

Problematika svařování termoplastů ultrazvukem

Bc. Zbyněk Vávra

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zbyněk Vávra**

Osobní číslo: **T17287**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Problematika svařování termoplastů ultrazvukem**

Zásady pro vypracování:

1. Literární studie na dané téma
2. Návrhy 3D profilů
3. Program na NC a výroba profilů
4. Experimentální svařování termoplastů a vyšetření pevnosti svaru
5. FEM modelové studie spojů a jejich porovnání s výsledky experimentu

Rozsah diplomové práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh: **dle pokynů VDP**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

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

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

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

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

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výtěžku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je studium problematiky v oblasti ultrazvukového svařování termoplastů.

Teoretická část je zaměřena na problematiku svařování termoplastů. Jsou zde vysvětleny základní pojmy a fyzikální principy technologií ultrazvuku, dále se tato část věnuje ultrazvukovému svařování. V závěru teoretické části je podán přehled metod, které budou použity pro vyhodnocení naměřených dat.

Praktická část je zaměřena na svařování zkušebních těles vybraných materiálů. Svařování zkušebních vzorků materiálů probíhalo za různých podmínek a úprav stykových ploch, které slouží k vedení ultrazvukové energie do svaru.

Závěr praktické části obsahuje srovnání pevnosti spojů při ultrazvukovém svařování u vybraných druhů termoplastů.

Klíčová slova: svařování ultrazvukem, svařování termoplastů, zkouška tahem

ABSTRACT

This diploma thesis studies the issue of ultrasonic welding of thermoplastics.

Theoretical part describes the issue of thermoplastic welding. Basic concepts and principles of ultrasound technology are explained and ultrasonic welding is introduced. Finally, it is concluded by an overview of methods applied in the evaluation of obtained data.

Practical part focuses on welding of test specimens using selected materials. Welding of specimens was performed under various conditions and modifications of contact surfaces which serves to guide ultrasonic energy to the weld.

In conclusion, this part compares the strength of joints gained by ultrasonic welding of selected types of thermoplastics.

Keywords: ultrasonic welding, thermoplastic welding, tensile test

Děkuji paní doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D za odborné vedení a pomoc při vypracování této diplomové práce. Dále chci tímto poděkovat panu Ing. Janu Volejníkovi za možnost využití ultrazvukového zařízení ve firmě Plastika a.s. Kroměříž.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 SVAŘOVÁNÍ	12
2 SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ	14
2.1 DODÁNÍ TEPLA DO SVARU VEDENÍM	14
2.1.1 Svařování horkým tělesem	14
2.1.2 Svařování topnou spirálou.....	15
2.2 DODÁNÍ TEPLA DO SVARU KONVEKČÍ	16
2.2.1 Svařování horkým plynem	16
2.2.2 Svařování extrudérem	16
2.3 DODÁNÍ TEPLA DO SVARU ZÁŘENÍM	17
2.3.1 Svařování infračerveným paprskem.....	17
2.3.2 Svařování laserem	18
2.4 DODÁNÍ TEPLA DO SVARU TŘENÍM	19
2.4.1 Vysokofrekvenční (dielektrické) svařování	19
2.4.2 Svařování třením (rotační)	20
2.4.3 Vibrační svařování	20
2.4.4 Svařování ultrazvukem.....	21
3 ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ	22
3.1 POPIS SVAŘOVACÍHO ZAŘÍZENÍ.....	22
3.1.1 Generátor	23
3.1.2 Konvertor	23
3.1.3 Zesilovač	23
3.1.4 Sonotroda	23
3.1.5 Upínací přípravky.....	25
3.1.6 Typy ultrazvukových svářeček.....	26
3.2 TECHNOLOGICKÝ POSTUP SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM	27
3.2.1 Procesní parametry.....	27
3.2.1.1 Svařovací čas	28
3.2.1.2 Svařovací síla	28
3.2.1.3 Frekvence	28
3.2.1.4 Amplituda	29
3.2.2 Metody svařování ultrazvukem.....	30
3.2.2.1 Bodové svařování	30
3.2.2.2 Ultrazvukové svařování folií a tkanin.....	31
3.3 MATERIÁLY VHODNÉ K ULTRAZVUKOVÉMU SVAŘOVÁNÍ.....	32
4 PROGRAM SIEMENS NX	34
4.1 POUŽITÍ	34
4.1.1 CAM.....	34
4.1.2 Design	34
4.1.3 Kontrola kvality	34
4.1.4 Aditivní výroba	35

4.1.5	Robotizace a automatizace	35
II	PRAKTICKÁ ČÁST	36
5	CÍL PRÁCE	37
6	EXPERIMENT	38
6.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	38
6.2	POUŽITÉ MATERIÁLY	39
6.2.1	Polymethylmethakrylát (PMMA ALTUGLAS)	40
6.2.2	Akrylonitril-butadien styren (ABS)	40
6.2.3	Polyamid (PA6).....	41
6.2.4	Polypropylen (PP)	42
6.3	PŘÍPRAVEK PRO FRÉZOVÁNÍ	42
6.4	SVAŘOVACÍ SESTAVA	44
6.5	URČENÍ PŘÍTLAČNÉ SÍLY	46
6.6	VARIANTY SVAROVÝCH SPOJŮ	48
6.7	SVAŘOVACÍ PARAMETRY	49
6.8	TAHOVÁ ZKOUŠKA	50
6.8.1	Zkušební trhací zařízení	50
7	VÝSLEDKY A HODNOCENÍ.....	51
7.1	HODNOCENÍ VLIVŮ NA PEVNOST SPOJE.....	51
7.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY A VÝSLEDKY ZKOUŠKY	51
7.2.1	Pevnost základních materiálů.....	51
7.2.2	PMMA.....	52
7.2.3	ABS	56
7.2.4	PP	57
7.2.5	PA-6	60
7.2.6	PMMA+ABS.....	62
7.3	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ	65
7.3.1	Vliv energetických můstků v oblasti svarového spoje na jeho únosnost	65
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ	71
	ZÁVĚR	75
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	77
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	79
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM TABULEK.....	82

ÚVOD

Využívání technologií svařování termoplastů přináší řadu výhod, jako je snížení nákladů za náročné technologie, technologické modifikace a úpravy nástrojů stávající technologií. Technicky náročná výroba komplikovaných dílů se zjednodušuje výrobou polotovarů a jejich následným svařováním. Volba metod svařování plastů je dána hospodárností, dosažitelnou pevností svaru a přesností. Jednotlivé svařovací metody se odvíjejí od průmyslového odvětví, ve stavebnictví se setkáváme nejčastěji se svařováním pomocí extrudéru a topnou spirálou, v automobilovém průmyslu je využíváno vibrační svařování. Svařování ultrazvukové se využívá také pro medicínu, předpokládá-li se využití svařenců v biologicky aktivních prostředích, kde lepené spoje nedosahují požadované doby životnosti nebo je z hlediska zdravotní nezávadnosti nelze použít.

Během posledních dvaceti let se ultrazvuková svařovací technologie ukázala jako velmi důležitá spojovací technika. Má velmi široké spektrum uplatnění od elektrických přístrojů až po celé linky např. v textilním průmyslu. Pro úspěšné svařování je totiž nutno pro každý spoj na míru vyrobit příslušné nástroje a přípravky. To je prakticky jediná nevýhoda této technologie. Velkými výhodami jsou vysoká rychlost, kompaktnost, čistota a prakticky žádná údržba. Předností je také vysoká životnost nástrojů, i statisíce svarů. Současným trendem jsou plně automatizované ultrazvukové linky, kde není potřeba lidského faktoru.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SVAŘOVÁNÍ

Svařování je proces, při kterém vznikají působením tepla, respektive tlaku, nerozebíratelná spojení dvou a více materiálů. Nejčastěji se svařují kovy nebo termoplasty. Za běžných podmínek nelze dosáhnout spojení, je třeba pro svařování použití tlaku nebo tepla nebo spojení obou faktorů. Pro svařování lze použít mnoho různých zdrojů energie, včetně plynového plamene (chemického), elektrického oblouku, laseru, elektronového paprsku, ale také lze svařovat např. pomocí tření nebo ultrazvuku. Průmyslový proces svařování může být proveden v mnoha různých prostředích, na vzduchu, pod vodou a ve vesmíru. Svařování je nebezpečný proces a jsou nutná preventivní opatření, aby se zabránilo popáleninám, úrazu elektrickým proudem, poškození zraku, vdechování jedovatých plynů a výparů a vystavení intenzivnímu ultrafialovému záření.

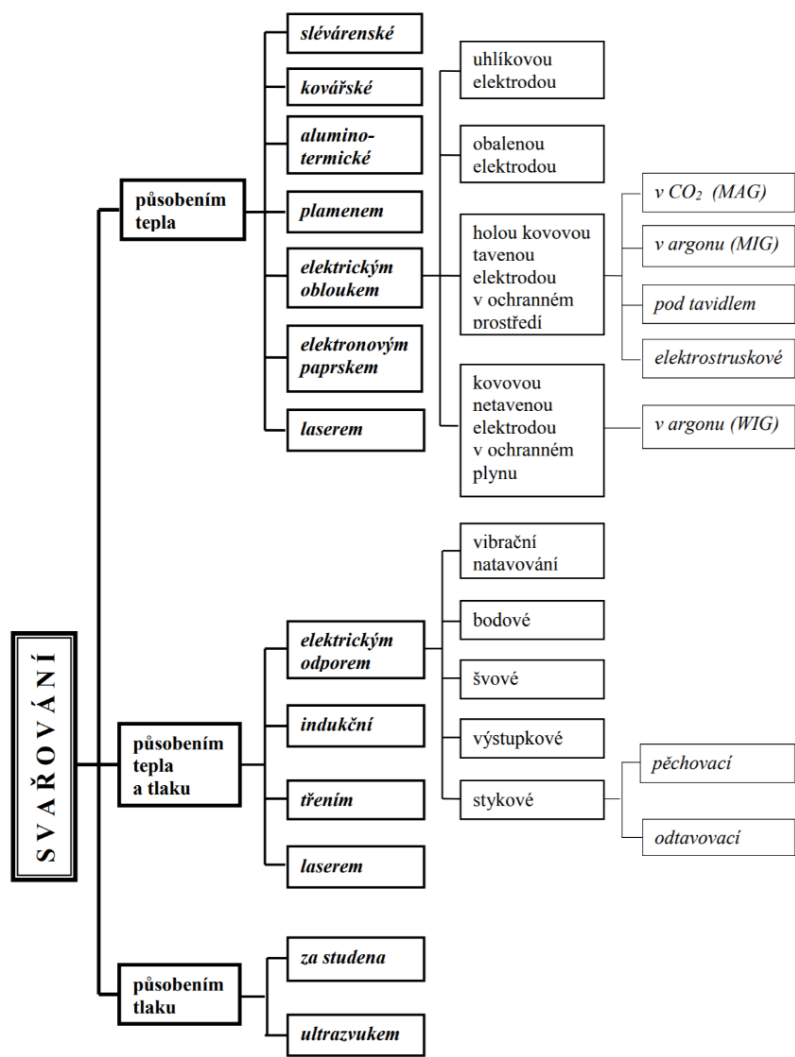
Až do konce 19. století bylo jediným procesem svařování kovářské svařování, které kováři používali po tisíciletí spojování železa a oceli ohřevem a přiklepem. Svařovací technologie se rychle rozvíjela na počátku 20. století, kdy světové války požadovaly spolehlivé a levné spojovací metody. Vývoj pokračoval s vynálezem laserového paprsku, svařování elektronovým paprskem, magnetické pulsní svařování a svařování třením. Nejnovějším trendem, který se již několik let sériově využívá hlavně v automobilovém průmyslu, je automatické robotické svařování bez použití lidské síly. [1]



Obr. 1. Svařování [2]

Svařovací technologie rozdělujeme do několika kategorií. Svařování za působení tepla, kam patří například laserové svařování, svařování plamenem, elektronovým paprskem, elektrickým obloukem atd. Nejpoužívanější metodou svařování (většinou kovů) patří svařování elektrickým obloukem, které se dále dělí na svařování obalenou elektrodou, kovovou tavnou elektrodou, zde je potřeba ochranného prostředí (v CO₂ – MAG, argonu-MIG, pod tavidlem, elektro-struskově), dále kovovou netavnou elektrodou v ochranném plynu (argon-WIG).

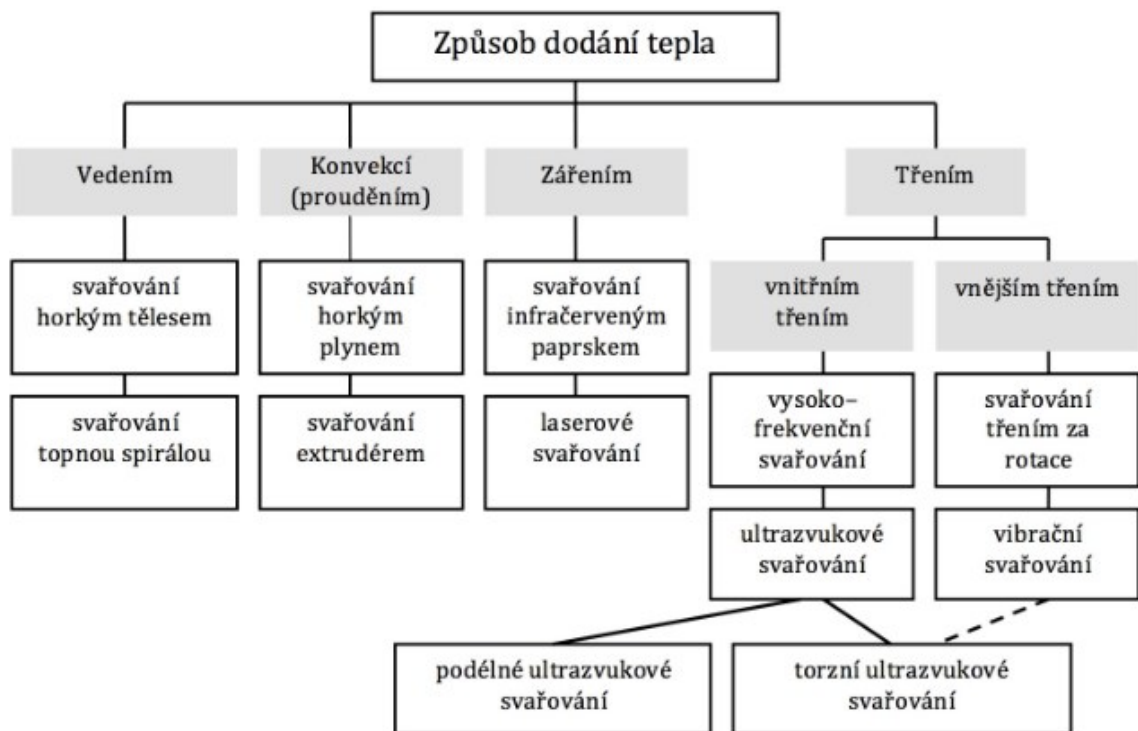
Jako další druh svařování je společné působení tepla a tlaku, sem patří svařování elektrickým odporem, třením, indukční a laserové. Svařování za pomoci elektrického odporu dále dělíme na švové, vibrační natavování, bodové výstupkové a stykové. Poslední kategorií je svařování za působení tlaku, zde máme svařování za studena a ultrazvukem. [1]



Obr. 2. Rozdělení svařovacích technologií [4]

2 SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ

Svařování termoplastů definujeme jako trvalé spojení dvou materiálů. Může být aplikováno na mnoho termoplastických materiálů a je to dlouho zavedená metoda používaná v automobilovém, leteckém, obalovém a zdravotnickém průmyslu. Svařovací metody typicky zahrnují aplikaci lokalizovaného tepla a tlaku. Celkovým cílem svařování termoplastů je vytvoření bezešvého spoje, který má ideálně stejnou pevnost jako má základní materiál. Pro svařování termoplastů je k dispozici celá řada technik, které jsou často klasifikovány z hlediska způsobu dodání tepla do místa svaru. Existují čtyři hlavní způsoby dodání tepla: za pomoci vedení, proudění, záření a tření. [7]



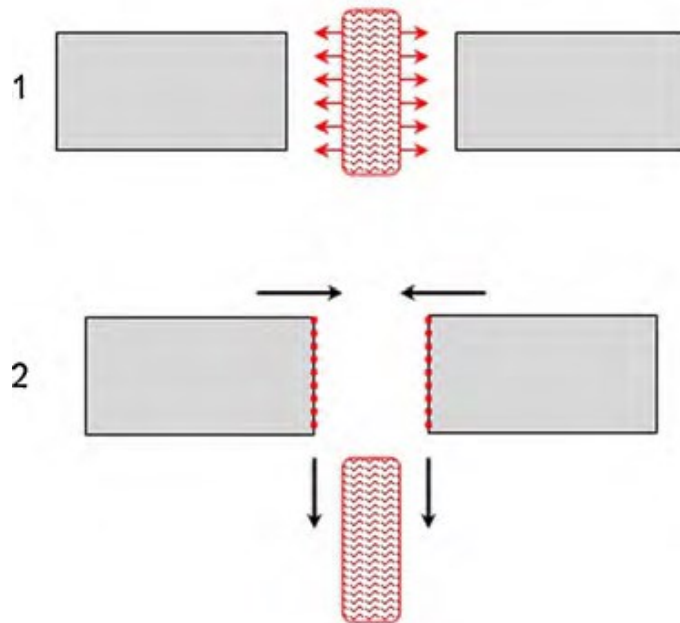
Obr. 3. Rozdělení technologií svařování termoplastů dle způsobu dodání tepla do místa svaru [4]

2.1 Dodání tepla do svaru vedením

2.1.1 Svařování horkým tělesem

Při svařování horkým tělesem za tepla se na povrchy, které mají být svařovány, přitlačí vyhřívaná deska, což způsobuje lokální tavení. Zjistilo se, že pevnost vazby vzrostla s do-

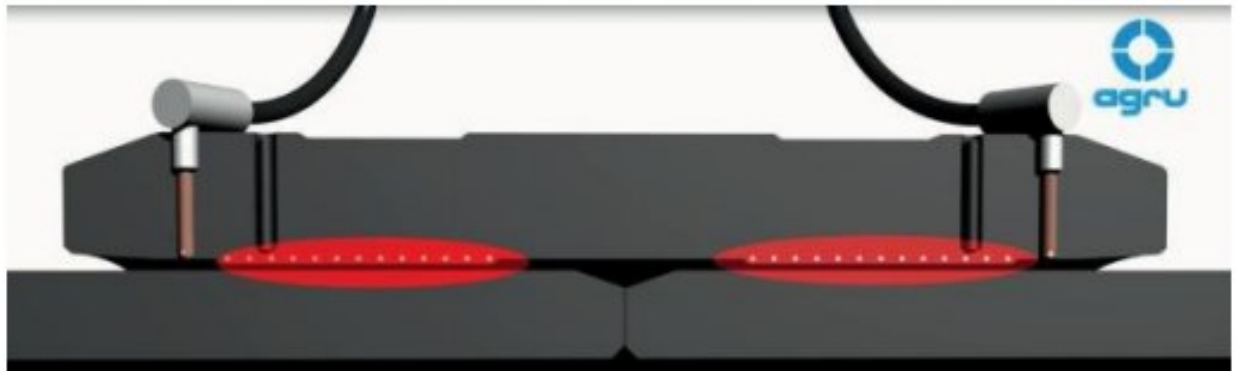
bou kontaktu a teplotou desky a hlavním faktorem pro rozvoj pevnosti kloubu byl dostatečný tok roztaveného polymeru. [7]



Obr. 4. Schéma svařování horkým tělesem (1- nahřátí spojovaných ploch, 2- vytvoření svaru za pomoci tlaku) [7]

2.1.2 Svařování topnou spirálou

Při svařování topnou spirálou, jsou potrubní plastové tvarovky (elektrotvarovky) v hrdlech opatřeny přímo vytápěným topným tělesem. Topná spirála je vyráběna z měděných, mosazných nebo ocelových nerezových drátů. Elektrotvarovky se vyrábějí z PP, PB a PE. Svařovací parametry s předepsanou dobou ochlazování obsahuje identifikační štítek, který je součástí každé tvarovky. Samovolné chladnutí musí být zajištěno po každém svařování. Svařování topnou spirálou se nejčastěji používá pro potrubní systémy z PE-HD, PE-LD, PE-XA, PB, PE-HD, PE-MD a PP. [8]



Obr. 5, Princip svařování topnou spirálou [8]

2.2 Dodání tepla do svaru konvekcí

2.2.1 Svařování horkým plynem

Pro svařování horkým plynem se používá proud horkého plynu k roztavení plnicí tyče umístěné mezi dvěma sousedními povrchy. Extruzní svařování také používá proud horkého plynu, ale místo plnicí tyče se vstříkuje roztavený polymer do spoje. Folie a další tenký materiál je možno svařovat bez použití přídavného materiálu. Kvalita spoje svarů horkého plynu závisí na rychlosti svařování, tlaku a teplotě plynu. Svařování horkým plynem je však ruční technika, která vyžaduje zkušeného operátora, což činí tyto metody nevhodnými pro výrobu velkých objemů a přesnost výroby je také nižší. [4, 7]

2.2.2 Svařování extrudérem

Principem je ohřev materiálu horkým plynem a vytlačování zplastikovaného přídavného materiálu do svařovací zóny obvykle pod tlakem. Přídavný materiál je shodný se svařovaným materiálem, je zcela homogenní a dokonale zplastifikovaný, poté je vytlačován z plastikační jednotky extrudéru jako proud taveniny. Pro dobrou kvalitu svaru je nutné správné vytvoření tlaku, aby byl přídavný materiál vtlačován do svarové zóny. Použití je velmi široké, např. 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. Základem je plastikační jednotka, vyhřívaný válec se šnekem nebo pístem, kde dojde k ohřevu přídavného materiálu na svařovací teplotu a jeho homogenizaci. Vytlačení přídavného materiálu do svarové zóny se děje pomocí přítlačné koncovky, u některých konstrukcí se přídavný materiál pěchuje ručně nebo za pomoci válečkového systému. [7]



Obr. 6. Svařování za pomoci ručního extrudéru [4]

2.3 Dodání tepla do svaru zářením

2.3.1 Svařování infračerveným paprskem

Tato metoda technologie svařování se zakládá na bezdotykovém ohřevu čelních ploch tvarovek a trubek za pomoci infračerveného záření. Jako zdroj infračerveného záření může být použito halogenových, fóliových nebo keramických zářičů. Díky bezkontaktnímu způsobu ohřevu vzniká při svařování jen malý výronek oproti svařování na tupo. Vysoká rychlost svařování a menší koncentrace nečistot patří mezi další výhody této svařovací techniky. [14]



Obr. 7. Díly svařované infračerveným paprskem [4]

2.3.2 Svařování laserem

Principem svařování laserem je ohřev materiálu spojovaných dílů pomocí přeměny zářivé energie na teplo. Této přeměny je dosaženo koncentrací velkého množství energie do tenkého paprsku. Plocha tohoto paprsku v místě dopadu je v řádech desetin milimetru čtverečních. Nejčastějším využitím této technologie je svařování fólií z PE, ABS, PC a PMMA. Laserové svařování se hojně využívá v automobilovém průmyslu a patří mezi spolehlivé a bezpečné metody. [14]



Obr. 8. Laserové svařování plastů. [9]

2.4 Dodání tepla do svaru třením

Svařování třením využívá teplo vznikající třením dvou povrchů, společně se roztaví a následně spojí svařované části. Stejně jako u termické vazebné techniky obě části jsou pak drženy pohromadě pod tlakem, až se vazba ochladí a zpevní. Nejběžnější techniky svařování za pomoci tření jsou vibrace, rotace a ultrazvukové svařování. [14]

2.4.1 Vysokofrekvenční (dielektrické) svařování

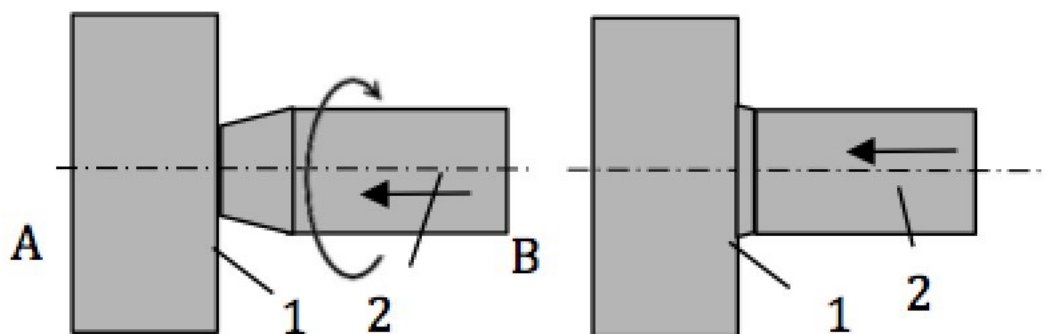
Základem vysokofrekvenčního, též dielektrického svařování je ohřev materiálu za pomoci vysokofrekvenčního proudu mezi dvěma elektrodami a současného působení tlaku. Tato svařovací metoda funguje na principu kondenzátoru, kdy horní a spodní deska jsou elektrodou a svařovaný plast plní funkci dielektrika. Základními parametry pro vysokofrekvenční svařování jsou doba působení elektrického pole, tlak a doba chlazení. Oblast použití je velmi široké, avšak nejčastěji se používá tato technologie na svařování vysoce pevných, nepromokavých krycích potahů z polyamidových nebo polyesterových tkanin s nánosem termoplastu. Dále fólií, tkané či netkané textilie, nejčastěji z polymerních vláken, laminované PVC nebo PUR. [14]



Obr. 9. Pevná nepromokavá plachta nákladního automobilu. [14]

2.4.2 Svařování třením (rotační)

Je to velmi efektivní proces pro spojení kruhových součástí. Díly jsou spojeny za pomoci rotace a tlaku. Jedna část je pevně uchycena a druhá pod tlakem rotuje. Díky teple, které vzniká pomocí tření ve spoji, dosahujeme velmi silného a pevného svaru. Rotační svařování je využíváno pro svařování dutých profilů, kuličkových plováků a filtrů v automobilovém průmyslu. [7]

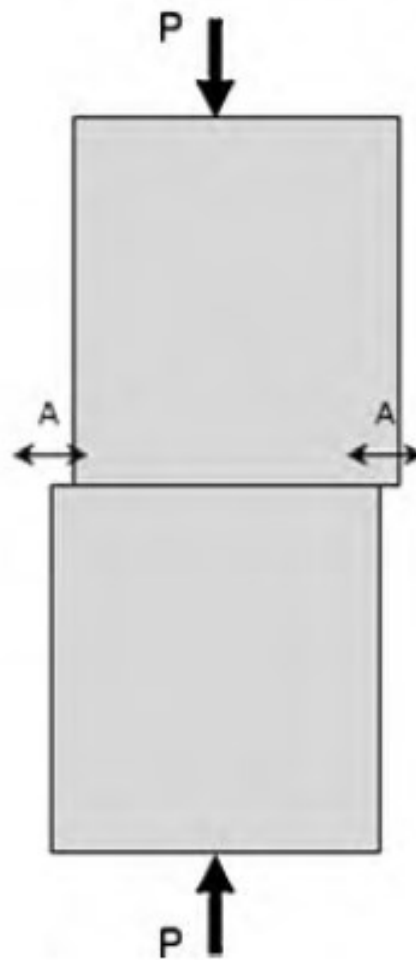


A – ohřev materiálu pomocí tření, B – svařovací fáze a chlazení, 1, 2 – svařované díly

Obr. 10. Princip rotačního svařování [7]

2.4.3 Vibrační svařování

Při vibračním svařování je jedna část fixována, zatímco druhá je vibrována paralelně s vazebnou linií při specifické frekvenci a amplitudě. Vibrace pokračují až do roztavení spárovaných povrchů. Díly jsou pak vyrovnány a stlačeny do konsolidace. Tato technika je obecně omezena na části s plochými spojovacími plochami a je většinou používána pro spojování relativně velkých částí, jako jsou sací potrubí a sestavy nárazníku pro automobily. Během počáteční fáze svařování, kdy existuje vysoký součinitel tření, mohou vznikat vysoké ohybové síly. Tato technika vyžaduje specializovaná upevnění a termoplast, který má být spojen, musí být dostatečně tuhý, aby se zabránilo deformaci během procesu svařování. Včasné studie hodnotící parametry procesu pro vibrační svařování ukázaly, že nejvýznamnějším parametrem ovlivňujícím pevnost vazby je vzdálenost průniku svaru, což je pokles rozměrů dílu v pravém úhlu ke svaru, v důsledku bočního odtoku roztaveného plastu. [7]



Obr. 11. Princip vibračního svařování [7]

2.4.4 Svařování ultrazvukem

Ultrazvukové svařování je vibrační svařování na ultrazvukové frekvenci. Ultrazvukové vibrace jsou přenášeny materiálem a tavení začíná probíhat na kontaktních plochách. Tato technika je nejčastěji používanou metodou pro svařování termoplastů. Nevýhodou ultrazvukového svařování je to, že má omezenou použitelnost na semikrystalické polymery. Doba svařování a amplituda vibrací jsou významnými parametry ovlivňujícími pevnost svaru. Významným parametrem je také svařovací energie. [6]

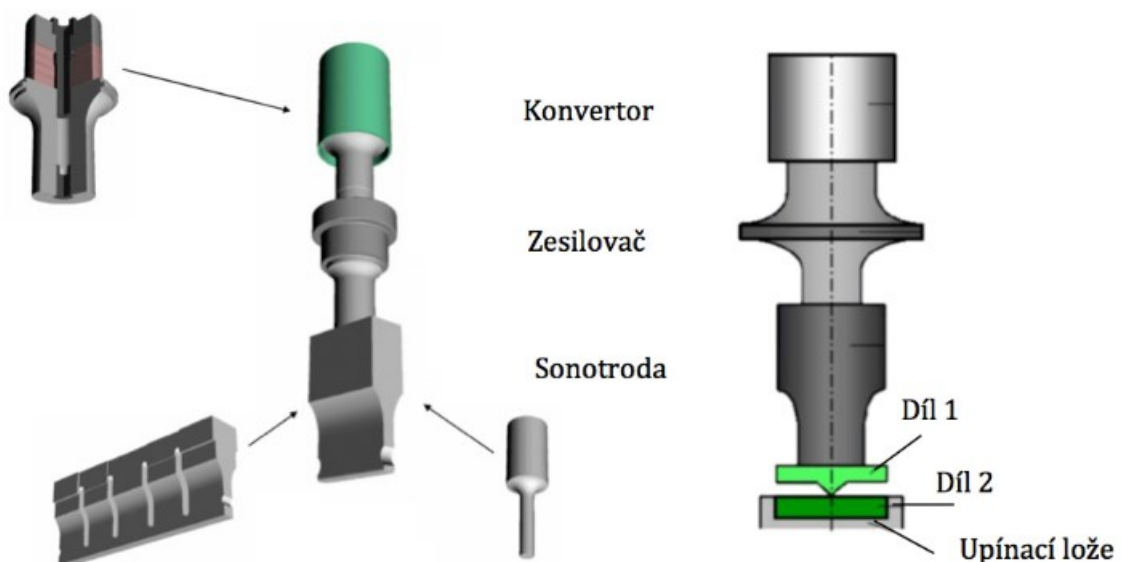
3 ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ

Ultrazvukové svařování patří mezi nejrozšířenější svařovací metody, využívá ultrazvukové energie při vysokých frekvencích (20-40 kHz), které jsou mimo rozsah lidského sluchu, aby se dosáhlo nízké amplitudy mechanických vibrací. Vibrace vytvářejí teplo na společném rozhraní svařovaných dílů, což má za následek tavení termoplastických materiálů a vytváření svarů po ochlazení. Ultrazvukové svařování je nejrychlejší známou svařovací technikou,

s dobou svařování kratší než jedna sekunda. Ultrazvukové vlny byly nejprve používány po druhé světové válce pro zařízení na detekci vad a pro čištění a odmašťování. Ultrazvukové svařování termoplastů bylo vyvinuto v roce 1963. Ultrazvukové svařování se používá jak pro měkké, tak i pro tuhé termoplasty a pro termoplastické kompozity. Kromě svařování se ultrazvuková energie běžně používá pro procesy, jako je vsazování kovů do plastových dílů nebo reformování termoplastických dílů pro mechanické upevnění podobných dílů. [6]

3.1 Popis svařovacího zařízení

Komponenty nezbytné pro ultrazvukové svařování jsou generátor nebo zdroj napětí, konvertor neboli převodník, zesilovač a sonotroda.



Obr. 12. Části svařovacího zařízení [4]

3.1.1 Generátor

Generátor převádí nízkonapětovou elektřinu na vysokofrekvenční a elektrickou energii vysokého napětí. Elektrický proud vstupuje do konvertoru, který obsahuje piezoelektrické keramické krystaly, které expandují a smršťují se při excitaci elektrickou energií. Elektrická energie je přeměněna na mechanickou energii a konvertor expanduje a stahuje se na frekvenci krystalů. Frekvence mohou být v rozsahu 15-70 kHz, nejčastěji používané frekvence v ultrazvukovém svařování však jsou 20 až 40 kHz. Amplituda od vrcholu ke špičce je vzdálenost, kterou se měnič během mechanických vibrací pohybuje tam a zpět. Zesilovač zvyšuje nebo snižuje amplitudu mechanických vibrací měniče v závislosti na požadované amplitudě pro svařování a přenáší vibrační energii na sonotrodu. [6, 12]

3.1.2 Konvertor

Konvertor též také převodník, je klíčovou součástí ultrazvukového svařovacího systému. Převádí elektrickou energii z generátoru na mechanické vibrace používané pro svařovací proces. Převodník se skládá z řady piezoelektrických keramických disků, které jsou vloženy mezi dva kovové bloky, obvykle titanové. Mezi každým z disků je tenká kovová deska, která tvoří elektrodu. Jak je sinusový elektrický signál přiváděn do měniče přes elektrody, disky se rozšiřují a stahují. Protože piezoelektrické kotouče mají špatné mechanické vlastnosti v tahu, je k zajištění správné polohy disků používán šroub. Tím je zajištěno, že disky zůstanou stlačené při roztahování a kontrakci. [6, 12]

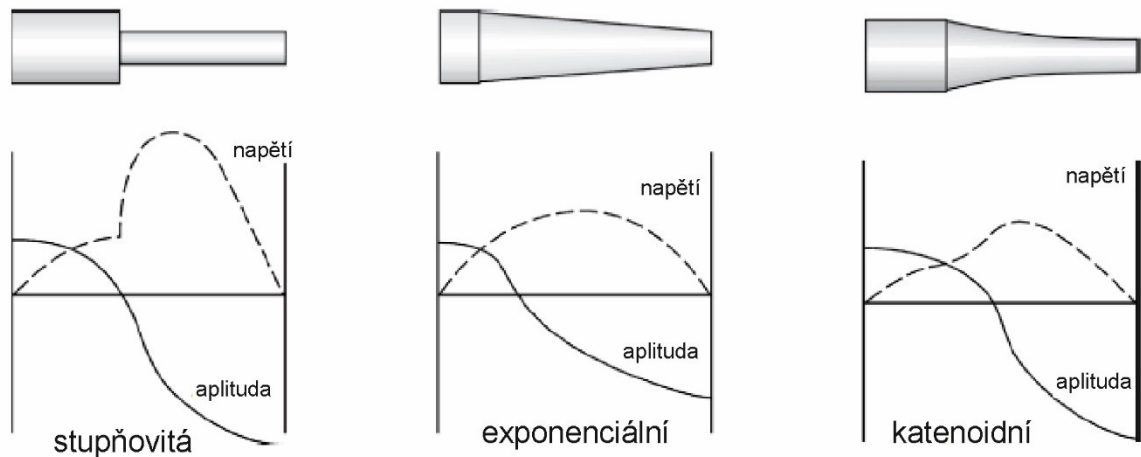
3.1.3 Zesilovač

Zesilovač zvyšuje nebo snižuje amplitudu mechanických vibrací měniče v závislosti na amplitudě požadované pro svařování a přenáší vibrační energii na sonotrodu. Primárním účelem zesilovače je zesílení mechanických vibrací vytvořených na konci snímače. Sekundárním účelem je poskytnout montážní bod pro připevnění sonotrody. [12]

3.1.4 Sonotroda

Svařovací hrot, známý také jako sonotroda, je nástroj, který přenáší mechanické vibrace na obrobek a je vyroben na míru tak, aby vyhovoval požadavkům aplikace. Amplituda sonotrody je určena pohybem od nejdělsí hodnoty k nejkratší hodnotě čelní plochy v kontaktu s dílem. Při svařování se dotýká jedné ze součástí a přenáší na ni vibrační energii. Pro

optimální přenos energie je konec sonotrody, který je v kontaktu s dílem, navržen tak, aby odpovídal geometrii součásti. [6, 12]



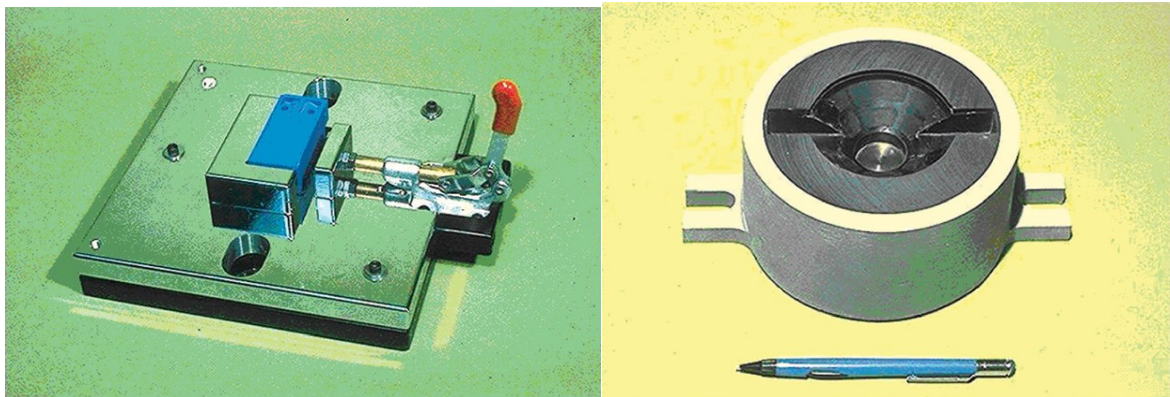
Obr. 13. Základní profily sonotrod [12]

Máme tři základní konstrukce profilů sonotrody: stupňovitá, exponenciální a katenoidní, jak je znázorněno na obr. 13. Stupňovitý profil se skládá ze dvou částí s různými průřezovými plochami. Přechod mezi sekcemi se nachází v blízkosti uzlového bodu. Kvůli náhlým změnám průřezu v uzlové rovině mají stupňovité sonotrody v této oblasti velmi vysokou koncentraci napětí a mohou selhat při nadměrné amplitudě. Sonotrody s exponenciálním profilem mají průřezovou plochu, která se mění exponenciálně s délkou. Hladký přechod rozděluje napětí na větší délku, čímž nabízí nižší koncentrace napětí, než je tomu u stupňovitých sonotrod. Obecně mají nižší ziskové faktory, takže se používají pro aplikace vyžadující nízké síly a nízké amplitudy. Katenoidní sonotrody jsou v podstatě stupňovité sonotrody s více postupným poloměrem přechodu přes uzlový bod. Nabízejí vysoké zisky s nízkou koncentrací napětí. Větší průměr sonotrody (typicky větší než 90 mm). Sonotroda by měla mít vyvážený a symetrický tvar. Materiály sonotrody jsou obvykle vysoce pevné hliníkové slitiny, titan nebo kalená ocel. Hliník je cenově výhodný materiál, který lze snadno opracovat a má vynikající akustické vlastnosti. Z těchto důvodů se používá pro svařování velkých dílů a výrobu prototypových sonotrod nebo sonotrod vyžadujících komplexní obrábění. Hliník není vhodný pro dlouhodobé výrobní aplikace kvůli jeho špatné tvrdosti povrchu a únavové vlastnosti. Může však být potažen chromem nebo niklem, aby se tyto problémy zmírnilo. Titan má dobrou povrchovou tvrdost, únavovou pevnost a vynikající akustické vlastnosti. Titan může být také potažen karbidem pro snížení opotřebení.

Ocelové sonotrody mohou být použity pouze pro aplikace s nízkou amplitudou díky své nízké únavové pevnosti. [12]

3.1.5 Upínací přípravky

Upínací přípravky jsou potřebné pro vyrovnání dílů a jejich držení během svařování. Díly musí být udržovány vodorovně s koncem sonotrody tak, aby během svařování byl udržován rovnoměrný tlak a proces byl opakovatelný. Musí také udržet části stacionární k účinnému přenosu ultrazvukové energie. Držáky jsou obecně vyrobeny z hliníku nebo nerezové oceli. Naopak přípravky jsou vyrobeny z pružných materiálů, které způsobují menší otisk na svařovaný díl, ale také absorbují více energie. Změny plochosti nebo tloušťky v některých tvarovaných dílech, které by jinak mohly zabraňovat stálému svařování, mohou být uloženy v materiálech potažených elastomerním materiálem. Gumové pásy nebo litý a vytvrzený silikonový kaučuk umožňují, aby díly byly v souladu s normami statického zatížení, ale působí jako tuhé zádržné systémy při vysokofrekvenčních vibracích. Gumová podšívka může také pomoci absorbovat náhodné vibrace, které často vedou k popraskání nebo roztavení částí na místech vzdálených od oblasti spoje. PTFE, epoxid, korek a kůže jsou také používány jako tlumící materiály. Při výrobě těchto přípravků jsou důležitými faktory snadné nakládání a vyhození svařovaných součástí. [12]



Obr. 14. Upínací přípravky pro ultrazvukové svařování [12]

3.1.6 Typy ultrazvukových svářeček

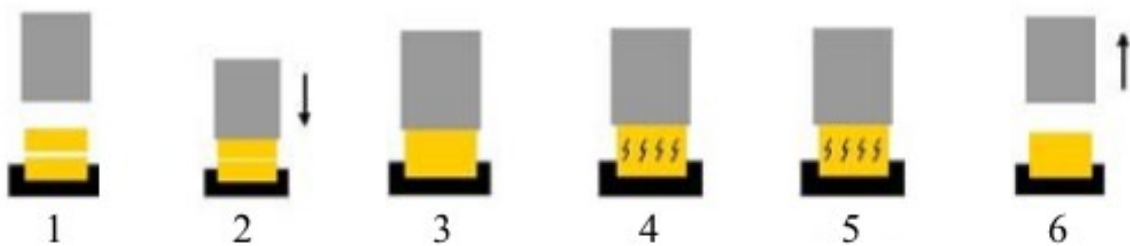
V závislosti na zamýšleném rozsahu provozu je k dispozici řada různých konfigurací svařovacích strojů. Integrovaný stroj obsahuje veškeré zařízení v kusové jednotce a obvykle vyžaduje pouze připojení na stlačený vzduch a napájení. Tyto stroje se nejčastěji používají pro ruční svařování a vykládání. Komponentový systém je sestaven z vyměnitelných napájecích zdrojů, akčních členů a stojanů a je přizpůsoben pro každou specifickou aplikaci. Ruční systém (obr. 2.14) se skládá z napájecího zdroje a konvertoru, který je určen pro ruční obsluhu. Používají se v jednoduchých aplikacích, kde konzistence a vzhled nejsou zvláště důležité, jako je bodové svařování plechu. Napájecí zdroj obsahuje všechny ovládací prvky a monitorovací zařízení, s výjimkou ručně ovládaného spouštěcího spínače, který je namontován na převodníku. [12]



Obr. 15. Ultrazvukové zařízení integrované a ruční [12]

3.2 Technologický postup svařování ultrazvukem

Teplo, které vzniká z vysoko-frekvenčních mechanických kmitů slouží ke svařování plastů pomocí ultrazvuku. Jako první se elektrická energie přemění na vysokofrekvenční mechanický pohyb, poté spolu s působící silou vytváří frikční teplo na svařovacích plochách svařovaných materiálů. Plastický materiál se taví a vzniká tak molekulový svar mezi součástmi. [4]



Obr. 16. Základní princip ultrazvukového svařování [4]

Krok 1: Umístění dvou spojovaných termoplastů do lůžka

Krok 2: Sonotroda se dostává do kontaktu s horním dílcem svařovaného materiálu

Krok 3: Působení kontrolovaného tlaku na obě spojované součásti proti lůžku

Krok 4: Následuje svařovací proces, kdy sonotroda vertikálně vibruje s frekvencí 15-75 kHz za sekundu, ve vzdálenosti několika mikronů. Vibrační energie je nasměrována na stykové plochy svařovaných dílců, kde vytváří frikční teplo. Při dosažení bodu tání na rozhraní spojovaných dílů se kmitání zastaví a následuje fáze chladnutí.

Krok 5: Přítlačný cyklus udržuje sevření součásti při tuhnutí tak, aby došlo ke spojení materiálů, zlepšení pevnosti a neprodyšnosti svaru.

Krok 6: Vrácení sonotrody do původní polohy nastává, jakmile dojde ke ztuhnutí spojených plastů. Posledním krokem je vyjmutí svařené součásti z lůžka. [4]

3.2.1 Procesní parametry

Důležitými procesními parametry při ultrazvukovém svařování jsou doba svařování, kontrolovaný tlak nebo síla, přítlačný cyklus (doba určená pro chlazení a tuhnutí po zastavení vibrací), přidržovací síla, spouštěcí síla (síla působící na součást před zahájením ultrazvukového svařování), úroveň výkonu a amplitudy vibrací. Před spuštěním ultrazvukových vibrací musí být sonotroda správně umístěna v kontaktu s horní částí, svařování nemůže

být úspěšně provedeno, pokud se sonotroda dotkne části po zahájení vibrací. Frekvence vibrací je obvykle 20 nebo 40 kHz a závisí na použité ultrazvukové svářečce. Ve výrobě jsou běžné vysoké amplitudy a krátké doby svařování. [12]

3.2.1.1 Svařovací čas

Svařovací čas je doba, po kterou vibruje sonotroda při svařovacím cyklu a obvykle se rovná času, po který je sonotroda v kontaktu se svařovaným dílem. Zvýšení svařovacích časů obecně zvyšuje pevnost svaru až do dosažení optimálního času, další zvýšení má za následek snížení pevnosti svaru nebo pouze mírné zvýšení pevnosti. Zvýšení času svařování zvyšuje rozptýlení energie ve svařovaných materiálech. Pokud jsou časy svařování příliš dlouhé, dochází k nadměrnému toku taveniny, což snižuje pevnost svaru. [12]

3.2.1.2 Svařovací síla

Svařovací tlak poskytuje statickou sílu nutnou ke spojení svařovacího můstku s díly tak, že do nich mohou být přivedeny vibrace. Toto statické zatížení zajišťuje, že části jsou drženy pohromadě, když roztavený materiál ve svaru tuhne během části přitlačného cyklu. Stanovení optimálního tlaku je nezbytné pro dobrou kvalitu svaru. Příliš nízké svařovací tlaky mají obvykle za následek špatný přenos energie nebo neúplný průtok taveniny, což vede

k dlouhým svařovacím cyklům. Zvýšení svařovací síly nebo tlaku snižuje dobu svařování nezbytnou k dosažení stejného posunu. Pokud je tlak příliš vysoký, větší objem taveniny má za následek vyrovnání molekul ve směru proudění a sníženou pevnost svaru, jakož i možnost otlacení dílů. V extrémních případech, pokud je tlak vysoký vzhledem k amplitudě hrotu sonotrody, může dojít k přetížení a zablokování sonotrody. Většina ultrazvukového svařování se provádí při konstantním tlaku nebo síle. U některých systémů může být síla během cyklu měněna. Snížený svařovací tlak nebo síla v průběhu svařovacího cyklu snižuje množství materiálu vytlačeného ze spoje, umožňuje více času pro intermolekulární difúzi, snižuje molekulární orientaci a zvyšuje pevnost svaru. Pro materiály, jako je polyamid, které mají nízkou viskozitu taveniny, to může výrazně zlepšit pevnost svaru. [12]

3.2.1.3 Frekvence

Většina ultrazvukového svařovacího zařízení pracovala na frekvenci 20 kHz až do počátku 80. let; 30 a 40 kHz frekvence jsou nyní běžné, kromě nízkofrekvenčních (15 kHz) zařízení

pro semikrystalické materiály. Mezi výhody vysokofrekvenčních zařízení patří menší hluk, menší velikost komponentů (svářečky o výkonu 40 kHz mají poloviční velikost než svářečky o výkonu 20 kHz), zvýšená ochrana dílů díky sníženému cyklickému namáhání a nevybíravé vytápění v oblastech mimo společný prostor, lepší ovládání mechanické energie, nižší svařovací síly a rychlejší zpracování. Nevýhodou je snížená výkonnost díky malé velikosti součástí a obtížné provádění svařování na dálku v důsledku snížení amplitudy. Ultrazvukové stroje s vyšší frekvencí se obecně používají pro malé, jemné komponenty, jako jsou elektrické spínače. U svářeček o výkonu 15 kHz lze většinu termoplastů svařovat rychleji a ve většině případů s menší degradací materiálu než při 20 kHz. Části okrajově svařované při 20 kHz, zejména ty, které jsou vyrobeny z vysoce výkonných technických pryskyřic, mohou být účinně svařeny při 15 kHz. Na těchto nižších frekvencích mají výstupky delší rezonanční délku a mohou být větší ve všech rozměrech. Další významnou výhodou použití 15 kHz je, že dochází k podstatně menšímu útlumu termoplastickým materiálem, což umožňuje svařování mnoha měkčích plastů a ve větších vzdálenostech, než je možné při použití vyšších frekvencí. [12]

3.2.1.4 Amplituda

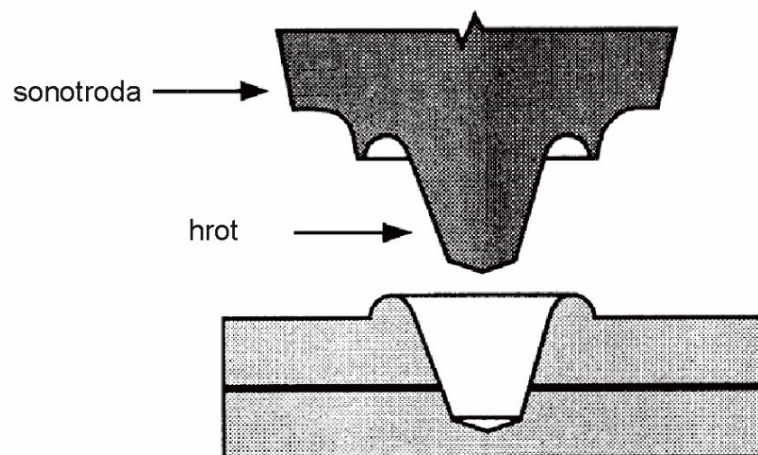
Aplikované napětí je úměrné vibrační amplitudě sonotrody, takže ohřev svarového rozhraní může být řízen změnou amplitudy vibrací. Amplituda je důležitým parametrem při regulaci rychlosti svařování termoplastů. Při vysokých amplitudách se svarové rozhraní zahřívá vyšší rychlostí, teplota se zvyšuje a roztavený materiál se propouští vyšší rychlostí, což vede ke zvýšenému molekulárnímu vyrovnání, výrazné tvorbě tepla a nižší pevnosti svaru. Pro zahájení tavení jsou nezbytné vysoké amplitudy. Příliš nízké amplitudy způsobují nesejtnou iniciaci taveniny a předčasné tuhnutí taveniny. Jakmile je amplituda zvýšena, větší množství vibrační energie je rozptýleno v termoplastickém materiálu a části, které jsou svařovány, vykazují větší napětí. Při použití konstantní amplitudy v průběhu svařovacího cyklu se obecně používá nejvyšší amplituda, která nezpůsobuje nadměrné poškození svařovaných částí. Pro semikrystalické polymery, jako je PE a PP, je účinek amplitudy vibrací mnohem větší než u amorfních polymerů, jako je ABS a polystyren. To je pravděpodobně způsobeno větší energií potřebnou pro tavení a svařování semikrystalických polymerů. Amplitudu lze nastavit mechanicky změnou zesilovače nebo sonotrody, nebo elektricky změnou napětí dodávaného do měniče. V praxi jsou mechanicky prováděna velká amplitudová nastavení, zatímco elektrické nastavení je prováděno elektricky. Materiály s

vysokou teplotou tavení, vzdálenější svary a semikrystalické materiály, obecně vyžadují vyšší amplitudy než amorfni materiály a svary blízké okolí. Typické amplitudové rozsahy jsou 30-100 μm pro amorfni plasty a 60-125 μm pro krystalické plasty. [12]

3.2.2 Metody svařování ultrazvukem

3.2.2.1 Bodové svařování

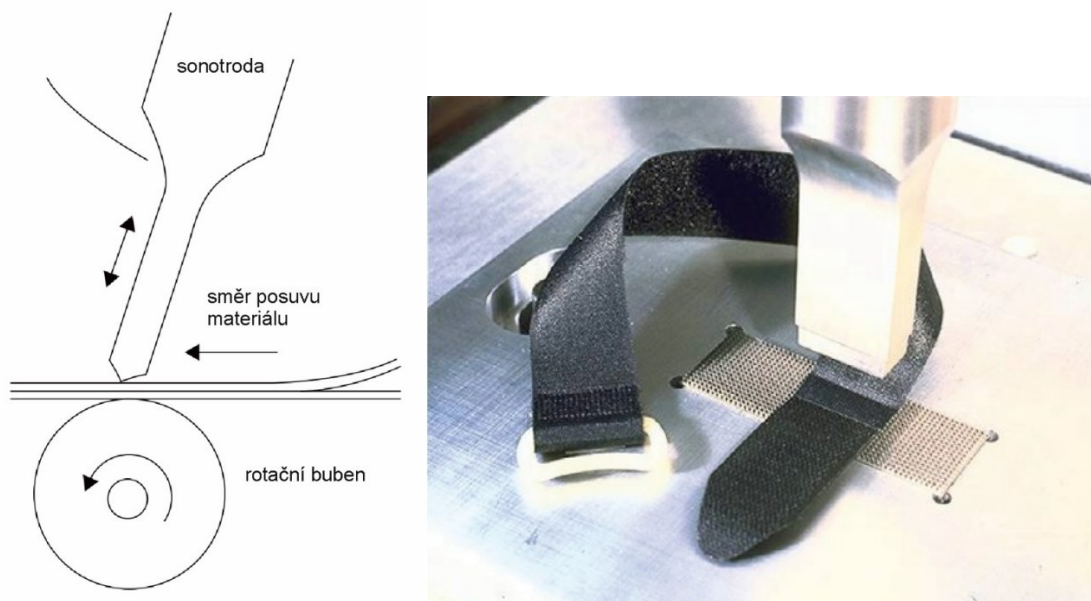
Ultrazvukové bodové svařování spojuje dvě termoplastické části v lokalizovaných bodech bez předvrtaného otvoru nebo energetického regulátoru. Vytváří silný konstrukční svar a je vhodný zejména pro velké díly nebo díly s komplikovanou geometrií nebo těžko dosažitelnými spojovacími plochami. Bodové svařování se používá ke svaření fólií z extrudovaného nebo litého termoplastu. Při bodovém svařování má sonotroda špičku (hrot), která se nataví přes horní část do spodní části do předem určené hloubky, když se aplikují ultrazvukové vibrace. Když vibrace ustanou, tavenina z obou částí spolu prochází a tvoří svar s horní stranou opatřenou vyvýšeným kroužkem vytvořeným svařovací špičkou. Spodní vrstva spoje bodového svařování má hladký vzhled. Bodové svařování může být prováděno pomocí ručních pistolí, jednostranných nebo dvouhlavých svářeček, nebo pomocí svařovacích systémů, které jsou složeny z mnoha bodových svařovacích hlav, které zvládají několik svařovacích operací současně. [6, 12]



Obr. 17. Princip bodového svařování [6]

3.2.2.2 *Ultrazvukové svařování folií a tkanin*

Tkaniny a fólie používané v celé řadě zařízení, jako je zdravotnický, obalový a textilní průmysl, lze svařovat pomocí ultrazvukové energie. Zde je popsáno kontinuální ultrazvukové spojení. V kontinuálním ultrazvukovém spojování jsou dvě nebo více vrstev materiálu sestaveny jejich průchodem mezerou mezi vibrační sonotrodou a rotačním bubnem nebo kovadlinou. Rotační buben je obvykle vyroben z kalené oceli a na povrchu má vyvýšené plochy. Ultrazvukové vibrace a komprese mezi sonotrodou a bubnem vytvářejí třecí teplo v místě, kde se roh dotýká materiálů. Ke svaření dochází pouze v těchto bodech, což vytváří měkkost, prodyšnost a absorpci ve svařovaných materiálech. Tyto vlastnosti jsou důležité pro nemocniční šaty, sterilní oděvy, pleny a další aplikace používané v prostředí čistých prostor a v lékařském průmyslu. Ultrazvukové svařování využívá mnohem méně energie než tepelné spojování, které používá ohřáté rotační bubny pro spojení materiálů dohromady. Sonotroda může být také uzpůsobena pro provádění operace řezání. Typické použití této svařovací technologie zahrnují filtry, přezky, poutka na opasek, podprsenky a vertikální žaluzie. Tkaniny a fólie vhodné pro ultrazvukové svařování obsahují termoplastické materiály s podobnými teplotami tání a kompatibilní molekulární strukturou. Příznivé vlastnosti zahrnují rovnoměrnou tloušťku, vysoký koeficient tření a minimálně 65% obsah termoplastu. Skutečná struktura materiálu má také významný vliv na svařitelnost. Hlavními kategoriemi termoplastických textilií a fólií jsou tkaniny, netkané textilie, úplety, fólie, potažené materiály a lamináty. Faktory, jako je hustota příze, těsnost vazby, pružnost a styl pleteniny, mohou mít vliv na kvalitu ultrazvukového svaru. Termoplastické tkaniny a fólie vyrobené z polyesteru, nylonu, PP a PE jsou vhodné pro ultrazvukové zpracování. [6, 12]



Obr. 18. Ultrazvukové svařování folií a tkanin [6]

3.3 Materiály vhodné k ultrazvukovému svařování

Plasty s vyššími teplotami tavení nebo skelného přechodu vyžadují pro svařování více ultrazvukové energie. Amorfnní plasty mají náhodnou molekulární strukturu a postupně se změkčují v širokém teplotním rozsahu. Dosahují skelného přechodového stavu, pak tekutého, tuhnutí je také postupné, takže nedochází k předčasnému tuhnutí. Amorfnní polymery účinně přenášejí ultrazvukové vibrace a mohou být svařovány širokým rozsahem podmínek zpracování. Je-li potřeba zajistit hermetické spojení součástí, lze toho snadněji dosáhnout pomocí amorfnních materiálů. Semikrystalické plasty jsou charakterizovány oblastmi uspořádané molekulární struktury. K přerušení tohoto uspořádání je třeba vysokých teplot. Bod tání je vysoký a dochází k rychlému tuhnutí, jakmile teplota mírně poklesne. Když jsou semikrystalické molekuly v pevném stavu, absorbují velkou část ultrazvukových vibrací, místo aby je přenášely na styčné rozhraní, takže dochází k vytvoření velkého množství tepla a pro svařování je nutná vysoká amplituda. [6]

	ABS	ABS/polycarbonate	Acetal	Acrylic	Cellulose acetate	ECTFE	LCP	Polyamide	PES	PPO	PC	PC/polyester	PBT	PET	PEEK	PEI	PE	PPS	PP	Polystyrene	Polysulfone	PVC	PTFE	PVDF	SAN
ABS	■	■																		○					○
ABS/polycarbonate	■	■		○							■	○													
Acetal			■																						
Acrylic	■	○		■							■	○													○
Cellulose acetate					■																				
ECTFE						■																			
LCP							■																		
Polyamide								■																	
PES									■																○
PPO										■	○										■				
PC		■		■						○	■	○													
PC/polyester		○		○							○	■	○												
PBT												○	■												
PET													■												
PEEK														■											
PEI															■										
PE																■									
PPS																	■								
PP																		■							
Polystyrene	○								■												■				○
Polysulfone																						■			
PVC																							■		
PTFE																								■	
PVDF																								■	
SAN	○			○					○												○				■

■ dobrá svařitelnost
 ○ za určitých podmínek svařitelné

Obr. 19. Tabulka svařitelnosti plastů [6]

4 PROGRAM SIEMENS NX

Siemens NX je modulární systém CAD/CAM/CAE pro podporu činností v konstrukci a výrobě. Umožňuje plnou asociativitu všech spolupracujících modulů, postavenou nad jednotnou grafickou objektově orientovanou databází. To znamená, že již v určité fázi rozpracovanosti modelu lze současně provádět pevnostní a kinematické výpočty, případně i další analýzy a simulace, modelování jednotlivých dílů i celých sestav, tvorbu výkresové dokumentace, programování NC obráběcích a měřících strojů, simulaci obrábění, kontrolu kvality, správu dat a projektů a integraci do podnikového informačního systému. [16]

4.1 Použití

4.1.1 CAM

NX CAM poskytuje komplexní a integrované funkce NC programování v jediném systému. To umožňuje použití konzistentních 3D modelů, dat a procesů pro bezproblémové propojení plánování a provozu obchodu s digitálním vláknem. Můžeme optimalizovat a automatizovat NC programování při současném zkrácení doby cyklu pomocí výkonných nástrojů pro konkrétní aplikace. Od 2,5-osého obrábění a výroby forem až po současné 5-osé frézování a velkoobjemovou výrobu umožňuje NX používat jeden software CAM pro rychlejší výrobu lepších dílů. [16]

4.1.2 Design

NX poskytuje výkonný integrovaný počítačový design (CAD), který umožňuje bezproblémovou výrobu - od modelů digitálních součástí až po hotové produkty. Můžeme rychle připravit 3D modely pro programování číslíkového řízení (NC), ověřovat vyrobiteľnost a zlepšovat kvalitu dat pomocí komplexních nástrojů pro návrh. Asociativita k modelu digitální části spojuje všechny provozní fáze, což umožňuje rychlou implementaci změn návrhu. Programováním pomocí digitálního dvojče celého nastavení vaší úlohy, včetně obrobku, upínacích přípravků a obráběcích strojů, a nástrojů eliminuje výrobní chyby a zvyšuje provozuschopnost stroje. [16]

4.1.3 Kontrola kvality

Automatizuje kontroly kvality tak, aby splňovaly náročné požadavky na kvalitu výrobku a přesnost rozměrů. Integrací CMM inspekčního programování, provádění dílen a analýzou

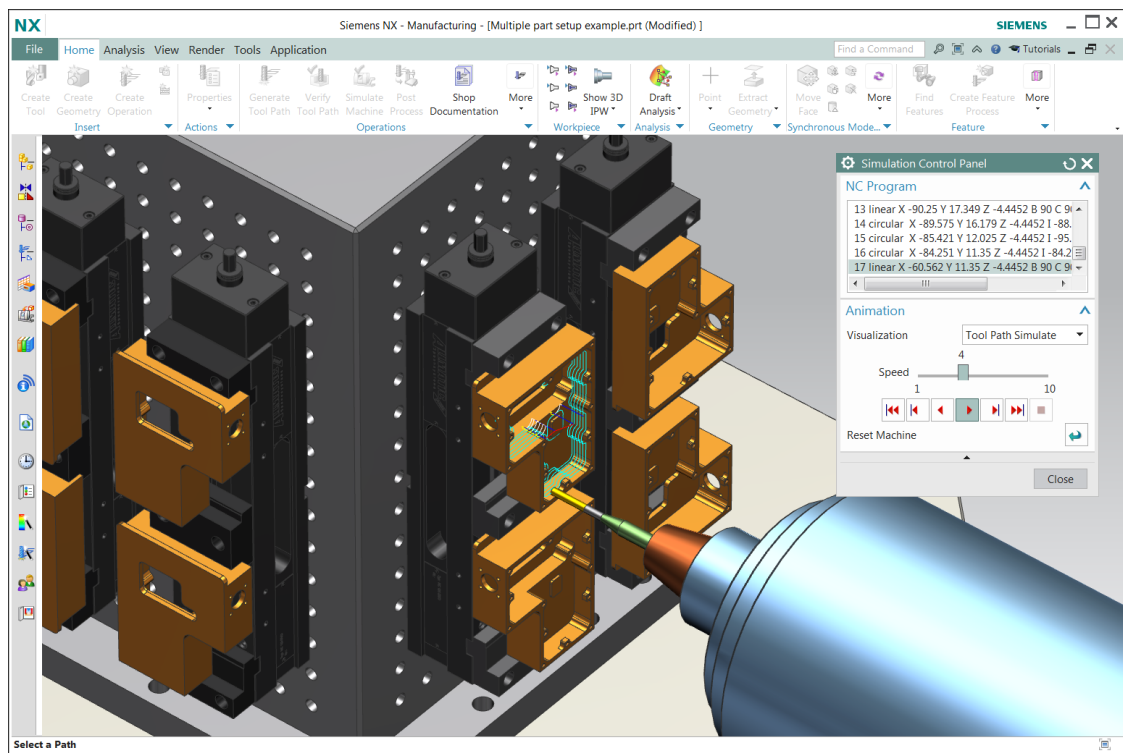
naměřených dat můžete vytvořit efektivní proces řízení kvality založený na datech. Toto automatizované řešení s uzavřenou smyčkou umožňuje plynulé řízení procesu, a to umožňuje dodávat vysoce kvalitní produkty. [16]

4.1.4 Aditivní výroba

Siemens NX poskytuje všechny potřebné funkce, od návrhu až po tisk při ověření v jediném integrovaném systému. Siemens NX je industrializace výroby aditiv, takže můžete nejen prototypovat, ale také vyrábět průlomové produkty touto novou technologií. [16]

4.1.5 Robotizace a automatizace

Pokročilá robotika zvyšuje produktivitu výroby dílu - od polotovaru až po hotový díl. Robotické obrábění poskytuje větší flexibilitu, která může výrazně zvýšit efektivitu ve výrobě. Pomocí NX CAM lze naprogramovat roboty na obrábění velkých dílů a automatizovat úlohy obrábění, které jsou obvykle prováděny manuálně. To umožňuje rozšířené možnosti obrábění, zkrácení doby cyklu a zlepšení kvality dílů. Pomocí NX můžete také programovat roboty, aby mohly provádět operace, což umožňuje řídit plně automatizované pracovní linky. [16]



Obr. 20. Simulace obrábění v programu NX [16]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je srovnání pevnosti spojů při ultrazvukovém svařování na vybraných polymerních materiálech. Nejprve budou vyrobeny zkušební vzorky pro různé varianty a materiály ultrazvukového svařování. Na části z nich budou frézovány drážky různých rozměrů a hloubek, poté bude provedena kompletace svařovacího přípravku pro ultrazvukové svařování a optimalizace procesu svařování. Na závěr budeme porovnávat únosnost jednotlivých svarů pomocí tahové zkoušky a také hodnocení spojů na základě použitých materiálů.

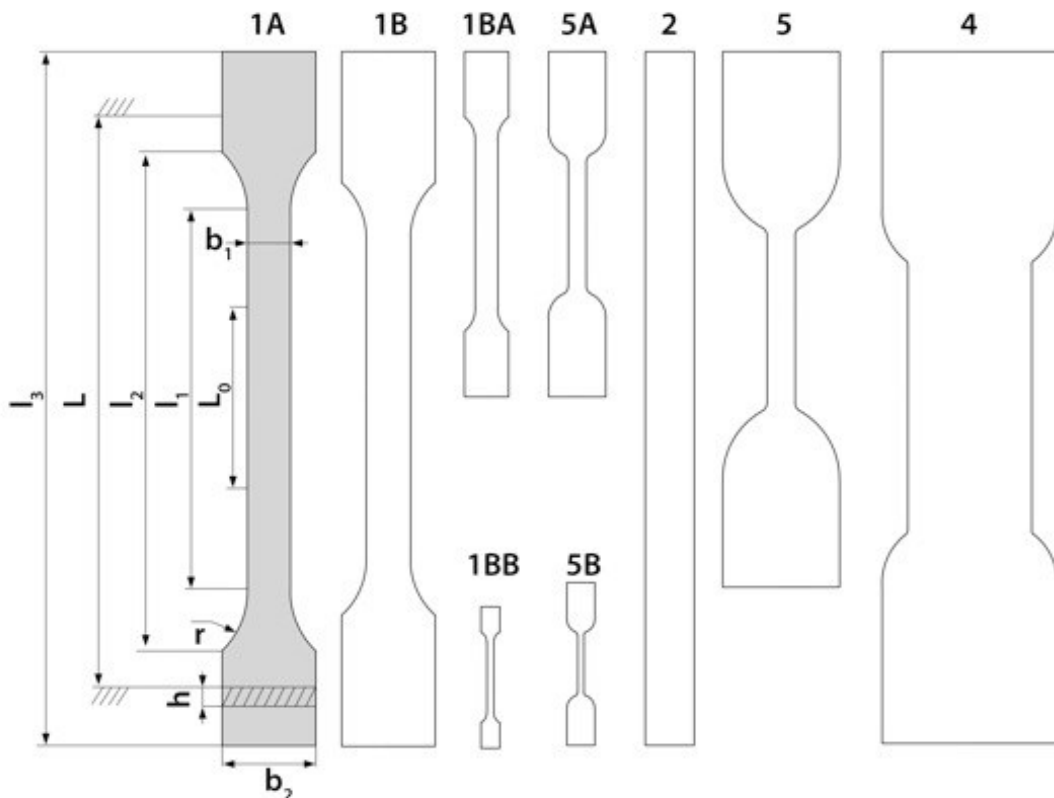
- 1) příprava vzorků na vstřík stroji
- 2) tvorba programu na frézce
- 3) návrh a výroba přípravku pro frézování drážek
- 4) experimentální svařování vzorků
- 5) vyhodnocení výsledků, statistické zpracování

6 EXPERIMENT

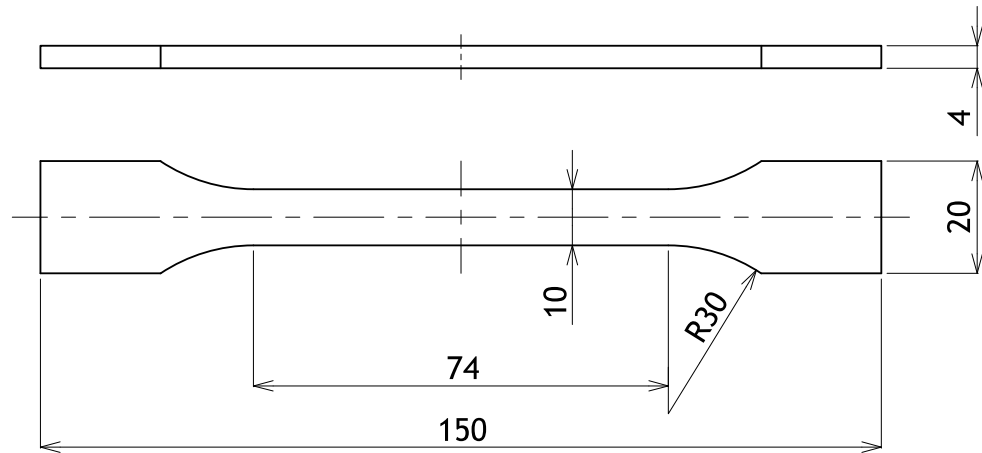
V této části se budeme zaměřovat na proces ultrazvukového svařování. Nejprve je potřeba upravit vzorky zkušebních tělísek, navrhnout a vyrobit držák zkušebních tělísek pro následné frézování. Poté byly na zkušebních těliscích vyfrézovány drážky různých parametrů, které mají za úkol vést energii do svaru. V další části následuje optimalizace svařovacích procesů a samotné svařování vzorků materiálů s drážkami na povrchu, ať už z totožného materiálu, tak i kombinace materiálů dohromady. Hlavním ukazatelem vlivu drážek na kvalitu spoje je únosnost zjištěná pomocí tahové zkoušky. Nakonec jsou diskutovány výsledky vlivu drážek na základě únosné síly při jednoosém tahu.

6.1 Příprava zkušebních vzorků

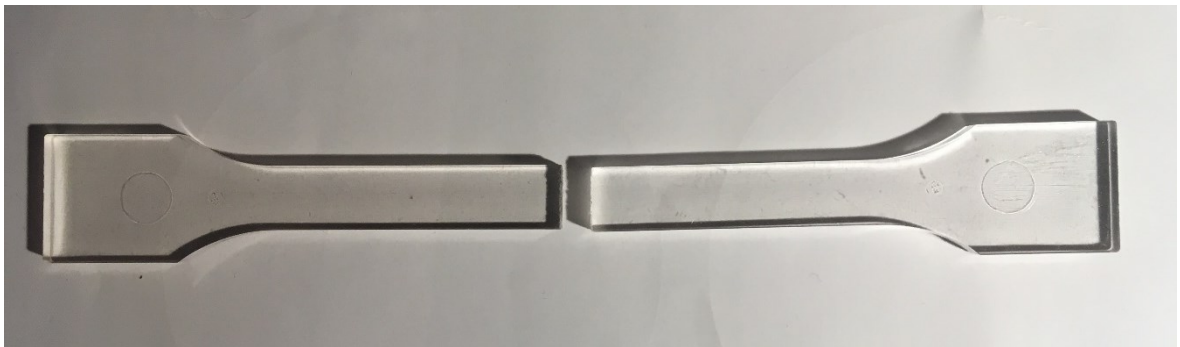
Zkušební vzorky byly vyrobeny vstřikovací technologií na stroji Arburg Allrounder 470E za pomoci formy pro výrobu normalizovaných zkušebních těles termoplastů. Tvar a rozměry jsou dány normou ČSN EN ISO 527-1, tvar 1A.



Obr. 21. Normované zkušební těleso [4]



Obr. 22. Rozměry zkušebního tělíska [15]



Obr. 23. Nakráčeny vzorek PMMA

6.2 Použité materiály

Na výrobu zkušebních vzorků bylo použito několik materiálů, které jsou charakterizovány strukturou, ale také různými mechanickými vlastnostmi. Pevnost svarového spoje závisí na několika aspektech, ať už na typu svařovaného polymeru, obsahu a podílu plniv, tak také na jeho reologických vlastnostech. Reaktoplasty se nesvařují, protože nejsou tavitelné po zpracování, tzn. nelze je převést do plastického stavu. Zvolené materiály pro svařování uvádím níže. [15]

6.2.1 Polymethylmethakrylát (PMMA ALTUGLAS)

Jedná se o polyakrylát odvozený od kyseliny akrylové. Tento nejznámější polymethylmethakrylát (PMMA) vzniká polymerací metylmethakrylátu, esteru kyseliny metakrylové. Používá se zejména ve tvaru desek jako tzv. organické sklo. Vyrábí se technologií polymerace kontinuálně mezi ocelovými pásy nebo v bloku diskontinuálním způsobem mezi skleněnými deskami. Charakteristickou vlastností PMMA je prostupnost světelného záření větší než 90 % v celém rozsahu spektra. Mezi další důležité vlastnosti patří odolnost proti povětrnostním vlivům a UV záření. Dále se vyznačuje velmi dobrou tvarovou pamětí při ohřevu nad teplotu skelného přechodu. Ta je zhruba 110 °C, materiál není náchylný na kríp, za běžných podmínek je křehký a odolává teplotnímu zatížení až 100 °C. [15]



Obr. 24. Zkušební vzorek PMMA

6.2.2 Akrylonitril-butadien styren (ABS)

ABS je termoplast, sestávající ze styrenového monomeru s přidavkem akrylonitril-monomeru a butadienového monomeru. Je to butadienová složka (syntetická pryž používaná hlavně v pneumatikách), která je z velké části zodpovědná za pevnost a odolnost plastu proti nárazu. Jde o amorfni termoplast s nízkou absorpcí vlhkosti a s dobrými zvukotěsníci vlastnostmi. Vyznačuje se vysokou rázovou houževnatostí i při nízkých teplotách. Dále má výbornou chemickou odolnost.

Používá se jako konstrukční plast ve strojírenství, automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, při stavbě lodí a ve spotřebním průmyslu. Můžeme ho nalézt také ve formě kompozitních materiálů, polymerů ztužených např. skleněnými vlákny, které vykazují další zvýšení mechanických vlastností. [15]



Obr. 25. Zkušební vzorek ABS

6.2.3 Polyamid (PA6)

Polyamidy obsahují v hlavním řetězci amidové skupiny. Mezi nejvýznamnější patří polyamid 6 a polyamid 6,6, který vzniká kondenzační polymerací hexametylendiaminu obsahující 6 uhlíků a kyseliny adipové také se 6 uhlíky. Příčinou vytváření vodíkových můstků mezi makromolekulami, a tedy velmi pevných mezimolekulárních vazeb, jsou silně polární amidové skupiny. Polyamidy jsou používány jako konstrukční plasty, mají velmi dobré mechanické vlastnosti, jako je pevnost, tvrdost, houževnatost a odolnost proti opotřebení. Nevýhodou je absorpce vody, velmi dobře však odolávají účinkům pohonných hmot, olejů a roztoků alkalií.

Používají se pro výrobu kluzných uložení a ložisek, kladky, filtry, řemenice, ale také pro výrobu ozubených kol kancelářských a měřících strojů. V případě vyztužení lze použít na pedály, kryty motorů, ručních vrtaček apod. [15]



Obr. 26. Zkušební vzorek PA6

6.2.4 Polypropylen (PP)

Jedná se o termoplast s krystalickou strukturou. Vyznačuje se relativně vysokou pevností, tvrdostí a tuhostí, dále také odolností proti oděru. Svými vlastnostmi je podobný polyethylenu, ale má nižší hustotu, vyšší teplotu tání a lepší mechanické vlastnosti. Má nejnižší hustotu ze všech nelehčených plastů. Odolává polárním rozpouštědlům, solím, kyselinám a zásadám. Uplatňuje se jako konstrukční plast. Při tahové zkoušce se za mezí kluzu vytváří na tělese lokální zúžení, které se postupně šíří podél části tělesa. Tento pochod se nazývá dloužení. Díky vyšší teplotě tání má polypropylen daleko lepší tvarovou stálost za zvýšených teplot.

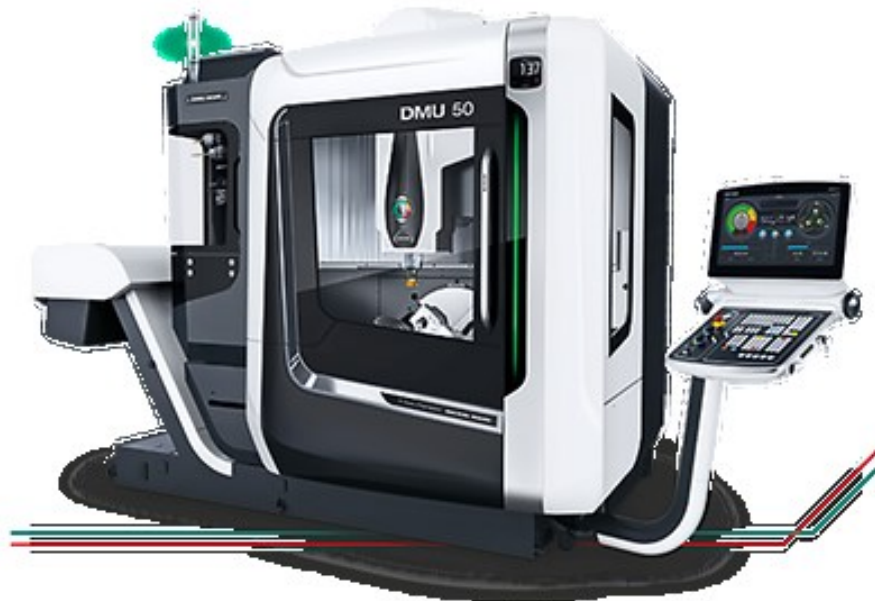
Z polypropyleny se vyrábějí nejčastěji předměty spotřebního průmyslu: např. fólie, misky a jiné obalové materiály, vlákna, lahve a další duté předměty. Používá se také pro výrobu trubek, armatur, spoilerů, vrtulí ventilátorů, nádrží, kanalizačních systémů a dílů klimatických jednotek. Odolnost vůči sterilizačním teplotám umožňuje také jeho použití ve zdravotnické technice. [15]



Obr. 27. Zkušební vzorek PP

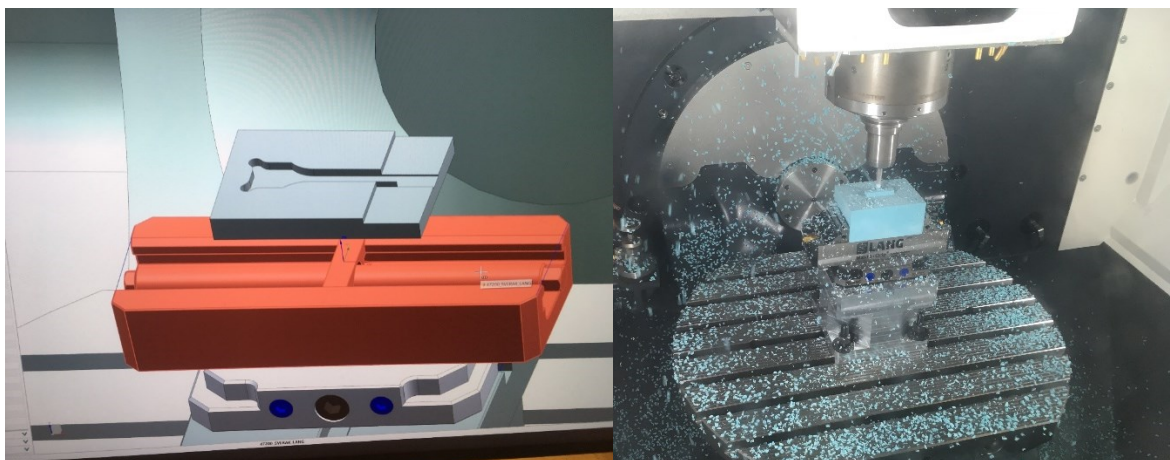
6.3 Přípravek pro frézování

Nejprve bylo nutné navrhnout a vyrobit přípravek pro uchycení zkušebních vzorků do svěráku obráběcího centra. Přípravek byl navrhnout v programu NX 12 a následně vyfrézován na obráběcím centru DMG MORI DMU 50.

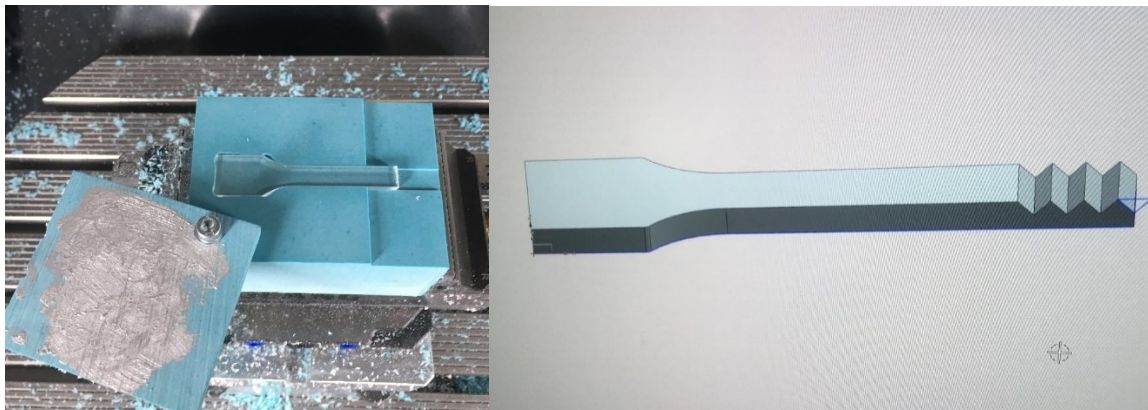


Obr. 28. Frézovací centrum [18]

Pětiosé obráběcí centrum DMG MORI DMU 50 dosahuje rychlostí až 20 000 ot/min, součástí je naklápěcí rotační stůl pro pětiosé simultánní obrábění, jehož nosnost je až 300 kg a umožňuje tak obrábět velmi těžké polotovary. Součástí stroje je zásobník na nástroje se 30ti pozicemi. Komplexní systém chlazení zajišťující maximální dlouhodobou přesnost a snižuje opotřebení nástrojů. Přímý pohon je zajištěn kuličkovými šrouby. Obsahuje systém přímého měření dráhy ve všech osách pro vyšší přesnost obrábění. Umožňuje obrábět polotovar výšky až 450 mm. [18]



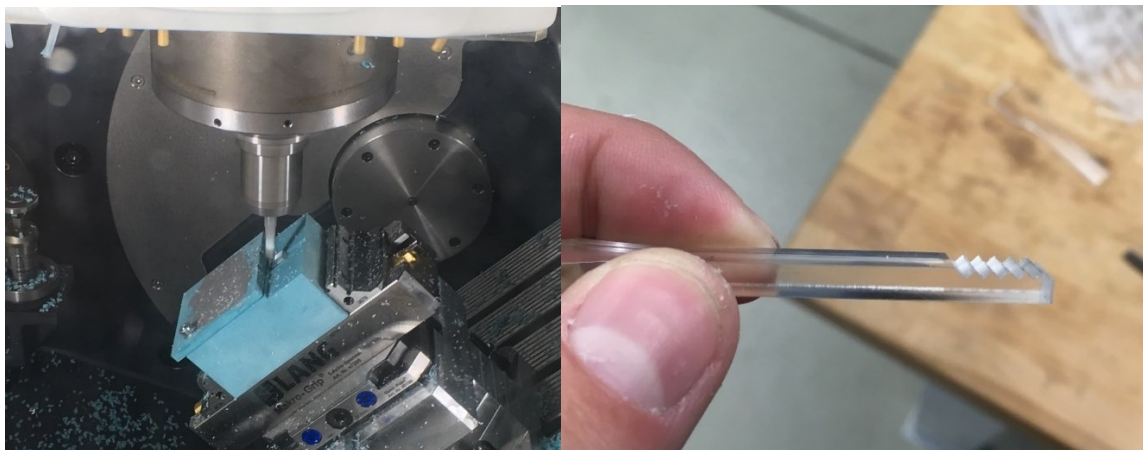
Obr. 29. Návrh a následné frézování přípravku pro zajištění zkušebních vzorků



Obr. 30. Zajištění zkušební vzorku v přípravku a návrh drážek pro frézování

Drážky jsou energetické můstky trojúhelníkového tvaru. Vrchol těchto můstků je během sváření pod největším napětím a dochází do styku s druhou částí, čímž vzniká tření, které způsobuje roztavení. Vedení roztavené energie vstupuje do spojovacího rozhraní a tvoří vazbu. Energetické můstky zajišťují, že se roztaví specifický objem materiálu, aby se dosáhlo dobré pevnosti vazby bez nadměrného tání materiálu.

Na vybrané vzorky se frézovaly energetické můstky o hloubkách 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm a 2 mm v délce 10 mm.



Obr. 31. Frézování drážek

6.4 Svařovací sestava

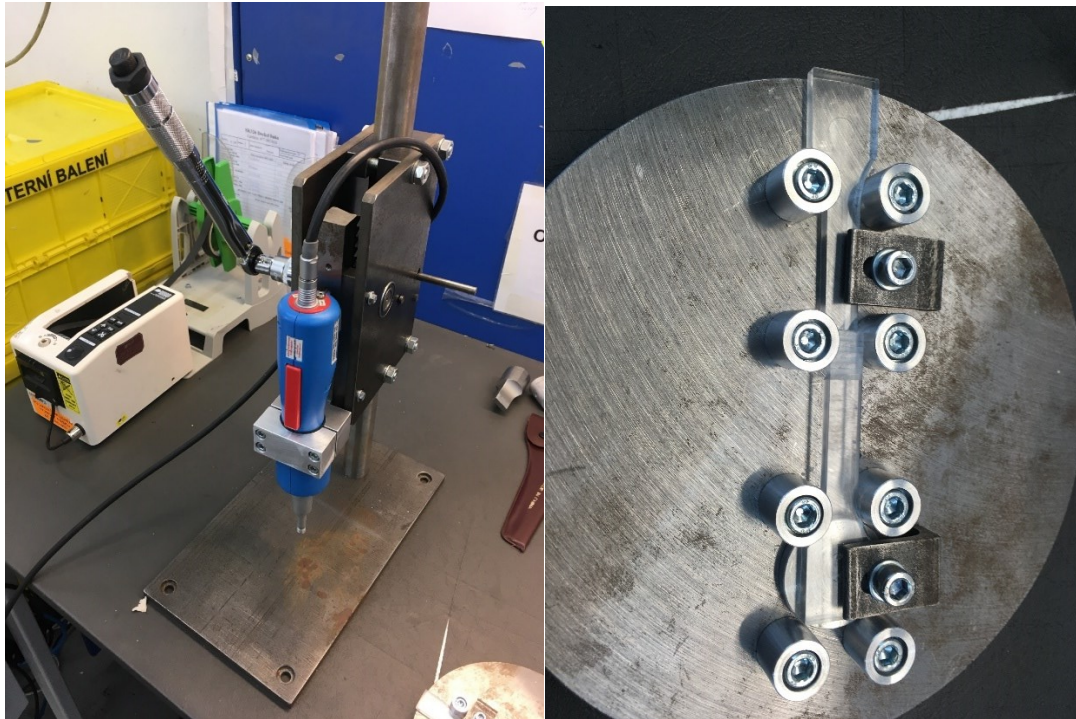
Svařování zkušebních lopatek bylo prováděno ruční ultrazvukovou svářečkou Herrmann HSG, kterou zapůjčila firma PLASTIKA a.s. Jde o přenosné zařízení pro malosériové sva-

řování vhodné například k bodovému svařování a opravám přímo ve výrobě. Zařízení umožňuje přívod vzduchu pro efektivní chlazení sonotrody.



Obr. 32. Svařovací zařízení

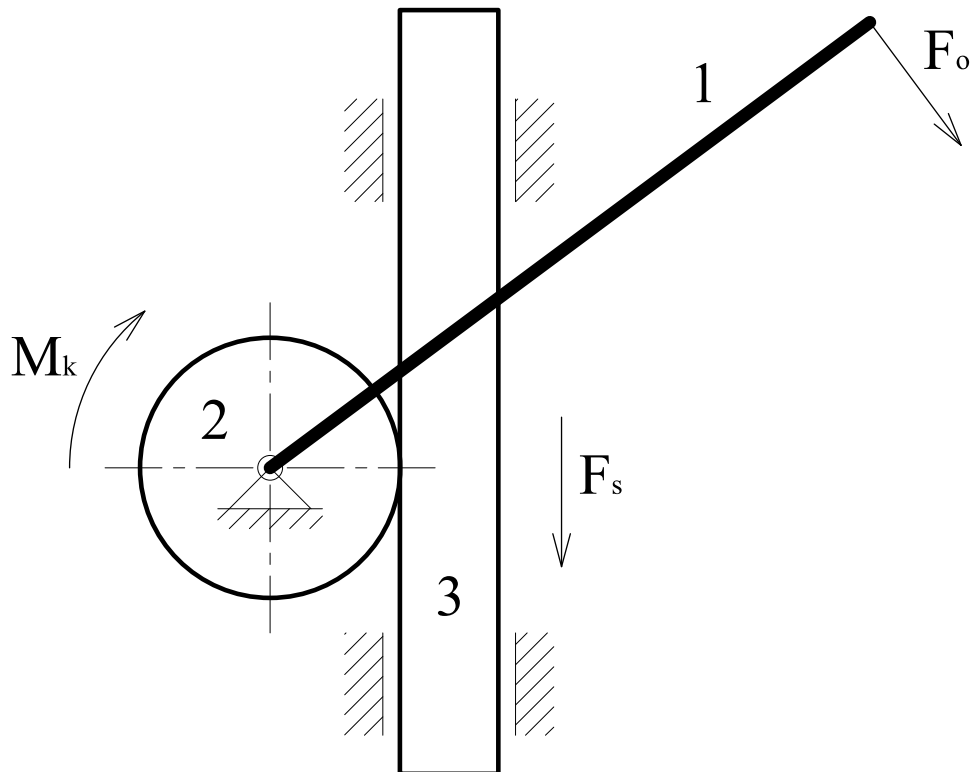
Další částí svařovací sestavy je držák svářečky, slouží k převodu síly pomocí momentového klíče přes převodový mechanismus, který se skládá z ozubeného kola a hřebenu, na svařovací zařízení. Jelikož ultrazvukové vibrace od sonotrody a působící síla způsobuje pohyb svařovaných tělísek, je potřeba umístit je do upínacího přípravku. Tento přípravek umožňuje vzájemné zajištění svařovaných částí zkušebního tělesa v podélném a příčném směru. Dále umožňuje souosost, která je důležitá při tahové zkoušce z hlediska správného chování zkušebního tělíska.



Obr. 33. Svařovací přípravek

6.5 Určení přitlačné síly

K určení přitlačné síly využijeme přepočtu z kroutícího momentu M_k , který jsme nastavili na momentovém klíči. Přepočet vychází z uvedeného schématu převodové části svařovacího přípravku. K síle vyvolané tlakem na klíč připočteme sílu vyvozenou hmotností pohyblivé části svařovací sestavy. Zanedbáme ztráty třením ve vodícím mechanismu.



Obr. 34. Schéma působících sil ve svařovacím přípravku

Sílu F_o vyvolanou tlakem obsluhy svařovacího přípravku spočítáme:

$$M_k = F_o \cdot r \Rightarrow F_o = \frac{M_k}{r}$$

Pokud obsluha nepůsobí na momentový klíč silou F_o pozorujeme, že svařovací síla F_s není nulová. To je dáno vlastní tíhou pohyblivé části přípravku. Tato počáteční síla byla označena F_p a lze ji stanovit jako součin hmotnosti pohyblivé části přípravku m_p (uvažují $m_p = 3,6$ kg, včetně svářečky) a tíhového zrychlení g (uvažují $g = 9,81$ m.s⁻²):

$$F_p = m_p \cdot g$$

Potom svařovací síla F_s je dána součtem zdánlivé síly F_o a počáteční síly F_p :

$$F_s = F_o + F_p = \frac{M_k}{r} + m_p \cdot g$$

Jelikož je svařovací síla F_s přímo úměrná krouticímu momentu M_k , lze výše uvedený přepočít zjednodušit na lineární funkci:

$$y = kx + q$$

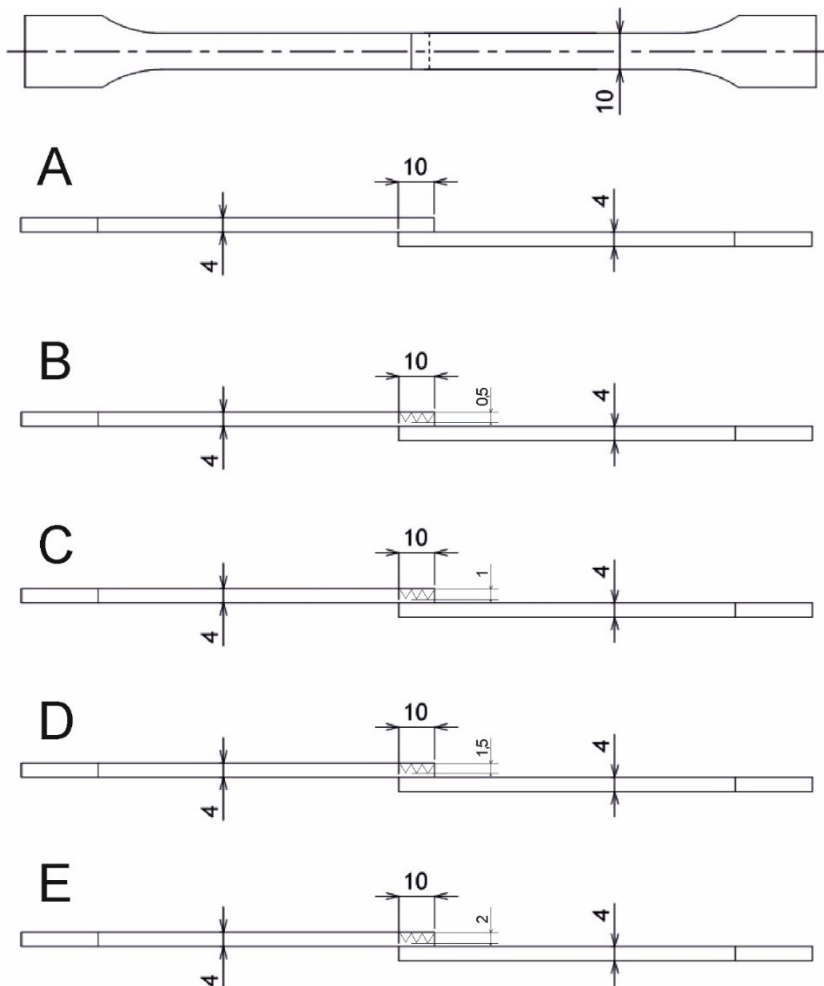
$$\text{kde: } y = F_s; \quad k = \frac{1}{r}; \quad x = M_k; \quad q = F_p$$

Po úpravě a dosazení dostáváme zjednodušený přepočtový vztah:

$$F_s = 38,5 M_k + 35,3$$

6.6 Varianty svarových spojů

Navržené varianty svarových spojů se liší v přítomnosti drážek na koncích svařovaných ploch, ale také v hloubce drážek. Jestli nám drážky ovlivní pevnost spoje zjistíme v následném experimentu. Přehlátování svarového spoje bylo zvoleno na základě průměru sonotrody a to 10 mm.



Obr. 35. Jednotlivé modifikace svarového spoje

6.7 Svařovací parametry

Před samotným svařováním bylo nutné nastavit svařovací parametry tak, aby došlo k co možná nejlepšímu svaření materiálů k sobě s co nejmenšími tvarovými odchylkami. Amplitudu kmitů, svařovací čas, frekvenci kmitů a v neposlední řadě také přitlačnou sílu. Pro různé materiály bylo potřeba stanovit odlišné svařovací parametry.

Přítlačná síla

Tato síla nám zajišťuje správný přenos ultrazvukových kmitů ze sonotrody na svarový spoj. Dále zvyšuje tření mezi svařovanými materiály, které je potřebné k narušení oxidických vrstviček. Nastavení přítlačné síly bylo voleno s ohledem na zkušební svařování tak, abychom garantovali dostatečný přítlak u svařovaných tělísek. Jako nejlepší možná varianta se ukázala hodnota 8 Nm, která byla poté nastavena na momentovém klíči u všech svařovaných vzorků. Toto nastavení po přepočtu odpovídá síle 343 N.

Svařovací čas

Svařovací čas je interval působení ultrazvukové energie na svar. Rozhoduje o pevnosti ultrazvukového spoje. Obvykle se používají svařovací časy co nejkratší. Zbytečně dlouhé časy mají za následek přehřátí místa spoje a způsobují únavové porušení.

Amplituda kmitů

Jedná se o základní parametr, s jehož zvětšováním lineárně roste pevnost spojů. V opačném případě menšení amplitudy výchylky způsobuje zmenšení pevnosti spoje. Příliš velká amplituda může mít za následek narušení povrchu svařovaného materiálu, proto jsme nastavili amplitudu na 80 %, což odpovídá hodnotě 8,8 μm . Maximální možná velikost amplitudy sonotrody byla 11 μm .

Frekvence kmitů

Za vysokých frekvencí se zvyšují ztráty energie a dochází ke zmenšení amplitudy a přílišnému zahřívání sonotrody. Jako ideální se ukázala pracovní hodnota frekvence 35 kHz.

Svařovací energie

Je to energie, kterou dodáváme do svarového spoje při svařování. Tato energie byla při optimalizaci svařovacího procesu postupně měněna, dokud se nedocílilo ideálního svarového spojení.

6.8 Tahová zkouška

Na zkušební těleso působíme v jeho podélném směru zvětšující se silou až do momentu, kdy dojde po určité deformaci k jeho přetržení nebo kdy měřené parametry dosáhnou nastavených hodnot. V průběhu zkoušky se zaznamenává síla a prodloužení zkušebního tělesa. Pevnost při tahové zkoušce slouží k určení odolnosti polymerních materiálů vůči tlakovému namáhání. Mluvíme-li o deformaci, jedná se o inverzní průběh oproti tahové zkoušce.

6.8.1 Zkušební trhací zařízení

Pro zkoušku tahem bylo použito univerzální trhací zařízení Zwick Roell 1456, které nabízí maximální sílu v tahu 20 kN a je určeno ke zkoušení plastů a dalších nekovových materiálů. Výsledky a průběh zkoušek byly zaznamenávány do grafů a tabulek, což umožnil software Test Expert, který byl součástí tohoto zkušebního stroje. Tahová zkouška podle normy ČSN EN ISO 527-2/1A/10 byla provedena v laboratoři za pokojové teploty 22 °C.



Obr. 36. Univerzální trhací zařízení Zwick Roell 1456

7 VÝSLEDKY A HODNOCENÍ

7.1 Hodnocení vlivů na pevnost spoje

Tahová zkouška nám bude sloužit k hodnocení mechanických vlastností materiálu. Tato zkouška bude prováděna dle normy ČSN 05 6821 a dá nám výsledky o pevnosti svarových spojů v závislosti na druhu materiálu a typu úpravy výchozího materiálu. Následné vyhodnocení dat nám poskytne výpověď o vlivu zmíněných parametrů na pevnost svarového spojení. Během experimentu nám pro porovnání míry pevnosti bude sloužit především maximální únosná síla F_{MAX} [N], které bylo během tahové zkoušky docíleno.

7.2 Naměřené hodnoty a výsledky zkoušky

Pro záznam výsledků byl použit software testXpert II. Průběh měření byl vykreslován pomocí deformační křivky a výsledné hodnoty jednotlivých měření zapsány do tabulek.

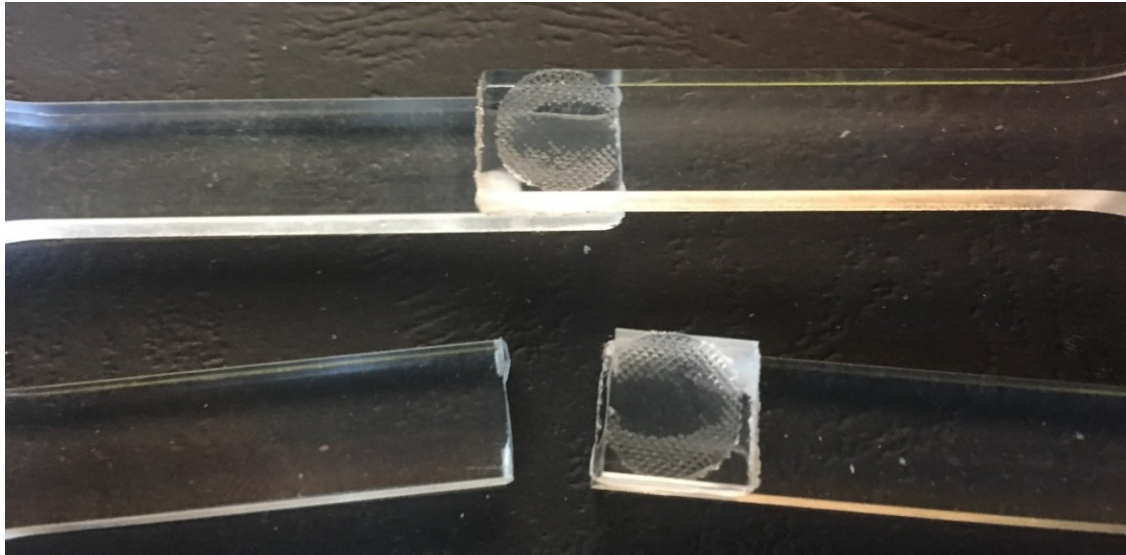
7.2.1 Pevnost základních materiálů

Tab. 1. Pevnosti základních materiálů

Základní materiály				
	PMMA	ABS	PP	PA6
č. měření	F_{MAX} (N)	F_{MAX} (N)	F_{MAX} (N)	F_{MAX} (N)
1	2750	1297	895	2310
2	2870	1420	960	2280
3	2810	1380	925	2305
průměr \bar{x}	2810	1366	927	2898

7.2.2 PMMA

Tento materiál se po optimalizaci svařovacích parametrů vyznačoval velmi dobrou svařitelností. Jako ideální se ukázalo nastavení svařovací energie na hodnotu 25 J.



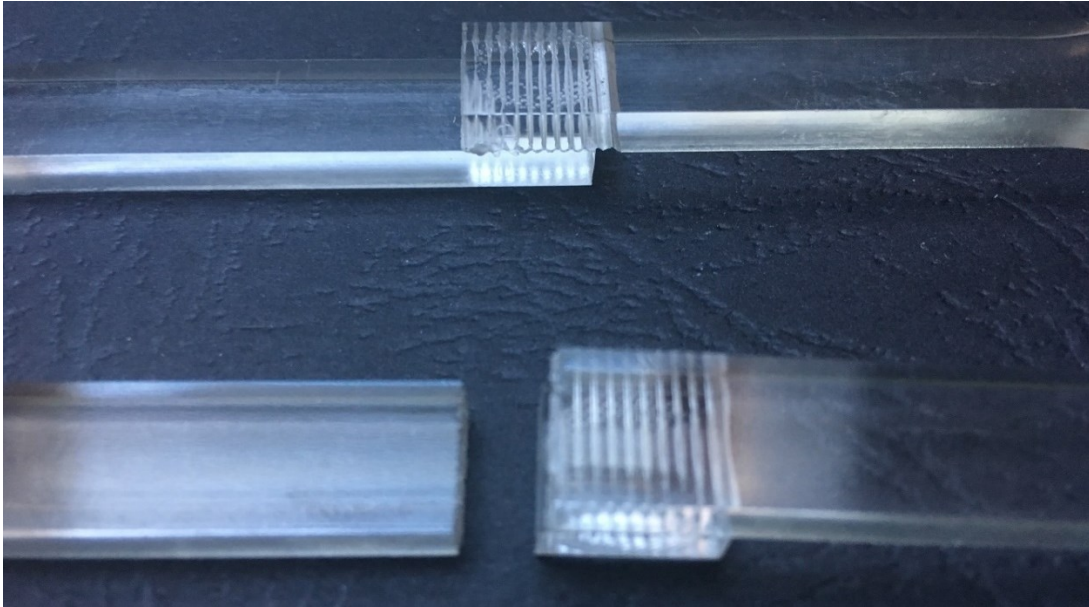
Obr. 37. Svaření a přetržený vzorek PMMA

Jako první se vyhodnocovaly údaje o vzorcích s přeplátováním 10 mm a bez drážek na povrchu.

Tab. 2. Výsledky experimentu při variantě A

PMMA						
Přeplátovaný spoj a=10 mm typ A (bez drážek)				E _s = 25 J		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	968	0,050	412
2				896	0,050	452
3				956	0,052	484
4				912	0,051	510
5				978	0,053	478
průměr \bar{x}				942	0,051	467,2

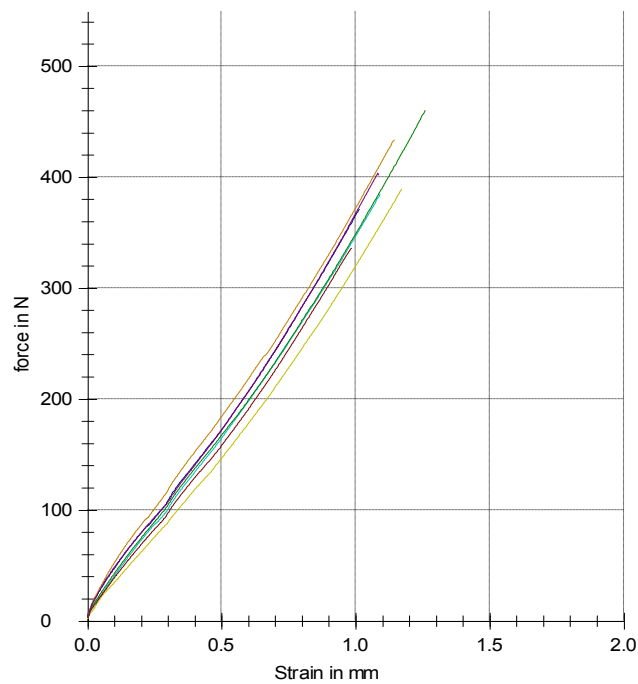
Další sada vzorků obsahovala na povrchu drážky hluboké 0.5 mm. Jak je z tabulky patrné, drážky na povrchu u materiálu PMMA nezpůsobily zpevnění spoje ba naopak, pevnost se zmenšila téměř o 20 %. Toto snížení pevnosti zřejmě vzniklo narušením struktury materiálu při frézování drážek.



Obr. 38. Svaření a přetržený vzorek PMMA varianta B

Tab. 3. Výsledky experimentu při variantě B

PMMA						
Přeplátovaný spoj a=10 mm typ B (0.5 mm drážky)				E _s = 25 J		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	872	0,052	385
2				906	0,053	390
3				847	0,052	336
4				802	0,054	461
5				936	0,053	371
průměr \bar{x}				8472,6	0,053	388,6



Obr. 39. Průběh napětí při variantě B

Pevnost se u vzorků s drážkami hlubokými 1 mm také zmenšovala oproti vzorkům, které byly svařeny bez drážek, a to dokonce o 35 %.

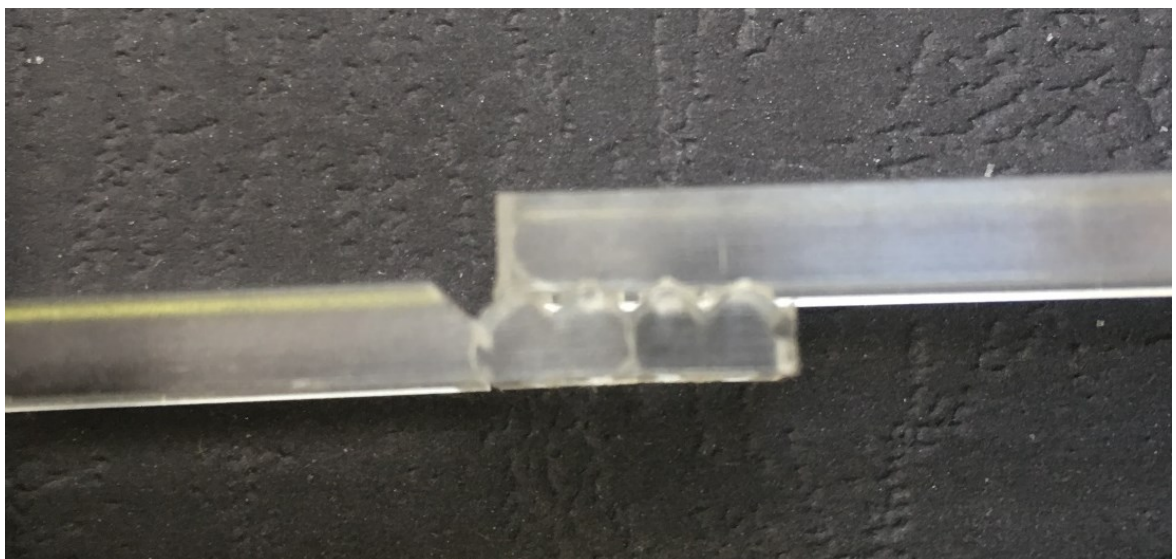
Tab. 4. Výsledky experimentu při variantě C

PMMA						
Přeplátovaný spoj a=10 mm typ C (1 mm drážky)				$E_s = 25 \text{ J}$		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	844	0,051	296
2				866	0,053	312
3				835	0,054	308
4				865	0,052	274
5				844	0,054	315
průměr \bar{x}				841,3	0,053	301

Tab. 5. Výsledky experimentu při variantě D

PMMA						
Přeplátovaný spoj a=10 mm typ D (1,5 mm drážky)				$E_s = 25 \text{ J}$		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	817	0,051	296
2				847	0,053	312
3				832	0,054	308
4				814	0,052	274
průměr \bar{x}				827,5	0,052	297,5

Byly vyrobeny také vzorky s drážkou hlubokou 2 mm, ale tyto vzorky obsahovaly velké množství prasklin vzniklých při svařování, tudíž byly nevhodné pro tahovou zkoušku a z experimentu byly vyřazeny.



Obr. 40. Svaření vzorek PMMA varianta D

7.2.3 ABS

Druhým použitým materiálem bylo ABS. U tohoto materiálu jsme docílili velmi dobré svařitelnosti, a to za použití větší energie, než tomu bylo u PMMA. Jako ideální se ukázalo nastavení 50 J. Při této energii docházelo k velmi dobrému svarovému spojení bez větších propadlin a přetoků.

Tab. 6. Výsledky experimentu materiál ABS typ A

ABS						
Přeplátovaný spoj a=10 mm typ A (bez drážek)				E _s = 50 J		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	768	0,104	316
2				798	0,103	454
3				741	0,104	421
4				753	0,103	349
5				791	0,105	387
průměr \bar{x}				770,2	0,104	385,4

Po tahové zkoušce u materiálu ABS bez drážek následovaly vzorky s drážkou o hloubce 1 mm. Jak můžeme vyčíst z tabulky, nastal výrazný nárůst pevnosti u vzorků s vyfrézovanou drážkou a to o zhruba 40 %.



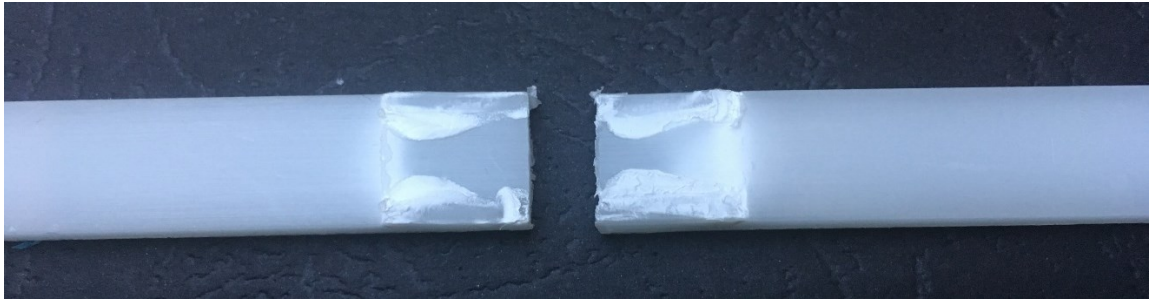
Obr. 41. Roztržený vzorek ABS typ C

Tab. 7. Výsledky experimentu materiál ABS typ C

ABS						
Překlátovaný spoj a=10 mm typ C (1 mm drážky)				$E_s = 50 \text{ J}$		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	751	0,104	525
2				766	0,102	539
3				749	0,104	552
4				787	0,106	521
5				735	0,107	544
průměr \bar{x}				757,6	0,105	536,2

7.2.4 PP

Následný materiál byl Polypropylen. Vyznačoval se dobrou svařitelností. Překlátování zůstává stejné, také 10 mm. Hodnoty dodávané energie taky a to 50 J.



Obr. 42. Roztržený vzorek PP typ A

Tab. 8. Výsledky experimentu materiál PP typ A

PP						
Přeplátovaný spoj a=10 mm typ A (bez drážek)				E _s = 50 J		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	548	0,141	549
2				598	0,130	663
3				472	0,128	535
4				556	0,132	602
5				569	0,133	569
průměr \bar{x}				548,6	0,1328	583,6

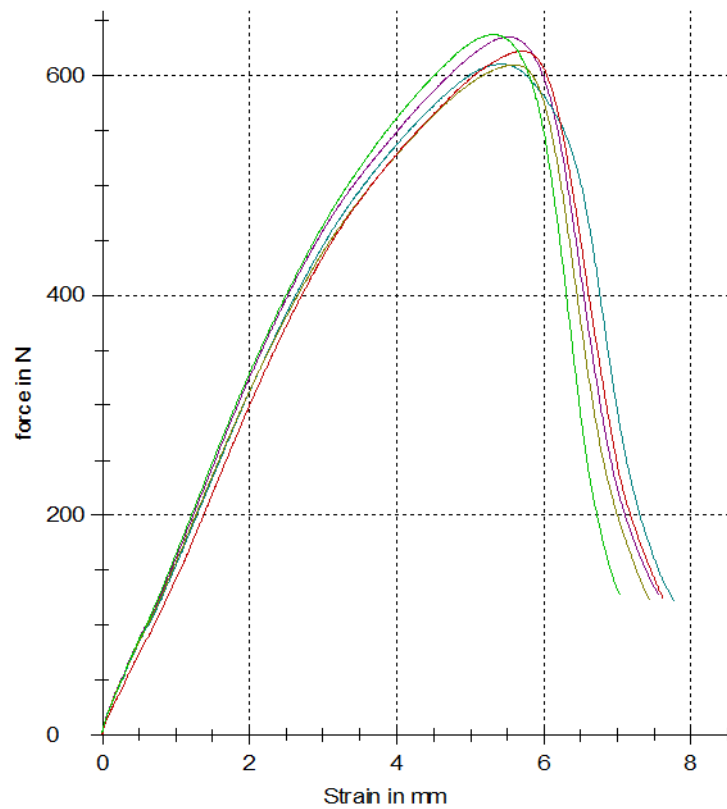
U tohoto materiálu opět dochází ke zvýšení pevnosti svarového spoje, a to zhruba o 7 % oproti vzorkům bez drážek.



Obr. 43. Roztržený vzorek PP typ A

Tab. 9. Výsledky experimentu materiál PP typ C

PP						
Přepřátovaný spoj a=10 mm typ C (1 mm drážky)				E _s = 50 J		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	604	0,132	636
2				544	0,140	611
3				552	0,133	610
4				541	0,130	622
5				513	0,131	638
průměr \bar{x}				550,8	0,133	623,4



Obr. 44. Průběh napětí u vzorku PP

7.2.5 PA-6

Polyamid 6 má velmi dobré mechanické vlastnosti, jako je pevnost, tvrdost, houževnatost a odolnost proti opotřebení. Je ale taky vhodný k ultrazvukovému svařování. Při svařování energií 50 J nedocházelo k přetokům na hranici svarového spoje. Stopa po sonotrodě byla téměř zanedbatelná.



Obr. 45. Roztržený vzorek PA-6 typ A

Tab. 10. Výsledky experimentu materiál PA-6 typ A

PA-6						
Přeplátovaný spoj a=10 mm typ A (bez drážek)				$E_s = 50 \text{ J}$		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	702	0,118	485
2				668	0,116	515
3				685	0,108	553
4				623	0,118	435
5				580	0,120	533
průměr \bar{x}				651,6	0,116	504,2

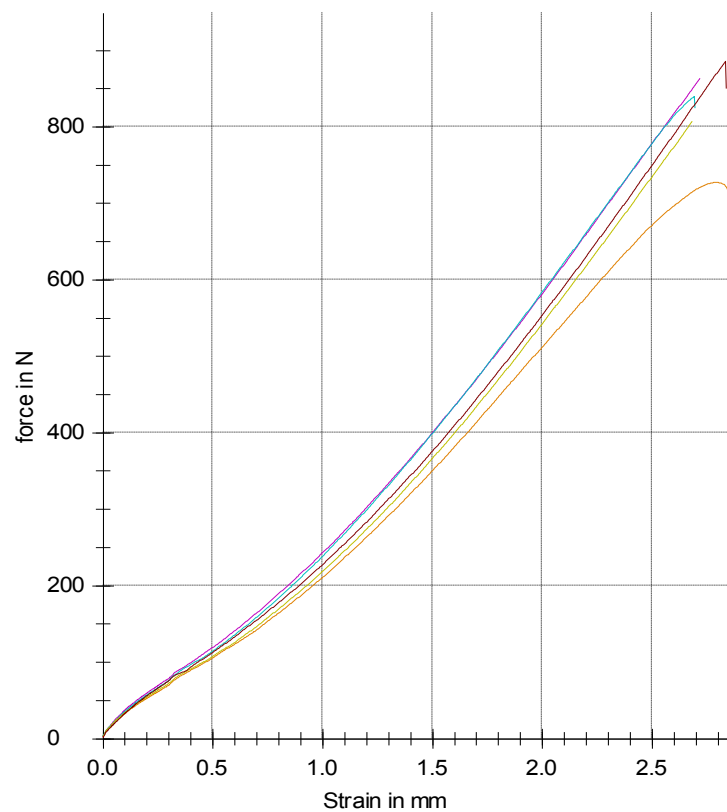
Největší nárůst pevnosti svarového spoje bez frézovaných drážek a s drážkou o hloubce 1 mm, jsme zaznamenali u materiálu PA-6. Pevnost se zvýšila o více než 60 %.



Obr. 46. Roztržený vzorek PA-6 typ C

Tab. 11. Výsledky experimentu materiál PA-6 typ C

PA-6						
Překlátovaný spoj a=10 mm typ C (1 mm drážek)				$E_s = 50 \text{ J}$		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	742	0,112	728
2				620	0,118	864
3				687	0,120	840
4				585	0,116	807
5				635	0,120	886
průměr \bar{x}				653,8	0,117	825



Obr. 47. Průběh napětí PA-6 typ C

7.2.6 PMMA+ABS

Jako poslední se dostala na řadu kombinace materiálů PMMA a ABS. Při svařování různých materiálů by se měla dodržovat jedna zásadní podmínka, že do kontaktu se sonotrodou by se měl dostávat materiál s vyšší teplotou skelného přechodu, což byl v našem případě materiál PMMA. Překlátování bylo 10 mm a jako ideální se ukázala svařovací energie 35 J. Při nižších energiích docházelo k porušení svarového spoje.



Obr. 48. Roztržený vzorek PMMA+ABS typ A

Tab. 12. Výsledky experimentu materiálů PMMA+ABS typ A

PMMA + ABS						
Přeplátovaný spoj a=10 mm typ A (bez drážek)				E _s = 35 J		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	926	0,065	295
2				896	0,062	347
3				883	0,068	241
4				965	0,066	258
5				957	0,063	325
průměr \bar{x}				925,4	0,0648	293,2

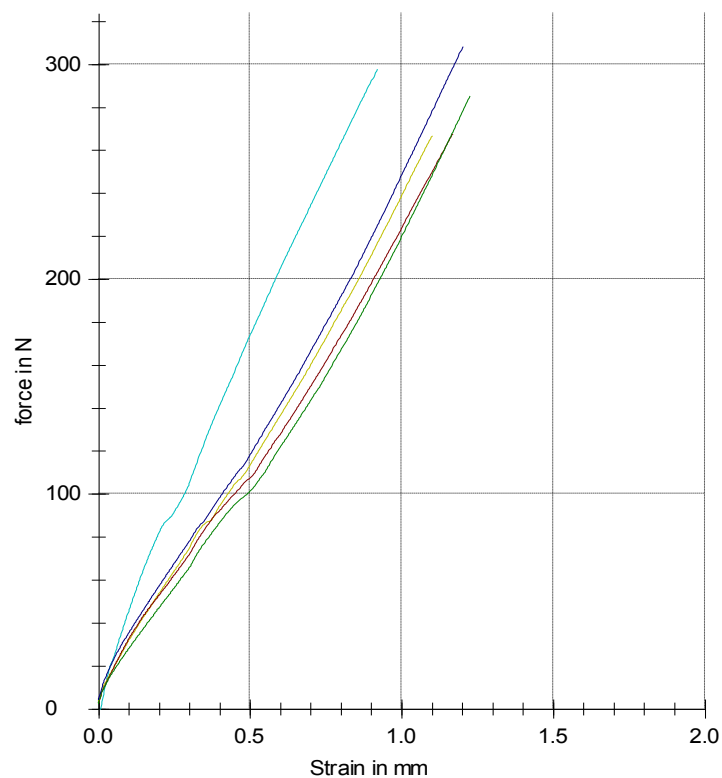
U této kombinace materiálů můžeme pozorovat, že přítomnost drážek, které byly frézovány do materiálu PMMA, neměla téměř žádný vliv na pevnost spoje. Spíše se vlivem frézování nepatrně snížila. Pravděpodobně to zapříčinila křehkost materiálu PMMA, frézování tohoto materiálu narušilo strukturu povrchu a negativně ovlivnilo jeho pevnost.



Obr. 49. Roztržený vzorek PMMA+ABS typ C

Tab. 13. Výsledky experimentu materiálů PMMA+ABS typ C

PMMA + ABS						
Přepřátovaný spoj a=10 mm typ C (1 mm drážky v PMMA)				$E_s = 35 \text{ J}$		
č. měření	f (kHz)	A (%)	F _p (N)	P (W)	t (s)	F _{MAX} (N)
1	35,5	80	343	811	0,068	295
2				841	0,07	347
3				768	0,062	241
4				795	0,066	258
5				838	0,070	325
průměr \bar{x}				810,6	0,0672	285,2



Obr. 50. Průběh napětí PMMA+ABS typ C

7.3 Statistické vyhodnocení

Naměřené hodnoty z tahové zkoušky vykazují velké rozptyly, proto nemůžeme potvrdit průkaznost výsledků. Pro potvrzení využijeme analýzu ANOVA.

ANOVA neboli analýza rozptylu je metoda matematické statistiky, která ověřuje vliv hodnoty některého znaku, který lze u jedince pozorovat, na hodnotu náhodné veličiny v rámci statistického významu. Znak nabývá konečného počtu možných hodnot. Je určen k rozdělení jedinců do porovnávaných skupin. [20]

Podstatou analýzy rozptylu je rozklad celkového rozptylu na složku objasněnou, známý zdroj variability, a na složku neobjasněnou reziduální, chybovou, o níž se předpokládá, že je náhodná. Analýzu dělíme na jednofaktorovou, kde má vliv pouze jeden faktor na závislou proměnnou a vícefaktorovou, kde máme vliv více faktorů. [19]

Test byl proveden v aplikaci Minitab a výstupem bude graf a souhrn výsledných hodnot, kde budou obsaženy základní statistické charakteristiky, z nichž pro nás nejdůležitější bude hodnota **P**.

Pokud hodnota **P** bude větší než α , poté nezamítáme nulovou hypotézu H_0 a tvrdím, že hodnota nezávislá nemá statistický význam na hodnotu závislou, tzn. závislá hodnota se liší náhodně.

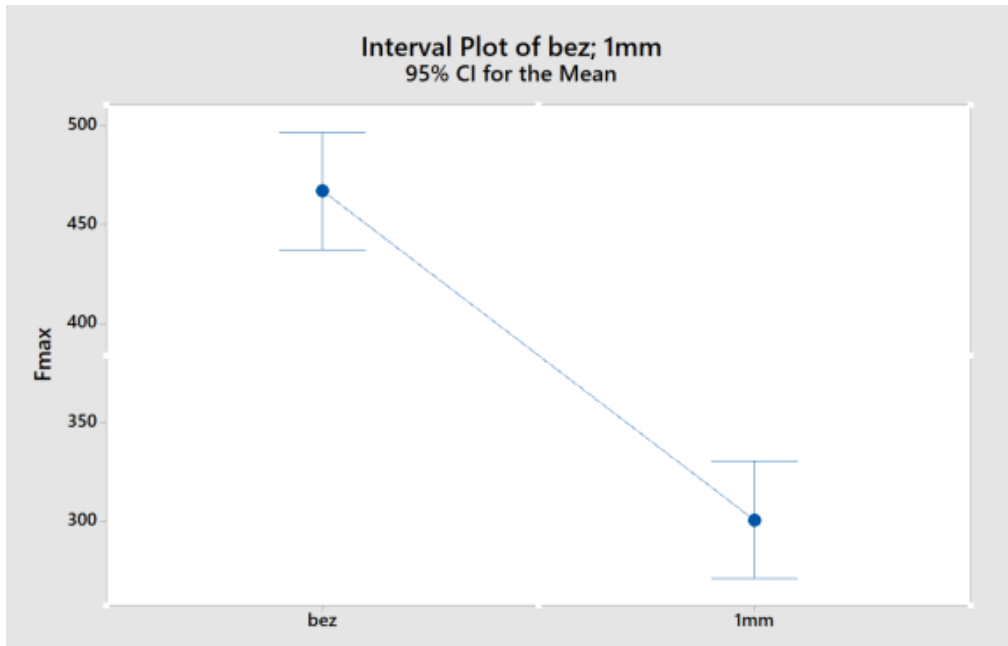
Je-li hodnota **P** menší než α , zamítám nulovou hypotézu H_0 a tvrdím, že nezávislá hodnota má statistický vliv na hodnotu závislou.

7.3.1 Vliv energetických můstků v oblasti svarového spoje na jeho únosnost

$$H_0: \mu_{F_{\max,A}} = \mu_{F_{\max,A2}}$$

$$H_A: \mu_{F_{\max,A}} \neq \mu_{F_{\max,A2}}$$

$$\alpha = 0,05$$



One-way ANOVA: bez; 1mm

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

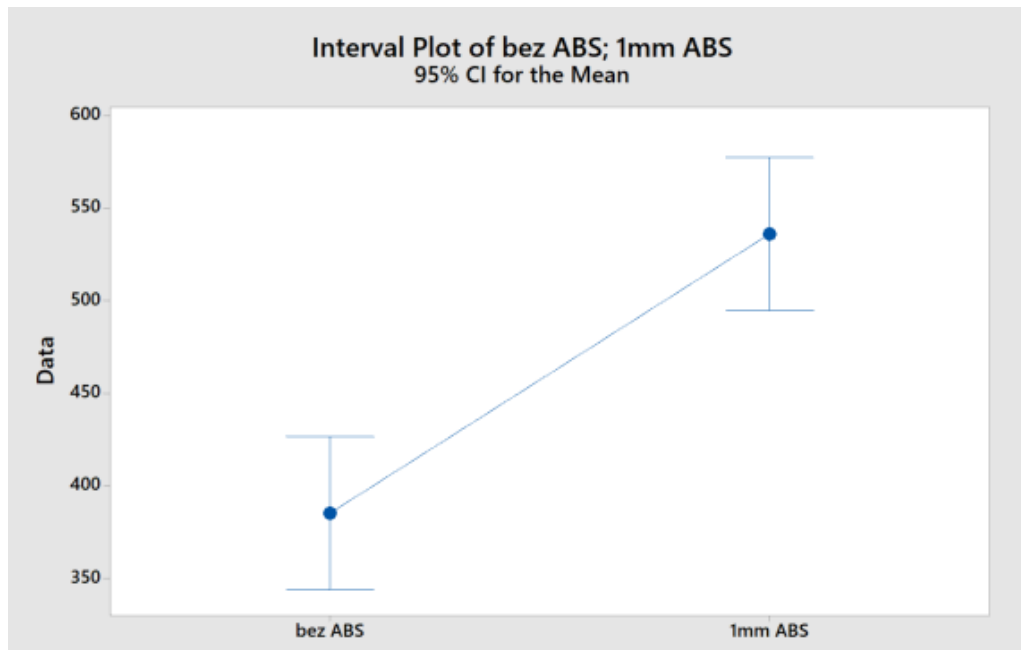
Factor	Levels	Values
Factor	2	bez; 1mm

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	69056	69056,1	83,34	0,000
Error	8	6629	828,6		
Total	9	75685			

Obr. 51. Graf a výsledné hodnoty ANOVA hypotézy u materiálu PMMA

Hodnota P u prvního materiálu PMMA je menší než α , tudíž zamítám nulovou hypotézu a tvrdím, že modifikace svaru má statisticky významný vliv na únosnost svarového spoje.



One-way ANOVA: bez ABS; 1mm ABS

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

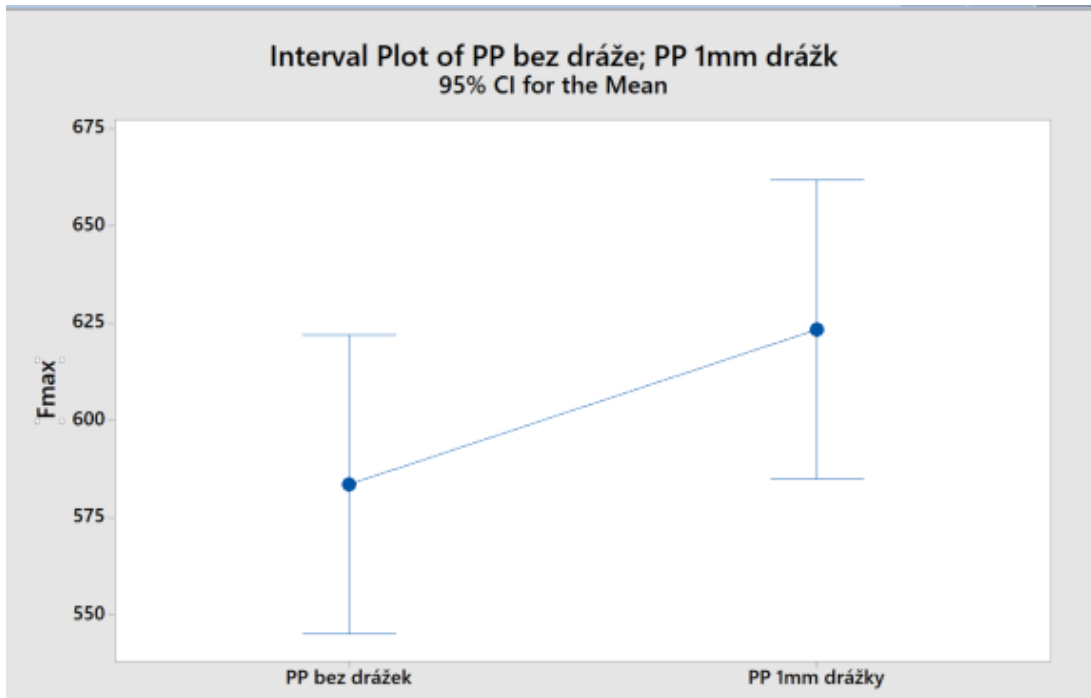
Factor	Levels	Values
Factor	2	bez ABS; 1mm ABS

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	56852	56852	35,55	0,000
Error	8	12792	1599		
Total	9	69644			

Obr. 52. Graf a výsledné hodnoty ANOVA hypotézy u materiálu ABS

Také hodnota **P** u materiálu ABS je menší než α , tudíž zamítám nulovou hypotézu a tvrdím, že modifikace svaru má statisticky významný vliv na únosnost svarového spoje.



One-way ANOVA: PP bez drážek; PP 1mm drážky

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

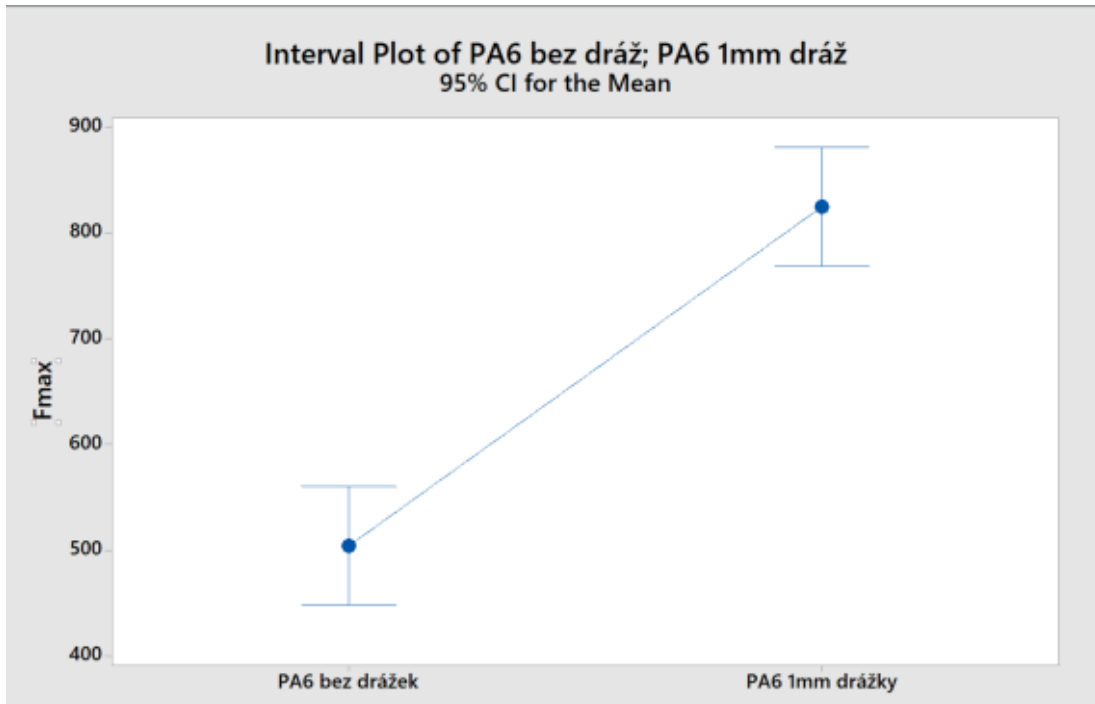
Factor	Levels	Values
Factor	2	PP bez drážek; PP 1mm drážky

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	3960	3960	2,85	0,130
Error	8	11122	1390		
Total	9	15083			

Obr. 53. Graf a výsledné hodnoty ANOVA hypotézy u materiálu PP

Hodnota **P** u materiálu PP je větší než α , tudíž nezamítám nulovou hypotézu a tvrdím, že modifikace svaru nemá statisticky významný vliv na únosnost svarového spoje.



One-way ANOVA: PA6 bez drážek; PA6 1mm drážky

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

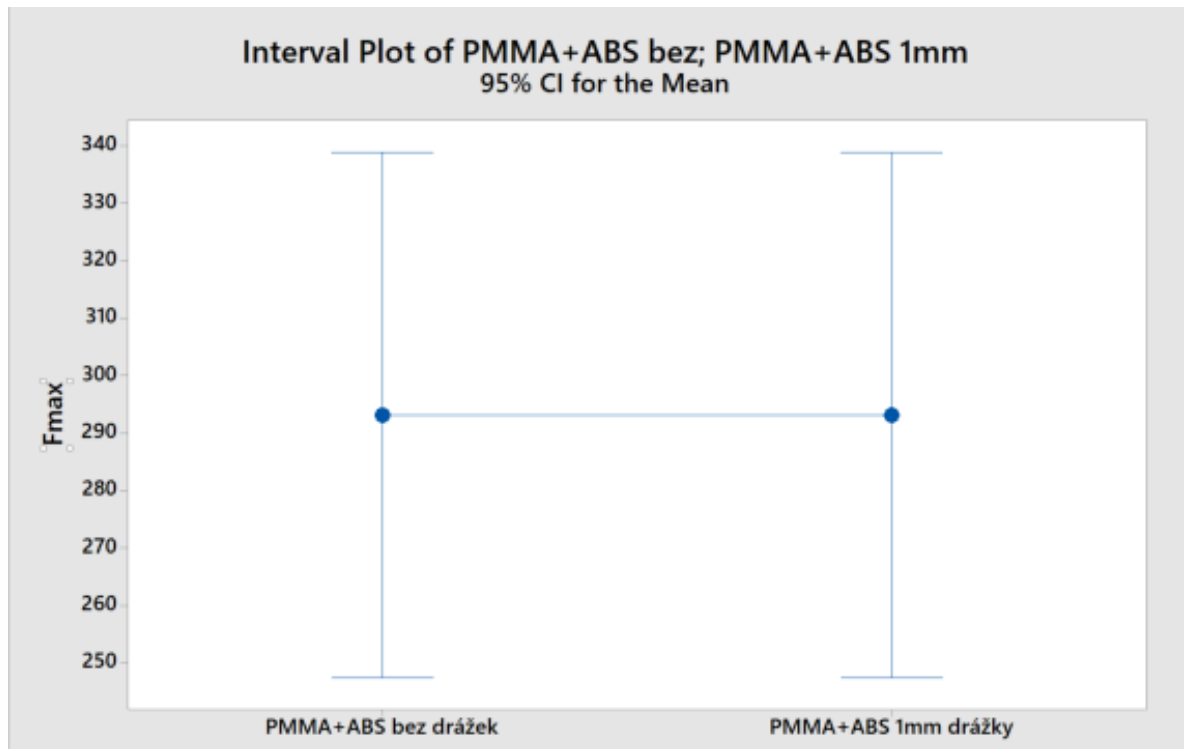
Factor	Levels	Values
Factor	2	PA6 bez drážek; PA6 1mm drážky

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	257282	257282	86,90	0,000
Error	8	23685	2961		
Total	9	280966			

Obr. 54. Graf a výsledné hodnoty ANOVA hypotézy u materiálu PA6

Analýza u materiálu PA6 vychází hodnota **P** menší než α , tudíž zamítám nulovou hypotézu a tvrdím, že modifikace svaru má statisticky významný vliv na únosnost svarového spoje.



One-way ANOVA: PMMA+ABS bez drážek; PMMA+ABS 1mm drážky

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	PMMA+ABS bez drážek; PMMA+ABS 1mm drážky

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	0,0	0,00	0,00	1,000
Error	8	15745,6	1968,20		
Total	9	15745,6			

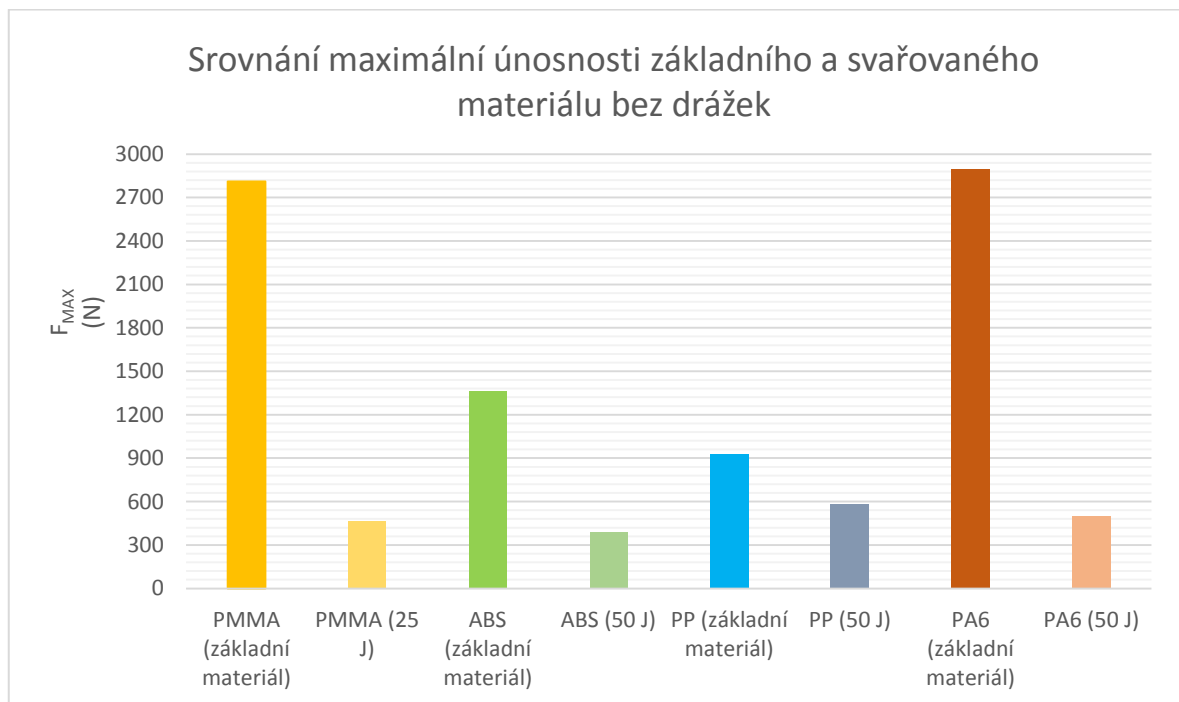
Obr. 55. Graf a výsledné hodnoty ANOVA hypotézy u kombinace materiálů PMMA a ABS

U kombinace materiálů PMMA a ABS je hodnota **P** větší než α , tudíž nezamítám nulovou hypotézu a tvrdím, že modifikace svaru nemá statisticky významný vliv na únosnost svařového spoje.

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

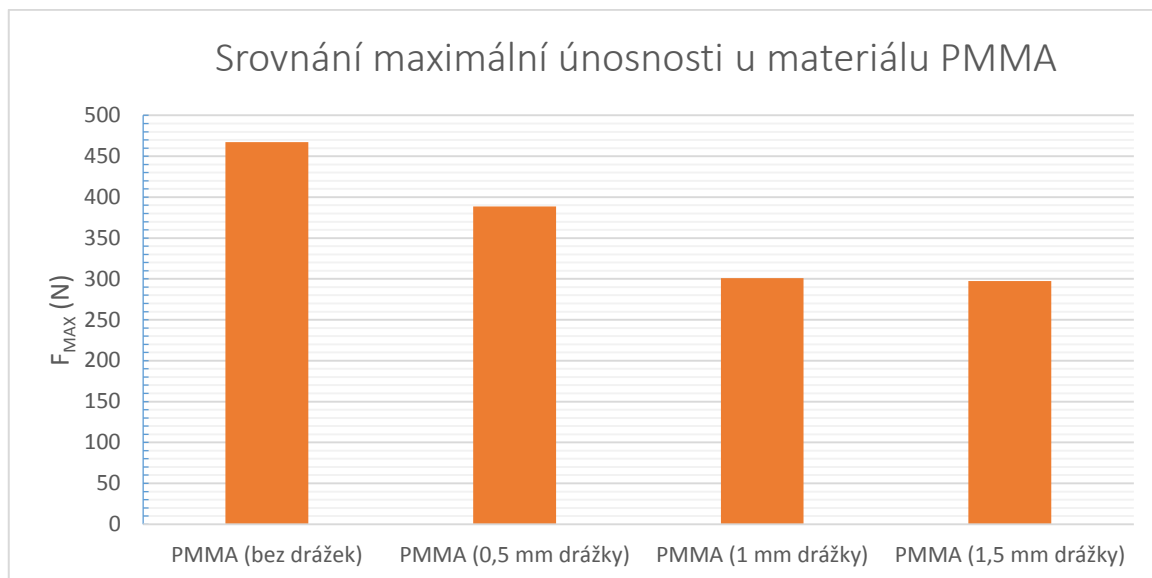
V praktické části diplomové práce byl zkoumán vliv úpravy povrchu zkušebních vzorků na pevnost ultrazvukového svarového spojení. Na povrchu zkušebních těles různých materiálů (PMMA, PA6, PP, ABS a kombinace PMMA a ABS), byly frézovány drážky určitých parametrů. Dále bylo provedeno ultrazvukové svaření vzorků a následná tahová zkouška pro srovnání vlivu těchto drážek na hodnoty maximální únosné síly.

Srovnání pevnosti základního materiálu a svařovaného materiálu bez drážek.



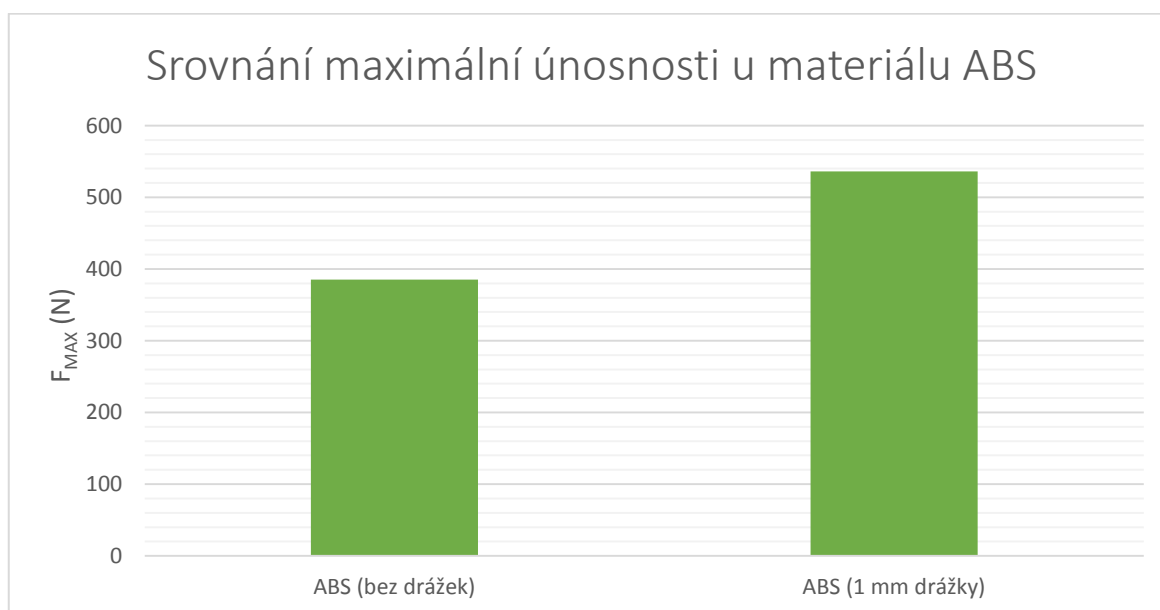
Obr. 56. Graf srovnání maximální únosnosti základních materiálů

Pomocí tahové zkoušky byla zjištěna maximální únosná síla u vybraných druhů svařovaných materiálů a následně byly tyto hodnoty vyneseny do grafu a srovnány s hodnotami u výchozích vzorků. Nejlepší hodnoty vykazoval polypropylen, jehož pevnost oproti základnímu materiálu byla více než 50 %, naopak největšího rozdílu v únosnosti svarového spoje dosahoval materiál PMMA.



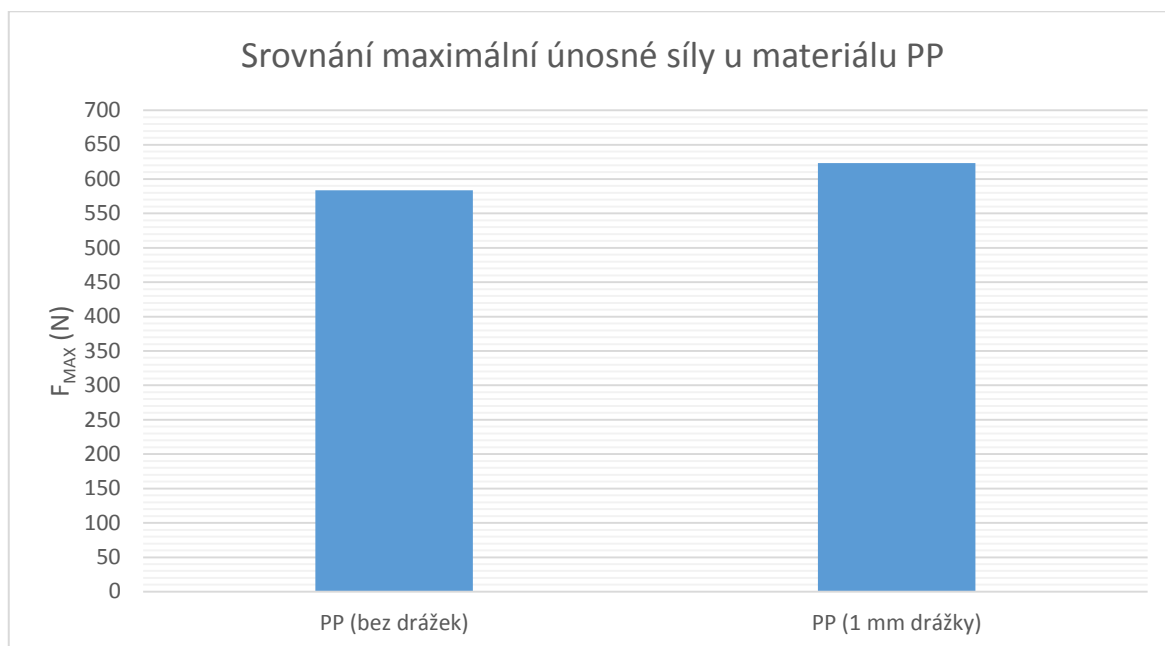
Obr. 57. Graf srovnání maximální únosnosti PMMA

Z grafu naměřených hodnot maximální únosné síly je patrné, že drážky u svařovaných vzorků materiálu PMMA mají spíše negativní vliv na pevnost spoje. Čím hlubší drážka byla frézována na povrchu materiálu, tím se hodnota maximální únosné síly snižovala. Toto snížení pevnosti spoje bylo pravděpodobně způsobeno narušením struktury materiálu při frézování.



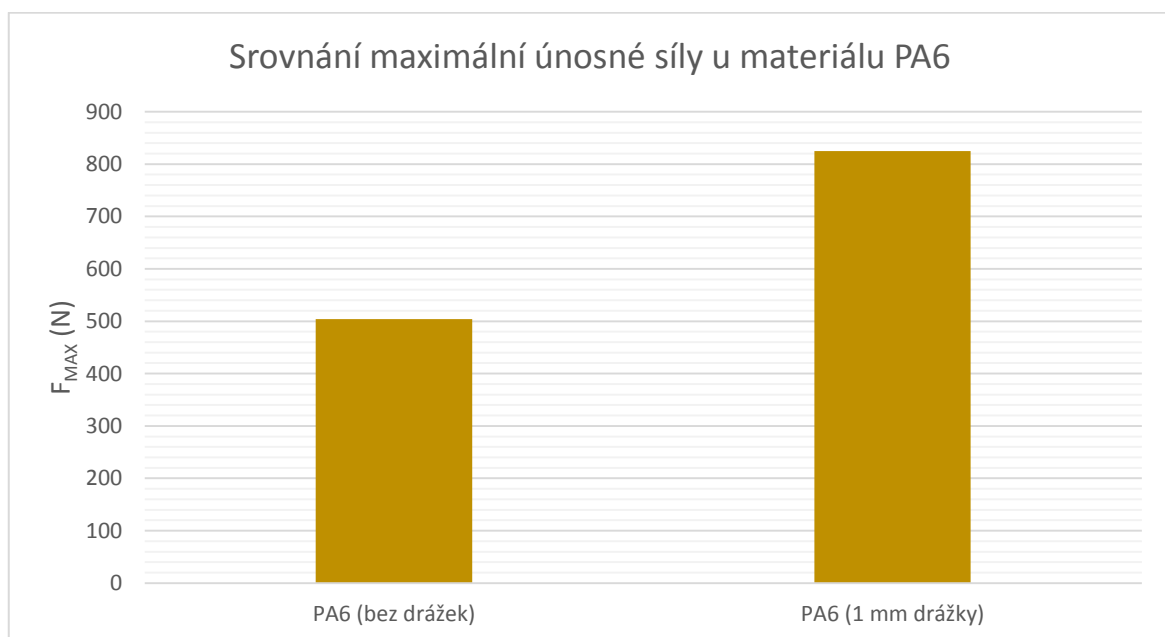
Obr. 58. Graf srovnání maximální únosnosti ABS

U materiálu ABS si lze všimnout výrazného nárůstu maximální únosnosti svarového spoje, a to až o 40 %. Lze tedy říct, že drážky na povrchu pozitivně ovlivnily pevnost svarového spojení.



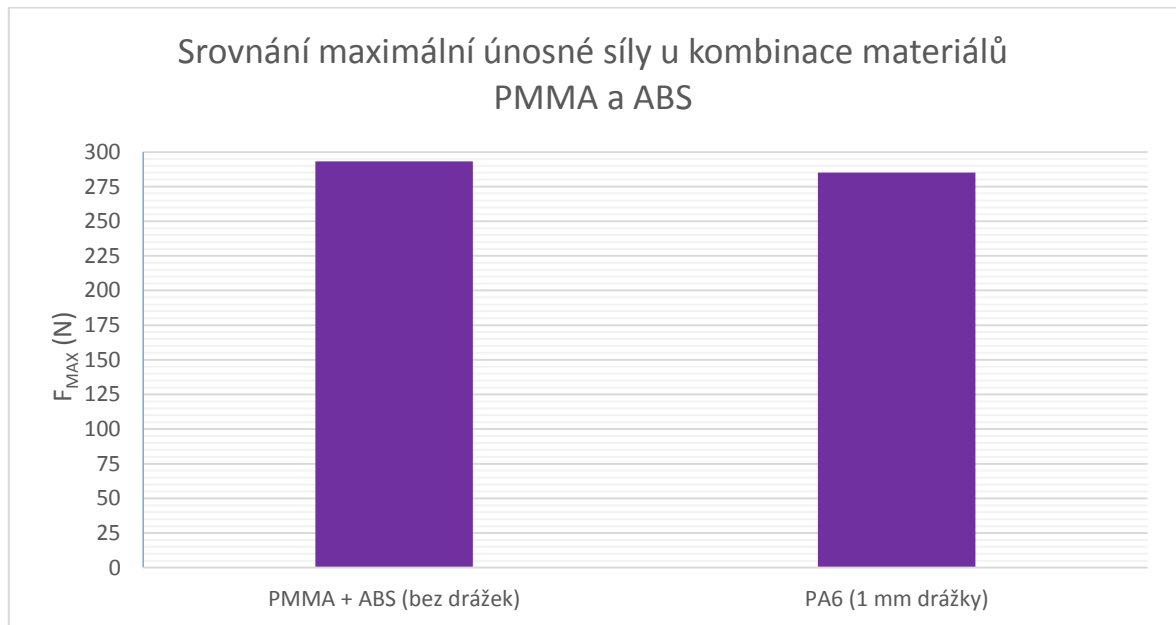
Obr. 59. Graf srovnání maximální únosnosti PP

Polypropylen, mezi jehož vlastnosti patří dobrá houževnatost, nedosahoval takových významně rozlišných hodnot jako ABS, ale i přesto můžeme pozorovat zvýšení pevnosti spoje o zhruba 7 %.



Obr. 60. Graf srovnání maximální únosnosti PA6

Pozitivní vliv drážek na pevnost spoje byla vidět u materiálu PA6, kdy se zvýšila maximální únosná síla svarového spoje o více než 60 %.



Obr. 61. Graf srovnání maximální únosnosti u kombinace PMMA a ABS

Zkušební tělíska materiálů PMMA a ABS byla spolu svařena při energii 35 J. Rozdíl v pevnosti svarového spojení s drážkami a bez nich je však téměř zanedbatelný, tudíž nelze říct, že by drážky u kombinace těchto materiálů nějak ovlivnily maximální únosnost spoje.

ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na problematiku svařování termoplastů ultrazvukovou technologií. V úvodu práce jsou popsány technologie pro svařování termoplastů podle dodání tepla do svaru. Následně detailněji popisuje ultrazvukovou technologii svařování, jednotlivé části ultrazvukového svářecího zařízení, technologický postup a procesní parametry ovlivňující kvalitu svaru. Závěr teoretické části popisuje materiály vhodné k ultrazvukovému svařování a použití v praxi.

Praktická část je orientována na vytvoření návrhu a frézovacího programu pro výrobu přípravku k usazení zkušebních těles, a dále také návrh energetických můstků, které byly následně vyfrézovány na stykových plochách těchto vzorků. Předpokládali jsme, že vytvoření energetických můstků na svarových plochách bude mít za následek rovnoměrnější tavení materiálu ve svaru, tudíž i lepší mechanické vlastnosti spoje. Upravené vzorky byly po předchozí optimalizaci svařovacích parametrů svařeny a následně podrobeny tahové zkoušce, kde byla zjištěna maximální únosnost spoje.

Jako první se svařoval materiál PMMA, kdy byly vytvořeny energetické můstky o hloubkách 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm a 2 mm. Tento materiál se po optimalizaci svařovacích parametrů vyznačoval velmi dobrou svařitelností. Jako ideální se ukázalo nastavení svařovací energie na hodnotu 25 J. Z výsledků je patrné, že modifikace svarové plochy u tohoto materiálu neměla pozitivní vliv na únosnost svarového spoje. Naopak únosnost se s hloubkou drážek postupně snižovala. Toto snížení pevnosti spoje bylo pravděpodobně způsobeno narušením struktury materiálu při frézování.

Druhým svařovaným materiálem byl ABS. U tohoto materiálu jsme docílili velmi dobré svařitelnosti, a to za použití větší energie, než tomu bylo u PMMA. Ideální energie byla 50 J. Při této energii docházelo k velmi dobrému svarovému spojení bez větších propadlin a přetoků. Z výsledků je patrný výrazný nárůst maximální únosnosti svarového spoje s modifikací oproti svaru bez modifikace, a to až o 40 %. Lze tedy říci, že energetické můstky na povrchu pozitivně ovlivnily pevnost svarového spojení.

Následný materiál byl Polypropylen, který se vyznačoval dobrou svařitelností. Přeplátování i svařovací energie zůstaly stejné. Polypropylen nedosahoval takových významně rozlišených hodnot jako ABS ale i přesto můžeme pozorovat průměrné zvýšení únosnosti spoje o zhruba 7 %.

Největší nárůst únosnosti svarového spoje mezi modifikovaným a základním tvarem stykové plochy jsme zaznamenali u materiálu PA-6. Pevnost se zvýšila o více než 60 %. Svařovalo se energií 50 J a nedocházelo k přetokům na hranici svarového spoje. Stopa po sonotrodě byla téměř zanedbatelná.

Jako poslední se svařovala kombinace materiálů PMMA a ABS. Při svařování různých materiálů byla dodržena jedna zásadní podmínka, a to že do kontaktu se sonotrodou by se měl dostávat materiál s vyšší teplotou skelného přechodu, což byl v našem případě materiál PMMA. Přepřátování bylo 10 mm a svařovalo se energie 35 J. Při nižších energiích docházelo k porušení svarového spoje. Rozdíl v pevnosti svarového spojení s modifikací a bez ní je však téměř zanedbatelný, tudíž nelze říct, že by drážky u kombinace těchto materiálů nějak ovlivnily maximální únosnost spoje.

Pro určení statistické významnosti naměřených dat, konkrétně únosnosti svarového spoje byla využita metodika jednocestné Anovy, s konfidenční úrovní $1-\alpha = 0,95$. Lze tedy konstatovat, dle P hodnoty nabývající méně než 0,05 je možné zamítnout stanovenou nulovou hypotézu o rovnosti středních hodnot únosnosti. Tímto krokem lze na statistické úrovni konstatovat, že aplikace dané technologie vede k zvýšení únosnosti, která je statisticky prokazatelná.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DAVID, S.A., S.S. BABU a J.M. VITEK, 2016. Welding. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering [online]. Elsevier [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.02194-9. ISBN 9780128035818. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128035818021949>
- [2] Jaký je rozdíl mezi měkkým pájením, tvrdým pájením a svařováním: Svařování [online], [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-mekky-pajenim-tvrzym-pajenim-a-svarovanim>
- [3] Ing. Miloslav Loyda, Vlastimil Šponer, Ladislav Ondráček a kolektiv: Svařování termoplastů, Vydalo UNO Praha, spol. s.r.o., Šaldova 28, 186 00 Praha 8, v roce 2001, ISBN 80-238-6603-6
- [4] Internetové stránky publi.cz, Technologie zpracování plastů, Svařování plastů [online]. [cit. 18.1.2018]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/13.html>
- [5] AHMED, Nasir, c2005. New developments in advanced welding. Cambridge, England: Woodhead Pub. ISBN 978-1-85573-970-3.
- [6] Benatar, A. (2015). Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites. Power Ultrasonics, 295–312. doi:10.1016/b978-1-78242-028-6.00012-0
- [7] AMANAT, Negin, Natalie L. JAMES a David R. MCKENZIE, 2010. Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices. Medical Engineering & Physics [online]. 32(7), 690-699 [cit. 2019-05-06]. DOI: 10.1016/j.medengphy.2010.04.011. ISSN 13504533. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350453310000858>
- [8] Spojovací technika: Svařování topnou spirálou [online], In: . s. 17 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.auro.cz/public/content/articles/92/files/AGRULINE_Stechnika.pdf
- [9] Lintech, s.r.o. - Laserové technologie a průmyslové značení [online], [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.overena-znacka.cz/clanky-lintech-laserove-technologie-a-prumyslove-znaceni.html>
- [10] Wikipedia, Svařování plastů [online]. [cit. 10.1.2018]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařován%C3%AD_plastů
- [11] VURAL, M., 2014. Welding Processes and Technologies. Comprehensive Materials Processing [online]. Elsevier, s. 3-48 [cit. 2019-05-06]. DOI: 10.1016/B978-

- 0-08-096532-1.00603-8. ISBN 9780080965338. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080965321006038>
- [12] Ultrasonic Welding, 2009. Handbook of Plastics Joining [online]. Elsevier, s. 15-35 [cit. 2019-05-06]. DOI: 10.1016/B978-0-8155-1581-4.50004-4. ISBN 9780815515814. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780815515814500044>
- [13] CHUAH, Yew Khoy et al., 2000. Effects of the shape of the energy director on far-field ultrasonic welding of thermoplastics. Polymer Engineering & Science [online]. 40(1), 157-167 [cit. 2019-05-06]. DOI: 10.1002/pen.11149. ISSN 0032-3888. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.11149>
- [14] MMspektrum, Dr. Ing. Ondřej Kotera, Problematika dějů při svařování plastů vybranými technologiemi [online]. [cit. 7.1.2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-deju-pri-svarovani-plastu-vybranymi-technologie.html>
- [15] BĚHÁLEK, Luboš. *Přehled základních termoplastů, reaktoplastů a termoplastických elastomerů* [online]. Technická univerzita v Liberci, 2006 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf
- [16] NX (program): Siemens NX, 2001-. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/NX_\(program\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/NX_(program))
- [17] FRAJTOVÁ, Lenka, 2009. Svařování dlouhovláknových PP kompozitů ultrazvukem: Ultrasonic welding of the long-fibers PP composites. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-522-8.
- [18] DMG MORI: DMU 50 3. generace, DMG MORI [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50>
- [19] Jiří Neubauer, Katedra ekonometrie FEM UO Brno, Analýza rozptylu [online]. [cit. 27.4.2018]. Dostupné z: http://k101.unob.cz/~neubauer/pdf/analyza_rozptylu.pdf
- [20] ZLÁMAL, Filip. *Pokročilé statistické metody* [online]. In: . 2013, s. 41 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.med.muni.cz/patfyz/stat.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitril-butadien styren
PA	Polyamid
PP	Polypropylen
PC	Polykarbonát
PMMA	Polymethylmethakrylát
PVC	Polyvinylchlorid
PET	Polyethylentereftalát
PUR	Polyuretan
PE-HD	Vysokohustotní polyethylen
HIPS	Houževnatý polystyren
°C	Stupeň celsia
%	Procento
W	Watt
t	Čas
s	Sekunda
min	Minuta
m	Metr
mm	Milimetr
μm	Mikrometr
nm	Nanometr
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Svařování [2]</i>	12
<i>Obr. 2. Rozdělení svařovacích technologií [4]</i>	13
<i>Obr. 3. Rozdělení technologií svařování termoplastů dle způsobu dodání tepla [4]</i>	14
<i>Obr. 4. Schéma svařování horkým tělesem [7]</i>	15
<i>Obr. 5. Princip svařování topnou spirálou [8]</i>	16
<i>Obr. 6. Svařování za pomoci ručního extrudéru [4]</i>	17
<i>Obr. 7. Díly svařované infračerveným paprskem [4]</i>	18
<i>Obr. 8. Laserové svařování plastů. [9]</i>	18
<i>Obr. 9. Pevná nepromokavá plachta nákladního automobilu. [14]</i>	19
<i>Obr. 10. Princip rotačního svařování [7]</i>	20
<i>Obr. 11. Princip vibračního svařování [7]</i>	21
<i>Obr. 12. Části svařovacího zařízení [4]</i>	22
<i>Obr. 13. Základní profily sonotrod [12]</i>	24
<i>Obr. 14. Upínací přípravky pro ultrazvukové svařování [12]</i>	25
<i>Obr. 15. Ultrazvukové zařízení integrované a ruční [12]</i>	26
<i>Obr. 16. Základní princip ultrazvukového svařování [4]</i>	27
<i>Obr. 17. Princip bodového svařování [6]</i>	30
<i>Obr. 18. Ultrazvukové svařování folií a tkanin [6]</i>	32
<i>Obr. 19. Tabulka svařitelnosti plastů [6]</i>	33
<i>Obr. 20. Simulace obrábění v programu NX [16]</i>	35
<i>Obr. 21. Normované zkušební těleso [4]</i>	38
<i>Obr. 22. Rozměry zkušebního tělíska [15]</i>	39
<i>Obr. 23. Nakrácený vzorek PMMA</i>	39
<i>Obr. 24. Zkušební vzorek PMMA</i>	40
<i>Obr. 25. Zkušební vzorek ABS</i>	41
<i>Obr. 26. Zkušební vzorek PA6</i>	41
<i>Obr. 27. Zkušební vzorek PP</i>	42
<i>Obr. 28. Frézovací centrum [18]</i>	43
<i>Obr. 29. Návrh a následné frézování přípravku pro zajištění zkušebních vzorků</i>	43
<i>Obr. 30. Zajištění zkušební vzorku v přípravku a návrh drážek pro frézování</i>	44
<i>Obr. 31. Frézování drážek</i>	44
<i>Obr. 32. Svařovací zařízení</i>	45

<i>Obr. 33. Svařovací přípravek</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 34. Schéma působících sil ve svařovacím přípravku.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 35. Jednotlivé modifikace svarového spoje</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 36. Univerzální trhací zařízení Zwick Roell 1456.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 37. Svaření a přetržený vzorek PMMA.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 38. Svaření a přetržený vzorek PMMA varianta B.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 39. Průběh napětí při variantě B.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 40. Svaření vzorek PMMA varianta D</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 41. Roztržený vzorek ABS typ C</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 42. Roztržený vzorek PP typ A.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 43. Roztržený vzorek PP typ A.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 44. Průběh napětí u vzorku PP.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 45. Roztržený vzorek PA-6 typ A</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 46. Roztržený vzorek PA-6 typ C</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 47. Průběh napětí PA-6 typ C</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 48. Roztržený vzorek PMMA+ABS typ A</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 49. Roztržený vzorek PMMA+ABS typ C</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 50. Průběh napětí PMMA+ABS typ C.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 51. Graf a výsledné hodnoty ANOVA hypotézy u materiálu PMMA.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 52. Graf a výsledné hodnoty ANOVA hypotézy u materiálu ABS</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 53. Graf a výsledné hodnoty ANOVA hypotézy u materiálu PP</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 54. Graf a výsledné hodnoty ANOVA hypotézy u materiálu PA6</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 55. Graf a výsledné hodnoty ANOVA - PMMA a ABS.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 56. Graf srovnání maximální únosnosti základních materiálů</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 57. Graf srovnání maximální únosnosti PMMA.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 58. Graf srovnání maximální únosnosti ABS</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 59. Graf srovnání maximální únosnosti PP</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 60. Graf srovnání maximální únosnosti PA6</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 61. Graf srovnání maximální únosnosti u kombinace PMMA a ABS</i>	<i>74</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Pevnosti základních materiálů.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 2. Výsledky experimentu při variantě A</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 3. Výsledky experimentu při variantě B</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 4. Výsledky experimentu při variantě C</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 5. Výsledky experimentu při variantě D.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 6. Výsledky experimentu materiál ABS typ A</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 7. Výsledky experimentu materiál ABS typ C</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 8. Výsledky experimentu materiál PP typ A</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 9. Výsledky experimentu materiál PP typ C</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 10. Výsledky experimentu materiál PA-6 typ A</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 11. Výsledky experimentu materiál PA-6 typ C</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 12. Výsledky experimentu materiálů PMMA+ABS typ A</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 13. Výsledky experimentu materiálů PMMA+ABS typ C</i>	<i>64</i>