambda = w * T = \frac{w}{f} \quad (2)$$

$f$ ...frekvence kmitů (Hz)

$T$ ...perioda kmitů (s)

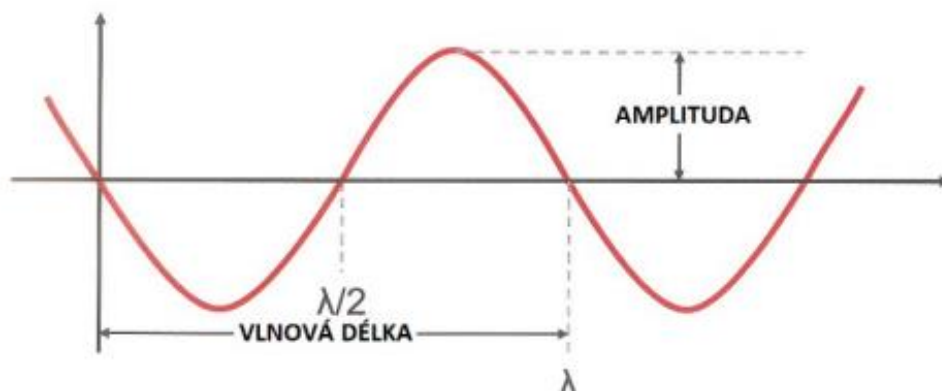
$\lambda$ ...vlnová délka (m)

$w$ ...fázová rychlost vlnění (m/s)

- Rychlost, kterou se šíří vlnění daným prostředím.
- Závisí na vlastnostech pružného prostředí.

Vlnová délka lze znázornit pomocí sinusoidy, kde odpovídá vzdálenosti např. dvou maxim na křivce. Ultrazvukové vlny mají vlnové délky velice krátké (např. frekvenci 20 kHz odpovídá ve vzduchu vlnová délka přibližně 1,7 cm/s). [5] [6]

Amplitudou  $A$  se označuje výkmit či rozkmit a udává maximální hodnotu periodicky se měnící veličiny. [36]



Obrázek 19: Vlnový pohyb [32]

Díky jeho vlastnostem našel ultrazvuk využití v mnoha průmyslových odvětvích. Intenzita ultrazvuku má za následek, jestli vlnění má vliv na prostředí nebo ne. Ultrazvukové vlnění, které prostředí neovlivňuje a má tzv. nedestruktivní charakter se označuje jako *pasivní*. Nejčastěji se vyskytuje v lékařství při různých vyšetřeních, v zařízení zvané sonar a při nedestruktivní kontrole materiálu. Opakem je *aktivní* ultrazvukové vlnění, které mění jak fyzikální, tak chemické vlastnosti prostředí. Tento typ se využívá převážně ve výrobě a to např. v obrábění, svařování nebo čištění. [5] [7] [9]

### 5.1.1. Zdroje ultrazvuku

Zdrojem ultrazvukového vlnění nemusí být pouze stroje, ale i některé živočichové, např. netopýři, ho používají k orientaci a delfíni ke komunikaci. K nejčastějším zdrojům ultrazvukového vlnění patří *piezoelektrické* nebo *magnetostrikční* měniče. Podstata těchto měničů je přeměna elektrické energie na akustickou. K tomu využívají stejnojmenné fyzikální jevy – piezoelektrický a magnetostrikční. [7]

#### Piezoelektrický zdroj ultrazvuku

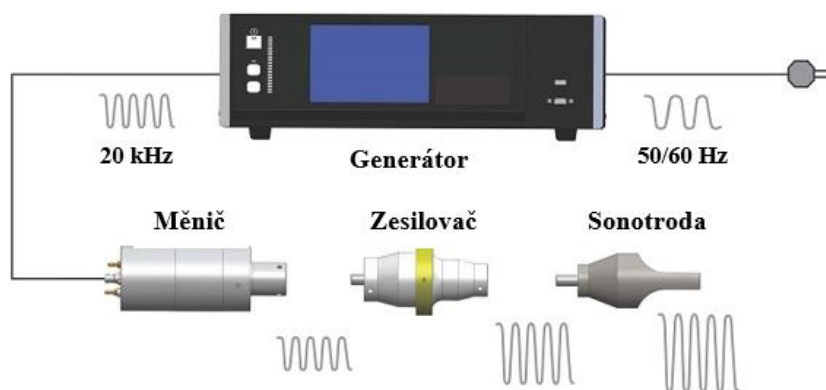
Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat elektrický náboj při jeho deformaci a opačně, kdy vlivem elektrického pole dochází k deformaci krystalu. Neboli k piezoelektrickému krystalu jsou připevněny elektrody, na které je přivedeno střídavé elektrické napětí. Krystal se při průchodu elektrické energie deformuje tak, že se periodicky rozvibruje. Tyto vibrace se dále přenáší do nástroje. Touto vlastností disponuje např. křemen ( $\text{SiO}_2$ ), u kterého se piezoelektrické vlastnosti vyskytují do teploty  $573^\circ\text{C}$ . Při vyšších teplotách tuto vlastnost ztrácí. Jedná se o vratný děj. [9] [10]

#### Magnetostrikční zdroj ultrazvuku

Magnetostrikčním jevem je nazývána změna rozměrů feromagnetických látek vyvolanou jejich magnetizací. Jednoduše řečeno, do cívky, která je navinutá na duté, niklové tyči je přivedené střídavé napětí. V dutině tyče vzniká magnetické pole, vlivem kterého se tyč periodicky zvětšuje a zmenšuje (vibruje). Pokud je frekvence proudu dostatečně vysoká, vibrace se stávají zdrojem ultrazvuku. Nejběžnějším magnetostrikčním materiálem nacházející největší technické uplatnění je nikl a jeho slitiny s železem, popř. kobaltem. [5]

## 5.2. Ultrazvukové svařovací zařízení

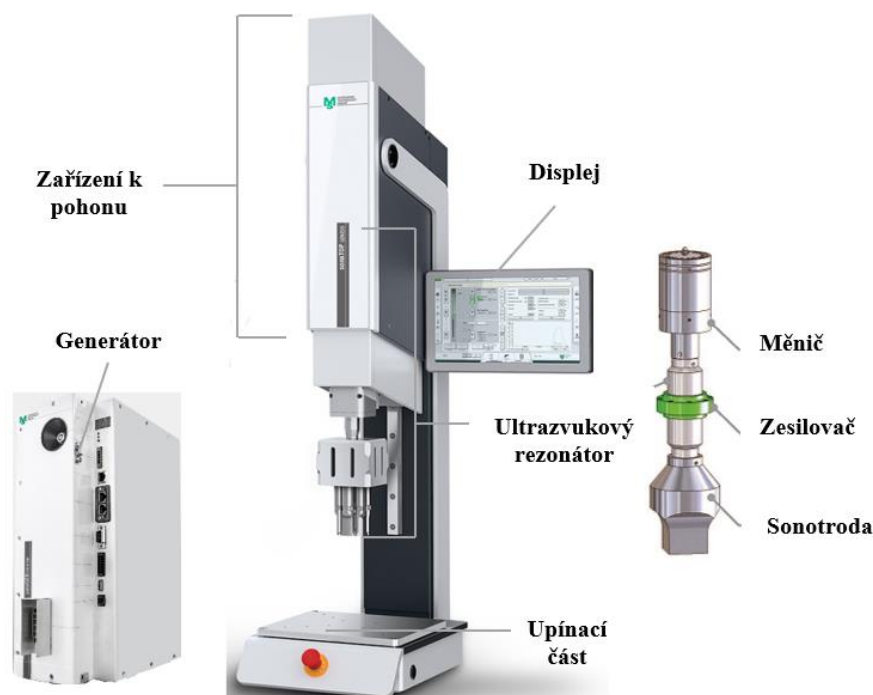
Princip a popis ultrazvukové svářečky je následující. Ze sítě je přivedena nízkofrekvenční elektrická energie (50 – 60 Hz) na generátor, ve kterém se převádí na vysokofrekvenční elektrickou energii (20 – 40 kHz). Ta je následně v měniči transformována na vysokofrekvenční mechanickou energii. Následný zesilovač zvýší intenzitu vibrací. Neposlední částí ultrazvukové svářečky je nástroj, který se nazývá sonotroda. Svarový spoj vzniká zahřátím svarových dílů pomocí tření a za současného působení nástroje svařovací silou na svařované díly. Doplňujícími zařízeními mohou být různé přípravky pro přidržení svařovaných dílů. [11]



Obrázek 20: Princip ultrazvukové svářečky [13]

### Části ultrazvukového zařízení

Části ultrazvukového zařízení se dělí na aktivní a pasivní součásti. Mezi aktivní součásti patří takové díly, které generují zvukové vlnění nebo ho přenášejí na svařované díly. Aktivní součásti jsou ultrazvukový generátor, měnič, zesilovač a sonotroda. Pasivní díly mají za úkol absorbovat vytvořené vlnění a udržet svařované díly v požadované poloze. Mezi pasivní součásti patří aretační přípravek, upínací deska a rám stroje. [32]



Obrázek 21: Popis ultrazvukové svářečky [13] [31]

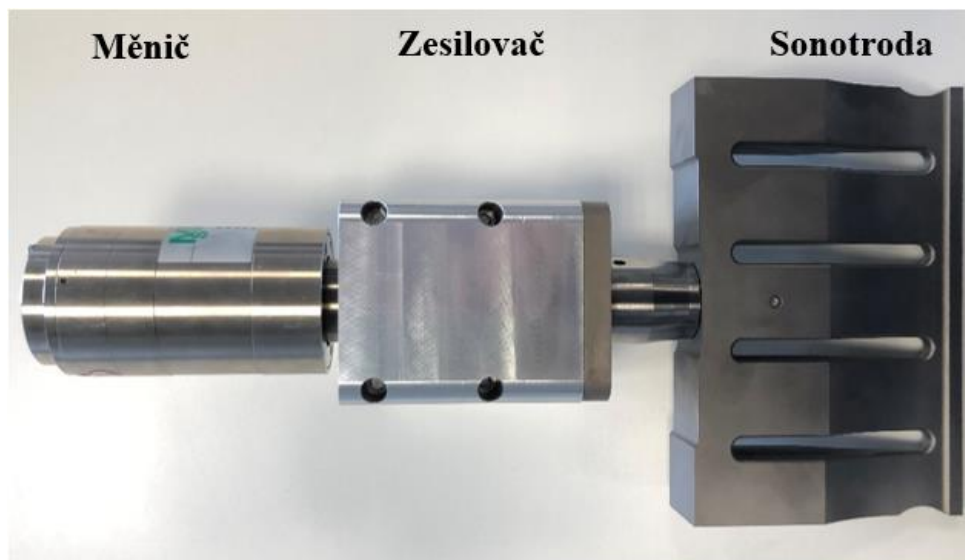
## Generátor

Jedná se o zařízení, které slouží jako napájecí zdroj svařovacího zařízení. Mění standardní elektrickou energii ze sítě o frekvenci 50 Hz na požadovanou elektrickou energii o vysoké frekvenci (frekvenci ultrazvuku), pro kterou je svařovací zařízení navrženo a zkonstruováno (zpravidla 15, 20, 30 a 40 kHz). Generátor může být jak samostatný, tak integrovaný do konstrukce stroje. Záleží především na výrobci a způsobu použití stroje. [32]



Obrázek 22: Generátor [31]

Měnič (konvertor), zesilovač (booster) a sonotroda jsou mechanicky spojeny v jeden celek nazývaný ultrazvukový rezonátor (viz obr. 23).



Obrázek 23: Ultrazvukový rezonátor [17]

## Měnič (konvertor)

Měnič je zdroj ultrazvukových vln. Transformuje elektrickou energii generátoru o frekvenci ultrazvuku na mechanickou energii (kmity), frekvence zůstává stejná. V této fázi mají kmity



tak nízkou hodnotu amplitudy (přibližně 12  $\mu\text{m}$  odpovídá frekvenci 20 kHz), že je téměř nemožné docílit svaření dílů, a proto je nutné hodnotu amplitudy zvýšit. [32]



Obrázek 24: Měníč [31]

### Zesilovač (booster)

Úkolem zesilovače je zpravidla měnit hodnotu amplitudy dodanou z měniče. V průmyslové praxi se používají většinou zesilovače se standardizovaným stupněm změny. Ten bývá zpravidla v rozsahu 1,0 (nemění hodnotu amplitudy, slouží pouze jako spojovací člen mezi měničem a sonotrodou) do 3,0 (trojnásobně zvýší hodnotu amplitudy), avšak vyrábí se i zesilovače se stupněm zesílení menší než 1,0 (snižuje hodnotu amplitudy). [32]



Obrázek 25: Zesilovače [31]

### Sonotroda

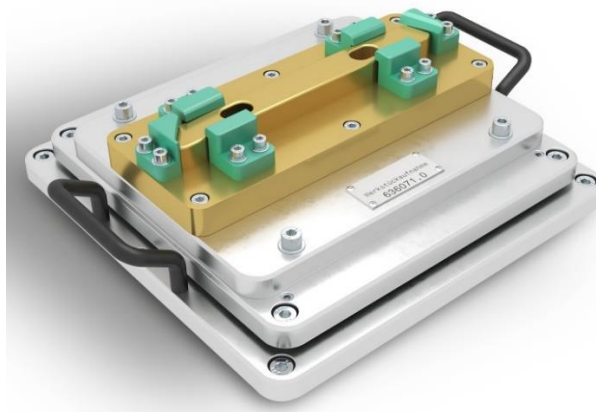
Sonotroda je odborný název pro nástroj pro ultrazvukové zařízení. Jedná se o poslední článek ultrazvukového rezonátoru a také o nejdůležitější část ultrazvukového zařízení, protože sonotroda je v kontaktu se svařovaným dílem a převádí na něj mechanickou energii. Pro každou aplikaci je určený jiný tvar a velikost sonotrody. Tvar sonotrody, resp. zúžení má stejný vliv jako u zesilovače, tedy mění se hodnota amplitudy. Stejně jako u zesilovače, tak u sonotrody se hodnota amplitudy mění dle standardizovaného stupně změny. Sonotroda je nástroj, který je velice zatížen střídavým zatížením. Například ultrazvuková frekvence 20 kHz odpovídá roztahování a zkracování molekul nástroje 20000 krát za sekundu, proto se sonotroda neustále prodlužuje a zkracuje. Z tohoto důvodu se jako materiál sonotrod volí kvalitní oceli nebo hliníkové a titanové slitiny. Právě titanové slitiny mají v současné době díky svým vlastnostem největší zastoupení. [32]



Obrázek 26: Sonotroda [32]

### Aretační přípravek

Úkolem aretačního přípravku je nejen přesná aretace svařovaných dílů v požadované poloze, ale také pevné zajištění svařovaných dílů, aby nedocházelo ke ztrátám energie vlivem přenosu vibrací do jiného místa, než do místa svaru. Výroba kvalitního svaru požaduje co nejefektivnější přenos vibrační energie do místa svaru, a proto se pro každou aplikaci vyrábí speciální aretační nebo upínací přípravek, což je považováno za největší nevýhodu ultrazvukového svařování.



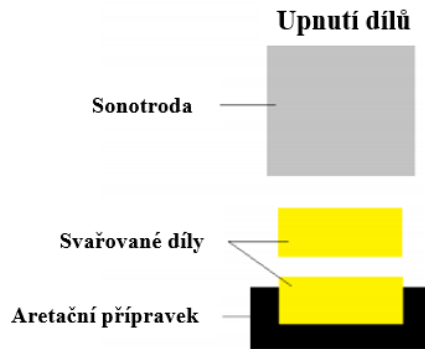
Obrázek 27: Aretační přípravek [31]

### 5.3. Proces ultrazvukového svařování

Proces ultrazvukového svařování se skládá z několika jednoduchých kroků, které jsou popsány níže.

1. Upnutí svařovaných dílů v přípravku. [11]





Obrázek 28: Upnutí svařovaných dílů [11]

2. Kontakt nástroje (sonotrody) se svařovaným dílem. [11]

#### Kontakt sonotrody



Obrázek 29: Kontakt sonotrody se svařovaným dílem [11]

3. Působení nastavené svařovací síly sonotrodou na svařované díly. [11]

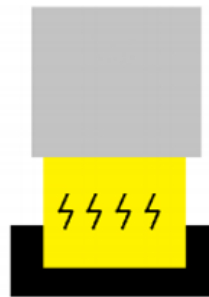
#### Aplikace svařovací síly



Obrázek 30: Aplikace svařovací síly [11]

4. Počátek svařovacího procesu. Po dosažení nadefinovaného tlaku (viz bod 3), sonotroda svisle vibruje s přednastavenou frekvencí 20 nebo 35 kHz v rozsahu kmitů odpovídající amplitudě zpravidla do 90  $\mu\text{m}$  a po dobu odpovídající svařovanému času. Od sonotrody ke svarové ploše jsou mechanické vibrace přenášeny skrz horní díl. Po dosažení přednastavené dráhy, energie nebo času se vibrační pohyb sonotrody ukončí. [6] [11]

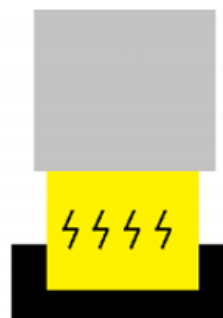
### Svařování



Obrázek 31: Svařování [11]

5. Chladnutí svařovaného spoje za stálého působení tlaku (viz bod 3). [5]

### Výdrž



Obrázek 32: Tuhnutí svařovaného spoje [11]

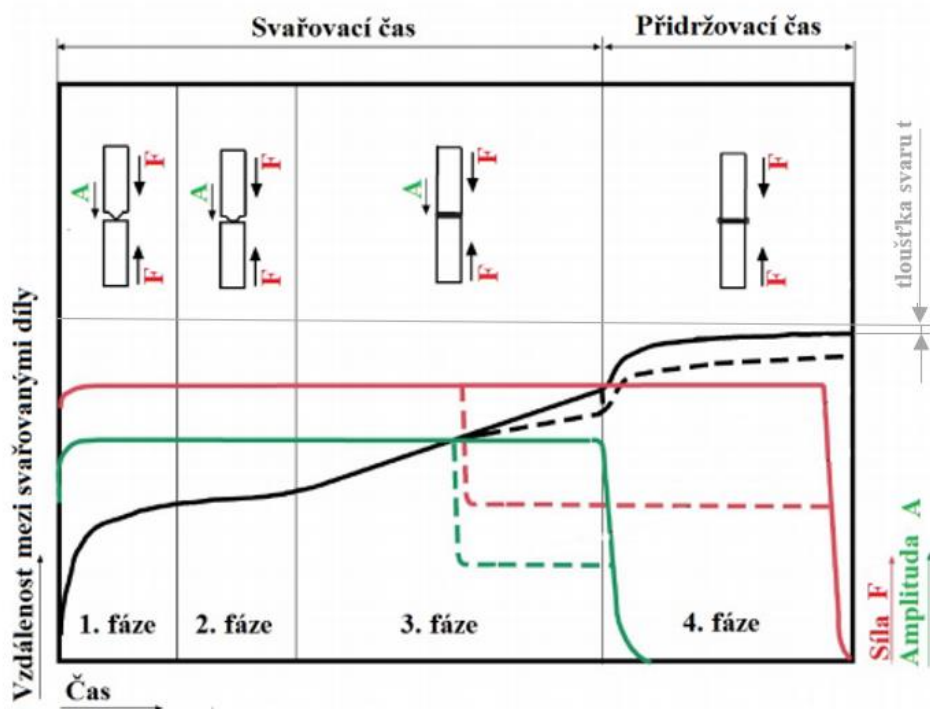
6. Po ztuhnutí svařovaného spoje se sonotroda vrací do výchozí polohy. [11]

### Vrácení sonotrody



Obrázek 33: Svařený díl [11]

Tvorba svaru je detailněji popsána na obr. č. 34, kde je popsán průběh svařování tupého spoje s trojúhelníkovým profilem energetického usměrňovače. Součástí obr. č. 34 je diagram průběhu svařovacího procesu v závislosti na vzdálenosti mezi svařovanými díly a čase (= černá křivka). Diagram je dále obohacený o průběh dvou svařovacích parametrů, a to amplitudy (= zelená křivka) a svařovací síly (= červená křivka). Svařovací cyklus je rozdělen na dvě doby, svařovací čas a čas držení dílců pod tlakem (= přidržovací čas). Svařovací čas obsahuje 3 fáze, během kterých je tvořen svar. [5]



Obrázek 34: Průběh svařovacího procesu (tupý spoj) [5]

Popis jednotlivých fází:

1. *Fáze – Natavení* – Po kontaktu dílů se energetický usměrňovač (malý trojúhelníkový výstupek – viz kapitola č. 5.4.2.) začne vtlačovat do spodního dílu. Vlivem ultrazvukových vln od sonotrody vzniká v místě dotyku největší teplo. Usměrňovač velmi rychle taje z důvodu jeho malé kontaktní plochy a vysoké koncentraci energie a díky tomu se díly k sobě rychle přibližují. [5]
2. *Fáze – Spojení* – Vlivem zvětšující se svařované plochy roste výkon generátoru při snaze udržet definovanou hodnotu amplitudy. Rychlost přibližování dílů je definována buď vlastní rychlostí tavení u pneumatického přítlaku nebo rychlostním profilem servopohonu. [5]
3. *Fáze – Svařování* – Celý usměrňovač je roztavený a vrstva taveniny má konstantní tloušťku. V této fázi lze díky velké možnosti nastavení svařovacích parametrů docílit největší optimalizace svarového spoje. Např. snížením amplitudy nebo svařovací síly se docílí větší tloušťky svaru, což je znázorněno v diagramu čárkovanými čarami. Touto fází končí vibrační pohyb sonotrody. [5]
4. *Fáze – Přidržení* – Po dokmitání, sonotroda už jen působí přednastavenou přítlačnou silou a nastává doba tuhnutí svaru. [5]

Pevnost spoje je spjata s průběhem jednotlivých fází tvorby spoje. Největší vliv na pevnost spoje má teplota tavení a podmínky tečení v rovině svarové plochy. Proto se největších rozdílů dosáhne ve třetí fázi svařovacího procesu, kde je roztavený největší objem materiálu. Rychlost odtavování usměrňovače by ideálně měla probíhat konstantně. To lze dosáhnout regulací rychlosti posuvu sonotrody s použitím softwaru. Další způsob je naznačen na obr. č. 34 pomocí čárkovaných, barevných čar, kde regulací síly a amplitudy je dosaženo nejsilnější tloušťky svaru. [5]

## 5.4. Zásady ultrazvukového svařování

Ultrazvukové svařování je velice produktivní metoda spojování termoplastů, ale jako každá technologie má i své omezení a nutné technologické přípravy.

### 5.4.1. Svařitelnost termoplastů

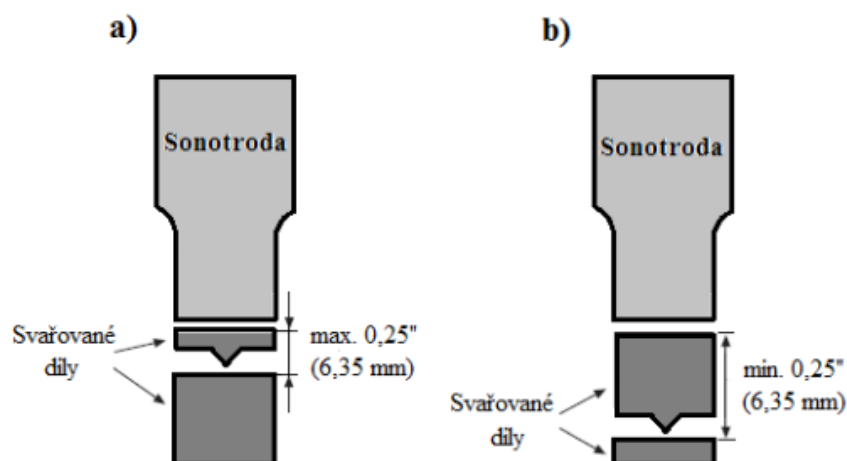
Metodou ultrazvukového svařování je vhodné svařovat pouze termoplasty, díky jejich schopnosti přejít do plastického stavu vlivem zahřívání a následného ztuhnutí. Mezi nejdůležitější faktory ovlivňující svařitelnost termoplastů patří struktura polymeru, teplota tání, index toku taveniny, modul pružnosti a chemické složení termoplastů. [5]

#### Tlumicí schopnost polymerů

Vlastnosti, jako jsou struktura polymeru, modul pružnosti a ztrátový činitel mají značný vliv na tlumení vibračních kmitů. Čím jsou tyto tlumicí schopnosti větší, tím musí být nástroj blíže ke svarové ploše. Podle této vzdálenosti se dělí svařování ultrazvukem do dvou skupin.

*Svařování v blízkém poli* je takové svařování ultrazvukem, při kterém je čelní plocha nástroje (sonotrody) vzdálená od svarové plochy méně než 0,25“ (6,35 mm). Metoda se využívá pro svařování převážně semikrystalických termoplastů, které mají zpravidla vyšší tlumicí schopnosti než amorfnní termoplasty.

*Svařování ve vzdáleném poli* je takové svařování ultrazvukem, při kterém je čelní plocha nástroje (sonotrody) vzdálená od svarové plochy více než 0,25“ (6,35 mm). Metoda se využívá pro svařování převážně amorfnních termoplastů, které jsou tužší a lépe přenáší ultrazvukové kmity. Výhodou této metody je možnost svařovat díly o větší tloušťce. S rostoucí tloušťkou, však roste i spotřeba elektrické energie. To je zapříčiněno zvýšením amplitudu kmitů, zvýšením svařovací síly a prodloužením svařovacího času, proto aby bylo dosaženo stejné jakosti svarového spoje jako u svařování v blízkém poli. Z toho vyplývá, že pokud je to možné, je lepší svařovat v co nejmenší vzdálenosti mezi sonotrodou a svarovou plochou.



Obrázek 35: Ultrazvukové svařování; a) v blízkém poli, b) ve vzdáleném poli [5]

Každé materiály jsou odlišně svařitelné a na každý svar je kladen jiný požadavek. Pro lepší přehlednost je svařitelnost označována čísly od jedné (tj. nejlepší svařitelnost) do pěti (tj. nejhorší svařitelnost). V tab. č. 5 je podrobně popsána svařitelnost jednotlivých termoplastů v závislosti na druhu pole (v blízkém nebo ve vzdáleném). [5]

Tab. 5: Svařitelnost termoplastů v blízkém a ve vzdáleném poli (1 - nejlepší, 5 - nejhorší) [5]

Druh plastu	Typ plastu	Svařitelnost		Druh plastu	Typ plastu	Svařitelnost	
		V blízkém poli	Ve vzdáleném poli			V blízkém poli	Ve vzdáleném poli
Amorfní	ABS	1	2	Semikrystalické	PP	3	4
	ASA	1	1		POM	2	4
	PC	2	2		PET	3	4
	PMMA	2	3		PE	4	5
	PS	1	1		LCP	3	4
	PVC	3	4		PPS	3	4

### Chemické složení

Nejlépe se svařují dva totožné materiály. A pokud jsou vyrobené od stejného výrobce v jedné šarži, napomáhá to k minimalizaci nežádoucích jevů spojené se svařovacím procesem. Dva termoplasty s odlišným chemickým složením, lze svařovat za podmínky, jsou-li schopné vytvořit molekulovou vazbu. [5]

*Svařování totožných termoplastů* se zpravidla vyznačuje lepší pevností, jakostí povrchu svaru a jednoduchostí nastavení parametrů svařování.

*Svařování odlišných termoplastů* je možné za podmínek,

- podobné chemické složení.
- podobné molekulární skupiny ve struktuře.
- musí být schopné vytvořit molekulovou vazbu.
- podobné chování při tečení.
- rozdíl teplot tečení nesmí být větší než 22 °C.

Tyto podmínky jsou častěji splněny u amorfních než u semikrystalických termoplastů. Možné kombinace termoplastů jsou uvedeny na obr. č. 36, ze kterého je patrné, že ABS, PC nebo akryl jsou dobře svařitelné i mezi sebou. Oproti tomu semikrystalické termoplasty není vhodné svařovat, vlivem jejich špatné chemické compatibility. Tento problém se může pozorovat u svařování PP a PE. Tyto semikrystalické termoplasty mají podobné chemické složení, hustotu a jen mírně odlišné fyzikální vlastnosti, přesto nejsou chemicky kompatibilní, a proto je nelze svařovat ultrazvukem. Stejný problém nastává při snaze svařovat semikrystalické a amorfní termoplasty. [5]

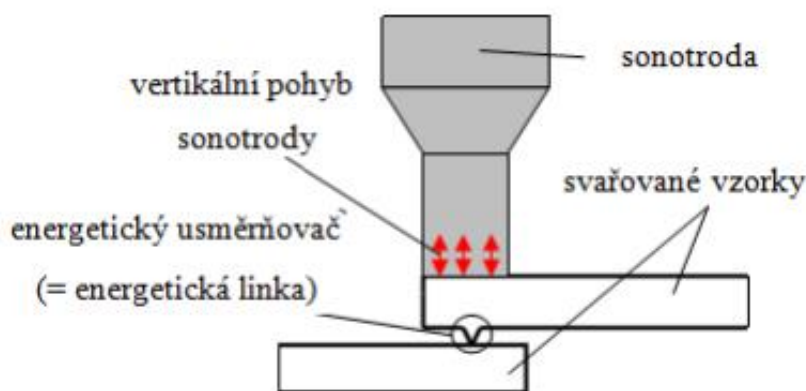
	ABS	ABS/PC	Akryl	BS	PC	PES	PS	PVC	SAN-NAS-ASA	PBT/PC
ABS	■	■	■		■			■	■	
ABS/PC	■	■	■		■					
Akryl	■	■	■		■				■	
BS				■			■			
PC	■	■	■		■	■				■
PES					■	■				
PS							■			
PVC	■							■		
SAN-NAS-ASA	■		■				■		■	
PBT/PC					■					■

... Dobře svařitelné  
  ... Hůře svařitelné  
  ... Nesvařitelné

Obrázek 36: Svařitelnost amorfních termoplastů [5]

### 5.4.2. Energetický usměrňovač

Energetický usměrňovač neboli energetická linka je výstupek nejčastěji trojúhelníkového tvaru, který se nachází zpravidla na svařovaném díle, který přichází do kontaktu se sonotrodou (viz obr. 37). Energetický usměrňovač poskytuje takový objem materiálu, aby došlo k natavení a byla dosažena dobrá pevnost bez přílišných přetoků. Trojúhelníkový tvar energetického usměrňovače napomáhá ke koncentraci energie v místě svaru, kde dochází k rychlejšímu hromadění tepla, které způsobuje tání výstupků. Vlivem svařovací síly je natavený materiál usměrňovače vtlačěn do nataveného materiálu druhého dílu a vytváří se tak molekulová vazba mezi oběma svařovanými díly. [32]



Obrázek 37: Poloha energetického usměrňovače při svařování [5]

### 5.4.3. Svařovací parametry

„Svařovací proces je řízen několika důležitými parametry. Kromě frekvence svařování a svařovacího výkonu, které jsou dány konstrukcí svařovacího zařízení, lze většinu parametrů programovat pro dosažení optimální jakosti svařového spoje.“ [5]

Základní svařovací parametry jsou:

- Frekvence
- Amplituda
- Svařovací čas
- Rychlost svařování
- Svařovací síla
- Iniciační svařovací síla
- Přidržovací síla
- Přidržovací čas (čas „dotlaku“)

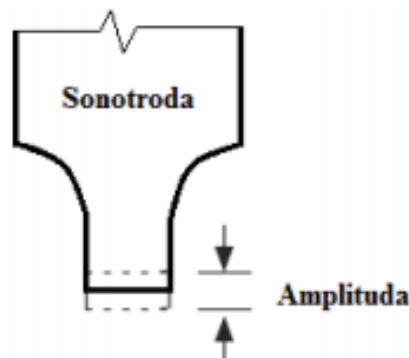
Vhodně nastavené svařovací parametry závisí především na druhu spojovaného termoplastu, dle geometrie svařovaných dílů a tvaru energetického usměrňovače, konstrukce svarové plochy (tvar a vzdálenost od sonotrody) a v neposlední řadě také podle svařovacího zařízení (frekvence, amplituda a tvar sonotrody). [5]

### Frekvence svařování

Konstrukce a vybavení svařovacího zařízení udává frekvenci svařování, která v praxi bývá 20, 30 a 40 kHz, méně běžné je použití nižších frekvencí, které již způsobují značný hluk během procesu svařování (15 kHz). Nejběžněji použita je frekvence kmitů 20 kHz, jejíž výhoda spočívá v široké škále nastavení, dimenzování sonotrody a dostupných svařovacích výkonů. [5]

### Amplituda

Svařovací amplituda je popisována jako vzdálenost mezi maximální a minimální hodnotou posunu čela sonotrody při kmitání. Ultrazvukové vibrace způsobují roztahování a smršťování molekul materiálu sonotrody, což má za následek prodloužení, respektive zkrácení délky sonotrody. Schematické znázornění výkmitu délky sonotrody je uvedeno na obr. č. 38. Hodnota amplitudy se odvíjí od svařovaného materiálu a frekvence svařovacího zařízení. Svařovací amplituda je určena konstrukcí svařovacího zařízení, především pak použitým rezonátorem, tedy soustava měniče, zesilovače a sonotrody. [5]



Obrázek 38: Zobrazení velikosti amplitudy na konci sonotrody [5]

Velikost amplitudy má přímý vliv na pevnost a kvalitu spoje, neboť amplitudou je řízena rychlost a uspořádání molekul ve svarové vrstvě. Příliš vysoká hodnota amplitudy způsobí rychlejší ohřev svarové plochy, natavený materiál teče rychleji a může dojít k výronku roztavené vrstvy materiálu. Výsledkem je poté nejen nekvalitní vzhled svaru, ale i nižší pevnost, neboť část svarové vrstvy je bez užitku vytlačena mimo místo svarové plochy. Naopak příliš nízká hodnota

amplitudy může způsobit nedokonalé natavení celého objemu energetického usměrňovače a předčasné tuhnutí vrstev svaru. Negativem je poté netěsnost spoje sdružená s nižší pevností svaru. [5]

### **Svařovací čas**

*„Svařovací čas je doba, po kterou působí sonotroda vibračními kmity na plochu kontaktního dílu spojovaných komponentů. Svařovací čas začíná překročením iniciační síly sonotrody a končí počátkem doby držení (výdrž). Spolu s výdrží (neboli přidržovacím časem) určuje výslednou délku svařovacího cyklu. Doba svařování se liší v závislosti na svařovaném materiálu, geometrii energetického usměrňovače a vzdálenosti čelní plochy sonotrody od místa svaru. Zpravidla se svařovací čas pohybuje v řádech desítek setin sekundy až po jednotky sekund, záleží především na aplikaci. Delší čas svařování obecně zvyšuje pevnost svaru, neboť rychlost tavení je nižší a při tuhnutí mají molekuly více času pro vhodné uspořádání a vytvoření pevných vazeb. Po dosažení optimálního svařovacího času se již pevnost svaru příliš nemění, v některých případech může pevnost dokonce i klesat. Nižší pevnost při příliš dlouhém svařovacím času je způsobena vytačením části natavené vrstvy z místa svaru. Přesné určení optimální doby, po kterou vibruje sonotroda, lze určit pouze na základě zkušebních testů.“ [5]*

### **Rychlost svařování**

*„Svařovací rychlost je dána rychlostí vertikálního posuvu sonotrody, zpravidla je vyjádřena v milimetrech za sekundu. Svařovací rychlost je úměrná svařovacímu času. Čím větší je rychlost svařování, tím kratší je svařovací čas. Tato úměra určuje i nastavení svařovací rychlosti. Platí stejná pravidla jako pro stanovení svařovacího času, tzn. experimentální zjištění optimální rychlosti svařování (= svařovacímu času) vede k dosažení požadované jakosti svaru. U pneumatických svařovacích zařízení se rychlost svařování nastavuje pomocí tlaku, u servořízení posuvu sonotrody je možné nastavit svařovací rychlost přímo v milimetrech za sekundu.“ [5]*

### **Spouštěcí svařovací síla**

*„Spouštěcí svařovací síla (nebo také spínací síla, iniciační síla) je předzatížení, kterým působí sonotroda na plochu kontaktního spojovaného dílu před procesem svařování. Během působení tohoto předzatížení sonotroda nevibruje, ale pouze tlačí na materiál. Po překročení předem nastavené iniciační svařovací síly začíná sonotroda působit mechanickými kmity a tím spustí proces tavení materiálu. Hodnota iniciační svařovací síly se nastavuje experimentálně.“ [5]*

### **Svařovací síla**

Svařovací síla je tlak vyvinutý sonotrodou působící na plochu horního spojovaného dílu po celou dobu svařovacího času. Poskytuje kontakt mezi čelem sonotrody a plochou svařovaného dílu a je nezbytný k optimálnímu přenosu vibrační energie z rezonátoru přes horní svařovaný díl až k usměrňovací energii. Po ukončení vibrací se svařovací síla přeměňuje na přidržovací sílu, která na díl působí při jeho tuhnutí. [5]

### **Velikost a doba přidržovací síly**

*„Druhou částí svařovacího cyklu je doba, po kterou sonotroda nevibruje, ale pouze působí tlakem na spojované díly. Tato část svařovacího cyklu je označována jako výdrž nebo přidržovací čas (hold time). Po tuto dobu roztavená vrstva materiálu tuhne, molekuly se navzájem propojují za vzniku vazeb a utvářejí tak výslednou podobu svaru a pevnost spojení. Tloušťka svaru se již příliš nemění. Délka přidržovacího času musí být tak dlouhá, dokud svar plně*



*neztuhne. U moderních svařovacích lisů lze nastavit i tlak, s jakým sonotroda působí na tuh-  
noucí spoj po celou dobu držení.“ [5]*

## 5.5. Využití ultrazvukového svařování v průmyslu

Ultrazvukové svařování se postupem času rozšířilo do většiny průmyslových odvětví. Využití nachází převážně tam, kde se vyrábí velké série a je požadováno zkrácení výrobních časů. Takové odvětví jsou hlavně automobilový průmysl, lékařství, potravinářství, obalová technika a zpracování textilií.

Předpoklady technologie:

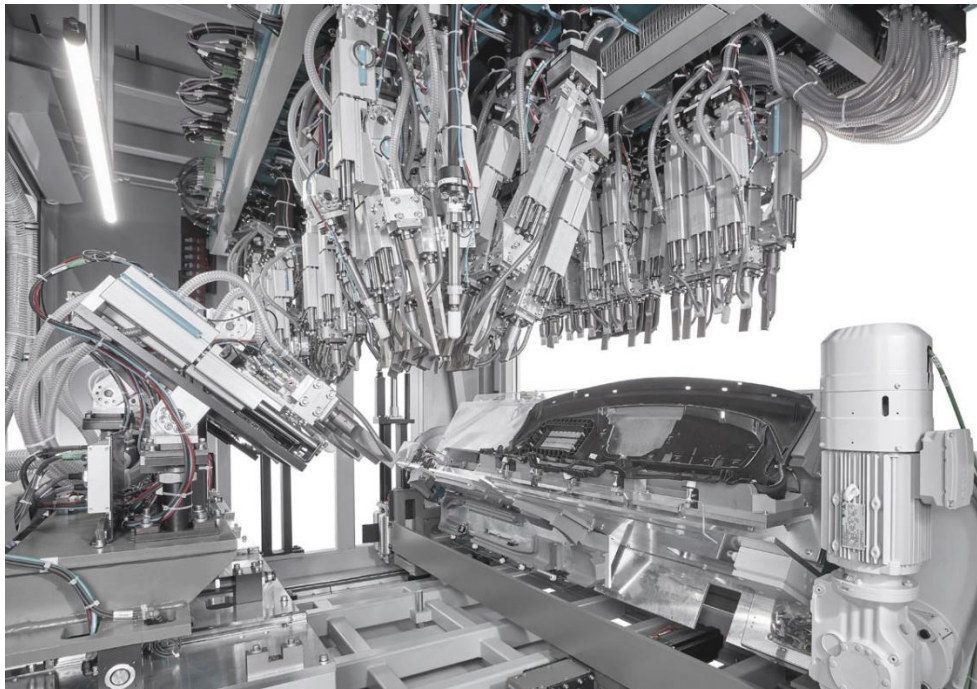
- rychlost procesu
- krátký čas cyklu (maximálně jednotky sekund)
- vysoká pevnost svaru
- čistota technologie
- nízká spotřeba energie
- minimální údržba
- nenáročnost na připojení
- kompaktnost zařízení
- vysoká živostnost nástrojů
- široká možnost použití

Nevýhody technologie:

- vysoká pořizovací cena
- nutnost upínacích přípravků a sonotrod pro konkrétní svařenec
- omezená až nemožná svařitelnost některých kombinací semikrystalických termoplastů [5]  
[14]

### Automobilový průmysl

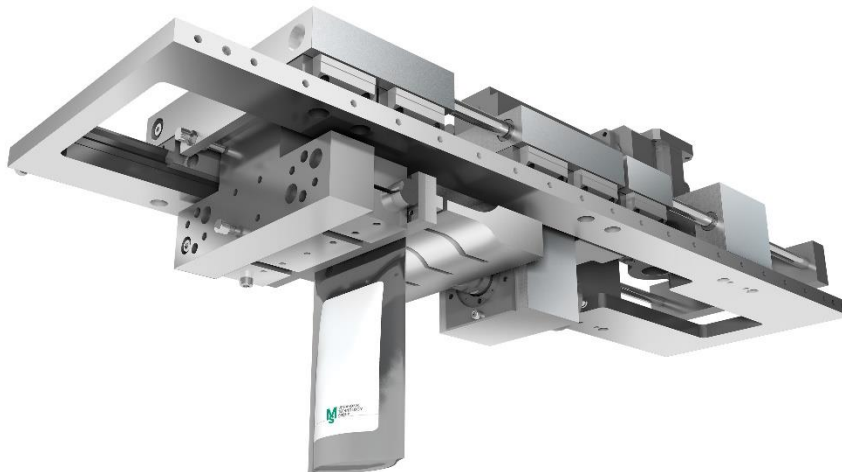
Díly spojené pomocí ultrazvukového svařování se dnes najdou v interiéru, exteriéru i v motorovém prostoru osobních automobilů. Velké zastoupení má ultrazvukové svařování právě v interiéru vozidla, kde se využívá pro svařování přístrojových desek, středových panelů, odkládacích přihrádek aj. V exteriéru se ultrazvukového svařování využívá např. u koncových světel, které jsou u dnešních automobilů velice složité a mají vysoké nároky na vodotěsnost. Dále pro uchycení nárazníků a spojlerů, spojování potrubí pro sání, nebo spojování kontaktů elektrických kabelů. [14]



Obrázek 39: Ultrazvukové svařování palubní desky [31]

### Obalová technika

Ultrazvukové svařování nachází značné využití v potravinářství a obalové technice. Obě odvětví spojuje velký důraz na hygienu. Stejně důležité je zajistit maximální přesnost a těsnost spoje, vysoké rychlosti cyklu a minimální prostoje ve výrobním procesu. Všechny tyto požadavky ultrazvukové svařování dokonale splňuje. [31]



Obrázek 40: Ultrazvukové svařování obalů [31]

Technologie ultrazvukového svařování je stále technologií dražší, co se týče pořizovací ceny ve srovnání s konvekčním odporovým svařováním. Pokud se do srovnání zahrnou i hlediska jako je nízká spotřeba elektrické energie, vysoký stupeň automatizace a vysoká bezpečnost, stává se ultrazvukové svařování bezkonkurenční technologií ve spojování polymerních

materiálů. Nízká spotřeba elektrické energie je zaručena dnes již propracovaným systémem, kterým ultrazvukové svářečky disponují. Vysoký stupeň automatizace je v současné době již standardem a díky variabilitě nástrojů a snadné přestavbě výrobní linky má ultrazvukové svařování nad ostatními technologiemi navrch. Bezpečnost je vysoká díky absenci manipulace s otevřeným ohněm, výbušnými plyny nebo jinými faktory snižující bezpečnost, jako je tomu u jiných technologií.

## 6. Praktická část

Praktická část je zaměřena na proces ultrazvukového svařování plastů. První část zahrnuje veškerou přípravu experimentu, tj.:

1. Zhotovení polotovarů pro zkušební vzorky.
2. Zkonstruování, zhotovení a úprava aretačního přípravku pro ultrazvukové svařování.
3. Příprava a seznámení se svařovacím zařízením.
4. Tahová zkouška.
5. Statistické zpracování naměřených hodnot.

Druhá část se věnuje optimalizaci procesu svařování, tj.:

1. Úprava energetických usměřovačů.

Třetí část se zabývá testováním, vyhodnocením a diskuzí výsledků.

1. Svařování s proměnnou hodnotou amplitudy „A“.
2. Svařování s proměnnou hodnotou rychlosti svařování „v“.

### Hypotéza č. 1

Pevnost svaru ovlivňuje nastavení svařovacích parametrů.

### Hypotéza č. 2

Pevnost a kvalitu svaru ovlivňuje kvalita provedené geometrie energetických usměřovačů.

Cílem praktické části je objasnění a určení ideálních parametrů při ultrazvukovém svařování vybraného polymerního materiálu. Úkolem je analyzovat, do jaké míry jednotlivé procesní parametry ovlivňují pevnost svarového spoje a povrch svařovaného dílu a na základě výsledků navrhnout optimální nastavení zkoumaných svařovacích veličin. Výsledky jsou navzájem porovnány jednak z hlediska pevnosti, jakosti povrchu svařovaného dílu a jednak z hlediska času. Hlavním ukazatelem kvality spoje je únosnost zjišťovaná pomocí tahové zkoušky. Vedlejším ale zároveň důležitým ukazatelem je kvalita provedení svarového spoje a povrch dílu, který je v kontaktu se sonotrodou.

## 6.1. Příprava experimentu

### 6.1.1. Zhotovení polotovarů pro zkušební vzorky.

#### Materiál zkušebních vzorků

Na začátku experimentu jsou jako materiály polotovarů pro zkušební vzorky zvažovány PVC, PE-HD a PP. Všechny tři typy termoplastů mají odlišné vlastnosti, které jsou popsány v kapitole č. 3.3. Po konzultaci se zástupcem společnosti MS Ultrasonic Technology Group panem Vondrou a prvním seznámením se strojem MS sonxTOP GENESIS, je na základě obsáhlosti tématu vybrán pouze PP. Hlavním důvodem, proč je z uvedených tří materiálů vybrán Polypropylen, je jeho nejčastější použití v automobilovém průmyslu. V příloze č. 4 je přiložen materiálový list vybraného polotovaru.



Obrázek 41: Nařezané polotovary o rozměru 200x30x4 mm, dole PVC, uprostřed PE-HD, nahoře PP [17]

#### Příprava zkušebních vzorků

Jako výchozí polotovar je použita plastová deska z PP o rozměrech 2000x1000x4 mm. Výrobce desky je firma Röchling. Z této desky jsou vyřezány díly o rozměrech 200x30x4 mm. Po prvním seznámení se strojem a prvních zkušebních svarech je finální rozměr polotovarů pro vzorky upraven na 100x30x4 mm. Důvodem je nejen snížení množství materiálu, ale i pro ustavení dílů s původními rozměry, by musel být vyroben podstatně větší aretační přípravek, což by značně zvyšovalo náklady.

Jako nejideálnější varianta dělení materiálu se díky své rychlosti řezání, čistotě řezu a pouze malých otřepů osvědčuje technologie řezání pomocí laseru. Řezání se provádí na laserové řezačce Transon TS6090.

Tab. 6: Specifikace laserové řezačky Transon TS6090

Transon TS6090	
Rozměry pracovního prostoru	600x900 mm
Výkon	120 W
Maximální rychlost řezu	40000 mm/min
Pracovní plyn	CO <sub>2</sub>
Chlazení	voda



Obrázek 42: Porovnání řezů [17]

a) řez prováděn ruční pilou

b) řez prováděn na laserové řezačce Transon TS6090, rychlost řezu 500 mm/min

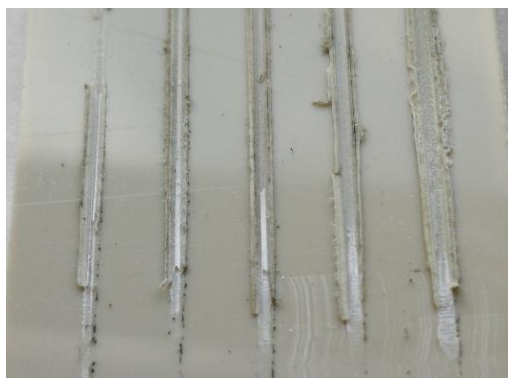
### Úprava svarové plochy vzorku

Vzhledem k technologickým možnostem ultrazvukového svařování a špatné svařitelnosti PP v dalekém poli je zvolen výchozím typem spoje přeplátovaný spoj s možností změny délky přeplátování. Ten však pomocí ultrazvukového svařování nelze vytvořit na velké ploše bez určitých úprav svarové plochy. Proto je nutné na svarové ploše vytvořit energetické usměřovače. Díky těmto výstupkům dochází k rychlejšímu tavení materiálu a lepšímu spojení dílů. Ty jsou vytvořené vždy na horním dílu, který je v kontaktu se sonotrodou.

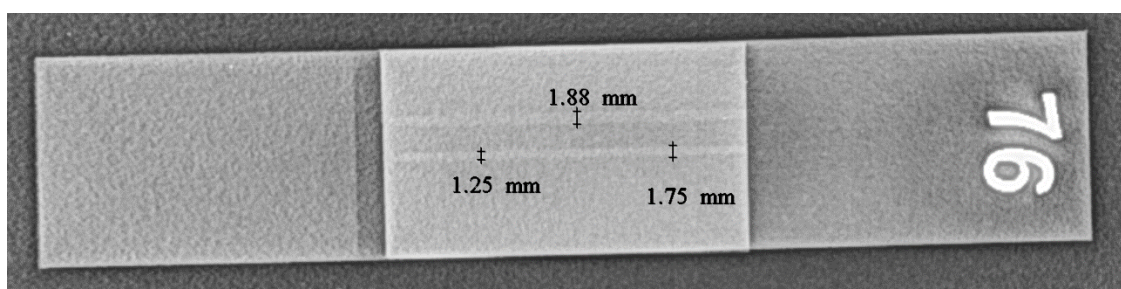
Tvar energetického usměřovače se nejčastěji volí trojúhelníkový profil, který je zvolen i v případě této práce. Velikost a počet energetických usměřovačů je určen na základě zkušeností pana Vondry. Při návrhu je brána v úvahu i velikost kontaktní plochy typizovaných sonotrod. Použitá sonotroda má rozměr 50x25 mm. Výsledkem je pět energetických usměřovačů (energetických linek) o celkové délce  $L = 250$  mm a výšce trojúhelníkového profilu 0,8 mm, které jsou na dílech frézovány na CNC obráběcím centru. Podrobnější rozměry horního dílu vzorku jsou na výkresu, který je přiložen v příloze č. 1.

### Velikost svarové plochy

Avšak nevýhodou je špatné až téměř nemožné určení velikosti svarové plochy, která se v některých místech značně mění. Po přetržení vzorku je možné pozorovat rozdílné velikosti svarové plochy u každého energetického usměřovače (viz obr. č. 43). To samé je pozorovatelné i na rentgenovém skenu vzorku (viz obr. č. 44), kde jsou patrné rozdílné hodnoty šířky svarových ploch.



Obrázek 43: Svarová plocha po natavení a přetržení vzorku [17]



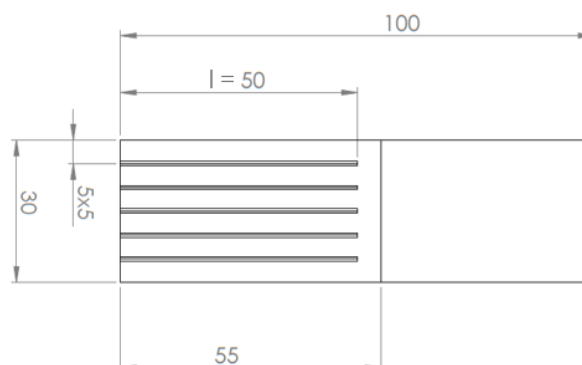
Obrázek 44: Rentgenový sken vzorku [17]

Díky této skutečnosti se při hodnocení pevnosti svarů přistoupilo k převádění svarové plochy na jednotkovou délku svaru označenou „L“. Ta odpovídá vždy celkové délce energetických usměrňovačů (energetických linek). V práci jsou použity vzorky, které mají energetické usměrňovače navržené o různém počtu „n“. Co se však nemění je jejich délka „l“, která odpovídá vždy 50 mm. Proto se délka svaru snadno vypočítá dle rovnice č. 3.

$$L = n * l \text{ (mm)} \quad (3)$$

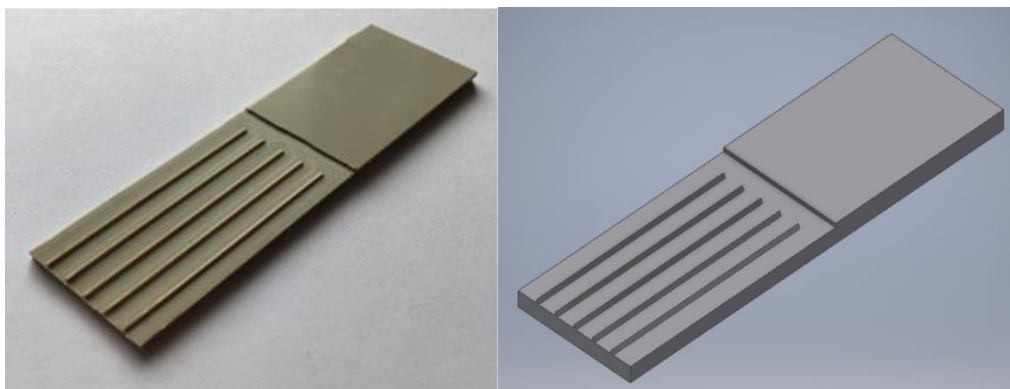
Tab. 7: Celková délka svaru "L";  
n – počet EU; l – délka jednoho EU

l = 50 mm	
n	L
(1)	(mm)
1	50
2	100
3	150
4	200
5	250



Obrázek 45: Horní díl [17]





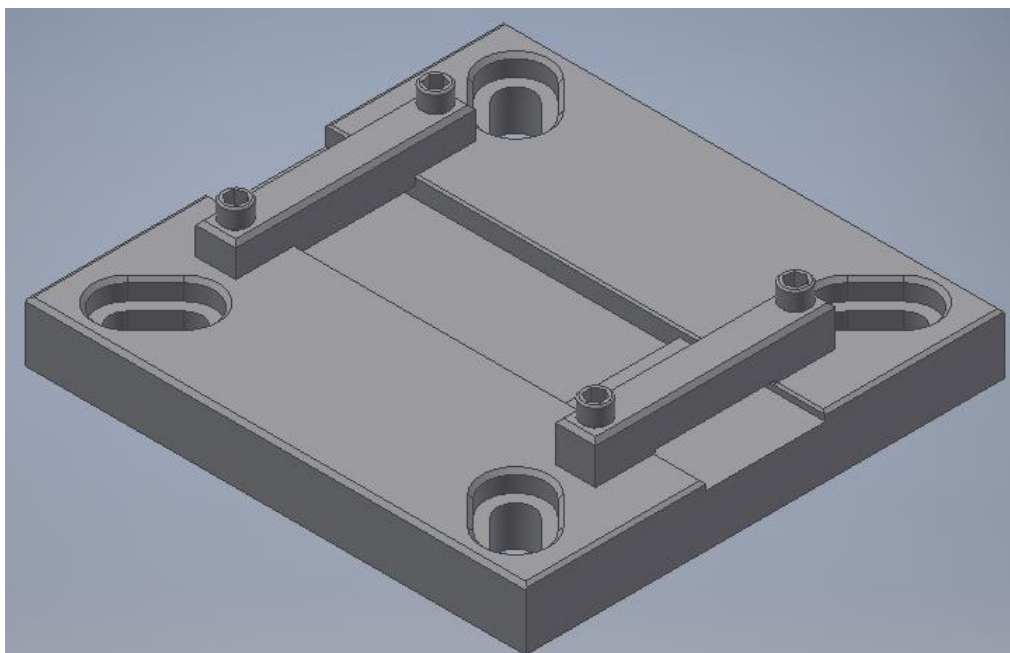
Obrázek 46: Horní díl vzorku; vlevo fotka dílu, vpravo 3D model dílu [17]

### 6.1.2. Zhotovení aretačního přípravku

Aretační přípravek slouží pro ukotvení svařovaných dílů. Bez správné aretace by nebylo možné docílit přesné, vzájemné polohy. Z tohoto důvodu je zkonstruován aretační přípravek, který je připevněn na základovou desku stroje.

#### Aretační přípravek č. 1

První verze aretačního přípravku má vnější rozměry 125x125x22 mm a je zkonstruována pro díly o rozměrech 200x30x4 mm. Vlivem ultrazvukových kmitů, které působí na tělesa dochází k rozkmitání svařovaných dílů. Bez aretace a upnutí dílů dochází vlivem vibrací při ultrazvukovém svařování ke klouzání svařovaných dílů z místa svaru. Proto jsou jako aretační členy zvoleny jedna polouzavřená a jedna průběžná drážka, které slouží pro zamezení pohybu dílů v ose y. Pro zamezení pohybu dílů v ostatních osách slouží dvě upínky přichyceny šrouby.



Obrázek 47: Aretační přípravek č. 1 [17]

Po svaření prvních vzorků je zjištěno, že uchycení dílů pomocí upínek není ideální, protože vlivem velkého chvění se díly i přes velké dotažení posouvají. Dochází tak nejen k nesvaření



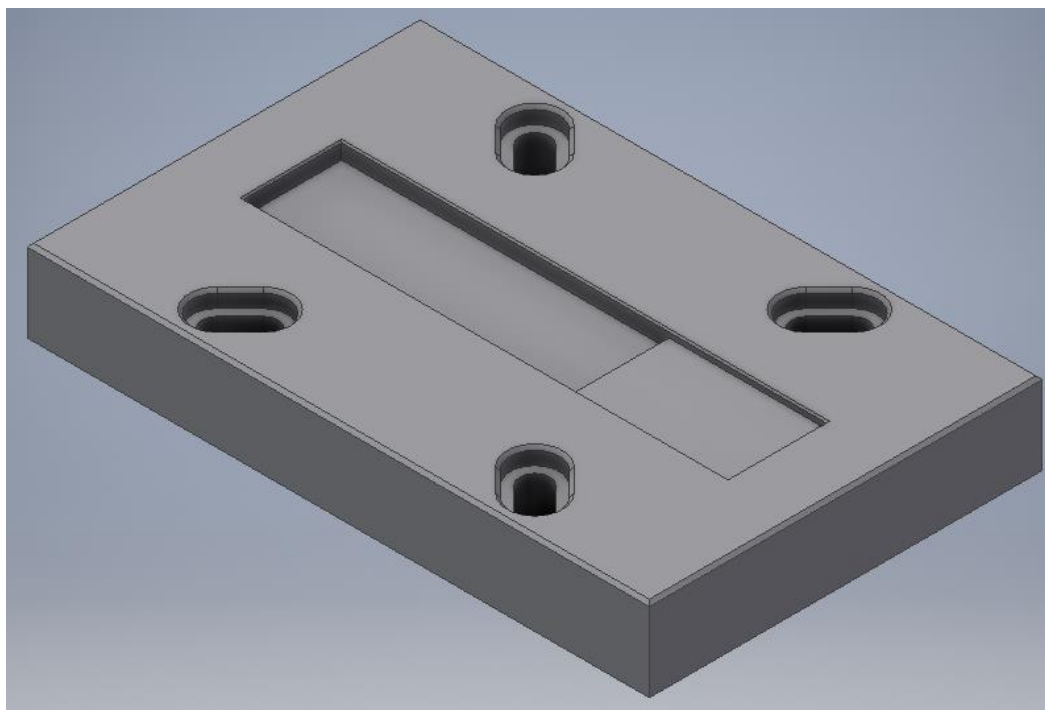
dílu po celé požadované ploše (viz obr. č. 48), ale především by nemohla být docílena opakovatelnost svaření a výsledky experimentu by byli velice zkreslené. Proto je navržena druhá verze aretačního přípravku.



Obrázek 48: Test aretačního přípravku č. 1; výsledkem je odchlípnutí a posunutí spodního dílu vzorku [17]

### Aretační přípravek č. 2

Druhá verze již počítá s menšími polotovary o rozměrech 100x30x4 mm, přesto jsou vnější rozměry větší, a to 190x125x25 mm. Původní jedna polouzavřená a jedna průběžná drážka jsou nahrazeny dvěma uzavřenými drážkami. Díky tomu jsou oba díly pevně zajištěny ve dvou osách a odpadá i upínání pomocí upínek, čímž je značně zrychlena výměna dílů.

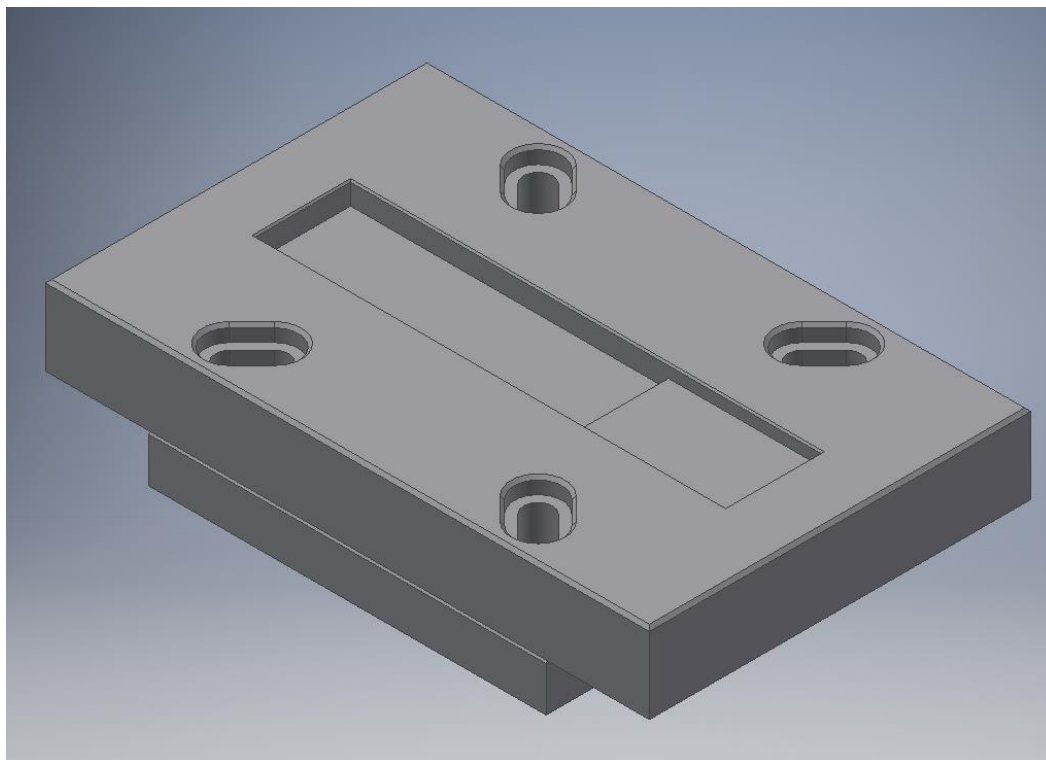


Obrázek 49: Aretační přípravek č. 2 (před úpravou hloubky drážek) [17]

Přesto je nutné na aretačním přípravku č. 2 provést úpravu. Po svaření několika vzorků na druhé verzi aretačního přípravku je patrné, že horní díl není vůči spodnímu dílu svařený rovnoběžně (viz obr. č. 50). Díky tomu je u přípravku snížena hloubka obou drážek o 2 mm. Zároveň je však snížena rovina, kde se dotýká nástroj s horním dílem vzorku, pod koncový bod stroje. Tento problém je jednoduše vyřešen podložením aretačního přípravku č. 2 aretačním přípravkem č. 1. Tím jsou vyřešeny poslední problémy, a především je docílena opakovatelnost svařování.



Obrázek 50: Test aretačního č. 2 – před úpravou; výsledkem je nerovnoběžně svařený vzorek [17]



Obrázek 51: Aretační přípravek č. 2 (po úpravě drážek a vypodložení) [17]

Obě verze aretačního přípravku jsou zhotoveny ve firmě PETOKOV s.r.o. dle výkresové dokumentace frézováním ze slitiny hliníku 42 4203. Výkresy obou verzí jsou přiloženy v přílohách č. 2 a č. 3.

### 6.1.3. Příprava a seznámení se svařovacím zařízením.

Kompletně dokončená svařovací sestava, na které je experiment prováděn, se skládá z ultrazvukové svářečky a aretačního přípravku. K základové desce stroje se aretační přípravek č. 2 uchycuje čtyřmi šrouby M8 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem.

#### Ultrazvuková svářečka

Jedná se o ultrazvukovou svářečku od společnosti MS Ultrasonic Technology GmbH s označením MS sonxTOP GENESIS. Tento typ disponuje piezoelektrickým měničem a elektrickým servopohonem řady sonxTOP. Díky tomu se jedná o svařovací zařízení, které umožňuje výrobu i v provozech, které nedisponují rozvodem vysokotlakého vzduchu, a to z důvodu finančních nákladů nebo technologických a hygienických opatření. Stroj je osazen 17,3“ dotykovým displejem, díky kterému je ovládání stroje velice jednoduché a uživatelsky přívětivé. Pohyb

nástroje je ovládán pomocí displeje a dvou tlačítek, které musí být při pohybu nástroje zmáčknuty současně, tím je zajištěna bezpečnost obsluhy. Stroj disponuje funkcí MS Tensile, což umožňuje na stroji provádět jednoduchou tahovou zkoušku.



Obrázek 52: Ultrazvuková svářečka MS sonxTOP GENESIS [31]

Tab. 8: Specifikace ultrazvukové svářečky MS sonxTOP GENESIS [31]

MS sonxTOP GENESIS	
Výkon generátoru	20 kHz / 6000 W
Rozmezí síly	10 – 3000 N
Pracovní výška (bez sonotrody a přípravku)	630 mm

### Postup svařování

Po namontování aretačního přípravku na upínací desku se musí vždy provést jeho kalibrace. Ta se může provést až po připojení stroje k síti, protože je k tomu zapotřebí posuv nástroje, který je poháněn elektrickým pohonem. Kalibrace se provádí pomocí čtyř stavěcích šroubů, které jsou v upínací desce stolu a tlaku vyvozený na upínací desku pomocí nástroje.

Postup je následující. Po uvolnění všech stavěcích a utahovacích šroubů, tj. čtyř šroubů M4 a čtyř šroubů M8, se sonotroda přiblíží k aretačnímu přípravku, který je v tu chvíli volně

uložený na upínací desce stolu, která je ve svém středu uložena na kulové ploše. Následně je na aretační přípravek sonotrodou vyvinut tlak přibližně 1500 N, čímž dochází ke kalibraci a zúhlování desky vůči nástroji (sonotroda). Následuje postupné dotažení stavěcích a utahovacích šroubů. Ke konci sonotroda odjíždí do výchozí pozice.

Po kalibraci přípravku se musí „zkalibrovat“ i nástroj. K tomu slouží funkce „Určení sonotrody“ v hlavním menu na displeji stroje. Před zvolením funkce se musí do stroje zadat parametry ultrazvukového rezonátoru, tj. transformace zesilovače, transformace sonotrody, maximální možná frekvence sonotrody a označení sonotrody. Po zvolení funkce „Určení sonotrody“ si software automaticky ověří hodnoty zadané ručně a určí, jestli je ve stroji požadovaný nástroj a je ve stroji správně upnutý.

Tab. 9: Specifikace použitého rezonátoru

Rezonátor	
Označení sonotrody	597384.0
Transformace sonotrody	1:2,17
Transformace zesilovače	1:1,75
Frekvence	20 kHz
Velikost styčné plochy sonotrody	50x25 mm
Nejmenší možná amplituda	63 %
Největší možná amplituda	100 %

## Svařovací parametry

### Amplituda kmitů

Vzhledem k parametrům rezonátoru uvedených v tabulce č. 9 probíhá svařování vzorků v rozmezí od 70 % do 100 % maximální amplitudy sonotrody, což představuje amplitudu o velikosti 29,8  $\mu\text{m}$  do 42,5  $\mu\text{m}$ .

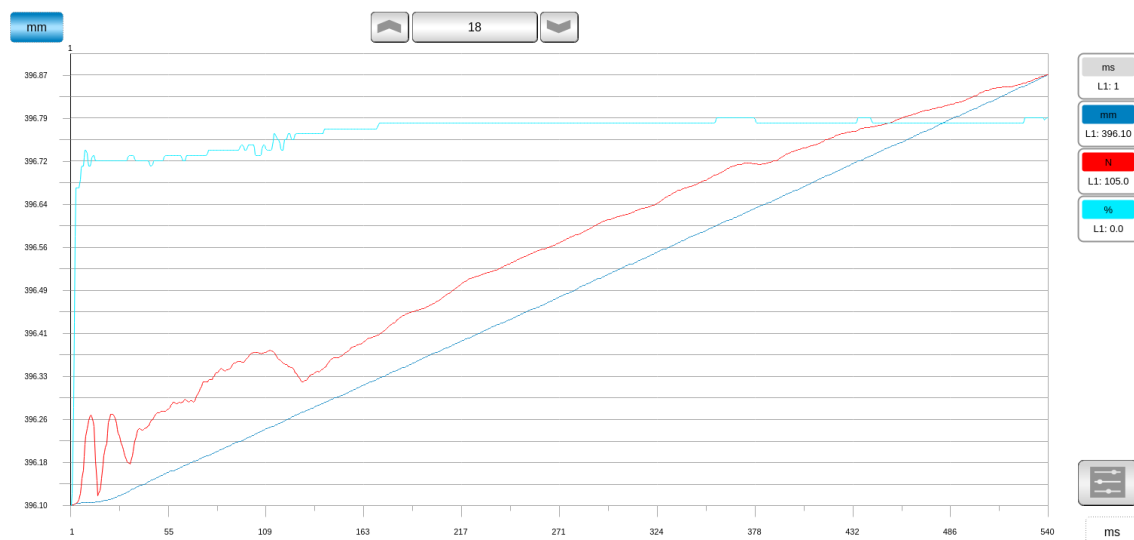
### Rychlost svařování

Zkušební vzorky jsou svařované při hodnotě rychlosti svařování v rozmezí od 1,0 mm/s do 2,5 mm/s.

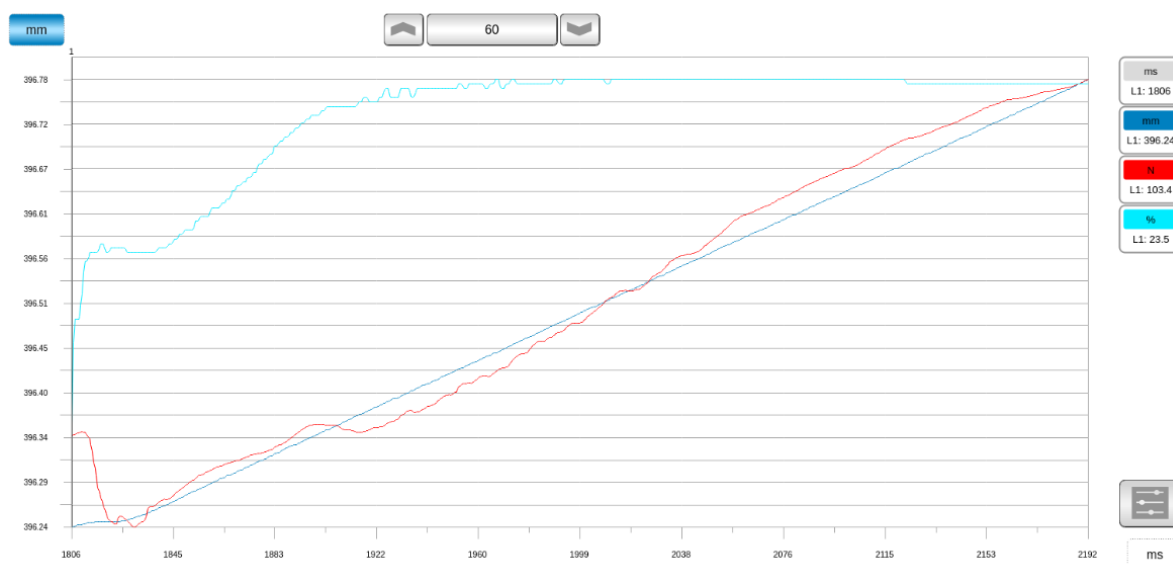
### Svařovací síla

Obrázky č. 53 a č. 54 znázorňují průběh svařování vzorku č. 18 a č. 60. Z obrázků je patrný rozdíl v průběhu intenzity svařovací síly (červená křivka). Cílem je dosáhnout, aby křivka svařovací síly co nejvíce kopírovala křivku dráhy sonotrody (tmavě modrá křivka).

U vzorku č. 18 je vynaložená svařovací síla větší, z důvodu kompenzace větší svařované plochy a nižší nastavené amplitudy oproti vzorku č. 60, u kterého je svařovaná plocha menší a zároveň nastavená vyšší amplituda. Díky tomu může být vynaložená svařovací síla nižší.



Obrázek 53: Průběh svařování vzorku č.18; svařovací síly (červená křivka); dráha sonotrody (tmavě modrá křivka); reálná hodnota amplitudy v % (tyrkysová křivka) [17]



Obrázek 54: Průběh svařování vzorku č.60; svařovací síly (červená křivka); dráha sonotrody (tmavě modrá křivka); reálná hodnota amplitudy v % (tyrkysová křivka) [17]

Maximální svařovací síla, kterou je možný stroj, resp. sonotroda v průběhu svařování vynaložit musí být minimálně taková, aby došlo k požadovanému roztavení materiálu a následného přitlačení dílů. Definovaná hodnota je 3000 N a vychází ze zkušeností pana Vondry a na základě výsledků několika prvních svařených zkušebních vzorků.

### Svařovací čas

Samotné svaření a následné přidržení dílů (výdrž) zabere čas řádově jen jednotky sekund. Svařovací cyklus se při svařování zkušebních vzorků pohybuje v rozmezí od 0,5 s do 1,6 s.

## Frekvence kmitů

Použitá svařovací technika pracuje na frekvenci 20 kHz. Daná frekvence se při svařování liší v rádech desítek Hz, a je zobrazena v tabulce záznamu svařování. [32]

## Svařovací Výkon

Stroj má mnoho různých možností, jak lze vkládat vstupní hodnoty svařovacích parametrů. Možnost, která se využívá u všech vzorků nezahrnuje ruční změnu svařovacího výkonu. Tu si stroj mění sám na základě vstupních parametrů, které jsou svařovací síla, amplituda a dráha sonotrody. Hodnoty svařovacího výkonu při svařování vzorků se pohybují v rozmezí od 500 W do 3000 W.

Tab. 10: Specifikace ultrazvukového rezonátoru

Rezonátor	
Označení	597384.0
Transformace sonotrody	1:2,17
Transformace zesilovače	1:1,75
Frekvence	20 kHz
Velikost styčné plochy sonotrody	50x25 mm
Nejmenší možná amplituda	63 % (29,8 $\mu\text{m}$ )
Největší možná amplituda	100 % (42,5 $\mu\text{m}$ )

### 6.1.4. Tahová zkouška

*„Tahové charakteristiky materiálu jsou jeho nejzákladnějšími mechanickými charakteristikami. Jestliže je zkušební těleso vystaveno jednoosému namáhání v tahu, je možné průběh deformace, resp. poměrného prodloužení v závislosti na normálovém napětí sledovat pomocí deformační křivky, která poskytuje důležité informace o vlastnostech materiálu. Tato závislost je určována experimentálně. Zkušební těleso je uchyceno do čelistí zkušebního stroje a na těleso je nasazen průtahoměr. Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly ( $F$ ), resp. napětí (snímané dynamometrem) na poměrném prodloužení zkušebního vzorku (snímané průtahoměrem), případně na jmenovitém poměrném prodloužení, určeném z pohybu příčnicku zkušebního stroje (používá se u tvárných materiálů).“ [33]*

#### Popis zkoušky

Jednoosá tahová zkouška se provádí na trhacím zařízení, které provádí mechanickou deformaci vzorku až po jeho destrukci. Průběh měření je zaznamenáváno pomocí grafů a hodnoty jsou zapisovány do tabulky. [32]

Tahová zkouška je provedena na trhacím stroji Zwick Roell Z005 ve spolupráci s programem testXpert II. Před samotným měřením se provádí nastavení vzdálenosti čelistí, dle velikosti vzorku, pomocí rychloposuvu na ovládacím panelu stroje. Další nastavení probíhá na PC v samotném programu testXpert II. Zde se zadává posuvová rychlost trhacího stroje a celková plocha svařované plochy. Celá zkouška probíhala při pokojové teplotě 22 °C.





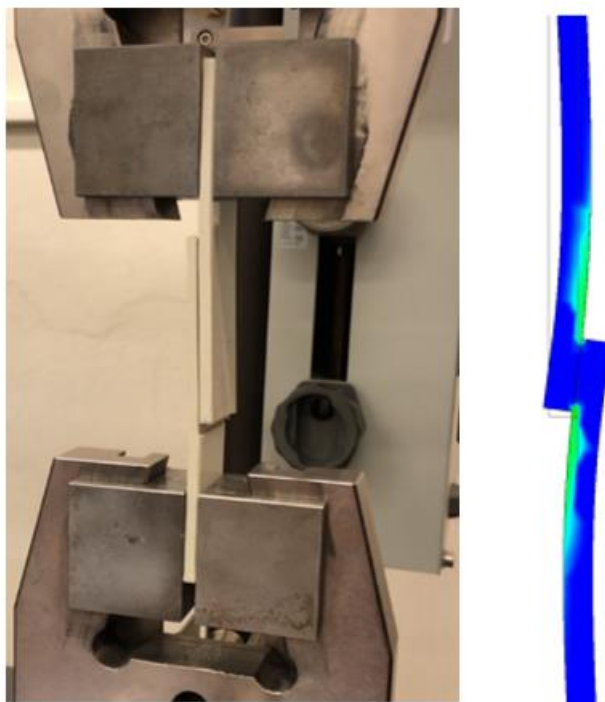
Obrázek 55: Trhací zařízení Zwick Roell Z005 [17]

Tab. 11: Specifikace trhacího stroje Zwick Roell Z005

Zwick Roell Z005	
Maximální posuv příčnicku	500 mm/min
Minimální posuv příčnicku	0,001 mm/min
Pracovní výška	565 mm
Pracovní šířka	440 mm
Zkušební zátěž – $F_{MAX}$	5 kN
Extenzometry	přídavné

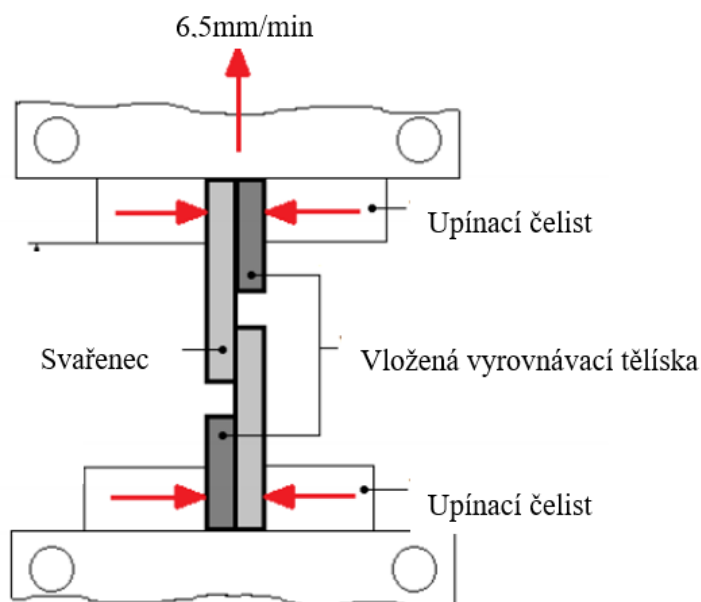
### Upnutí vzorku

Pro upínání vzorků do trhacího zařízení jsou používány samosvorné upínací čelisti. Bohužel však není možné tyto čelisti axiálně vychýlit a zamezit tak nežádoucímu působení ohybového momentu v místě svaru při tahové zkoušce (viz obr. č. 56). Záměrem je tento nežádoucí jev odstranit. K tomu jsou použity přebytečné polotovary pro vzorky, kterými jsou vzorky v čelistech vypořádány (viz obr. č. 57). Při zkoušce však dochází ke klouzání vzorků po tělíčkách a tahovou zkoušku tak není možné provést.



Obrázek 56: Svařený vzorek upnutý v upínacích čelistech a průběh deformace zatíženého vzorku [32]

Řešením by byla výroba ocelových destiček se zvrásněným nebo rýhovaným povrchem, které by se vložily mezi vzorek a jednu stěnu čelisti (viz obr. č. 57). Bohužel časová tíseň ani zbývající počet vzorků již nedovoluje tuto možnost provést, ale pro další výzkum je tento potup doporučen.



Obrázek 57: Návrh vypořádání svařence v upínacích čelistech při zkoušce tahem [5]

## Výsledky zkoušky

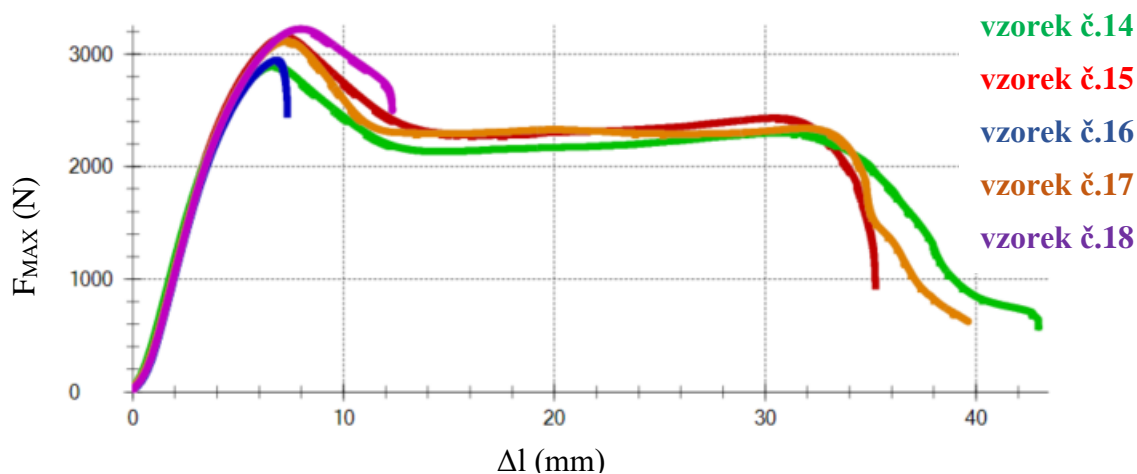
Výsledky jednotlivých měření jsou zaznamenávány v programu testXpert II. Jedná se o uživatelsky přívětivý a flexibilní software pro zkoušení mechanických vlastností materiálů. Průběh měření je vykreslován graficky v podobě deformační křivky. Výsledné hodnoty jsou po



dokončení jednotlivých měření exportovány do programu Microsoft Excel, ve kterém jsou zapsány do tabulky a zpracovány. [32]

Tab. 12: Parametry svařování a výsledky měření spojů s různými parametry

L = 250 mm		Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	mat.	s (mm)	A (%)	A (μm)	v (mm/s)	F <sub>MAX</sub> (N)
14	PP	0,55	100	42,5	1,5	2894,4
15	PP	0,55	100	42,5	1,5	3150,0
16	PP	0,40	70	29,8	1,5	2945,9
17	PP	0,35	70	29,8	1,5	3112,6
18	PP	0,35	70	29,8	1,5	3221,9



Obrázek 58: Deformační křivky vzorků s různými parametry svařování [17]

V tabulce č. 12 a na obrázku č. 58 jsou zaznamenány parametry svařování a následné výsledky tahové zkoušky prvních svařených vzorků, které sloužily pro seznámení se svařovacím zařízením. Jedná se o vzorky, které jsou svařené již na druhé verzi aretačního přípravku a parametry svařování jsou téměř pro každý vzorek jiné.

### 6.1.5. Statistické zpracování naměřených hodnot

Naměřené hodnoty jsou zpracované a vyhodnocené pomocí programu Microsoft Excel s využitím vztahů pro statistické vyhodnocování.

#### Aritmetický průměr $\bar{x}$ :

„Vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot. Suma výsledků je dělena jejich počtem n.“ [32]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

### Rozptyl $s^2$ :

„Je definován jako střední hodnota čtverců odchylek jednotlivých hodnot od aritmetického průměru.“ [32]

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

### Směrodatná odchylka $s$ :

„Vyjadřuje kvadratický průměr odchylek hodnot od aritmetického průměru.“ [32]

$$s = \sqrt{s^2} \quad (6)$$

### Střední kvadratická chyba aritmetického průměru $\sigma$ :

„Je kritériem pro hodnocení přesnosti měření.“ [32]

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

### Mechanické vlastnosti základního materiálu

V tabulce č. 13 je uveden modul pružnosti  $E$  (MPa) a maximální únosná síla  $F_{MAX}$  (N) základního materiálu PP. Cílem práce není hodnocení základního materiálu, proto hodnoty v tabulce č. 13 slouží pouze k porovnání mechanických vlastností.

Tab. 13: Mechanické vlastnosti PP

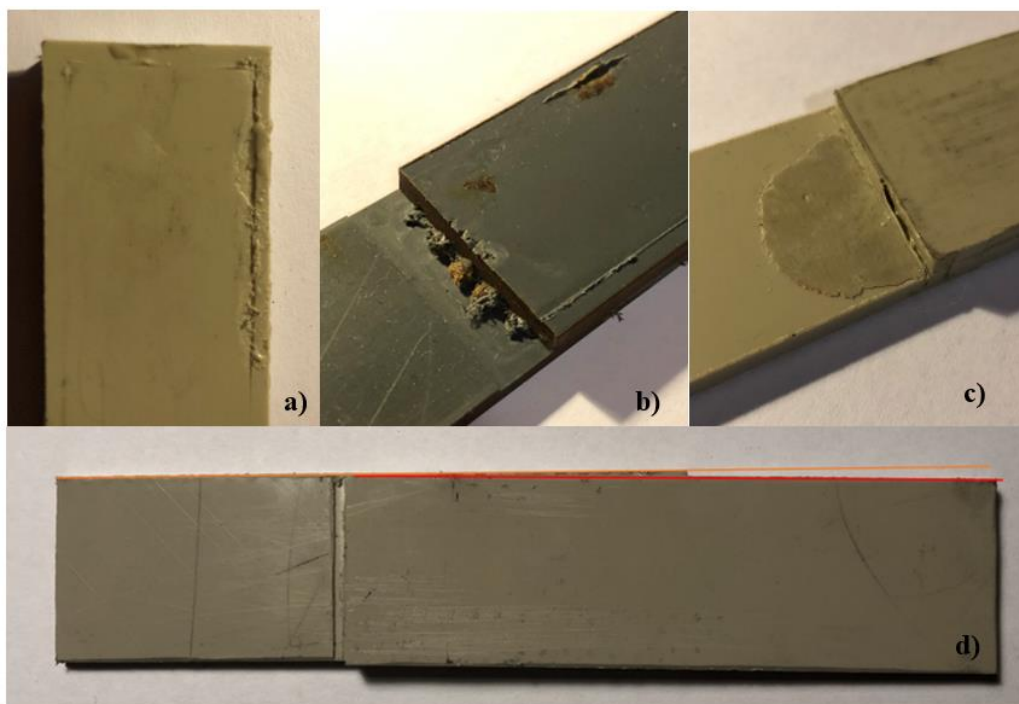
PP	Tahová zkouška
Číslo vzorku	$F_{MAX}$ (N)
1	3150,2
2	3091,3
3	2989,5
4	3005,9
5	3090,7
$\bar{x}$	3044,4
$\sigma$	31,7

### Cíl přípravy experimentu

Cílem této kapitoly je seznámení se se stroji, zkonstruování aretačního přípravku a vytvoření ideálního tvaru horního dílu vzorku z důvodu zamezení chyb, které jsou naznačeny na obr. č. 60. Všemi možnými přípravami a úpravami je docíleno vzniku zkušební vzorku vhodného pro další testování. Ten je znázorněn na obr. č. 59.



Obrázek 59: Zkušební vzorek s výchozími parametry [17]



Obrázek 60: Nevhodně svařené vzorky [17]

- a) příliš velká stopa od sonotrody na povrchu vzorku
- b) příliš vysoký výkon, dlouhý svařovací čas
- c) chybně nastavená dráha stroje, roztavení nejen usměrňovačů, ale i přeplátované plochy
- d) špatná aretace vzorku, vychýlení vzorku při svařování

## 6.2. Proces optimalizace

Z tabulky č. 12 a č. 14 je patrné, že většina vzorků disponuje svarovým spojem, který má tožnou pevnost, jako je pevnost základního materiálu. To naznačuje skutečnost, že svarový spoj s navrženými parametry je pevnější než základní materiál a k přetržení dochází téměř vždy mimo svarový spoj. To je sice správný výsledek, ale z pohledu cíle práce nevyhovující.

Tab. 14: Proces optimalizace; délka svaru  $L = 250$  mm

L = 250 mm						
PP	Svařování				Tahová zkouška	
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	$F_{\text{MAX}}$ (N)	Přetrženo ve svaru
14	70	29,8	0,55	1,5	3182,3	NE
15	70	29,8	0,55	1,5	2942,2	NE
16	70	29,8	0,45	1,5	2954,1	NE
17	70	29,8	0,35	1,5	2920,3	NE
20	80	34,0	0,35	1,5	3057,2	NE
21	80	34,0	0,35	1,5	3122,9	NE

### Objasnění postupu experimentu

Zásadou svařování je získat vždy co nejpevnější spoj a pokud možno docílit i pevnosti vyšší než pevnost základního materiálu. Cílem experimentu je sice získat co největší pevnost spoje,

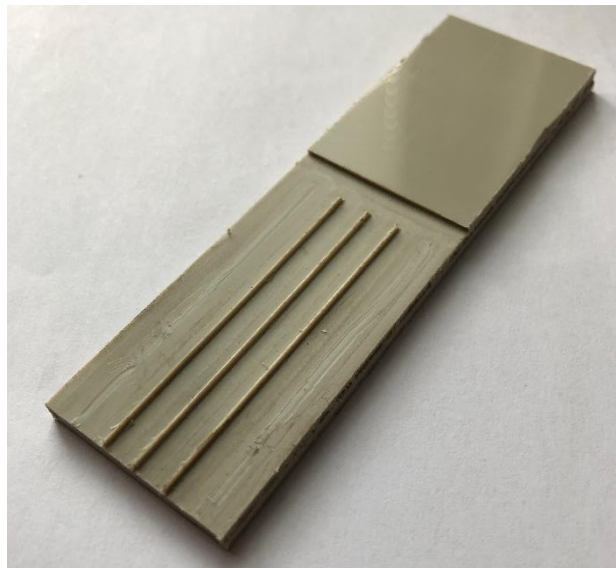
ale především zjistit, jak mají určité svařovací parametry vliv na pevnost spoje a jeho provedení. Tím nastává problém při navrhování parametrů svarového spoje, resp. navrhování energetických usměrňovačů.

Po provedení prvních zkušebních spojů s výchozím horním dílem (viz obr. č. 46) je zjištěno, že díky parametru svarového spoje (délka svaru  $L$ ) a parametrům svařování, které jsou stanoveny na začátku experimentu je vytvořen svarový spoj natolik pevný, že jeho pevnost překračuje pevnost základního materiálu (viz tab. č. 14), a proto spoj s těmito parametry je pro experiment nevyhovující. Jednoduše řečeno, na začátku experimentu je navržen tak pevný spoj, že i při jakékoli změně určitého svařovacího parametru jsou výsledky tahové zkoušky nevyhovující.

Proto je navrženo, aby se délka svaru  $L$ , resp. velikost svarové plochy snížila natolik, než je z výsledků tahové zkoušky vyhodnotitelné, jak změna svařovacích parametrů ovlivňuje pevnost spoje.

### Úprava energetických usměrňovačů – krok č.1

Počet energetických usměrňovačů je nejprve snížen na  $n = 3$  tudíž celková délka svaru je  $L = 150$  mm. Tím je zmenšena svarová plocha, čímž i maximální únosnost spoje při tahové zkoušce.



Obrázek 61: Horní díl vzorku – úprava energetických usměrňovačů – krok č. 1 [17]

#### 6.2.1. Svařování s proměnnou hodnotou amplitudy „A“

V této kapitole je zaznamenáno svařování s proměnnou hodnotou amplitudy „A“ a následné tahové zkoušky. Rozmezí hodnoty amplitudy je od 70 % do 100 % měněno po 10 %. Svařování probíhalo za přednastavené dráhy nástroje „s“ a rychlosti svařování „v“. Veškeré hodnoty svařovacích parametrů jsou uvedené v tabulkách. Výstupem této kapitoly je, zda při daných parametrech svarového spoje je pevnost spoje taková, že jsou výsledky tahové zkoušky vyhovující.

Tab. 15: Proces optimalizace – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda  $A = 70\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 1,5\text{ mm/min}$

L = 150 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	F <sub>MAX</sub> (N)
30	70	29,8	0,40	1,5	1988,5
31	70	29,8	0,40	1,5	2549,9
32	70	29,8	0,40	1,5	3111,1
$\bar{x}$ (N)					2549,8
$\sigma$ (N)					229,1

Tab. 16: Proces optimalizace – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda  $A = 80\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 1,5\text{ mm/min}$

L = 150 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	F <sub>MAX</sub> (N)
34	80	34,0	0,40	1,5	1812,0
35	80	34,0	0,40	1,5	3169,8
36	80	34,0	0,40	1,5	2208,6
$\bar{x}$ (N)					2396,8
$\sigma$ (N)					285,0

Tab. 17: Proces optimalizace – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda  $A = 90\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 1,5\text{ mm/min}$

L = 150 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	F <sub>MAX</sub> (N)
37	90	38,3	0,40	1,5	2341,5
38	90	38,3	0,40	1,5	3156,9
39	90	38,3	0,40	1,5	3202,2
$\bar{x}$ (N)					2900,2
$\sigma$ (N)					197,7

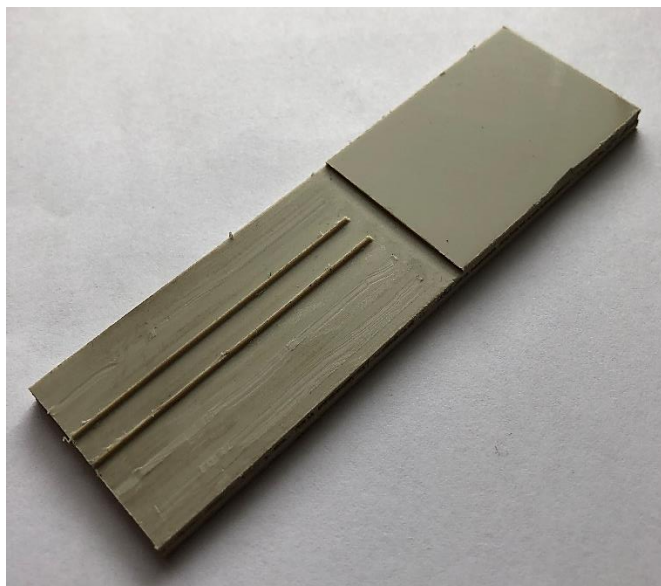
Tab. 18: Proces optimalizace – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda  $A = 100\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 1,5\text{ mm/min}$

L = 150 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	$F_{\text{MAX}}$ (N)
40	100	42,5	0,40	1,5	3048,2
41	100	42,5	0,40	1,5	2254,2
42	100	42,5	0,40	1,5	1579,2
$\bar{x}$ (N)					2293,9
$\sigma$ (N)					300,2

Z tabulek č. 15 až 18 je vidět, že pevnost svarového spoje je úpravou počtu energetických usměrňovačů na  $n = 3$  značně snížena. I přes to, jak je vidět v každé ze zmíněných tabulek, svarový spoj stále dosahuje pevnosti základního materiálu. To sice není špatně, ale svarový spoj stále není na hranici pevnosti, při které je možné spoj testovat.

### 6.2.2. Úprava energetických usměrňovačů – krok č.2

Počet energetických usměrňovačů je snížen na  $n = 2$  tudíž celková délka svaru je  $L = 100\text{ mm}$ . Tím je zmenšena svarová plocha, čímž i maximální únosnost spoje při tahové zkoušce. S těmito parametry spoje se již předpokládá, že žádný svar nedosáhne pevnosti vyšší než pevnost základního materiálu a svarový spoj bude citlivý na jakoukoliv změnu svařovacích parametrů.



Obrázek 62: Horní díl vzorku – úprava energetických usměrňovačů – krok č. 2 [17]

### Cíl procesu optimalizace

Díky této kapitole je získán tvar a parametry vzorku a zároveň svařovací parametry, se kterými je možné vzorky svařit a vyhodnotit jejich vliv na pevnost.



### 6.3. Testování

I přes to, že se na začátku experimentu uvažovalo o zkoumání více materiálů, vzhledem k ob-  
sáhlosti tématu bakalářské práce je v praktické části zkoumaný pouze jeden materiál. Jedná se  
o Polypropylen (PP), tento materiál je blíže popsán v kapitole č. 3.3. V předešlých kapitolách  
jsou popsány přípravy a úpravy potřebné k tomu, aby bylo možné provést svaření vzorků s po-  
žadovanou přesností, kvalitou a parametry se kterými je možné svařování analyzovat. Po této  
optimalizaci je svařena řada zkušebních vzorků, které jsou následně zkoumané a je na nich  
provedena zkouška tahem. Díky zkrácení celkové délky svaru  $L$  na hodnotu  $L = 100$  mm je  
možné pozorovat změny pevnosti způsobené změnou svařovacích parametrů.

V následujících kapitolách je zaznamenán a popsán průběh svařování vzorků. Nejprve je sva-  
řena řada vzorků vždy po čtyřech vzorcích s proměnnou hodnotou amplitudy „A“. Následně je  
z dat tahové zkoušky a vizuální kontroly vyhodnocena nejideálnější hodnota amplitudy. S touto  
hodnotou amplitudy je následně svařena druhá řada vzorků, ale tentokrát s proměnnou rychlostí  
svařování „v“. Následně je opět vyhodnoceno, jaká hodnota rychlosti svařování je vzhledem  
k pevnosti svaru nejideálnější. Na základě této diskuze je u dvou svařovacích parametrů určená  
hodnota, se kterou je docílena nejvyšší pevnost svarového spoje.

#### 6.3.1. Svařování s proměnnou hodnotou amplitudy „A“

V této kapitole je podrobně zaznamenáno svařování s proměnnou hodnotou amplitudy a ná-  
sledně tahové zkoušky. Rozmezí hodnoty amplitudy je od 70 % do 100 % měněno po 10 %.  
Svařování probíhalo za přednastavené dráhy nástroje „s“ a rychlosti svařování „v“. Veškeré  
hodnoty svařovacích parametrů jsou uvedené v tabulkách. Výstupní hodnotou této kapitoly je,  
při jaké hodnotě amplitudy „A“ je pevnost svaru největší. Na základě předchozích výsledků se  
předpokládá růst pevnosti s rostoucí hodnotou amplitudy.

Tab. 19: Testování – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda  $A = 70$  %; dráha nástroje  $s = 0,4$  mm; rychlost svařování  
 $v = 1,5$  mm/min

L = 100 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A (μm)	s (mm)	v (mm/s)	F <sub>MAX</sub> (N)
45	70	29,8	0,40	1,5	882,9
46	70	29,8	0,40	1,5	672,5
47	70	29,8	0,40	1,5	1238,4
48	70	29,8	0,40	1,5	1240,7
$\bar{x}$ (N)					1008,6
$\sigma$ (N)					121,3

Tab. 20: Testování – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda  $A = 80\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 1,5\text{ mm/min}$

L = 100 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	$F_{\text{MAX}}$ (N)
49	80	34,0	0,40	1,5	1992,7
50	80	34,0	0,40	1,5	1083,2
51	80	34,0	0,40	1,5	899,8
52	80	34,0	0,40	1,5	1081,7
$\bar{x}$ (N)					1264,6
$\sigma$ (N)					213,5

Tab. 21: Testování – proměnná rychlost svařování „v“; amplituda  $A = 90\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 1,5\text{ mm/min}$

L = 100 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	$F_{\text{MAX}}$ (N)
53	90	38,3	0,40	1,5	1977,3
54	90	38,3	0,40	1,5	1075,2
55	90	38,3	0,40	1,5	1779,7
56	90	38,3	0,40	1,5	1111,7
$\bar{x}$ (N)					1486,0
$\sigma$ (N)					199,5

Tab. 22: Testování – proměnná hodnota amplitudy „A“; amplituda  $A = 100\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 1,5\text{ mm/min}$

L = 100 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	$F_{\text{MAX}}$ (N)
53	100	42,5	0,40	1,5	2407,7
54	100	42,5	0,40	1,5	2415,3
55	100	42,5	0,40	1,5	1749,0
56	100	42,5	0,40	1,5	1083,7
$\bar{x}$ (N)					1913,9
$\sigma$ (N)					275,2

Nejvyšší pevnost svarových spojů vychází  $1913,9 \pm 275,2\text{ N}$  pro  $L = 100\text{ mm}$  a to u vzorků svařených při hodnotě amplitudy  $100\%$  (**42,5  $\mu\text{m}$** ). S rostoucí pevností se však častěji objevuje

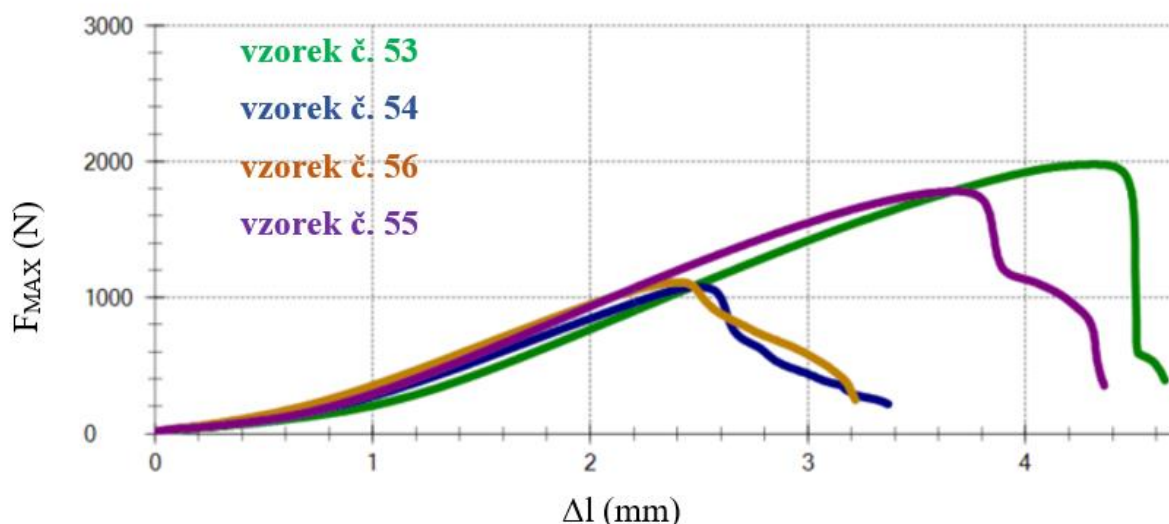


stopa od sonotrody na horním dílu vzorku. To je zapříčiněno právě vysokou hodnotou amplitudy. Díky tomu je jako nejlepší hodnota amplitudy určena 90 % (38,3  $\mu\text{m}$ ), čemuž odpovídá pevnost svarového spoje  $1486,0 \pm 199,5 \text{ N}$  pro  $L = 100 \text{ mm}$ .



Obrázek 63: Stopy od sonotrody na horním díle vzorku; vlevo fotka dílu; vpravo snímek ze světelného mikroskopu (zvětšeno 25x) [17]

Obrázek č. 64 znázorňuje průběh tahové zkoušky vzorků svařených s nejlepší hodnotou amplitudy „A“, která je 90 % (38,3  $\mu\text{m}$ ).



Obrázek 64: Deformační křivky vzorků svařených s parametry svařování:  $A = 90 \%$  (38,3  $\mu\text{m}$ ),  $s = 0,4 \text{ mm}$ ,  $v = 1,5 \text{ mm/min}$

### 6.3.2. Svařování s proměnnou hodnotou rychlosti svařování „v“

Druhým zkoumaným parametrem svařování je rychlost svařování, která by dle předchozích výsledků a výzkumů měla mít značný vliv na utváření svarové plochy a tím i na pevnost spoje. Svařovací rychlost je dána rychlostí vertikálního posuvu sonotrody a je úměrná svařovacímu času. S rostoucí rychlostí svařování je svařovací čas kratší.

Základem pro volbu rozsahu při testování svařovací rychlosti je rychlost 1,5 mm/s, která je použita při testování hodnoty amplitudy. Z této hodnoty je svařovací rychlost nejprve snižována, poté zvyšována. Rozmezí hodnoty rychlosti svařování je od 1 mm/s do 2,5 mm/s měněno po 0,5 mm/s. Krom svařovací rychlosti jsou ostatní parametry konstantní.

Na základě předchozího testování, ze kterého vychází nejideálnější hodnota amplitudy 38,3  $\mu\text{m}$  je testování rychlosti svařování prováděno s touto hodnotou amplitudy.

Veškeré hodnoty svařovacích parametrů jsou uvedené v tabulkách. Výstupní hodnotou této kapitoly je, při jaké rychlosti svařování je pevnost svaru největší. Na základě předchozích výsledků a výzkumů se předpokládá růst pevnosti s klesající rychlostí svařování.

Tab. 23: Testování – proměnná rychlost svařování „v“; amplituda  $A = 90\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 1,0\text{ mm/min}$

L = 100 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	$F_{\text{MAX}}$ (N)
61	90	38,3	0,40	1,0	1954,1
62	90	38,3	0,40	1,0	1549,2
63	90	38,3	0,40	1,0	1524,5
64	90	38,3	0,40	1,0	1141,4
$\bar{x}$ (N)					1542,3
$\sigma$ (N)					143,8

Tab. 24: Testování – proměnná rychlost svařování „v“; amplituda  $A = 90\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 1,5\text{ mm/min}$

L = 100 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	$F_{\text{MAX}}$ (N)
53	90	38,3	0,40	1,5	1977,3
54	90	38,3	0,40	1,5	1075,2
55	90	38,3	0,40	1,5	1779,7
56	90	38,3	0,40	1,5	1111,7
$\bar{x}$ (N)					1486,0
$\sigma$ (N)					199,5

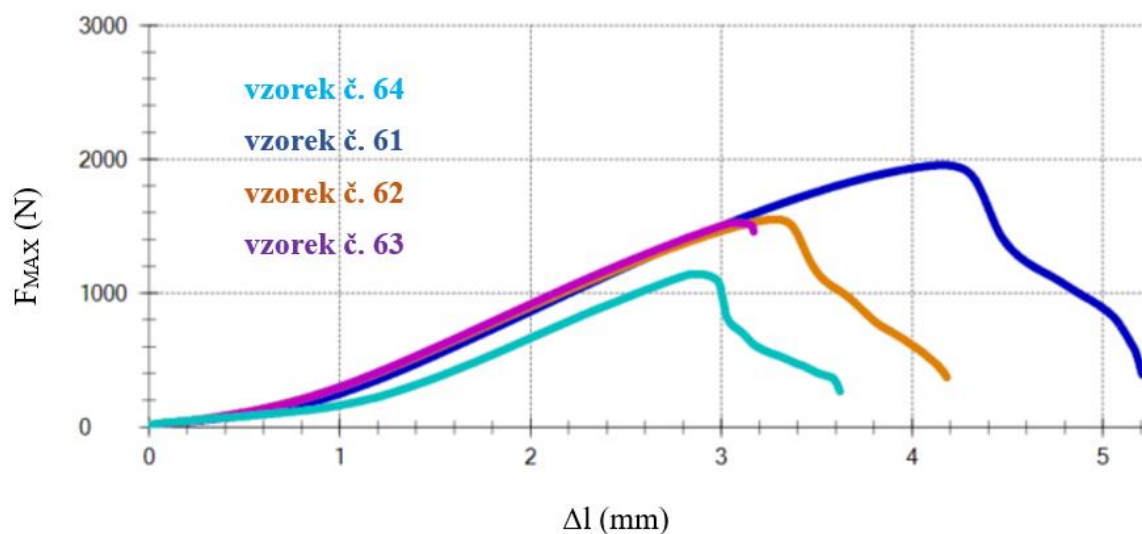
Tab. 25: Testování – proměnná rychlost svařování „v“; amplituda  $A = 90\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 2,0\text{ mm/min}$

L = 100 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	$F_{\text{MAX}}$ (N)
65	90	38,3	0,40	2,0	966,2
66	90	38,3	0,40	2,0	772,8
67	90	38,3	0,40	2,0	1247,3
68	90	38,3	0,40	2,0	1703,5
$\bar{x}$ (N)					1172,5
$\sigma$ (N)					175,0

Tab. 26: Testování – proměnná rychlost svařování „v“; amplituda  $A = 90\%$ ; dráha nástroje  $s = 0,4\text{ mm}$ ; rychlost svařování  $v = 2,5\text{ mm/min}$

L = 100 mm					
PP	Svařování				Tahová zkouška
Číslo vzorku	A (%)	A ( $\mu\text{m}$ )	s (mm)	v (mm/s)	$F_{\text{MAX}}$ (N)
69	90	38,3	0,40	2,5	880,3
70	90	38,3	0,40	2,5	950,6
71	90	38,3	0,40	2,5	1680,3
72	90	38,3	0,40	2,5	1124,9
$\bar{x}$ (N)					1159,0
$\sigma$ (N)					156,9

Měření potvrzuje předpoklad, že s klesající hodnotou rychlostí svařování roste pevnost spoje. Nejvyšší pevnost svarových spojů vychází  $1542,3 \pm 143,8\text{ N}$  pro  $L = 100\text{ mm}$  a to u vzorků svařených při hodnotě rychlosti svařování  $v = 1,0\text{ mm/s}$  s délkou svařovacího času  $0,55 \pm 0,12\text{ s}$ .



Obrázek 65: Graf tahové zkoušky vzorků svařených s parametry svařování:  $A = 90\%$ ,  $s = 0,4\text{ mm}$ ,  $v = 1,0\text{ mm/min}$  [17]

## 6.4. Diskuze výsledků

Prvním zkoumaným svařovacím parametrem je amplituda kmitů a její vliv na pevnost spoje. Měření potvrzuje předpoklad, že s rostoucí hodnotou amplitudy „A“ roste i pevnost spoje. To je dobře patrné z obrázku č. 66, kde je znázorněná vzrůstající tendence maximální tahové síly „ $F_{\text{MAX}}$ “ v závislosti na rostoucí hodnotě amplitudy „A“.

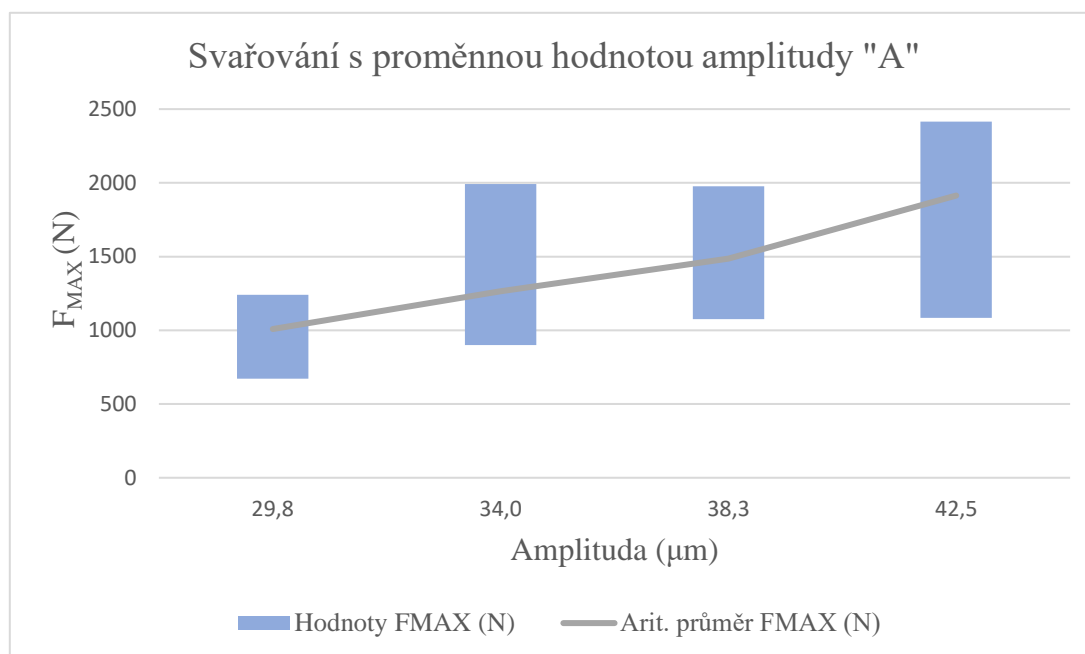
Dle naměřených výsledků z tahové zkoušky (viz tab. č. 19 – 22) je prokazatelný vliv amplitudy na pevnost svarového spoje. S rostoucí hodnotou amplitudy téměř lineárně stoupá pevnost spoje. Celkový naměřený nárůst pevnosti při zvýšení amplitudy z  $29,8\ \mu\text{m}$  na  $42,5\ \mu\text{m}$  činí

90 %. Postupným zvyšováním amplitudy z 29,8  $\mu\text{m}$  na 34, 38,3 a 42,5  $\mu\text{m}$  se zvyšuje pevnost o 25, 17 a 28,8 %.

Svařovací čas se pohybuje v rozmezí od 0,33 do 0,43 s.

Nejvyšší pevnost svarových spojů vychází při hodnotě amplitudy **42,5  $\mu\text{m}$**  (100 %) a to  $1913,9 \pm 275,2$  N při  $L = 100$  mm. Vůbec nejvyšší hodnotu pevnosti spoje je naměřena u vzorku č. 54, kde pevnost dosahuje až 2415,3 N. Jak je vidět na obrázku č. 69 je u vzorku č. 54 díky vysoké amplitudě docíleno dokonalého provaření v celé délce energetického usměrňovače.

S rostoucí amplitudou se však častěji objevuje stopa od sonotrody na horním dílu vzorku. To je zapříčiněno právě vysokou hodnotou amplitudy „A“. Díky tomu je jako nejideálnější hodnota amplitudy určena **38,3  $\mu\text{m}$**  (90 %), čemuž odpovídá pevnost svarového spoje  $1486,0 \pm 199,5$  N při  $L = 100$  mm.

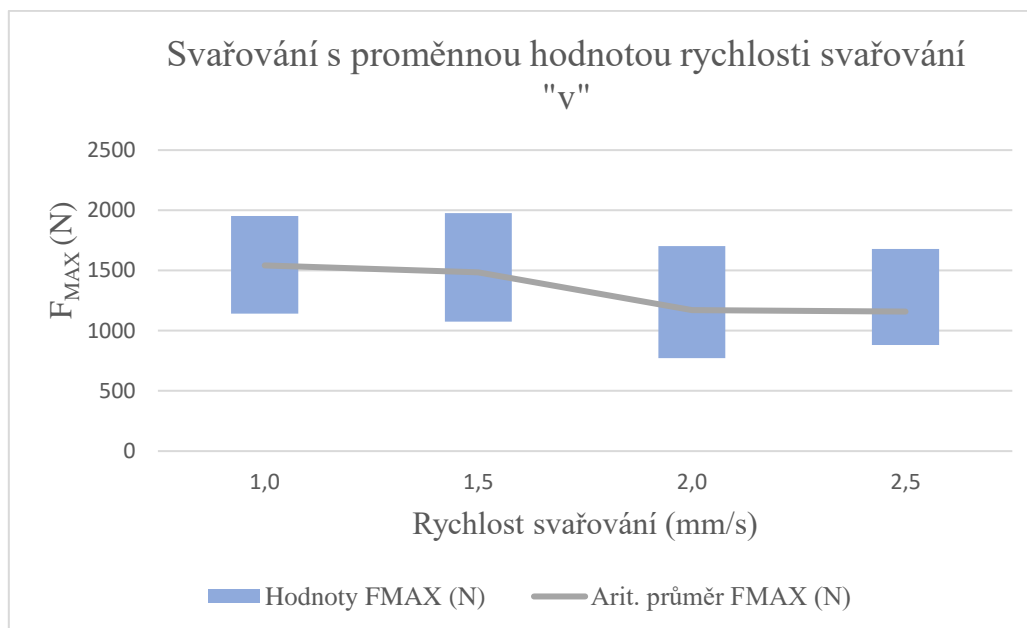


Obrázek 66: Vliv amplitudy na pevnost spoje [17]

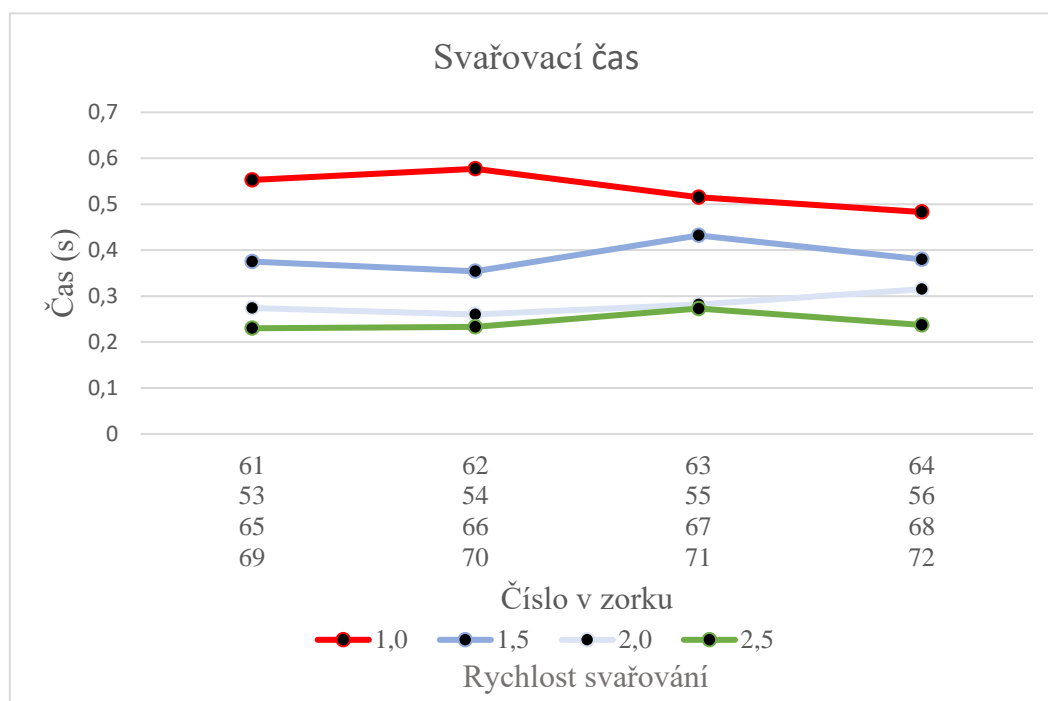
Dle naměřených výsledků z tahové zkoušky (viz tab. č. 23 – 26) je prokazatelný vliv rychlosti svařování na pevnost svarového spoje. Z grafického znázornění na obr. č. 67 je patrné, jak pevnost spoje klesá s rostoucí rychlostí svařování. Největší pevnost svaru je dosaženo při nejnižší svařovací rychlosti znamenající nejdelší dobu svařovacího cyklu. Celkový naměřený pokles pevnosti při zvýšení rychlosti svařování z 1,0 mm/s na 2,5 mm/s činí 33 %.

Jak ukazuje obrázek č. 67 postupným zvyšováním svařovacího času, resp. snižováním rychlosti svařování dochází ke kvalitnějšímu svaření a tím k vyšší pevnosti spoje. Z obrázku č. 69 je patrný rozdíl ve svaření dílů s rychlostí svařování 1 mm/s (vzorek č. 61) oproti rychlosti svařování 2,5 mm/s (vzorek č. 70). U vzorku č. 70 dochází k nesvaření dílů po celé délce energetických usměrňovačů vlivem krátkého svařovacího času.

Měření potvrzuje předpoklad, že s klesající hodnotou rychlosti svařování roste pevnost spoje. Nejvyšší pevnost svarových spojů vychází  $1542,3 \pm 143,8$  N při  $L = 100$  mm a to u vzorků svařených při hodnotě rychlosti svařování  $v = 1,0$  mm/s s délkou svařovacího času  $0,55 \pm 0,12$  s.



Obrázek 67: Naměřené hodnoty  $F_{MAX}$  při proměnné hodnotě rychlosti svařování "v" [17]



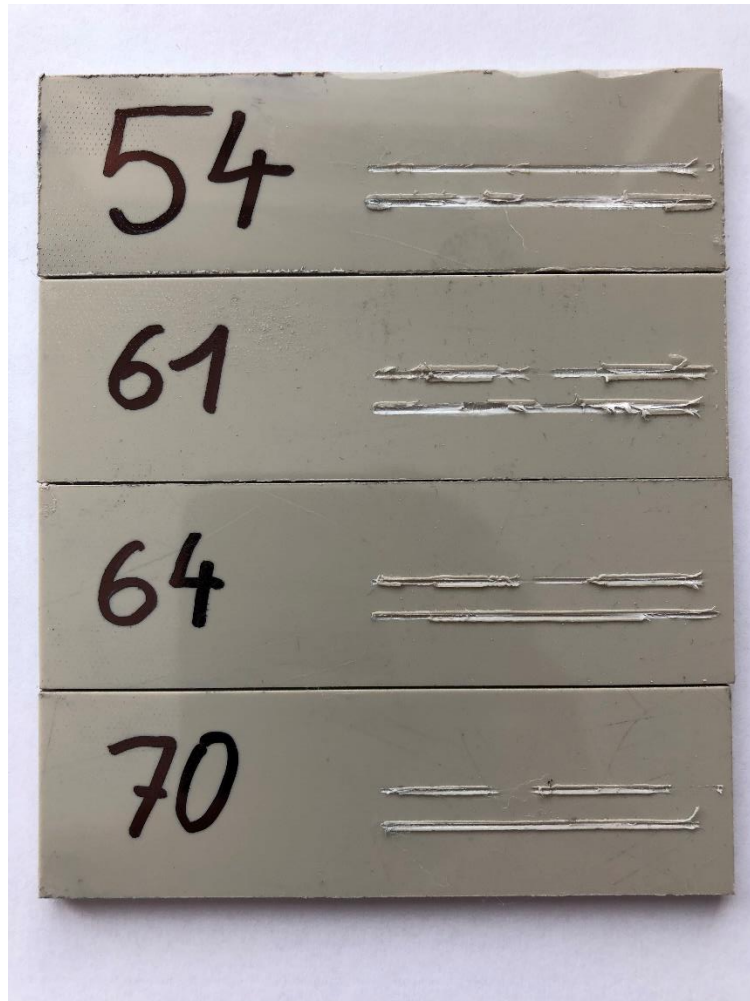
Obrázek 68: Svařovací čas v závislosti na rychlosti svařování [17]

Vzhledem k pevnosti spoje při svařování dílů z PP jsou nejlépe nastavené svařovací parametry o hodnotě amplitudy 42,5  $\mu\text{m}$  a rychlosti svařování 1 mm/s. To platí v případě vyřešení problému se stopou od sonotrody na horním díle, který je v kontaktu se sonotrodou. Jinak je doporučena hodnota amplitudy pouze 38,3  $\mu\text{m}$ .

Měřením je potvrzena hypotéza č. 1. Tudiž změna svařovacích parametrů má vliv na pevnost spoje.

Jak je patrné z tabulek a obrázků ze záznamu testování, je při svařování se stejnými parametry vždy značný rozptyl hodnot. To je nejspíše zapříčiněno kvalitou geometrie energetických usměřovačů. To potvrzuje tabulka č. 23, kde vzorky č. 61 a 64 jsou svařené se stejnými parametry svařování ale hodnota pevnosti spoje je značně rozdílná, přesněji o 71 %. Na obrázku č. 69 je vidět jak vzorek č. 61 disponuje větší svarovou plochou oproti vzorku č. 64. Při vytváření energetických usměřovačů pomocí frézování dochází k značné deformaci dílu, což má při následném svaření dílů za následek tento výkyv hodnot.

Měřením je potvrzena hypotéza č.2. Tudíž kvalita geometrie energetických usměřovačů má vliv na pevnost spoje.



Obrázek 69: Vzorky po přetržení [17]

## 7. Závěr

Bakalářská práce se zabývá moderní technologií spojování polymerních materiálů pomocí ultrazvukového svařování.

V teoretické části jsou obecně popsány polymerní materiály. Je zde uvedeno jejich rozdělení, příprava, použití a příklady. V kapitole o druzích plastů jsou popsány vlastnosti termoplastů, reaktoplastů a elastomerů. Další kapitola se zabývá svařováním termoplastů. Je zde vysvětlena podstata svařování termoplastů a základní parametry při svařování. Dále jsou v této práci hlavní používané technologie svařování termoplastů, jako je například polyfúzní svařování, svařování elektrotvarovkou, svařování třením, svařování laserem, horkým tělesem a ultrazvukové svařování, na což je zaměřena také praktická část této bakalářské práce.

Výzkum je prováděn z důvodu seznámení s ultrazvukovým zařízením, které katedře zapůjčila německá firma MS Ultrasonic Technology Group. Hlavním úkolem bylo monitorovat a parametrizovat svařovací veličiny během ultrazvukového svařování těles z termoplastu.

Praktická část práce je zaměřena na ultrazvukové svařování polypropylenu. Tato část zkoumá vliv svařovacích parametrů na pevnost svarového spoje. Zkoumanými parametry jsou amplituda kmitů a rychlost svařování s ohledem na svařovací čas. Výsledky jsou navzájem porovnávány z hlediska pevnosti, svařovacího času a jakosti povrchu svařovaných dílů.

Experiment ukazuje, že měnicí hodnota amplitudy kmitů „A“ a rychlost svařování „v“ značně mění pevnost spoje. Během experimentu je zjištěno, že nejvhodnějším parametrem pro zvyšování pevnosti je amplituda kmitů. Zvyšováním hodnoty amplitudy se dosáhne značného navýšení pevnosti, což potvrzuje předpoklad práce. Celkový naměřený nárůst pevnosti při zvýšení amplitudy z 29,8  $\mu\text{m}$  na 42,5  $\mu\text{m}$  činí 90 %. Ovšem při aplikaci amplitudy o hodnotě 42,5  $\mu\text{m}$  (100 % maximální hodnoty amplitudy) se častěji objevují viditelné stopy od sonotrody na kontaktním dílu. Proto bylo následné zkoumání rychlosti svařování prováděno při 90 % hodnotě amplitudy.

Druhým zkoumaným parametrem je rychlost svařování „v“. I u tohoto parametru je předpoklad potvrzen. A to ten, že s rostoucí rychlostí svařování klesá pevnost spoje. Nejpevnější spojení je získáno při nejnižší rychlosti svařování, kdy má tavenina nejvíce času se dokonale rozprostřít po svarové ploše. Nejnižší zkoumanou hodnotou rychlosti svařování je 1 mm/s, při které pevnost dosahuje o 33 % vyšší hodnotu než při maximální zkoumané hodnotě rychlosti svařování, což je 2,5 mm/s.

Výzkum rovněž potvrdil vliv geometrie svařovaných dílu neboli kvalitu energetických usměřňovačů. Právě kvalita výroby energetických usměřňovačů má velký vliv na pevnost spoje, ale především na provedení svarových spojů s konstantní pevností. Díky tvorbě energetických usměřňovačů pomocí frézování jsou díly zdeformovány. Díky tomu je značný rozptyl výsledků měření pro každý parametr. Proto je pro další výzkum nezbytná jiné technologie tvorby energetických usměřňovačů.



## 7.1. Doporučení pro další výzkum

Během provádění experimentu bylo zjištěno několik problematických jevů, které by bylo vhodné v dalším výzkumu odstranit nebo alespoň s nimi počítat. V první řadě se jedná o tahovou zkoušku. Jak je zmíněno v kapitole č. 6.1.4., jsou vzorky upínány do axiálně nevychýlitelných čelistí a při jejich zatížení působí nežádoucí ohybový moment. Pro další výzkum je doporučena výroba ocelových, rýhovaných destiček o stejné síle jako je síla jednoho dílu zkušební vzorku a při každé tahové zkoušce s nimi vypočítávat zkušební vzorek v čelistech. Tím se odstraní působení nežádoucího ohybového momentu a tahová zkouška bude více vypovídající.

V dalším výzkumu je třeba zvolit jiný způsob úpravy dílu pro ultrazvukové svařování, tj. tvorba energetických usměrňovačů. Plastový díl je po třískovém obrábění velice zdeformovaný, vlivem vneseného tepla a působení síly od frézy. Ultrazvukové svařování je velice přesná technologie spojování plastových dílů, a proto je velice citlivá na každou nepřesnost výchozího dílu. Jedním z řešení je výroba protahovacího nože, kterým se díly upraví. Sice se též jedná o třískové obrábění, ale vnesené teplo není tak velké jako je tomu u frézování. Dalším řešením je výroba dílů na vstřikovacím lisu. Bohužel se jedná o značně nákladnou variantu, která není jednoduše upravitelná. Posledním navrhovaným řešením je použití tělísek v podobě struny nebo tyček z totožného materiálu jako je materiál spojovaných dílů. Tělíska by měla mít stejný profil, např. trojúhelníkový. Výhodou těchto tělísek je, variabilita uložení mezi díly. Tím se dostáváme k dalšímu návrhu pro další výzkum, který je popsán níže.

V bakalářské práci je použit pouze jeden typ a provedení energetického usměrňovače. Tématem pro další výzkum je rozšíření znalostí o energetickém usměrňovači. Jaký vliv na pevnost svařového spoje má jeho směr vůči zatížení, délka, profil a velikost. Výzkum by měl naznačit, zda existuje určitá posloupnost s měnícími se parametry energetického usměrňovače.

V dalším výzkumu je doporučeno se zaměřit na kvantitativní měření při každé změně parametru. Je nezbytné při určité změně např. svařovacího parametru tuto změnu vyhodnotit z více měření.

Pro další výzkum je navrženo použít pro zkušební vzorky materiály, které jsou více používané v praxi. Dnes se takřka již nepoužívají čisté polymerní materiály. Často jsou vyplněny recyklovanou částí, plnivý nebo vlákny. Opět by měl výzkum naznačit, zda existuje zásadní změně v pevnosti svařového spoje při použití těchto materiálů.

Pokud další výzkum vychází nebo navazuje na tuto bakalářskou práci je nutné, aby se jeho postup zásadně nelišil.



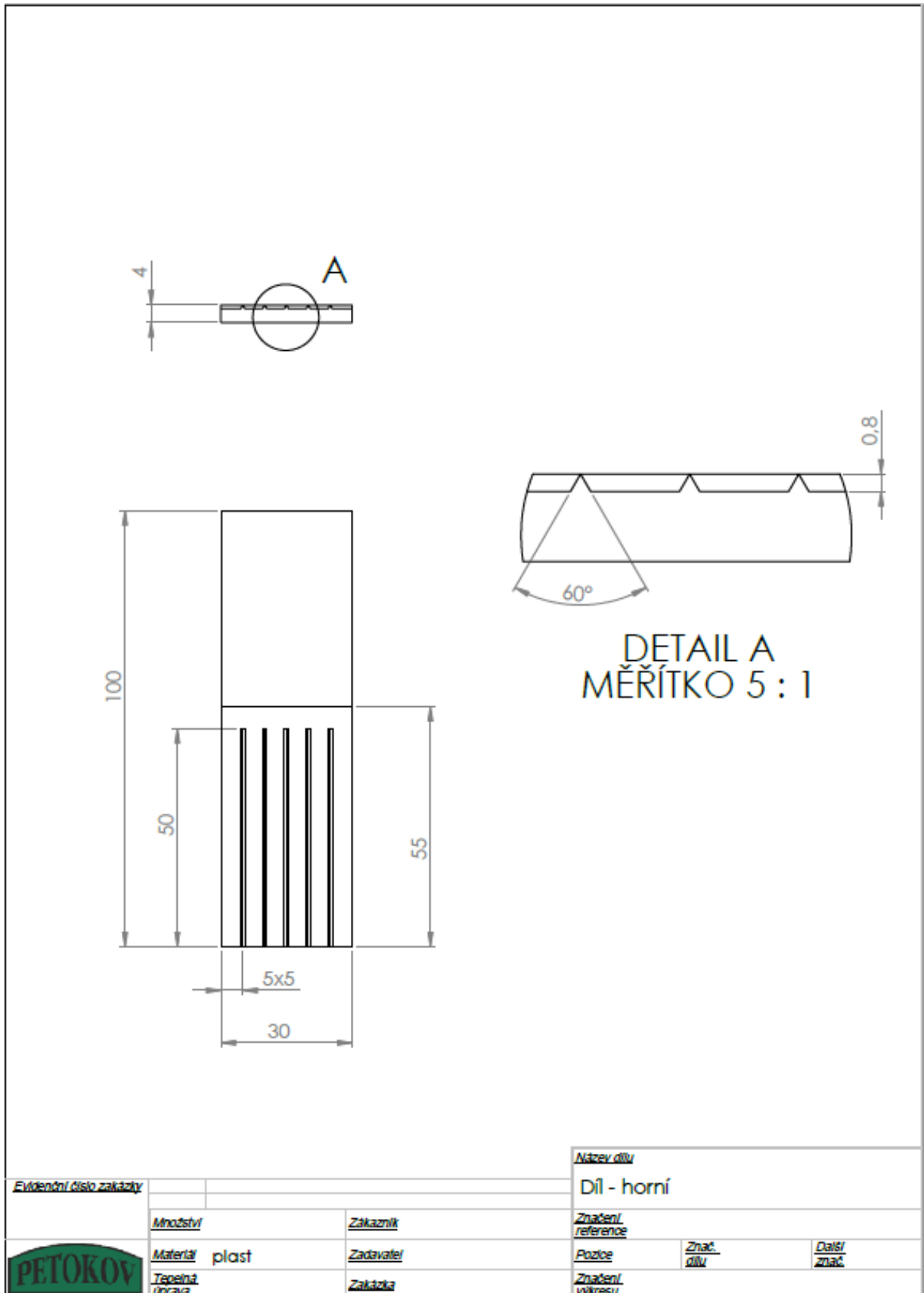
## 8. Použitá literatura

- [1] KRATOCHVÍL, B. ŠVORČÍK, V. VOJTĚCH, D. *Úvod do studia materiálů*. 1. vydání. ISBN 80-7080-568-4. 2005.
- [2] *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti*. In: [online] [cit. 2020-04-11] Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm)
- [3] *Plasty*. In: [online] [cit. 2020-04-11] Dostupné z: <https://www.opi.zcu.cz/plasty.pdf>
- [4] WIKIPEDIA. *Ultrazvuk*. In: [online] [cit. 2020-04-11] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ultrazvuk>
- [5] KOPÁČ, Dalibor. *Monitorizace svařovacích parametrů při ultrazvukovém svařování polyamidu*. In: [online] [cit. 2020-09-11] Dostupné z: [http://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/12972/dr\\_25753.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/12972/dr_25753.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Disertační. TUL. Vedoucí práce prof. Petr Lenfeld.
- [6] FELIXOVÁ, Blanka. *Elektromagnetické vlny*. In: [online] [cit. 2020-04-11] Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2907891/>
- [7] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA Martin. *Encyklopedie fyziky*. In: [online] [cit. 2020-04-11] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/212-pouziti-ultrazvuku>
- [8] BENEŠ, Libor. *Plasty*. In: [online] [cit. 2020-04-11] Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/polymvsauto/PLASTY\\_presentation\\_uvodni%20seznameni.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/polymvsauto/PLASTY_presentation_uvodni%20seznameni.pdf)
- [9] KRISTEK, Michal. *Ultrazvuk v diagnostice materiálů*. In: [online] [cit. 2020-04-11] Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_veřejne.php?file\\_id=105598](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=105598). Bakalářská. VUT Brno. Vedoucí práce prof. Jiří Kazelle.
- [10] VLKOVSKÝ, René. *Ultrazvuk*. In: [online] [cit. 2020-04-11] Dostupné z: [https://www.svf.stuba.sk/buxus/docs/web\\_katedry/fyz/SVOC/svk\\_2016\\_Vlkolinsky.pdf](https://www.svf.stuba.sk/buxus/docs/web_katedry/fyz/SVOC/svk_2016_Vlkolinsky.pdf).
- [11] ONDERKA, Martin. *Procesní implementace ultrazvukového svařování*. In: [online] [cit. 2020-04-11] Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/22921/1/Diplomova%20prace%20Martin%20Onderka.pdf>. Diplomová. ZČU v Plzni.
- [12] *Svařování ultrazvukem*. In: [online] [cit. 2020-06-11] Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_svarovani\\_ultrazvukem\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_ultrazvukem_mrna.pdf).
- [13] EMERSON, *Ultrasonic plastic welding*. In: [online] [cit. 2020-12-11] Dostupné z: <https://www.emerson.com/en-us>
- [14] EMERSON, *Industry Applications*. In: [online] [cit. 2020-24-11] Dostupné z: <https://www.emerson.com/en-us>
- [16] SEIDL, Martin. *Výzkum vlivů technologie přípravy a složek třífázových polymerních kompozitů plněných přírodními vlákny na zpracovatelnost a kinetiku fázových přechodů prvního řádu*. In: [online] [cit. 2020-24-11] Dostupné z: [http://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/39554/U\\_915\\_S.pdf?sequence=4&isAllowed=y](http://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/39554/U_915_S.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- [17] *Vlastní zdroj*
- [18] *Polymery - 06*. In: [online] [cit. 2020-07-12] Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/06.html>

- [19] *Polymery - 03*. In: [online] [cit. 2020-07-12] Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>
- [20] *Polymery - 01*. In: [online] [cit. 2020-07-12] Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/01.html>
- [21] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000, 186 s. ISBN 80-7082-697-5.
- [22] LOYDA, Miloslav; ŠPONER, Vlastimil; ONDRÁČEK, Ladislav. *Svařování termoplastů*. 2. vyd. Praha: UNO Praha, 2011., 530 s. ISBN 978-80-904949-0-9.
- [23] *Materiály v technice – plasty*. In: [online] [cit. 2020-07-12] Dostupné z: <https://adoc.pub/materialy-v-technice-plasty.html>
- [24] Technologie II. *Doplňkové technologie pro zpracování plastů*. In: [online] [cit. 2020-07-12] Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/12.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm)
- [25] *Svařování plastů – 13*. In: [online] [cit. 2020-07-12] Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/13.html>
- [26] KLAS, Weman. *Welding processes handbook*. 2. edition. Woodhead publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-510-7
- [27] MOL, Petr. *Svařování plastů tepelným zrcadlem*. In: [online] [cit. 2021-27-01] Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/33625/mol\\_2015\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/33625/mol_2015_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [28] *Svařování rychlotryskou*. In: [online] [cit. 2021-03-02] Dostupné z: <http://www.svareciskola.eu/wp-content/uploads/2015/02/rychlotryskou.jpg>
- [29] DUŠEK, Jiří. *Zelené a UV lasery*. In: [online] [cit. 2021-03-02] Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>
- [30] PRYČEK, Radovan. *Technologie svařování potrubí z termoplastů*. In: [online] [cit. 2021-03-02] Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/13472842/>
- [31] MS ULTRASONIC TECHNOLOGY GROUP. *Ultrazvukové komponenty MS sonxCOM*. In: [online] [cit. 2021-03-30] Dostupné z: <https://www.ms-ultrasonic.com/produkty/ms-sonxcom-ultrasonic-components/>
- [32] VALENTA, Michal. *Ultrazvukové svařování termoplastů*. In: [online] [cit. 2021-03-30] Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42326/valenta\\_2018\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42326/valenta_2018_dp.pdf?sequence=1)
- [33] BĚHÁLEK, Luboš. *Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání*. In: [online] [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [34] *Rozdělení technologií zpracování plastů*. In: [online] [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/02.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/02.htm)
- [35] *Rozdělení technologií zpracování plastů*. In: [online] [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/01.html>
- [36] WIKIPEDIA. *Amplituda*. In: [online] [cit. 2021-04-27] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Amplituda>

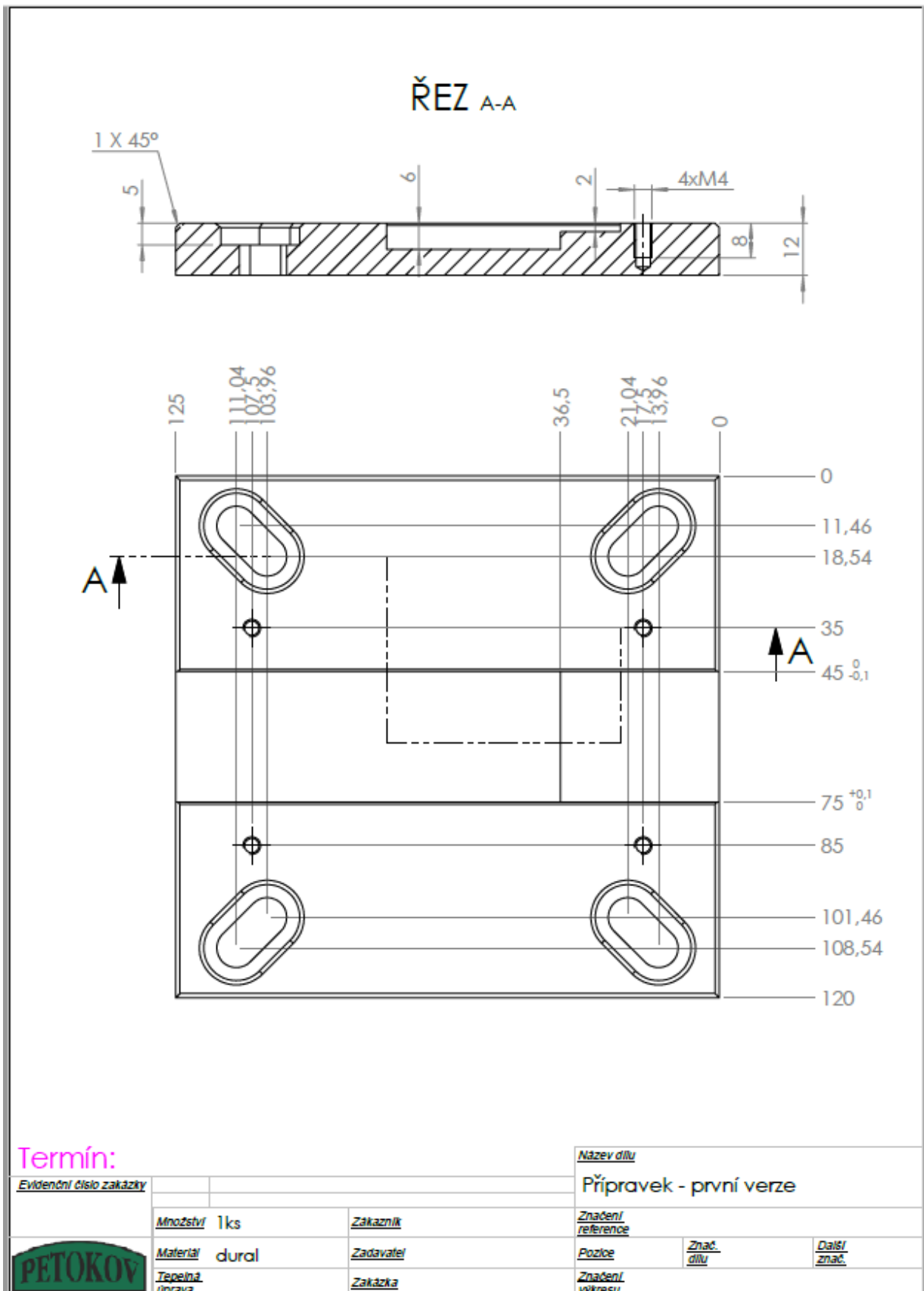
## PŘÍLOHA č. 1

### Výkresová dokumentace: Horní díl



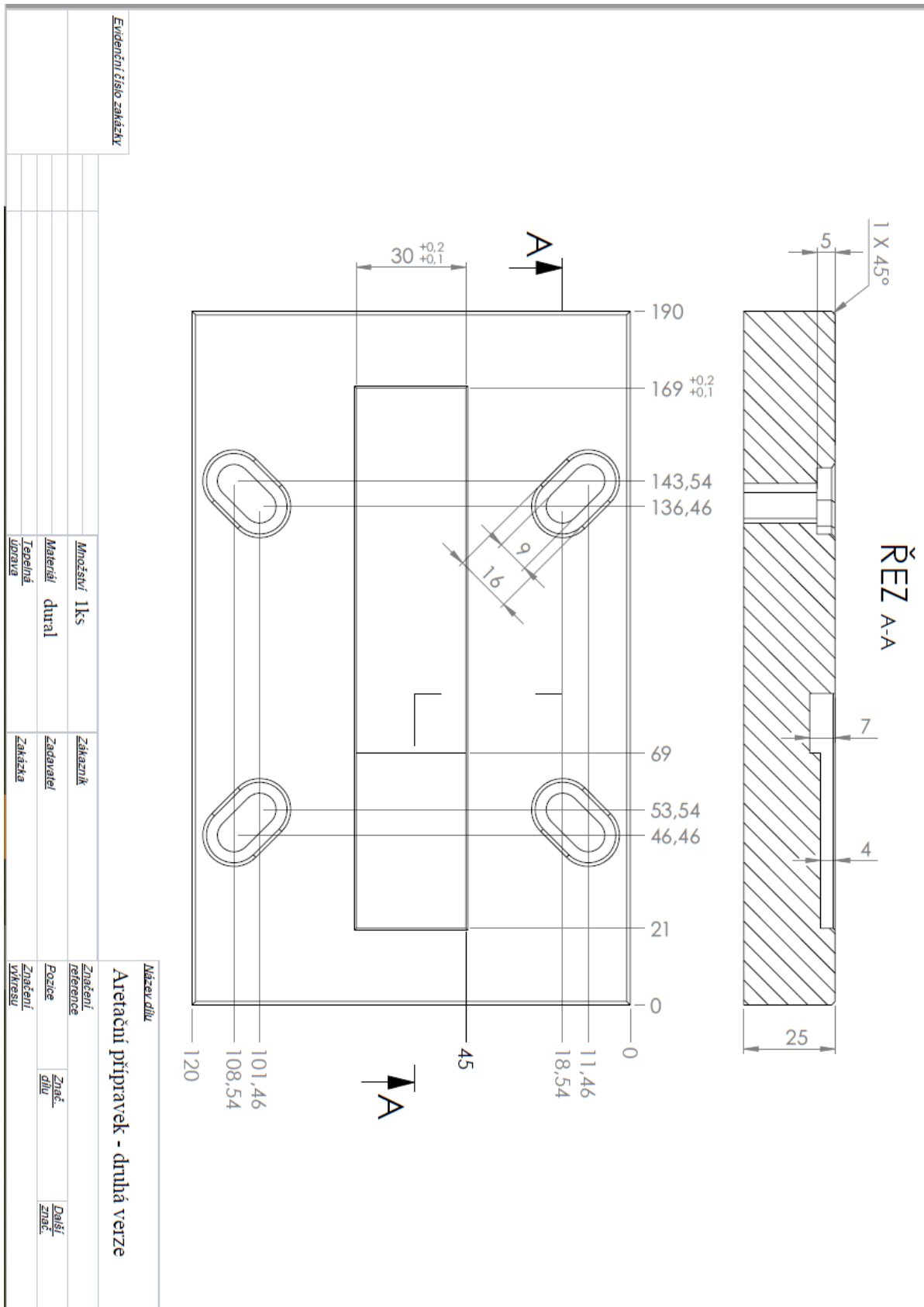
## PŘÍLOHA č. 2

### Výkresová dokumentace: Aretační přípravek č. 1



### PŘÍLOHA č. 3

### Výkresová dokumentace: Aretační přípravek č. 2



## PŘÍLOHA č. 4

### PP – materiálový list

**Röchling**

**Industrial**

#### Technical Data Sheet

### Polystone® P lightgrey

#### Product characteristics

- High rigidity
- Very good weldability
- High chemical and corrosion resistance

#### Product applications

- Chemical engineering and tank building
- Ventilation technology
- Pump engineering

	Test method	Unit	Value
<b>General properties</b>			
Density	DIN EN ISO 1183-1	g / cm <sup>3</sup>	0,91
Water absorption	DIN EN ISO 62	%	<0,1
Flammability (Thickness 3 mm / 6 mm)	UL 94		HB
<b>Mechanical properties</b>			
Yield stress	DIN EN ISO 527	MPa	32
Elongation at break	DIN EN ISO 527	%	>50
Tensile modulus of elasticity	DIN EN ISO 527	MPa	1300
Notched impact strength	DIN EN ISO 179	kJ / m <sup>2</sup>	8
Shore hardness	DIN EN ISO 868	scale D	72
<b>Thermal properties</b>			
Melting temperature	ISO 11357-3	°C	150
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W / (m * K)	0,20
Thermal capacity	DIN 52612	kJ / (kg * K)	1,70
Coefficient of linear thermal expansion	DIN 53752	10 <sup>-6</sup> / K	120 - 190
Service temperature, long term	Average	°C	0 ... 100
Service temperature, short term (max.)	Average	°C	150
Vicat softening temperature	DIN EN ISO 306, Vicat B	°C	90
<b>Electrical properties</b>			
Dielectric constant	IEC 60250		2,4
Dielectric dissipation factor (10 <sup>6</sup> Hz)	IEC 60250		0,00019
Volume resistivity	DIN EN 62631-3-1	Ω * cm	>10 <sup>14</sup>
Surface resistivity	DIN EN 62631-3-2	Ω	>10 <sup>14</sup>
Comparative tracking index	IEC 60112		600
Dielectric strength	IEC 60243	kV / mm	45

The data stated above are average values ascertained by statistical tests on a regular basis. They are in accordance with DIN EN 15860. The data above are provided purely for information and shall not be regarded as binding unless expressly agreed in a contract of sale.

