



Diplomová práce

Ultrazvukové svařování dílů vyrobených technologií HP Jet Fusion

Studijní program:

N0722A270001 Technologie plastů a kompozitů

Autor práce:

Bc. Jakub Křováček

Vedoucí práce:

Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Ultrazvukové svařování dílů vyrobených technologií HP Jet Fusion

Jméno a příjmení:

Bc. Jakub Křováček

Osobní číslo:

S22000257

Studijní program:

N0722A270001 Technologie plastů a kompozitů

Zadávací katedra:

Katedra strojírenské technologie

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše problematiky ultrazvukového svařování.
2. Rozbor problematiky technologie 3D tisku.
3. Návrh a realizace experimentálního měření.
4. Vyhodnocení ultrazvukové svažitelnosti dílů vyrobených technologií HP Jet Fusion.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

1. TROUGHTON, M. J. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. William Andrew, 2008.
2. KOLECHUKWU, A. *Ultrasonic Welding Pro Guide*, 2023, ISBN 13-979-8377265887.
3. WISE, R. J. *Thermal welding of polymers*. Woodhead Publishing, 1999.
4. GÜRTLER, J. *Vliv technologických parametrů ultrazvukového svařování na pevnost svarového spoje*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. Diplomové práce.
5. NOORANI, R. *3D printing: technology, applications, and selection*. CRC Press, 2017.
6. WINNAN, Ch. D. *3D printing: The next technology gold rush ; future factories and how to capitalize on distributed manufacturing*. [USA], 2012. ISBN 978-1494213961.
7. DIEGEL, O., NORDIN, A. (ed). *A practical guide to design for additive manufacturing*. Singapore: Springer, [2020]. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 978-981-13-8283-3.

Vedoucí práce: Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 6. listopadu 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 6. května 2025

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
garant studijního programu

V Liberci dne 6. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

21. května 2024

Bc. Jakub Křováček

Ultrazvukové svařování dílů vyrobených technologií HP Jet Fusion

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním svařitelnosti dílů vyrobených technologií Multi Jet Fusion (MJF), konkrétně materiálů PA 12, PA 12 GB a PP. U dílů s materiálem PA 12 a PA 12 GB byla přidána povrchová úprava – chemické vyhlazení. Vybrané materiály a jejich úpravy byly svařovány pomocí ultrazvuku. V teoretické části je popsána problematika aditivních technologií se zaměřením na technologii MJF. Dále je zde uvedena teorie ultrazvukového svařování a svařitelnosti plastů. V experimentální části je provedeno porovnání kvality tisknutých dílů. Následně jsou hledány optimální podmínky pro svařování, za kterých jsou svařeny další vzorky. Konečným krokem je porovnání pevnosti svarových spojů získaných tahovou zkouškou. Při porovnání pevnosti bylo zjištěno, že PA 12 a PP vykazují dobrou svařitelnost, zatímco u PA 12 GB došlo k výraznému poklesu pevnosti ve srovnání s hodnotami uvedenými v materiálovém listu.

Klíčová slova

Multi jet Fusion (MJF), svařitelnost plastu, PA 12, PA 12 GB, PP, ultrazvukové svařování, aditivní technologie, kvalita tisku, vnitřní vady, optimální svařovací podmínky, tahová zkouška, chemické vyhlazení, pevnost svarových spojů, porovnání pevnosti

Ultrasonic welding of Parts Produced by HP Jet Fusion Technology

Abstract

This master's thesis deals with the comparison of the weldability of parts made by Multi Jet Fusion (MJF) technology, specifically materials PA 12, PA 12 GB, and PP. For parts with PA 12 and PA 12 GB material, a surface treatment - chemical smoothing was added. The selected materials and their modifications were welded using ultrasound. The theoretical part describes the issue of additive technologies, focusing on MJF technology. Furthermore, the theory of ultrasonic welding and weldability of plastics is presented. In the experimental part, a comparison of the quality of printed parts is performed. Subsequently, optimal conditions for welding are sought, under which further samples are welded. The final step is a comparison of the strength of welded joints obtained by a tensile test. When comparing strength, it was found that PA 12 and PP show good weldability, while PA 12 GB showed a significant decrease in strength compared to the values listed in the material sheet.

Keywords

Multi Jet Fusion (MJF), plastic weldability, PA 12, PA 12 GB, PP, ultrasonic welding, additive technology, print quality, internal defects, optimal welding conditions, tensile test, chemical smoothing, strength of welded joints, strength comparison.

Poděkování

Rád bych vyjádřil své upřímné poděkování všem, kteří mě podporovali během mého studia zvláště při psaní této diplomové práce. Zvláštní poděkování patří mému vedoucímu práce, Ing. Pavlu Brdlíkovi, Ph.D., za jeho velkou ochotu a neustálou podporu. Jeho cenné rady a konstruktivní zpětná vazba mi pomohly porozumění danému tématu a zlepšit mé dovednosti v dané problematice. Dále bych chtěl poděkovat firmě MS Ultrasonic Technology Group za jejich rady a přínos v oboru ultrazvukového svařování. Mé díky patří také mé rodině a přátelům za jejich trpělivost, povzbuzení a nekonečnou víru v můj úspěch. Bez Vaší podpory a důvěry by tato diplomová práce nebyla možná. Mé upřímné díky patří Vám všem.

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Teoretická část.....	13
2.1	Představení 3D tisku	13
2.2	Rozdělení Aditivních technologií	13
2.2.1	Multi jet Fusiun	16
2.2.2	Parametry tiskárny HP MJF	17
2.2.3	Materiály na tiskárně HP MJF	17
2.2.4	Dokončovací operace po tisku na HP MJF	18
2.3	Svařování termoplastů	19
2.3.1	Metody svařování	19
2.4	Ultrazvukové svařování	20
2.5	Části stroje	20
2.5.1	Svařovací cyklus.....	23
2.5.2	Svařovací parametry	26
2.5.3	Svařitelnost termoplastů	28
2.5.4	Usměrňovač energie	29
3	Experimentální část	31
3.1	Volba materiálu.....	31
3.2	Volba testovaného dílu	31
3.3	Stanovení svařitelnosti dílů z PA 12.....	32
3.3.1	Tisknutí dílů PA 12 -tisk pod úhlem 0°	32
3.3.2	Kvalita vytisknutých dílů z PA12 – tisk pod úhlem 0°	35
3.3.3	Svařování dílů PA 12 - tisk pod úhlem 0°	41
3.3.4	Tisknutí dílů PA 12 - tisk pod úhlem 45°.....	50
3.3.5	Kontrola kvality dílů PA 12 – tisk pod úhlem 45°	50
3.3.6	Svařování dílů PA 12 – tisk pod úhlem 45°	52
3.4	Stanovení svařitelnosti dílů z PA 12 GB	54

3.4.1	Tisknutí dílů PA 12 GB	55
3.4.2	Kontrola kvality PA 12 GB	55
3.4.3	Svařování dílů PA 12 GB	56
3.5	Stanovení svařitelnosti dílů z PP.....	58
3.5.1	Tisk dílu PP	58
3.5.2	Kontrola kvality PP	58
3.5.3	Svařování dílů PP	60
4	Vyhodnocení a diskuze výsledků.....	62
4.1	Vnitřní vady	62
4.2	Vyhodnocení rozměrové přesnosti dílů	64
4.2.1	Vyhodnocení měření výšky koncentrátoru a absolutních výšek vzorků	65
4.2.2	Vyhodnocení měření kolmosti.....	66
4.3	Vyhodnocení svařitelnosti	67
5	Závěr.....	70
	Použitá literatura.....	72
	Seznam příloh.....	76

Seznam použitých zkratek a symbolů

3D	Trojrozměrné	
ABS	Akrylonitril-butadien styren	
ASA	Acrylic Styrene Acrylonitrile	
ASTM	American Society for Testing and Materials	
AT	Aditivní technologie	
BJ	Binder Jetting	
CT	Počítačová tomografie	
DLF	Direct Laser Forming	
DLP	Digital Light Processing	
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	
EBM	Electron Beam Melting	
f	Frekvence	[kHz]
FDM	Fused Deposition Modeling	
FFF	Fused Filament Fabrication	
F _{MAX}	Síla porušení	[N]
HP	Hewlett-Packard	
LCD	Liquid Crystal Display	
LOM	Laminated Object Manufacturing	
MJF	Multi Jet Fusion	
MJM	Multijet Modeling	
MJS	Multiphase Jet Solidification	
MKP	Metoda konečných prvků	
PA	Polyamid	
PA 12	Polyamid 12	
PA 12 GB	Polyamid 12 Glass balls	
PC	Polykarbonát	
PE	Polyethylen	
PEEK	Polyetheretherketon	
PET	Polyethylentereftalát	
PLA	Polylactic acid – kyselina polymléčná	
PLA	Kyselina polymléčná	
PMMA	Polymethylmethakrylát	
PP	Polypropylen	
PVC	Polyvinylchlorid	
R ₁	Poloměr počátku svaru	[mm]
R ₂	Poloměr konce svaru	[mm]
S	Plocha svaru	[mm ²]
SLA	Stereolithografie	
SLM	Selective Laser Melting	
SLS	Selective Laser Sintering	
STL	Stereolitografie	
TPA	Termoplastický polyuretan	
TPU	Termoplastický polyuretan	

UV
 σ
 σ_m

Ultra fialové
Napětí
Mez pevnosti v tahu

[MPa]
[MPa]

1 Úvod

V dnešní době se technologie rychle vyvíjejí a otevírají nové možnosti v mnoha oblastech, včetně výroby. Jednou z těchto technologií je 3D tisk, který přináší revoluci v oblasti výroby. Tato práce se zaměřuje na technologii HP Multi Jet Fusion (MJF), která je jednou z nejmodernějších a nejefektivnějších technologií 3D tisku. Technologie MJF nabízí řadu výhod, jako je schopnost hromadného tisku s vysokou přesností a rychlostí. Není zde potřeba tisku podpor, což je úspora materiálu. Díky tomu všemu je tato technologie udržitelná a ekologická, což je v dnešní době stále důležitější.

Tato práce se také zabývá ultrazvukovým svařováním dílů. Ultrazvukové svařování je efektivní metoda spojování polymerů, která se může používat pro vytváření komplexních a odolných dílů. Ultrazvukové svařování je rychlé (typický čas svařování je od 0,15 do 1,15 s) a je snadno automatizovatelné, což je ideální pro výrobu ve velké sérii např. v automobilovém průmyslu. Ačkoli ultrazvukové svařování nachází uplatnění v širokém spektru průmyslových sektorů, srovnávání charakteristik svarů u dílů vytvořených různými výrobními technologiemi, zůstává klíčovou oblastí výzkumu. V rámci aditivních technologií je zajímavé porovnávat pevnosti svarových spojů s vlastnostmi materiálů vyrobených technologií MJF.

V této diplomové práci se porovnájí vlastnosti svarových spojů vyrobených pomocí ultrazvukového svařování, kde se díly vyrobí aditivní technologií MJF. Tato práce se zaměřuje na tři nejčastější materiály využívané v této technologii: PA 12, PA 12 GB a PP. U prvních dvou materiálů se přidává i modifikace povrchu, která patří mezi častou dokončovací operaci. Hlavním úkolem práce je posoudit vliv materiálů a úpravy povrchu na kvalitu svaru a jejich svařitelnost.

V rámci praktické části této práce budou udělány experimenty s cílem zkoumat vliv změny materiálu při ultrazvukové svařování. Díly na svařování budou vyrobeny technologií MJF, ke kterým se přidávají varianty s chemickým vyhlazením povrchu. Pro hodnocení kvality svarových spojů se využije optická i mechanická kontrola. Získané informace z proběhlých experimentů poskytnou cenné údaje o vlastnostech svarů v kontextu použitých materiálů a jejich úpravy povrchu.

Cílem této diplomové práce je rozšířit současné poznatky o srovnání vlastností svarů vytvořených ultrazvukovým svařováním u dílů vyrobených technologií HP Multi Jet Fusion (MJF). Výsledky této práce mohou poskytnout informace při výběru vhodných materiálů pro návrh a výrobu plastových dílů, které budou následně podrobeny ultrazvukovému svařování. Tato práce tak přispívá k využití aditivní výroby (MJF) v oblasti ultrazvukového svařování.

2 Teoretická část

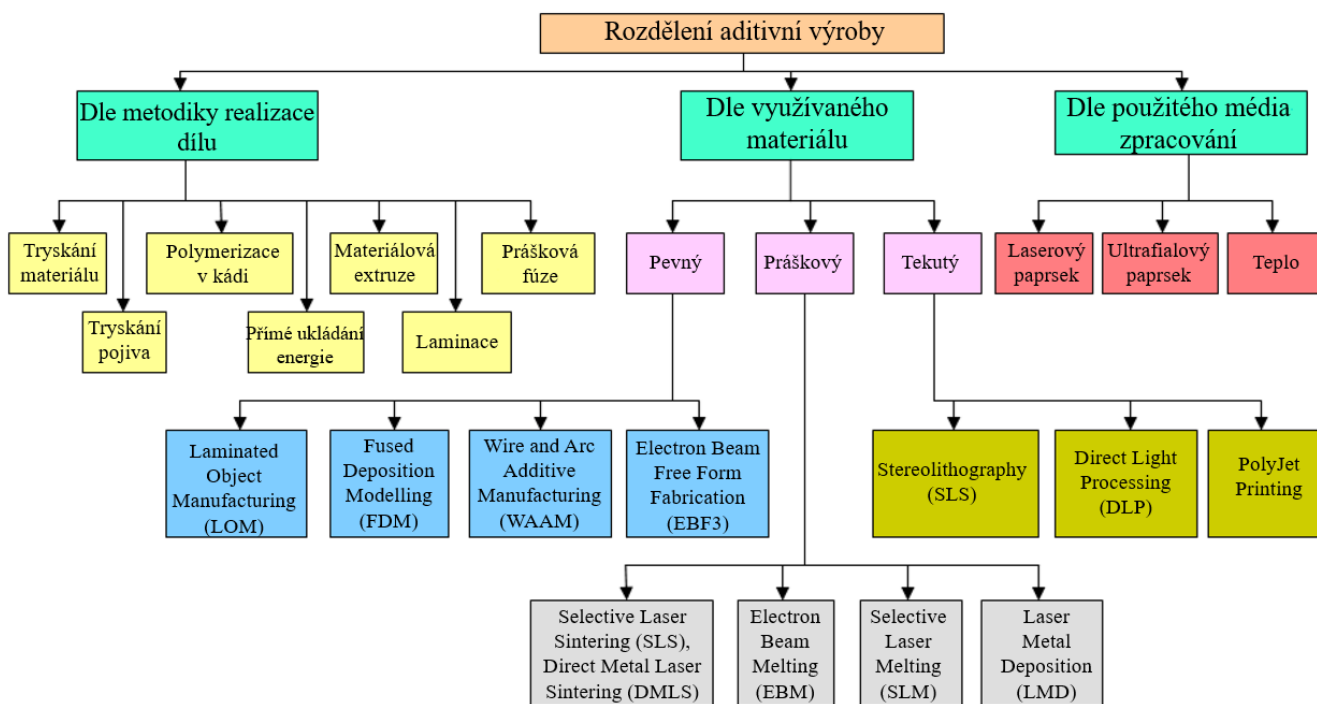
Teoretická část diplomové práce, která je v souladu se zadáním a stanovenými cíli, je zaměřená v úvodním segmentu na aditivní technologie. Blíže se zabývá technologií Multi jet fusion (MJF). Dále se věnuje práce svařování plastů a konkrétně oboru ultrazvukového svařování.

2.1 Představení 3D tisku

Aditivní výroba nebo také 3D tisk je technologie, kdy za pomoci digitálních dat vzniká trojrozměrný objekt. V těchto technologiích je objekt vytvářen pomocí souvislých vrstev. Tyto vrstvy jsou pokládány na sebe, až do dokončení daného programu. Každá vrstva takto tisknutá se může vnímat, jako tenký horizontální řez daným objektem.

2.2 Rozdělení Aditivních technologií

V průběhu vývoje aditivní výroby se objevily různé termíny a definice, často spojen se speciálními oblastmi použití a patentů prvotních výrobců. Existují různé metody klasifikace aditivní výroby. ASTM (American Society for Testing and Materials) píše, že je nyní vymyšleno více než 50 různých druhů aditivní výroby, které lze rozlišit na základě různých parametrů. Byl vybrán jeden druh dělení, který je na obr. 2.1. Níže se vybraly technologie 3D tisku, které mají největší potenciál v oblasti polymerů [1, 2].



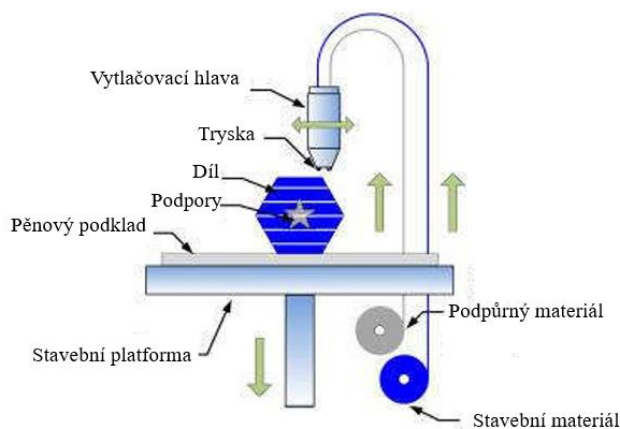
Obr. 2.1 Rozdělení aditivní výroby [2]

Materiálová extruze (Material Extrusion)

3D tisk pomocí metody extruze materiálu, známé také jako FFF/FDM (Fused Filament Fabrication/ Fused Deposition Modeling), je nejčastěji používaný a nejčtenější postup 3D tisku díky své poměrné jednoduchosti, a především nízké pořizovací ceně od 15 000 Kč. Tato metoda se zakládá na selektivním podávání materiálu prostřednictvím trysky nebo otvoru na pevný podklad.

Před jejím použitím se nejprve ohřeje vložený filament, který se v ohřívací komoře roztaví. Komora nebo tisková hlava je ohřívána pomocí topných těles na 120 až 200 °C. Úzká vlákna roztaveného plastu jsou nejprve položena na stavební platformu a následně spojena teplem s předešlou vrstvou. Celý proces je znázorněn na schématu na obr. 2.2 [1, 3].

Výhody této technologie jsou nízké pořizovací a provozní náklady, jednoduchá údržba a obsluha. Mezi nevýhody patří nízká kvalita povrchu. Další riziko je delaminace vrstev a vznik toxických výparů (ASA, ABS) [3].



Obr. 2.2 Princip technologie FFF [4]

Polymerizace v kádi (Vat Polymerization)

Jednou z technik 3D tisku je technika zvaná “Vat Polymerization”. Kapalný fotopolymer neboli pryskyřice, je umístěn v nádrži a je na definovaných místech vytvrzován světlem, což vede k vytvoření pevného tělesa. Tvar každé vrstvy je určen pomocí sliceru (software, který rozdělí 3D model na jednotlivé vrstvy), ve kterém lze nastavit specifickou technologii tisku.

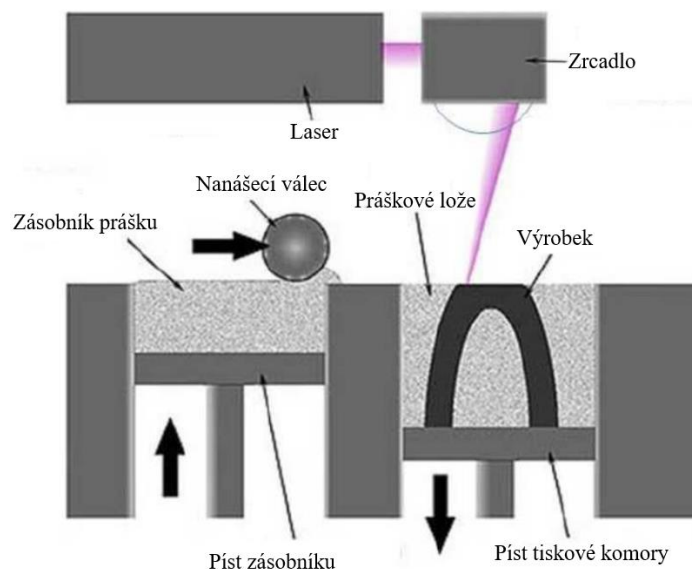
Tato kategorie 3D tisku zahrnuje více způsobů, které se liší typem světelného zdroje použitého k vytvrzování objektů a způsobem ozařování vrstev během tisku. Mezi nejznámější patří:

- Stereolithography (SLA),
- Digital Light Processing (DLP),
- Liquid Crystal Display (LCD/MSLA) [1–3].

Výhody těchto technologií jsou: kvalita povrchu, nevzniká riziko delaminace vrstev, větší detaily na dílech, průhlednost dílů. Do nevýhod se řadí nízká pevnost a životnost, malý výběr materiálů a vyšší pořizovací cena.

Prášková fúze (Powder Bed Fusion)

Jednou z nejmodernějších technik 3D tisku je “Power Bed Fusion”. Tato metoda umožňuje vytváření objektů z plastových, kovových a keramických materiálů. Její princip je podobný metodě tryskání pojiva. V obou metodách je hlavním aspektem materiál v práškové podobě, který je uložen v pracovním prostoru a je určitou technologií spojován v jeden celistvý díl. Aby se vytvořil díl v prostoru, musí dojít ke spojování mezi jednotlivými vrstvami. K tomu se používá elektronový nebo laserový paprsek. Další specifikum této technologie je inertní atmosféra, která je uvnitř v komoře. Prášková fúze je reprezentována technologií Selective Laser Sintering (SLS) na obr. 2.3 [2, 3, 5].



Obr. 2.3 Princip technologie SLS [6]

Během výroby zdroj tepla působí na malou oblast vrstvy prášku, což vede k tavení určitých zrn. Tím dojde ke spečení na místech daného průřezu. Poté se tisková deska, která je uložena na pístu, posune vertikálním směrem dolů. Píst se také posune ale opačným směrem nahoru se zásobníkem prášku. To umožní roztíracímu válečku (recoater) nanést další vrstvu prášku ze zásobníku na plochu a celý tento průběh se opakuje. Níže jsou vypsány technologie, které obsahují práškovou fúzi [6]:

- Selective Laser Sintering (SLS),
- Selective Laser Melting (SLM),
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS),
- Electron Beam Melting (EBM).

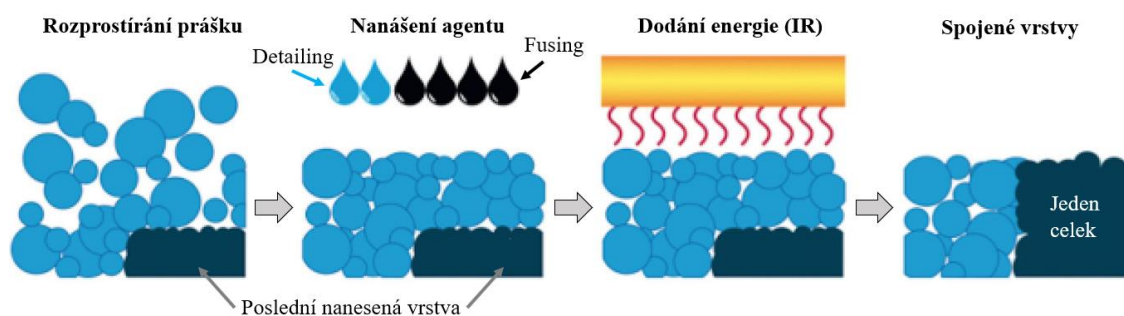
Výhody těchto metod jsou: kvalita tisku, malé náklady pro kusovou výrobu, zaručení stejně vyrobených dílů. Nevýhody jsou: vyšší pořizovací náklady, rozměry, omezený výběr materiálu pro dané technologie.

Tryskání pojiva (Binder Jetting)

Tryskání pojiva, známé také jako Binder Jetting (BJ), je proces, který spojuje práškové nebo granulové materiály pomocí cíleně nanášeného tekutého pojiva. Tato technika je podobná technologii práškové fúze (Powder Bed Fusion). Do této metody patří technologie Multi jet Fusion (MJF). Procesní stanice se dají dobře multiplikovat a propojovat a vznikají tak velké tiskařské farmy. Z těchto důvodů se bude tato práce dále zabírat technologií MJF.

2.2.1 Multi jet Fusiun

Multi jet Fusiun vynalezla firma Hewlett-Packard (HP), která ji uvedla na trh v roce 2016. Proces výroby začíná předehřátím komory těsně pod teplotu tání daného tisknutého materiálu. Další krok je rovnoměrné rozprostření vrstvy prášku po pracovní ploše. To se provádí díky nanášecímu válečku. Vybavená tiskařská hlava se pohybuje po předem dané dráze po stavební ploše. Během pohybu hlavy se cíleně nanáší kapalné pojivo v kapičkách na určená místa práškového materiálu. Nanáší se dva druhy kapalných agentů, fusing a detailing, viz obr. 2.4. První agent fusing se nanáší na ty části, které se potom spojí v jeden celek, teda vnitřek dílů. Druhý agent detailing se aplikuje na okraj dílů pro zlepšení kvality a přesnosti. Nanesené kapalné pojivo se poté spojí dohromady s práškovým materiálem. Poté se pomocí zdroje infračerveného záření vytvrdí nanesená vrstva. Takto vytvrzená vrstvička se spojí s předchozí a vznikne pevná část. Po spojení vrstev se platforma posune směrem dolu o 0,008 mm a na předchozí vrstvu se nanese nový prášek. Celý proces se opakuje až do finální vrstvy [2, 3].



Obr. 2.4 Proces metody MJF [7]

Celá pracovní sestava se skládá z tiskárny a stanice post-procesingu, kde se čistí díly po tisku a míchá se nový prášek se starým v poměru 80/20. na obr. 2.5 je představen model HP MJF 4200 [8].



Obr. 2.5 HP MJF 4200 – vlevo tiskárna a vpravo stanice post-procesingu [8]

2.2.2 Parametry tiskárny HP MJF

Tiskárna HP MJF 4200 je průmyslové řešení, které je ideální pro funkční prototypování a malosériovou výrobu. Cena zařízení je kolem 7,5 – 11 milionů korun. Parametry tiskárny, které jsou uvedeny v tab. 2.1, může měnit jen firma HP nebo firma, která dostane pověření. Bez možnosti úpravy parametrů jdou pouze upravit jen mechanické vlastnosti dílů tím, že se natočí v prostoru [9].

Tab. 2.1 Parametry tiskárny HP MJF 4200 [10]

Parametry tiskárny HP MJF 4200	
Tiskový prostor	380x284x380 mm
Rychlost tisku	4115 cm ³ /h
Tloušťka vrstvy	0,008 mm
Rozlišení	1200 dpi
Přesnost tisku	±0,1 mm
Poměr nového/ starého prášku	80/20
Doba tisku plného prostoru	10 hod
Doba přirozeného chlazení	48 hod
Doba rychlého chlazení na stanici post-procesing	10 hod

2.2.3 Materiály na tiskárně HP MJF

Firma HP si vybudovala i svoje speciální materiály pro tuto technologii, jiné se nedají použít. Oproti technologiím jako je třeba FFF nebo FDM je množství materiálu značně omezené ale i tak se firma snaží vyvíjet další materiály. Nyní je portfolio tvořeno převážně polyamidy a to PP 11, PA 12 a PA 12 GB. Na žádosti firem byl přidán ještě polypropylen (PP). Další kategorií, která nespadá do termoplastu jsou elastomery, firma dodává termoplastické polyuretany (TPU, TPA). V budoucnu by měla firma přidat vysoce odolný plast a to polyetheretherketon (PEEK).

Materiály se dodávají v základní šedivé barvě. Dále budou podrobněji popisovány materiály, se kterými se nejvíce pracuje na tiskárnách HP a které jsou důležité pro potřeby této práce [8, 9, 11].

HP PA 12

Odolný termoplast pro díly s vysokou hustotou, který má výbornou odolnost proti olejům, tukům a zásadám. Je vytvořen pro tisk složitých sestav, krytů, pouzder a také je vodotěsný. Patří mezi nejpoužívanější z portfolia. Má certifikaci pro biokompatibilitu s lidskou kůží, takže se může používat ve zdravotnictví a potravinářství. Kromě šedivé se dodává i v černé barvě [8, 12].

HP PA 12 GB

Jediný materiál, do kterého je přidáno aditivum s podílem 40 % skla. Materiál má výborné mechanické vlastnosti díky skleněným kuličkám. Mezi jeho přínosy patří také vysoká recyklovatelnost a kvalita rozměrové přesnosti. Je ideální pro díly, které potřebují mít vysokou tuhost např. kryty, pouzdra, upínače apod [8].

HP PP

Tento materiál je možné použít je na nových strojích 5200. Materiál byl vyvinut pro potřeby zákazníků ze strojírenství, kde se tento materiál hojně vyskytuje. Má výbornou chemickou odolnost, nízkou absorpci vlhkost a dlouhou životnost. Je to ideální řešení pro potrubí, kapalinové systémy, nádoby apod. [8, 13].

2.2.4 Dokončovací operace po tisku na HP MJF

Proces dokončovacích operací je součástí každé technologie 3D tisku. Díly po tisku nejsou připravené k okamžitému použití, je nutné provést dokončovací operace. Po dokončeném tisku a odstranění prášku na stanici post-procesingu, zůstanou ještě na povrchu dílu přilepené zbytky nespečeného prášku, který je potřeba odstranit. Na odstranění se používají štětce, kartáče a další drobné nástroje, které nepoškodí jemné kontury dílu. Proto se také následně dávají díly na pískování, kde se malé částičky abraziva postarají o zbytkové odstranění prášku. Abrazivo je foukáno pod tlakem v uzavřeném stroji [14, 15].

Dále se mohou použít další modifikace dílů, dle potřeby výroby, mezi které patří:

- **omílání:** patří do skupiny leštění povrchů. V bubnu, který se otáčí se omílají součástky svými plochami o sebe. Kontaktem mezi tělesy dochází k odebírání materiálu v řádu tisícín milimetru. Dochází k zaoblení hran a snížení hodnot drsnosti [16].

- **Chemické vyhlazení povrchu:** průběh procesu začíná položením či upnutím vzorků do komory, kam se vypustí pára s chemikálií. Složení chemikálie si nechávají výrobci jako svoje know-how. Látka kondenzuje na povrchu a tím naleptává plochy součástí. Naleptání zacelí póry a srovná nerovnosti. Poté se do povrchu nedostane žádná jiná látka ani nečistota. Mechanické vlastnosti se zlepší, jelikož na povrchu bude méně koncentrátů napětí. Součásti mají poté černou barvu. Tento způsob dokončení není vhodný pro všechny materiály. Např. PP nelze chemicky vyhladit, jelikož jeho chemické složení nedovoluje naleptat jeho povrch [17].
- **Barvení máčením:** kde je zapotřebí použít barvení, použije se tato možnost. Proces probíhá tak, že se součást ponoří do barviva, kde se poté barva vsaje do povrchu. Ve výrobě se nejvíce používají tmavé odstíny, jelikož je složité barvit světlou barvou, protože součásti jsou po tisku šedivé. Vrstva barvy je závislá na době ponoření součásti v barvě. Vrstva může mít až několik desetin milimetru [18].

Technologie MJF umí rychleji tisknout díly oproti SLS, díky tomu je více vhodná pro sériovou výrobu. Výhoda této technologie je vysoká přesnost, preciznost detailů a míra ekologie, kdy se používá až 20 % použitého prášku na nový tisk. Tato technologie nepotřebuje tisk podpor, jelikož podporu zde dělá nevytvrzený prášek. Mezi nevýhody patří malé portfolio materiálů a vysoká pořizovací cena celé sestavy.

2.3 Svařování termoplastů

Při procesu svařování plastů se vytváří pevný spoj mezi jednotlivými částmi, a to s úplnou nebo jen částečnou viditelností spojovaných hran. Svařování může probíhat s použitím přídavného materiálu nebo bez [19]. Svarový spoj vzniká za působením tepla a tlaku. Proces začíná se zahřátím svarových ploch. Polymer přechází ze svého pevného stavu do viskózního a následně se přemění v taveninu. Po zahřátí silová složka přitlačí určitou silou plochy k sobě. Při dotyku dvou ploch dochází k propletení makromolekul v místě spoje. Po přitlačení ploch k sobě a propletení makromolekul dochází ke chladnutí. Po vychladnutí, vzniká nerozebíratelný spoj. Takto svařovat lze pouze termoplastické polymery [20].

2.3.1 Metody svařování

Existuje široká škála technologií a postupů speciálně navržených pro svařování termoplastů, které se v praxi hojně využívají. Tyto metody lze kategorizovat podle toho, jak je teplo přiváděno do svaru. Například některé metody mohou využívat přímé ohřevy, zatímco jiné mohou využívat nepřímé zdroje tepla. Metody podle přiváděného tepla jsou:

- vedením,
- konvekcí,
- třením,
- zářením [19, 21].

V průmyslových odvětvích se v současné době hojně používá ultrazvukové svařování, které reflektuje použití polymerních materiálů. Často je to z důvodu rychlosti svařování, opakovatelnosti a možné automatizace na výrobních linkách. Proto se práce bude následně věnovat podrobnějšímu rozboru této technologie [22].

2.4 Ultrazvukové svařování

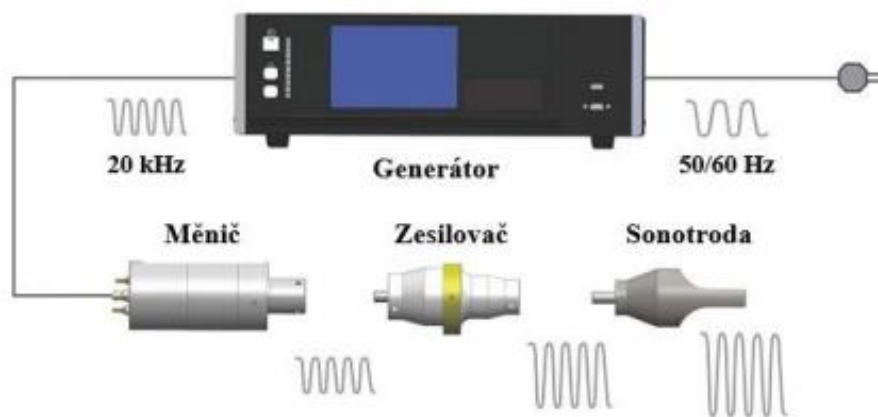
Ultrazvukové svařování je formou třecího svařování, které se odlišuje od ostatních spojovacích technik tím, že umožňuje dosáhnout vysoké pevnosti svaru během několika sekund. Základem ultrazvukového svařování je spojení dvou nebo více dílů pomocí tlaku a tepla vytvořeného mechanickým pohybem. Jako příklad praktického využití se uvádí automobilový průmysl, kde se ultrazvukové svařování používá jak v interiéru, tak v exteriéru automobilů. V interiéru automobilu tento druh spoje můžeme nalézt v obložení kufru, dekoračních lišt, obložení sloupků, dveřního obložení anebo v rámci palubní desky. V exteriéru je důležitým aspektem vzhled. Příkladem využití ultrazvukového svařování je zakrytí předních a zadních nárazníků, viz obr. 2.6, lemy blatníků, kufr atd. [22].



Obr. 2.6 Ultrazvukové svařování předního blatníku [3]

2.5 Části stroje

Ultrazvuková svářečka se skládá z generátoru, měniče, zesilovače, sonotrody a také z přípravku, na který se upínají díly. V následujících částech je popsáno, jak jednotlivé části fungují. Všechny zmiňované části stroje jsou zobrazeny na obr. 2.7 [23].



Obr. 2.7 Princip ultrazvukového svařování [5]

Generátor

Generátor je zařízení, které funguje jako napájecí zdroj pro svařovací stroj, viz obr. 2.8. Jeho cílem je přeměnit standardní elektrickou energii získanou ze sítě s frekvencí 50 Hz na vysokofrekvenční elektrickou energii (ultrazvukovou frekvenci), která je potřebná pro fungování svařovacího stroje. Tento stroj je navržen a postaven tak, aby pracoval při specifických frekvencích, obvykle pracuje na 15, 20, 30 a 40 kHz. Generátor, který tuto transformaci provádí, může být buď samostatným zařízením, nebo může být integrován přímo do konstrukce svařovacího stroje. Volba mezi těmito dvěma možnostmi závisí hlavně na výrobci a na tom, jak je stroj používán [22].



Obr. 2.8 Ultrazvukový generátor [6]

Konvertor

Konvertor (měnič) na obr. 2.9, který je zdrojem ultrazvukových vln. Přeměňuje elektrickou energii z generátoru na mechanickou energii, tedy na kmity. Přitom se frekvence nezmění a zůstává na úrovni ultrazvuku. V tomto bodě jsou kmity tak slabé (amplituda je přibližně 12 μm , což odpovídá frekvenci 20 kHz), že je prakticky nemožné dosáhnout svaření dílů. Proto je nezbytné zvýšit hodnotu amplitudy [22, 24].



Obr. 2.9 Konvertor

Zesilovač

Zesilovač (booster) na obr. 2.10, má za úkol upravit amplitudu signálu z konvertoru. V průmyslových aplikacích se často využívají zesilovače s normalizovaným koeficientem zesílení. Tento koeficient se obvykle pohybuje v rozmezí od 1,0 (neupravuje amplitudu, funguje pouze jako propojovací prvek mezi měničem a sonotrodou) až do 3,0 (zvýší amplitudu třikrát), ale existují i zesilovače s koeficientem zesílení menším než 1,0 (redukují amplitudu) [22, 24].



Obr. 2.10 Zesilovač [25]

Sonotroda

Sonotroda, která je součástí ultrazvukového zařízení, představuje poslední segment ultrazvukové svářečky a je považována za nejdůležitější prvek ultrazvukového systému. Důvodem je, že sonotroda je v přímém kontaktu se svařovaným materiálem a předává na něj mechanickou energii. Každá aplikace vyžaduje sonotrodu specifického tvaru a velikosti, viz obr 2.11. Tvar sonotrody, konkrétně její zúžení, má podobný efekt jako zesilovač, tedy dochází k modifikaci hodnoty amplitudy. U sonotrody, stejně jako u zesilovače, se hodnota amplitudy upravuje podle standardizovaného koeficientu změny. Sonotroda je nástroj, který je vystaven cyklickým zatížením. Z těchto aspektů se jako materiál pro sonotrody obvykle volí vysoce kvalitní ocel nebo slitiny hliníku a titanu. V současné době mají titanové slitiny díky svým vlastnostem nejširší uplatnění [22, 24].



Obr. 2.11 Rozmanitá geometrie sonotrod [9]

Aretační přípravek

Aretační přípravek má za úkol nejen přesně udržet svařované díly v požadované pozici, ale také je pevně upevnit, aby se zabránilo ztrátám energie přenosem vibrací mimo místo svaru. Pro vytvoření kvalitního svaru je nezbytné co nejefektivněji přenést vibrační energii na místo svaru. Z toho důvodu je pro každou aplikaci požadováno specifické aretační nebo upínací zařízení, což se pokládá za hlavní nedostatek ultrazvukového svařování. Na obr. 2.12 je přípravek na zkoušku svařitelnosti ultrazvukového svařování, kdy se do náboje pokládá zkušební těleso.



Obr. 2.12 Aretační přípravek (vlastní zdroj)

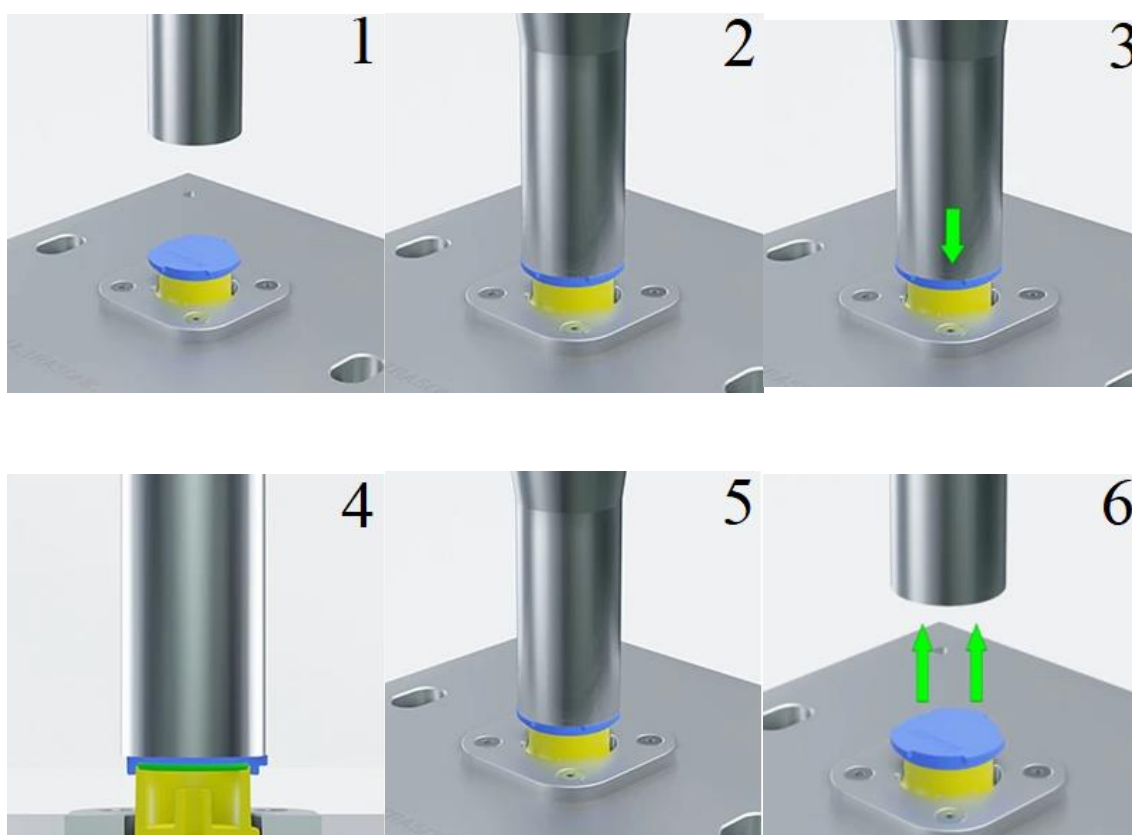
2.5.1 Svařovací cyklus

Ultrazvukové svařování je proces, který se skládá z několika základních kroků, které jsou podrobně popsány níže. Na obr. 2.13 je představen celý svařovací cyklus 1-6.

1. Díly určené ke svařování jsou umístěny v přípravku a zafixovány do svařovací pozice. [26].
2. Sonotroda přijede pracovním posuvem až na místo, kdy poté dojde ke kontaktu s dílem [26].
3. Sonotroda začíná působit předem nastavenou svařovací silou na upnuté díly.
4. Zahájení svařovacího procesu. Jakmile je dosaženo definovaného tlaku (viz předchozí bod) sonotroda začíná vibrovat svisle s nastavenou frekvencí 20 nebo 35 kHz v rozpětí kmitů náležitých amplitudě obvykle do 90 μm a po časový úsek, který odpovídá

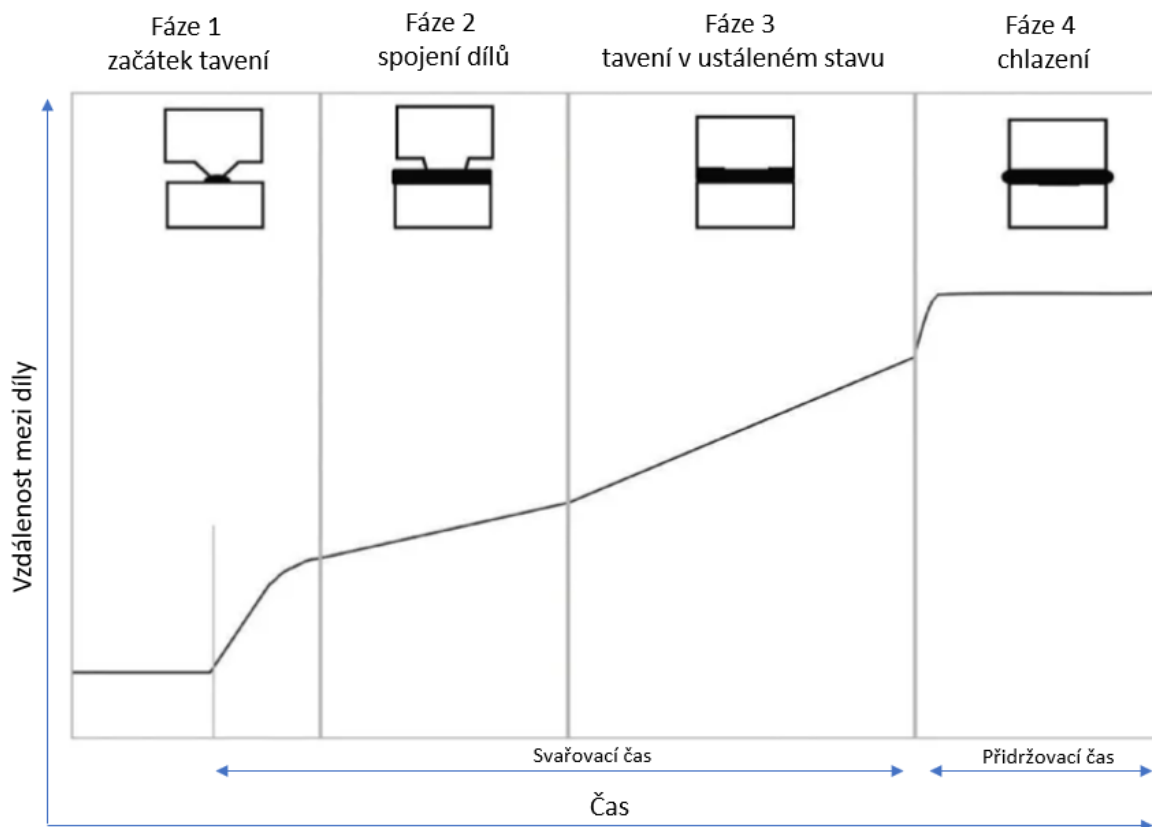
svařovacímu času. Mechanické vibrace jsou přenášeny od sonotrody ke svařované ploše skrze vrchní díl. Po dosažení nastavené dráhy, energie nebo času se vibrační pohyby sonotrody zastaví. Když se pohyby zastaví, díl je svařený a začíná pomalu chladnout [26, 27].

5. Síla, která byla stanovena na začátku (viz bod 3) se ještě stále udržuje, po určený čas. Tato doba dává dílům příležitost k dostatečnému ochlazení a spojení v jeden nerozebíratelný celek [28].
6. Po ukončení silového působení sonotrody a ochlazení dílu na teplotu, při které je díl spojen, sonotroda odjíždí do své původní pozice, kde započala svařovací cyklus. Nyní už je díl svařen a je možné ho odejmout z přípravku [26, 28].



Obr. 2.13 Svařovací cyklus [26]

Diagram na obr. 2.14. ilustruje jednotlivé fáze tvorby svaru v závislosti na vzdálenosti mezi svařovanými díly a čase. Tento proces se týká svařování tupým spojem s trojúhelníkovým koncentrátorem energie. Cyklus svařování je rozdělen na dvě části, svařovací čas a přidržovací čas. Svařovací čas zahrnuje tři fáze tvorby svaru, zatímco během přidržovacího času se vzdálenost mezi svařovanými díly již téměř nemění a vytvoření svaru představuje jen jedna fáze [29].



Obr. 2.14 Svařovací diagram procesu [29] (upraveno)

Popsání jednotlivých fází:

- Fáze 1 – Začátek tavení: v první fázi svařování je špička koncentrátoru vtlačena do opačného dílu, generuje teplo a rychle taje. Tavenina se rozšiřuje po povrchu opačného dílu. Vzdálenost mezi díly je určena tokem taveniny a mezera mezi díly se snižuje s rostoucí rychlostí tavení. Důležité parametry stroje v první fázi jsou amplituda, rychlost posuvu sonotrody a svářecí síla [28, 29].
- Fáze 2 – Spojení dílů: ve druhé fázi dochází ke spojení obou dílů určených k svařování. Rychlost tavení koncentrátoru klesá se zvětšující kontaktní plochou mezi díly. Koncentrátor se během této fáze ještě konstantě netaví. Důležité parametry ve druhé fázi jsou stále amplituda, rychlost posuvu sonotrody a svářecí síla [28, 29].
- Fáze 3 – Tavení v ustáleném stavu: ve třetí fázi se mezi oběma částmi vytváří konstantní vrstva taveniny s homogenně rozloženou teplotou. Proces lze ovládat pomocí různých parametrů, jako je čas, energie, síla nebo vzdálenost. Po dosažení konkrétní hodnoty se vypne napájení a ultrazvukové vibrace ustávají. Nejdůležitějším parametrem stroje v této fázi je hodnota vypnutí (jako je čas nebo vzdálenost) [29].
- Fáze 4 – Chlazení: ve čtvrté fázi se udržuje tlak a tavenina začíná chladnout, čímž se vytváří svarové spojení. Důležité parametry stroje v této fázi jsou přidržovací tlak, čas a vzdálenost [29].

2.5.2 Svařovací parametry

Většina svařovacích parametrů se dá nastavovat, kromě těch, které jsou dány konstrukcí stroje, což je výkon a svařovací frekvence. Ostatní parametry se dají měnit v závislosti pro nalezení optima kvality svarového spoje. Dále se zde budou popisovat základní parametry na ultrazvukové svářečce, které jsou amplituda, svařovací frekvence, svařovací čas, bod spuštění svařovací síly, svařovací rychlost, svařovací tlak/síla, doba přidržovacího tlaku.

Amplituda

Svařovací amplituda je definována jako rozdíl posunů mezi minimální a maximální hodnotou. Semikrystalické plasty oproti amorfním vyžadují vyšší hodnoty amplitudy kvůli tomu, že mají vyšší teplotu tání. Pro semikrystalické polymery musí být dodáno více energie pro roztavení koncentrátoru.

Volba amplitudy je také ovlivněna vzdáleností mezi sonotrodou a svarovou plochou. Pro svařování v blízkém poli bude potřeba použít nižších hodnot amplitudy, oproti těm svařovaným ve vzdáleném poli. Obecně platí, že pro svařování ve vzdáleném poli a také u semikrystalických termoplastů by se měla amplituda pohybovat v rozmezí 50 až 130 μm . V opačném případě, když se svařuje v blízkém poli nebo amorfní termoplasty, může být amplituda mezi 20 až 100 μm . Kdyby byla amplituda příliš vysoká, bude to mít za příčinu rychlý ohřev plochy a natavená část materiálu rychle vyteče ven ze svarového místa. U opačného případu nízké amplitudy by se nemusel natavit koncentrátor v celé ploše a svarová lázeň by předčasně ztuhla [23, 30].

Svařovací frekvence

Tento parametr je dán svařovacím zařízením. Frekvence 20, 30 nebo 40 KHz se nejčastěji používá pro svařování. Je také možné svařovat za nižších frekvencích (15 KHz), jelikož je možné zvýšit svařovací rychlost a také svařovat na větší vzdálenosti mezi plochou svaru a sonotrodou. Svařovat za těchto podmínek je ale méně časté, jelikož hluk už je značný a nepříjemný. Svařovat za vysokých frekvencí je vhodné pro malé díly, jelikož je použit nižší svařovací výkon a rozměry částí svařovacího zařízení mají o polovinu menší rozměry [31].

Svařovací čas

Svařovací čas se dá definovat jako časový úsek, při kterém působí sonotroda svými kmity na styčnou plochu dílu. Začíná působením síly sonotrody na styčnou plochu a končí, když začíná působit držení neboli dotlak. Svařovací čas bude v rozmezí od několika sekund až po setiny sekundy. Čím je delší svařovací čas, tím se obecně zvedá pevnost svaru, jelikož tání probíhá pomaleji a makromolekuly mají více času se uspořádat. Kdyby byl čas až moc dlouhý, mohlo by dojít ke snížení pevnosti, jelikož by se vytlačila všechna svarová lázeň z místa svaru.

V případě krátkého svařovacího času, by nemuselo dojít k úplnému propletení makromolekul a svar by měl nižší pevnost [22, 31].

Svařovací rychlost

Je dán posuvem sonotrody ve vertikálním směru, jednotka je v milimetrech za sekundu. Svařovací čas je v přímé úměře s rychlostí, což znamená, že když je vyšší rychlost, tak se snižuje svařovací čas. Svařovací rychlost nemusí být konstantní po celou dobu svařování, neboť zařízení umožňují na profilovat rychlost, aby docházelo k rovnoměrnému tavení koncentrátoru. Díky úpravě rychlosti 0 je svar kvalitnější a dosahuje vyšší pevnosti [31].

Bod spuštění svařovací síly

Bod spuštění svařovací síly je předzatížení, které vyvíjí sonotroda na styčnou plochu před působením hlavního svařovacího tlaku/síly. Sonotroda zatím nevibruje, jen působí předzatěžující silou na kontaktní plochu. Poté co sonotroda překročí hodnotu předem stanoveného předzatížení, začíná hlavní proces svařování.

Svařovací tlak/síla

Svařovací tlak/síla, začíná působit na styčnou plochu po předzatížení a pokračuje až do ukončení svařovacího času. Slouží k přenesení vibrační energie přes styčnou plochu až ke koncentrátoru energie. Po skončení vibrací se také vypíná působící tlak a na spojovanou součást začíná působit skrz sonotrodu přidržovací tlak (dotlak). Hodnota velikosti tlaku se mění v závislosti na svařovaném materiálu, svařování ve vzdáleném nebo blízkém poli a také na geometrii koncentrátoru.

Nastavení nízkého svařovacího tlaku má za následek, že sonotroda nebude v kontaktu se styčnou plochou a vibrace nebudou přecházet na koncentrátor. Tím bude přenos vibrací omezen, což bude mít vliv na nepropletení makromolekul a následný pokles pevnosti svaru. Při vysokém tlaku od sonotrody, bude tavenina vytlačována z místa svaru a tím se makromolekulární řetězce nestihnou proplést, což bude mít za následek taktéž pokles pevnosti svaru. Velká síla také nadměrně opotřebovává plochu sonotrody. Moderní svařovací stroje dokáží profilovat i svařovací tlak tak, aby s rostoucím svařovacím časem klesal. Toto nastavení má za vliv pomalejší vytlačování taveniny z místa svaru ke konci svařování, díky kterému dojde k pomalejšímu pohybu makromolekul, které se dříve ustálí, což povede ke zvýšení pevnosti svaru [31].

Doba přidržovacího tlaku

Doba přidržovacího tlaku je konečná část procesu, při které sonotroda již nevibruje ale pouze působí silou na styčnou plochu. Tato konečná fáze se nazývá jako doba přidržení (dotlak) nebo

také čas držení. V tomto okamžiku už jen tuhne svarová lázeň pod tlakem. Řetězce v makromolekule se navzájem spojují a vznikají pevné vazby. Svar začíná mít svou finální podobu a také získává výslednou pevnost. Doba působení tlaku musí být tak dlouhá, dokud svar nez tuhne [31].

2.5.3 Svařitelnost termoplastů

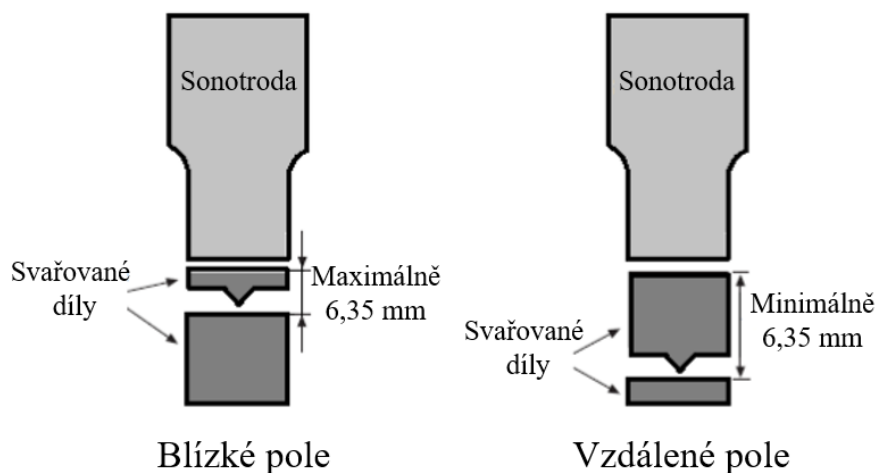
Ultrazvukové svařování je nejideálnější pro termoplasty, které jsou jedinou skupinou polymerních materiálů, jež mohou být převedeny do plastického stavu pomocí tepla generovaného ultrazvukovou vibrační energií. Existuje mnoho faktorů, které ovlivňují schopnost termoplastů být svařeny pomocí ultrazvuku. Mezi klíčové faktory, které mají vliv na svařitelnost termoplastů, patří teplota tání, struktura polymeru, chemické složení polymeru a index toku taveniny [28].

Termoplastické schopnosti útlumu vibrací

Mezi významné dopady na tlumení vibrační energie patří modul pružnosti a ztrátový faktor polymerů. S rostoucími tlumícími schopnostmi materiálu musí být sonotroda umístěna blíže ke svarové ploše. Termoplastický elastomer (TPU) se řadí mezi termoplasty, které mají nejvyšší schopnost útlumu kmitů, jelikož je dosaženo efektu superpozice tlaku a frekvence na molekulární úrovni. V opačném případě se nedá přesně říci, jaký termoplast má nejhorší útlum vibrací, ale pravděpodobně by tam patřil polyetylen (PE) a polypropylen (PP). Jelikož jejich vazby jsou drženy mezimolekulárními interakcemi jako van der Waalsovými silami, vodíkovými můstky a interakcemi dipól-dipól. Na základě útlumu vibrací a vzdálenosti od sonotrody je ultrazvukové svařování rozděleno do dvou kategorií, viz obr. 2.15 [20, 32].

- *Svařování v blízkém poli* – sonotroda je vzdálena od svařované plochy méně než 6,32 mm. Tato metoda se používá zejména pro semikrystalické termoplasty, jelikož mají vyšší schopnost tlumení vibrací nežli amorfni.
- *Svařování ve vzdáleném poli* – sonotroda je vzdálena od svařované plochy více jak 6,35 mm. Obecně platí, že je potřeba vyšších amplitud, delší čas na svařování a vyšší tlak k získání stejné kvality jako svařování v blízkém poli.

Pokud je zde možnost výběru, je nejlepší varianta svařovat v co nejmenší vzdálenosti mezi sonotrodou a svarovou plochou [33].



Obr. 2.15 Svařování v blízkém a vzdáleném poli [28]

Vhodné materiály pro svařování

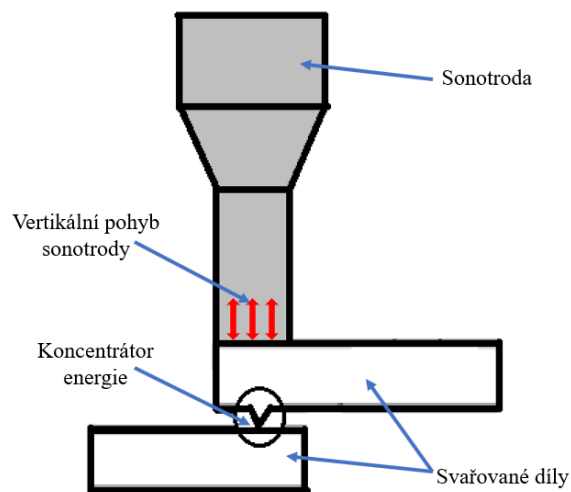
Materiály, které se obvykle využívají na ultrazvukové svařování, jsou termoplasty, např. PP, PE, PET, PA, PC, PVC, ABS, PMMA, ASA apod. Dále platí obecné pravidlo, že amorfní polymery se svařují snadněji než semikrystalické (tlumí vibrace). Polymery, které budou obsahovat plnivo, tak budou hůře svařitelné, než-li ty bez plniv, jelikož plnivo bude mít také funkci tlumení vibrací.

Polyamid (PA) – materiál ze skupiny semikrystalických, který je dobře svařitelný v blízkém poli. Ve vzdáleném poli je velmi obtížně svařitelný nebo svařit nelze. Jeho využití je např. na kryty vrtaček, brusek, motorů apod [28, 34].

Polypropylen (PP) – polymer ze semikrystalických materiálů, v blízkém poli je obtížně svařitelný a ve vzdáleném velmi obtížně svařitelný. Jeho využití je např. v automobilovém průmyslu, kde se z něj vyrábí přední/zadní nárazníky a také třeba v kanalizačním odvětví [28, 34].

2.5.4 Usměrňovač energie

Energetický usměrňovač energie, nebo též energetický koncentrátor je výstupek, který má nejčastěji tvar trojúhelníku, obdélníku nebo půlkruhu a je umístěn zpravidla na díle, který je v kontaktu se sonotrodou, viz obr 2.16. Usměrnjuje kmity amplitudy ze sonotrody do menší plochy. Tento efekt je dosažen tím, že je dovolen relativní pohyb mezi povrchem horního dílu a koncentrátorem energie, a to za soustavně působícího tlaku [22, 31].



Obr. 2.16 Pozice koncentrátoru energie během svařování [28] (upraveno)

Tvar trojúhelníku je nejčastěji používaným řešením při konstrukci koncentrátoru energie. Je vhodný pro materiály, kde se svařují rozdílné tloušťky a díly s trubkovitým tvarem. Tento tvar umožňuje nahromadit energii do jediného bodu, díky kterému je svařování přesnější a rychlejší. Jeho konkrétní tvar se mění v závislosti na struktuře materiálu. Amorfní materiály mají profil pravoúhlého rovnoramenného trojúhelníku s vrcholem o úhlu 90° . Na druhou stranu, semikrystalické materiály vyžadují koncentrátor energie s profilem rovnostranného trojúhelníku [33].

3 Experimentální část

Cílem experimentální části práce byla analýza svařitelnosti dílů vyrobených technologií MJF. Posouzení svařitelnosti bylo realizováno u technologie ultrazvukového svařování na vybrané skupině materiálů s odlišným svařovacím potenciálem. Jejich svařitelnost byla posuzována, jak z hlediska pevnosti svaru, tak z hlediska optické kvality svaru.

3.1 Volba materiálu

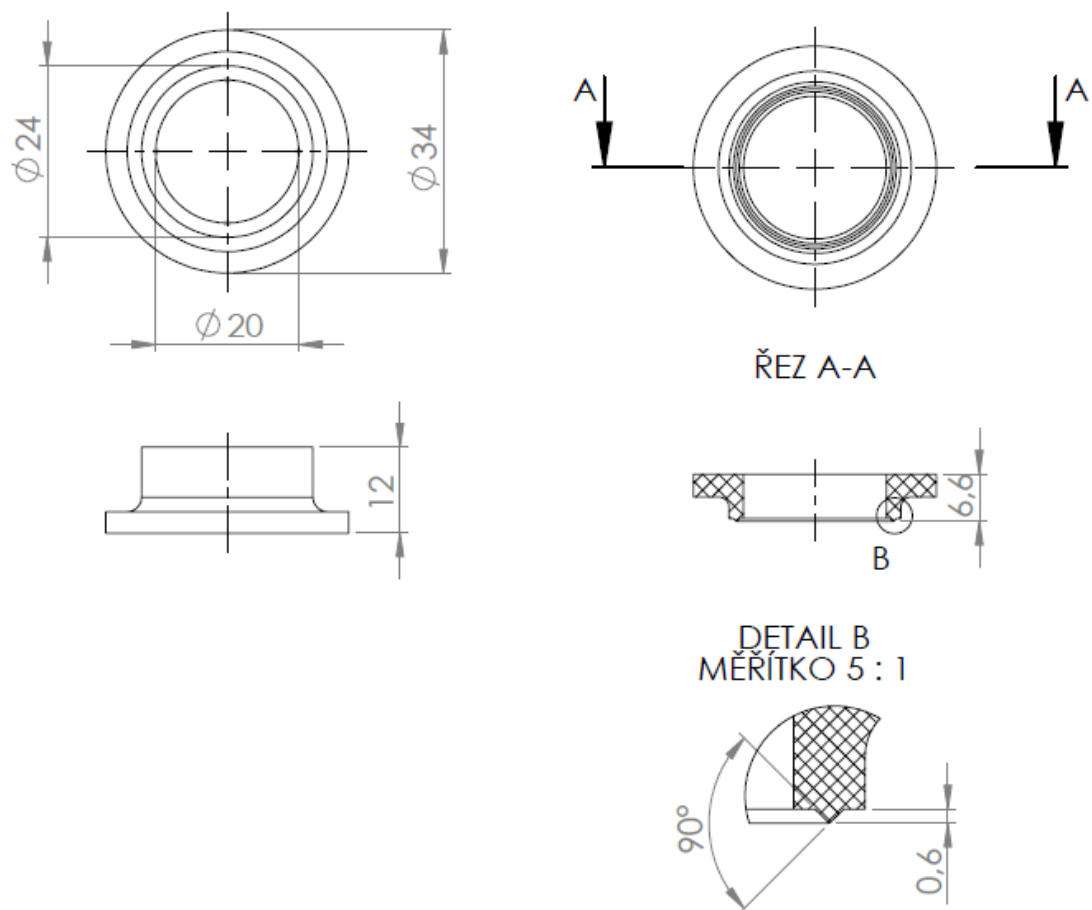
Pro experiment byly vybrány tři druhy materiálů, viz tab. 3.1. Jak už bylo řečeno v teoretické části práce, variant možností materiálu, které mohou být aplikovány není mnoho. Z termoplastických materiálů jsou nejčastěji používány právě tyto tři vybrané: PA 12, PA 12 GB a PP. Po výrobní úpravu dílů je nejrozšířenější chemické vyhlazení povrchu. Chemické vyhlazení dílů by mohlo ovlivnit svařovatelnost, jelikož povrch bude hladší a tření ploch se změní. Z tohoto důvodu byla do experimentu přidána tato metoda úpravy povrchu, k již zvoleným materiálům.

Tab. 3.1 Testované materiály s jejich vlastnostmi

Obchodní název	Teplota tání	Velikost částic	Pevnost v tahu (X, Y)	Modul pružnosti v tahu (X, Y)	Modul pružnosti v ohybu (X, Y)	Vrubová houževnatost (Izod ISO 180)
HP 3D High Reusability PA 12	187 °C	60 μm	48 MPa	1700 MPa	1730 MPa	3,5 KJ/m ²
HP 3D High Reusability PA 12 Glass Beads	186 °C	58 μm	30 MPa	2800 MPa	-	2,7 KJ/m ²
HP 3D High Reusability PP	138 °C	62 μm	30 MPa	1600 MPa	-	3,5 KJ/m ²

3.2 Volba testovaného dílu

Pro posouzení vlivu materiálu a úpravy povrchu byl pro testování zvolen díl dle normy VS-2216-3. Tento vzorek byl složen ze dvou částí s různou výškou. Menší díl je vysoký 6,6 mm a větší 12 mm. Obě části se vyznačují vnitřním průměrem 20 mm, vnějším průměrem 24 mm a maximálním průměrem 34 mm. Energetický koncentrátor má tvar trojúhelníku s úhlem 90° a výškou 0,6 mm. Díky různým výškám obou částí bylo možné svařovat jak v blízkém, tak vzdáleném svařovacím poli. V rámci tohoto experimentu bylo předpokládáno, že PP má vysokou schopnost útlumu, a je obtížně svařitelný technologií ultrazvukového svařování. Proto bylo vybráno svařování v blízkém poli, tedy nižší díl byl v kontaktu se sonotrodou. Na obr. 3.1 jsou okótovány hlavní rozměry dvou dílů.



Obr. 3.1 Rozměry dílů

3.3 Stanovení svařitelnosti dílů z PA 12

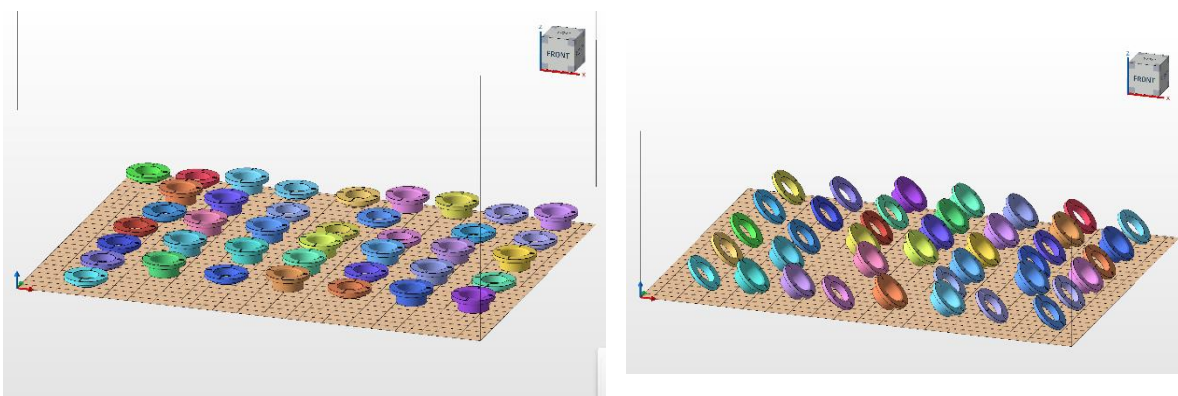
Z materiálu HP PA 12 byly vytisknuty díly na tiskárně od firmy HP. Po dotištění dílů byla zkontrolována jejich kvalita. Kontrola kvality obsahovala kontrolu vnitřních vad, měření kolmosti dílů a stanovení výšky koncentrátoru. Následně byl díl svařen (při optimálních technologických parametrech) a byla vyhodnocena jeho pevnost svaru z tahové zkoušky.

3.3.1 Tisknutí dílů PA 12 -tisk pod úhlem 0°

Výroba dílů probíhala na tiskárně HP 4200 od firmy Hewlett-Packard. Tiskárna byla představena v teoretické části kap. 2.2.1. 3D modely zkušebních svařovacích těles byly v softwaru HP 3D Build Manager uspořádány na stavební plochu tiskárny. Na stavební ploše byly díly orientovány rovnoběžně se základnou (0°), viz obr. 3.2. První vrstva začínala tisknutím koncentrátoru, protože tato plocha musí být nejkvalitnější z hlediska procesu svařování, jelikož z koncentrátoru vzniká svarová lázeň. Jak byl díl natočen koncentrátorem dolů a celá jeho plocha byla rovnoběžně se stavební plochou, vznikla kvalitní hrana, jelikož vzniká z jedné nanesené vrstvy prášku. Vzhledem k použité technologii a orientaci lze předpokládat, že na druhé straně dílu, na rovinných plochách, vzniknou propadliny, což je společná nevýhoda všech práškových technologií jako např. SLS, SLM. Propadliny vznikly rozdílným stupněm

zpracování materiálu (absorpcí tepla) na povrchu a uvnitř objemu dílu, kdy povrchová vrstva není tak dokonale protavena jako vnitřní část. Je však otázkou, jakou úroveň budou mít propadliny, a zda tato úroveň bude mít vliv na kvalitu svaru.

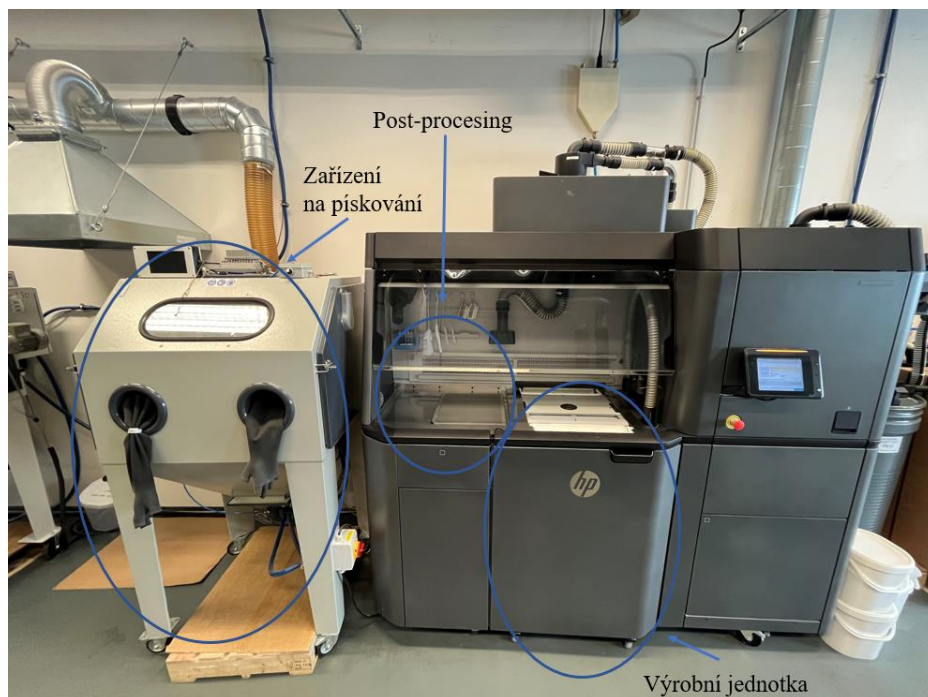
Další možností nastavení bylo tisknutí pod úhlem 45° , viz obr. 3.2. Při tomto nastavení lze předpokládat, že dojde ke zhoršení kolmosti dílů, a především zhoršení geometrie koncentrátoru, který nebude mít stejné rozměry po celém obvodu. Dále lze předpokládat, že na jedné straně bude koncentrátor vyšší a na druhé straně nižší. Technologie MJF neumožňuje pod takovým natočením zaručit kvalitní koncentrátor, jelikož není tisknut v jedné vrstvě (0,08 mm). Hrana koncentrátoru byla spojena z mnoha vrstev, čím více jich bylo, tím byl větší rozdíl mezi první a poslední vrstvou. Z tohoto důvodu se zvolilo nastavení 0° , jelikož kvalitní koncentrátor byl z hlediska svařitelnosti důležitější.



Obr. 3.2 Vlevo nastavení úhlu tisku 0° vpravo nastavení úhlu tisku 45°

Po nastavení v softwaru byla provedena kalibrace tiskárny. Kalibrace byla prováděna z důvodu kontroly tiskařské hlavy, zda všechny trysky fungují a nejsou zanešené práškem. V tiskárně byly tři tiskařské hlavy, každá z nich má 10 000 trysek. Proces kalibrace byl prováděn před každým tiskem. Po kalibraci byla dalším krokem příprava materiálu, který byl umístěn ve výrobní jednotce. Na procesní stanici byl smíchán nový prášek se starým v poměru 80/20. Stanice je představena na obr. 3.3 se zasunutou výrobní jednotkou. Celá výrobní jednotka byla naplněna smíchaným práškem, a poté byla přesunuta do samotné tiskárny. Po integraci jednotky byl započat proces tisku dílů. Tiskařské kapaliny (agenty) nebyly nanášeny hned na první vrstvu prášku, protože první vrstvy plní funkci podpůrného materiálu a izolantu. Výška prostoru bez nanášení agentu byla cca 5 mm. Teplota v tiskárně se blížila teplotě tavení materiálu, protože poté se nemusí dodávat tolik energie na vytvrzování. Detailní parametry tisku nejsou známy, protože firma HP si to uchovává jako svoje know-how. Plně vyplněný prostor dílu je tištěn přibližně 10 h. Vzhledem k ceně materiálu potřebného na výrobu, byla zkalkulována cena dílů, kde vyšší díly stály přibližně 94 Kč/ks a menší díly 71 Kč/ks. Parametry

tiskárny byly již zmíněny v teoretické části kap. 2.2.2. Na obr. 3.4 je otevřená tiskárna po dokončeném tisku.



Obr. 3.3 Procesní stanice se zasunou výrobní jednotkou



Obr. 3.4 Otevřená tiskárna HP series 4200

Po dokončení tisku musely být díly ochlazeny na pokojovou teplotu, až poté byly vyjmuty. Prášek snižoval odvod tepla a fungoval jako izolant, z tohoto důvodu chlazení ve stroji může trvat až 48 hodin. Pro urychlení procesu chlazení byla výrobní jednotka přesunuta do procesní stanice. Ve stanici byla doba chlazení urychlena dle potřeby, nejkratší doba byla 6 hodin, optimálně bylo voleno 10 hodin. (Nastavení rychlosti chlazení je individuální, záleží na využití tisknutých dílů, když je příliš rychlá, tak díly nebudou kvalitní, jelikož díl nebude mít dost času na relaxaci a může potom vzniknout dodatečné smrštění a tím změna geometrie. Záleží na přání zákazníka, co požaduje, zda rychlost nebo kvalitu). V procesu rychlého chlazení byl odsáván přebytečný prášek, který nebyl spečen s dílem, díky tomu byla doba chlazení snižována. Po dochlazení na pokojovou teplotu byl odsán zbytkový prášek a díly byly vyjmuty z výrobní

jednotky. Prášek, který není spečen byl využit v dalším tisku (v uvedeném poměru). Prášek, který držel na povrchu dílů již nemůže být použit. Není využíván, protože prášek u povrchu může být znečištěn kapalinou. První očištění bylo provedeno přímo na procesní stanici, kde k tomu byly použity štětky, kartáčky apod. Na obr. 3.3 je místo označeno jako post-processing. Po mechanickém odstranění byly na povrchu stále malé zbytky prášku, proto byly díly následně pískovány, což je představeno na obr. 3.3.

3.3.2 Kvalita vytisknutých dílů z PA12 – tisk pod úhlem 0°

Po dokončení tisku dílů za stanovených parametrů byla hodnocena jejich kvalita. Hlavním cílem bylo zjistit, zda díly nevykazují vnitřní vady, či rozměrové nepřesnosti v důsledku nastavení tisku.

Při vizuální kontrole bylo zjištěno, že u dílů vznikly na základnách různé velikosti propadlin, viz obr. 3.5 vlevo. Tyto propadliny jsou zapříčiněny nastavením úhlu tisku 0°.



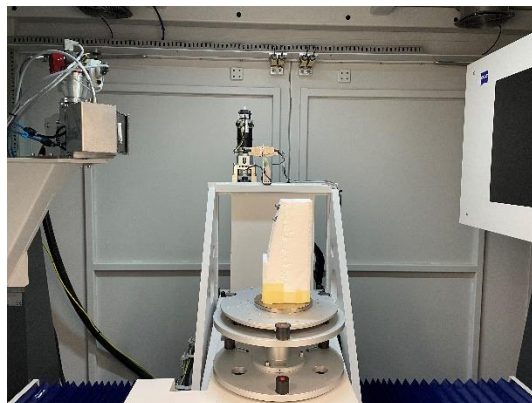
Obr. 3.5 Vytisknuté díly z PA 12 - vlevo vyšší díl a vpravo nižší díl

Dále byla zvažována možnost, že uvnitř dílů mohou být vady, jako jsou staženiny, trhliny nebo póry. Tato úvaha se odkazuje na předchozí bakalářskou práci od pana Václava Burdy [35], kde byly po vytisknutí technologií FDM vnitřní vady. Díky těmto vadám vzorky na tahové zkoušce nepraskaly v místě svaru, ale právě v místech, kde byly tyto vady. Bylo důležité si uvědomit, že jakákoliv taková vada nebo rozměrová nepřesnost může mít vliv na pevnost svaru. Proto byla provedena důkladná kontrola kvality dílů po tisku, jelikož následné porovnání výsledků pevnosti svaru u jednotlivých materiálových variant bylo ovlivněno technologií výroby.

Vnitřní vady

Odhalení vnitřních vad v dílech bylo realizováno počítačovou tomografií (CT). Pro scanování bylo použito zařízení CT Metrotom 1500 od firmy Zeiss, Německo, viz obr. 3.6 vlevo. Metoda scanování, známá jako počítačová tomografie, je nedestruktivní zkouška. Tato technika využívá rentgenové záření a výpočetní technologii k vytvoření 3D digitální

reprezentaci zkoumaného dílu. Ukázka uložení dílu je zobrazena na obr. 3.6 vpravo. Parametry scanování na CT, které byly použity, jsou uvedeny v tab. 3.2.



Obr. 3.6 Vlevo Zeiss Metronom 1500 [36] a vpravo založený díl v CT

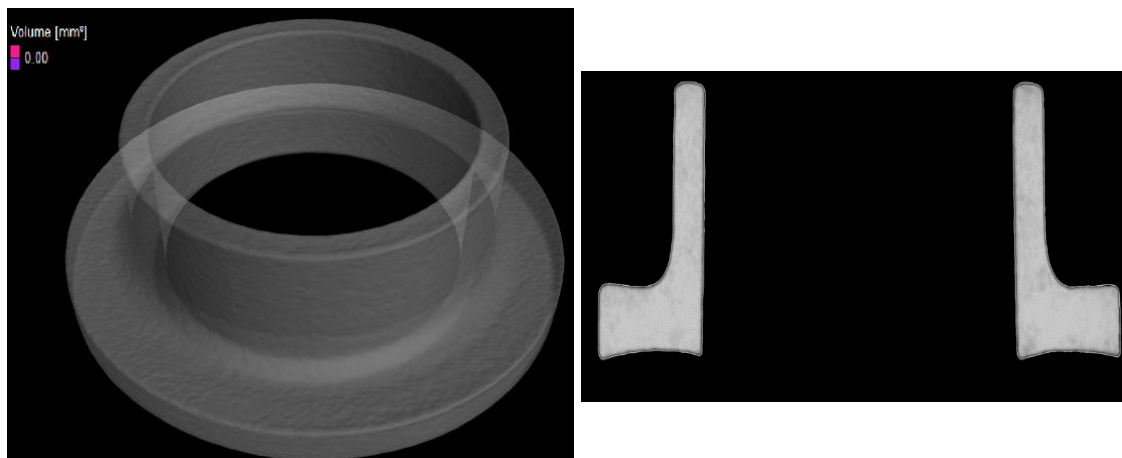
Tab. 3.2 Parametry CT°

Parametr	Hodnota
Napětí	180 kV
Proud	550 μ A
Doba integrace	1000 ms
Filtr a jeho tloušťka	Cu 0,25 mm
Zesílení	8 x
Binning (zmenšení základního rozlišení)	2x2
Vzdálenost dílu od RTG trubice	330 mm
Výška polohovacího systému od polohy 0	230 mm
Doba skenování	25 min

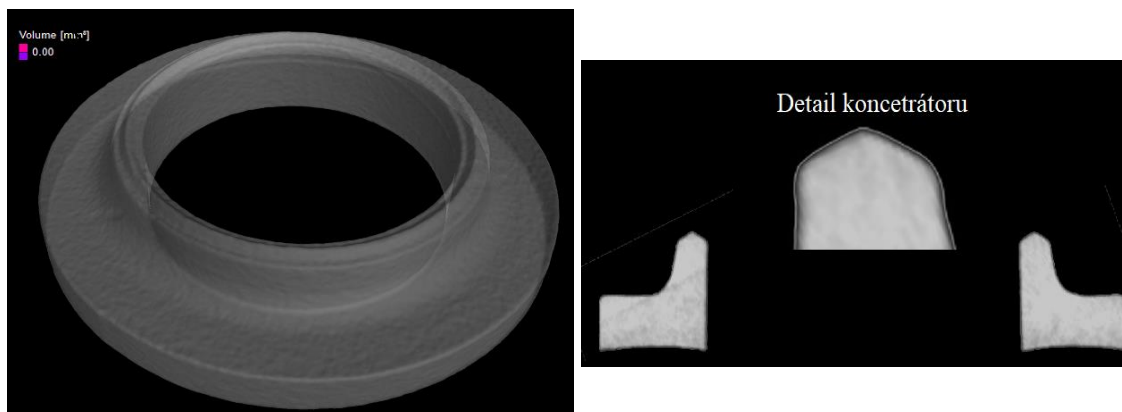
Díly po nascanování byly vizualizovány v programu VGSstudio MAX 3.3.4., viz obr. 3.7. Pro výpočet pórovitosti byla použita funkce hledání, v programu byla nastavena interpolace o faktoru 0,92. Porozita byla hledána na hladině významnosti 20 % a zároveň byly póry zobrazeny v objemu. Díl byl zobrazen v 70% transparentnosti, pro lepší přehlednost. Struktura dílu byla celistvá, tisknuté vrstvy byly dokonale propojeny, díl byl bez vnitřních vad. Na obr. 3.7 vpravo byl proveden řez tohoto dílu v ose válcové plochy. Prohnutím, které je vidět na spodní rovině vyššího dílu, jsou velké propadliny, které dosahují takové úrovně, že musí být uvažováno, zda neovlivní kvalitu svaru, jelikož sonotroda při působení tlaku nebude působit na celou styčnou plochu. Na obr. 3.8 je představen nižší díl také s výpočtem porozity, kde na obrázku je znázorněn díl v řezu s detailem na koncentrátor. Nižší díl rovněž neměl žádné vnitřní vady. V řezu byly viditelné zaoblené hrany jak na koncentrátoru, tak na ostatních hranách. Zaoblené hrany jsou nevýhodou práškových technologií. Práškové částice, které byly spečeny, mají tvar kuliček (50–60 μ m) a byly nanášeny po vrstvičkách. Díky tomu nebylo možné technologií MJF vytisknout ostrou hranu. Kvalitní geometrie koncentrátoru energie je důležitá, protože z ní vzniká svarová lázeň. Zaoblení těchto hran by mohlo ovlivnit měření výšky

koncentrátu, jelikož nebude jednoduché určit hranu odkud by měla být měřena. Také by mohlo dojít k omezení přenosu kmitů do místa svaru a snížit pevnost svarového spoje.

Jelikož evidovaná úroveň propadliny byla vysoká, je možné, že by mohla negativně ovlivnit měření kolmosti a také svařování. Příčinou u svařování by mohlo být nedostatečné rozložení svařovací síly i nerovnoměrnost přenosu kmitů. Výsledkem by mohl být pokles pevnosti svarového spoje i nestabilita procesu.



Obr. 3.7 Vyšší díl s vypočtenou porozitou vlevo a vpravo díl v průřezu



Obr. 3.8 Nižší díl s vypočtenou porozitou vlevo a vpravo díl v průřezu

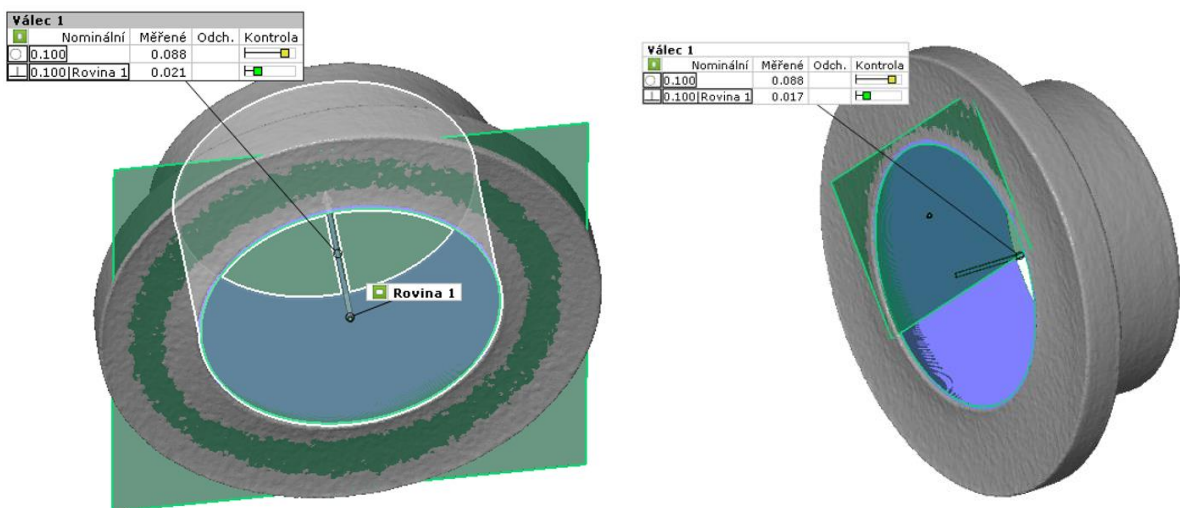
Rozměrová přesnost

Dále byla analyzována rozměrová přesnost (výška a tvar koncentrátoru, kolmost mezi válcovou a rovinou plochou), která by mohla také ovlivnit kvalitu budoucího svaru. Jak již bylo řečeno, tvar koncentrátoru ovlivňuje svarovou lázeň. Kolmost mezi základnou a válcovou plochou ovlivňuje, jak budou díly slícované, tedy svar. Kolmost ovlivní také upínání dílů na přípravek. Výška koncentrátoru byla měřena optickým způsobem. Na CT byly reprezentovány zaoblené hrany, díky nimž by mohly vzniknout komplikace při měření výšky koncentrátoru. Rovněž by mohl také nastat problém při měření kolmosti, kde by to mohlo být ovlivněno propadlinami, které jsou na základnách.

Měření kolmosti pomocí CT

Pomocí programu GOM Software 2021 byla kontrolována kolmost vytisknutých dílů. Pro stanovení kolmosti byla důležitá definice základny. Toto určení však vzhledem k výskytu propadlin není jednoznačné. Byly proto ověřovány dvě metody na vymezení základny. První metoda byla „bestfit“ a druhá „3 bodový výběr“.

U první jmenované metody byla automaticky vytvořena základna. U druhé metody pro stanovení základny byly zvoleny 3 body, které byly v blízkosti krajní hrany v místě kontaktu se sonotrodu, které byly proloženy rovinou. Následně byla měřena kolmost mezi válcovou plochou a základnou. Na obr. 3.9 je vlevo představeno měření pomocí „bestfit“ a na pravé straně měření „3 bodového výběru“. Mezi změřenými hodnotami byl zanedbatelný rozdíl, proto byla zvolena metoda „bestfit“. Výsledky měření na vyšších dílech jsou $0,021 \pm 0,005$ mm. Pro druhý menší díl bylo měření řešeno zcela stejně a výsledek je $0,017 \pm 0,003$ mm.

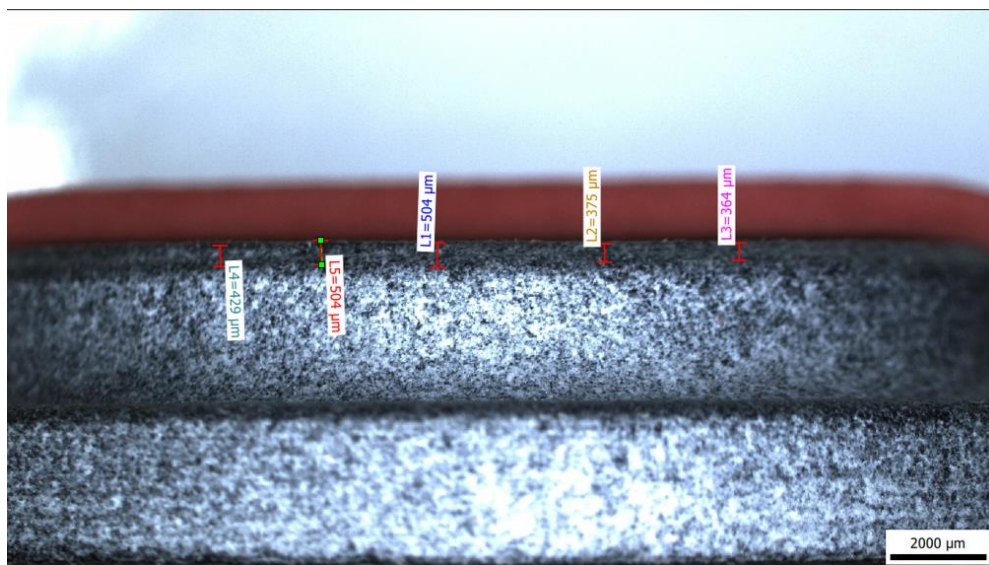


Obr. 3.9 Metoda „bestfit“ vlevo a metoda „3 bodový výběr“ vpravo

Měření výšky koncentrátoru

Optické měření výšky koncentrátoru proběhlo na mikroskopu Olympus SZ61. Na mikroskopu bylo použito zvětšení 6,7x. V programu QucikPhoto industrial 3.2, byla pomocí úseček změřena výška koncentrátoru. U měření je ze snímku na obr. 3.10 vidět, že hrana základny koncentrátoru byla zaoblená, a proto byla velice těžko stanovitelná její hodnota. Pro porovnání byl opticky změřen i vstříkovaný díl z ABS obr. 3.11, u kterého byla hrana ostrá, a tedy dobře měřitelná. Při porovnání obrázků byl vidět patrný rozdíl hran, kdy u vstříkovaného dílu byla viditelná linie, na rozdíl od tisknutého dílu, kdy tato hrana byla slitá a nebyla jednoznačně určitelná. I tak ale bylo provedeno orientační měření výšky koncentrátoru, kde byla hodnota stanovena na 435 ± 30 μ m, podle výkresu by to mělo být 600 μ m. Měření výšky koncentrátoru optickým způsobem nebylo zcela relevantní, díky zaobleným hranám. Další možnost měření byl mechanický způsob, kdy byl položen hrot na hranu a byla odečtena

hodnota. Jelikož hrana základy byla zaoblena, měření bylo opět nerelevantní a nemělo vypovídající hodnotu.



Obr. 3.10 Optické měření výšky koncentrátoru PA12



Obr. 3.11 Optické měření výšky koncentrátoru ABS

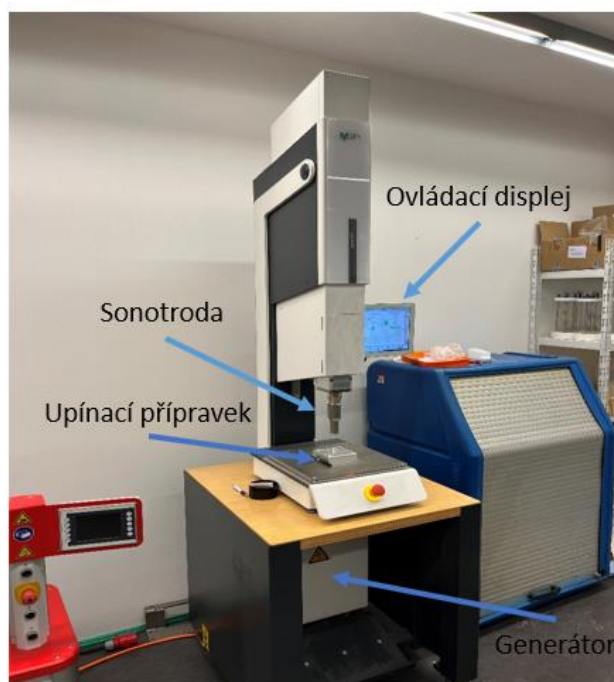
Výška koncentrátoru tedy nebyla přesně stanovitelná. Po změření výšky mělo dojít k porovnání tisknutých dílů, zda jsou všechny totožné a bude roztaveno vždy stejné množství koncentrátoru, tím měla být zaručena opakovatelnost svařování. Důležitější bylo zjistit její výšku z jiného hlediska, a to o kolik by mohla být sonotroda posunuta směrem do vzorku, jelikož by mohlo dojít k posuvu ze 100% výšky koncentrátoru. Posun 100 % by byl nežádoucí, poněvadž by byla vytlačena všechna tavná lázeň ven z místa svaru a svar by nebyl pevný.

Měření odchylky absolutních výšek vzorků

Na ultrazvukové svářečce byla možnost změřit celkovou výšku dílů před svařením. Tento rozměr neměl zásadní vliv na svařování, ale umožnil přiblížit pohled na stejnoměrnost kvality vytisknutých dílů. Proto byla hodnocena odchylka této hodnoty. Propadliny neovlivní proces měření, jelikož při měření se díly opírají na jedné straně o plochu upínky a na druhé straně o

plochu sonotrody, která vyvíjí nízký tlak. Propadliny by měly mít vliv pouze na výsledek měření. Pokud budou propadliny veliké, tak bude vyšší odchylka.

Měření rozměrů a poté svařování vzorků bylo provedeno na ultrazvukové svářečce MS SonxTOP GENESIS od firmy MS Ultrasonic Technology Group, na obr. 3.12.



Obr. 3.12 Ultrazvuková svářečka MS sonxTOP GENESIS

Na měření výšky dílu byl použit krokový režim, který byl nastaven na hlavním panelu. V prvním kroku přijela sonotroda do předem dané vzdálenosti rychloposuvem. Dalším krokem bylo najetí pracovního posuvu do kontaktu s dílem. Kontakt se zaznamená tehdy, když siloměr zaznamená sílu 75 N, v ten moment byl zastaven tento krok a byla zaznamenána hodnota. Na obr. 3.13 je zobrazeno, kde byla tato hodnota odečítána a také nastavení 75 N. Hodnota, která byla odečítána, je vzdálenost sonotrody, která je měřena od horního dorazu stroje. Hodnota 0 mm znamená, že je sonotroda v horním dorazu stroje. Vzdálenost od nulového bodu stroje ke kontaktu byla $380,42 \pm 0,02$ mm. Jak již bylo zmíněno, byla použita pouze směrodatná odchylka z této hodnoty pro další porovnávání.



Obr. 3.13 Nastavení krokového režimu

3.3.3 Svařování dílů PA 12 - tisk pod úhlem 0°

Ultrazvukový svařovací systém MS sonxTOP GENESIS představoval několik možností řízení procesu svařování, včetně svařování podle času, energie, absolutní nebo relativní vzdálenosti. V rámci experimentu byla jako metoda ultrazvukového svařování vybrána metoda svařování na relativní vzdálenost. Tento výběr byl proveden s ohledem na teoretickou možnost dosažení lepší konzistence hloubky svaru pro všechny vybrané kombinace materiálů.

Model, na kterém bylo realizováno svařování, je vybaven piezoelektrickým převodníkem, elektrickým servomotorem (s rozsahem sil od 10 do 3000 N) a generátorem s výkonem 20 kHz/6000 W a maximální pracovní výškou 630 mm.

V procesu ultrazvukového svařování bylo použito aretační zařízení na upnutí dílů. Toto zařízení bylo připevněno k pracovní desce čtyřmi šrouby. Před svařováním bylo nutné toto zařízení kalibrovat, což vedlo k zarovnání desky vůči sonotrodě, neboť zařízení musí být umístěno kolmo k sonotrodě. Navíc musí být provedena kalibrace sonotrody, která byla provedena v hlavním menu zařízení (učení sonotrody) na obr. 3.14. Zde bylo vyžadováno zadání parametrů sonotrody, označení sonotrody, transformace sonotrody, transformace zesilovače a frekvence. Modře jsou označeny na obrázku zmíněné parametry a učení sonotrody.



Obr. 3.14 Hlavní ovládací menu

Před začátkem svařování musí být nalezeny nejprve optimální svařovací podmínky, jelikož ultrazvuková svářečka musí být v první řadě správně parametrově nastavena pro daný materiál. Takto bude nastavován každý zkoušený materiál. Prvotní svařování bylo zahájeno s materiálem PA 12.

Optimální podmínky svařování

Pro hledání optimálních svařovacích podmínek musí být nalezeny technologické parametry, při kterých bude realizován kvalitní svar, a to jak z hlediska vizuálního, tak pevnostního. Ve vizuálním hodnocení bylo kontrolováno, zda z místa svaru není příliš vytlačována svarová lázeň. Tento efekt, je označován jako přetok nebo výronek. Použití nevhodných podmínek by mohlo evokovat degradaci materiálu. Všechny tyto aspekty by mohly zapříčinit pokles pevnosti svaru. Velký přetok nebo také potrhaný povrch svaru, samozřejmě nebyl také akceptovatelný pro pohledové díly z hlediska estetického. Velký přetok znamená nastavenou vysokou svařovací rychlost nebo také velký relativní posuv. Malý nebo až žádný přetok snižoval pevnost svarového spoje, jelikož makromolekuly neměly dostatečnou možnost se proplést. Správně svařený vzorek by neměl mít příliš velký ani malý přetok. Přetok by, měl být rovnoměrný po celém obvodu. Z hlediska nastavených optimálních podmínek bylo z tvorby přetoku upřednostňováno pevnostní hledisko nad vizuální stránkou. Pevnost svarového spoje byla hodnocena pomocí maximální síly z tahové zkoušky.

S firmou MS Ultrasonic Technology Group bylo konzultováno, jaké technologické parametry budou zvolené a jaké budou konstantní. Jednalo se o parametry: rychlost pohybu sonotrody ke svařovanému vzorku, relativní vzdálenost sonotrody od svařovaného dílu, velikost amplitudy a svařovací sílu.

Pro nalezení optimálních podmínek mohou být měněny všechny výše zmíněné parametry. Kdyby byly měněny všechny najednou, hodnocení vlivu materiálu a povrchové úpravy by mohlo být značně ovlivněno technologickým nastavením. V praxi bývají nejčastěji měněny dva parametry, a to rychlost pohybu a relativní vzdálenost sonotrody. Proto byly hodnoty těchto dvou parametrů měněny v závislosti na nalezení optimálních podmínek.

Konstantní parametry, nebyly měněny po celou dobu svařování. Pro svařování všech druhů materiálů, s různými vlastnostmi, byla nastavena 100 % amplituda kmitů (30 μ m). V předchozí práci pana O. Maxi [37] byla porovnávána hodnota amplitudy a při 100 %, vzorky dosahovaly nejvyšší pevnosti. Z těchto zmíněných důvodů byla amplituda kmitů nastavena na 100 %.

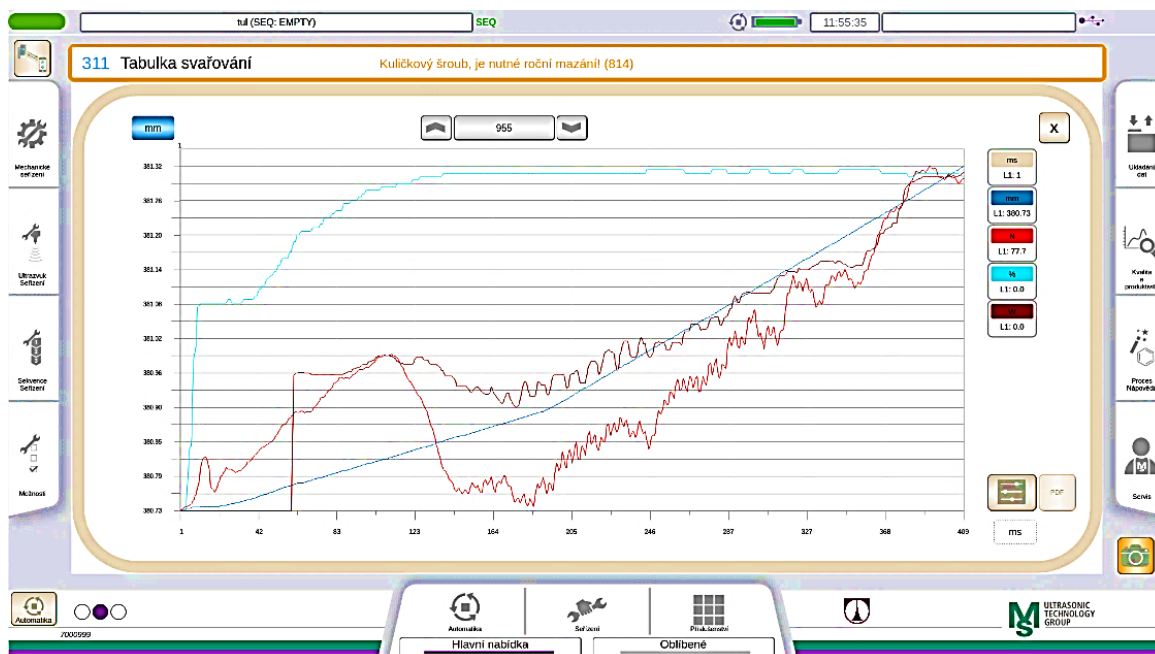
Síla na svařování by měla být upravena tak, aby odpovídala trajektorii sonotrody. Pro experiment byla nastavena na 3000 N, jelikož tato hodnota byla nastavena v předchozích pracích pana O. Maxi [37] a pana V. Burdy [35], a také odpovídala trajektorii sonotrody. Tato hodnota byla také konzultována s výrobcem a schválena jako adekvátní pro tento experiment.

Pro nalezení optimálních podmínek, byl průběh svařování rozdělen na dvě fáze. Rozdělení fází bylo použito pro kvalitnější svar, jelikož na začátek procesu byla zapotřebí menší rychlost a malý relativní posuv. Kdyby byla rychlost celou dobu konstantní, tak by roztavená špička mohla být okamžitě vytlačena ven z místa svaru. Vyšší rychlost ve druhé fázi byla úměrná vyššímu relativnímu posuvu, jelikož se zvyšující se dráhou, musí být také zvyšována rychlost. Kdyby byla rychlost nízká, tak by koncentrátor nemusel být dokonale roztaven v celém objemu a makromolekuly by neměly možnost být propleteny. Svar by díky tomu neměl takovou pevnost.

Do první fáze byla doporučena rychlost 1 mm/s a relativní posuv 0,15 mm. Do druhé fáze byla zvolena rychlost 2 mm/s a posuv 0,25 mm. Výšku koncentrátoru nebylo možné zjistit přesně, hodnota byla nerelevantní, byla pouze orientační. Proto při nastavení posuvu byla použita teoretická hodnota z výkresu 0,6 mm jako 100 %. Z obou fází byl sečten relativní posuv s výsledkem 0,4 mm, což bylo 66 % výšky. To bylo zvoleno jako adekvátní nastavení.

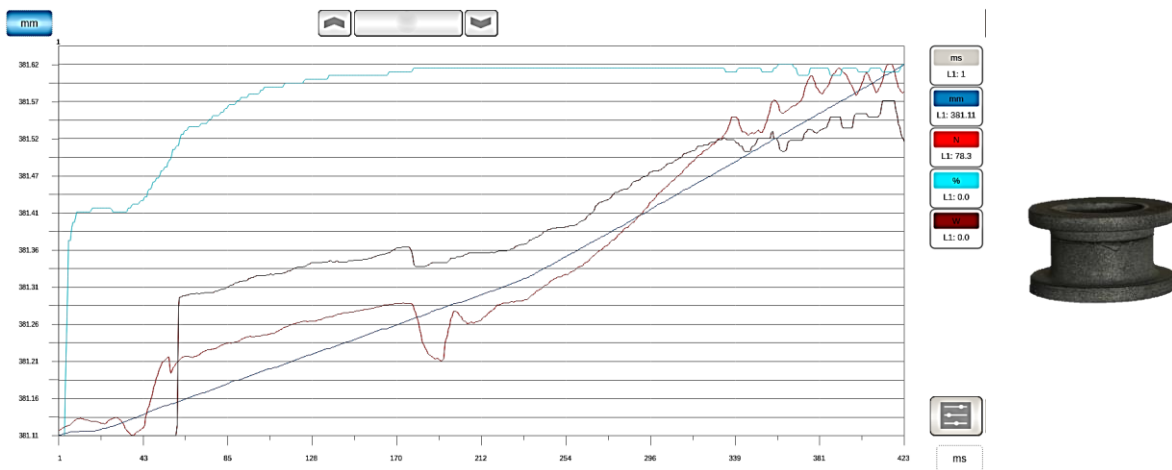
Po svaření vzorků za zvolených parametrů byl zobrazen průběh svařování v grafické závislosti, viz obr. 3.15, kde je představeno celé okno z panelu. Pomocí průběhu bylo zjištěno, jak probíhá svařování v závislosti na zadaných parametrech, a jaký parametr by mohl být upraven pro dosažení kvalitnějšího svaru. Na svařovacím grafickém průběhu by hodnoty výkonu (hnědá) a síly (červená) měly kopírovat křivku dráhy (světle modrá) a to z důvodu, aby výkon narůstal zároveň se zvětšující se plochou svaru. Výkon a síla by měly být úměrně zvedány s křivkou dráhy. Velikost příkonu nesmí být pod modrou křivkou, jelikož by byl dodáván malý výkon a svar by nebyl dostatečně provařen. Pokud bude hodnota výkonu nad modrou křivkou, tak to bude znamenat, že došlo k velkému provaření a vytlačení přetoku

z místa svaru. V případě, že síla bude pod modrou křivkou, vznikne malý přtlak sonotrody na díl a svar bude mít malou pevnost. Naopak kdyby byla křivka síly nad modrou, tak by byl vyvíjen až příliš velký tlak a tavenina by byla vytlačena z místa svaru. Hodnoty všech tří veličin na stejné hladině byly na konci průběhu důležitější než na začátku kvůli tomu, že na konci by mělo docházet k propletení a ustálení makromolekul a měl by tak vzniknout již pevný svarový spoj. Na začátku průběhu by mělo dojít k tavení koncentrátoru a začít svařovací proces.



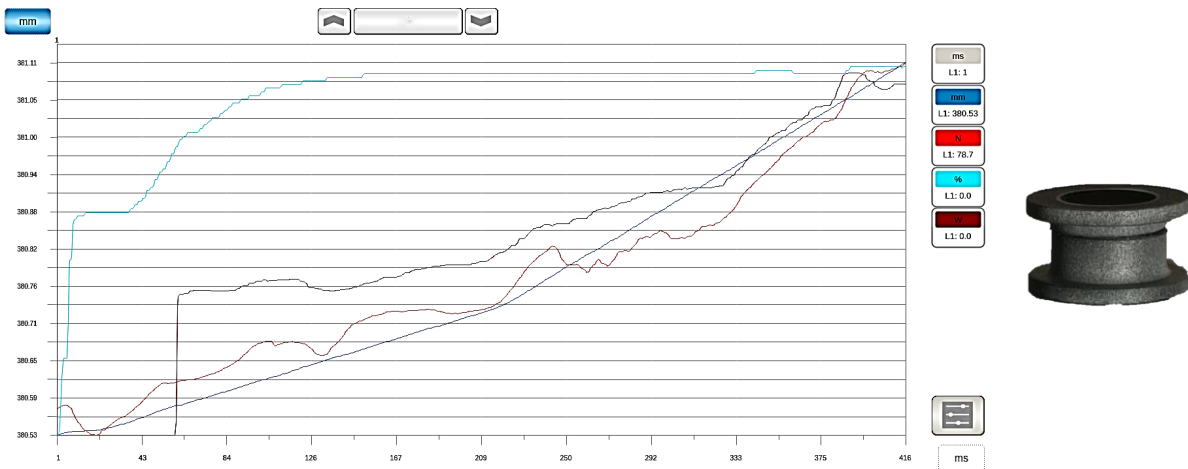
Obr. 3.15 Ukázka průběhu svařování

Na obr. 3.16 vlevo je představen průběh pro svařování vzorku s prvním nastavením, tedy vzorek č. 1. Světle modrá křivka dráhy je v půlce mírně zalomena, to je změna fáze, viz předchozí kapitola. Na ose Y je relativní vzdálenost v milimetrech a na ose X je čas v milisekundách. Z grafického průběhu svařování bylo vidět, že na začátku byl výkon vyšší, proto by zde měla být snížena rychlost. Na konci průběhu byly hodnoty síly a výkonu nízké, z tohoto důvodu zde bylo zapotřebí buď zvýšit rychlost nebo relativní vzdálenost. Na obr. 3.16 vpravo je zobrazen svařovaný vzorek, který měl malý přetok z místa svaru, což by mohlo mít vliv na snížení pevnosti svaru, jelikož makromolekuly nebyly dostatečně propleteny. V závislosti na malém přetoku, grafický průběh a možné snížení pevnosti, byl v dalším svařování zvýšen relativní posuv.



Obr. 3.16 Vlevo průběh svařování vzorku č. 1 a vpravo svařený vzorek

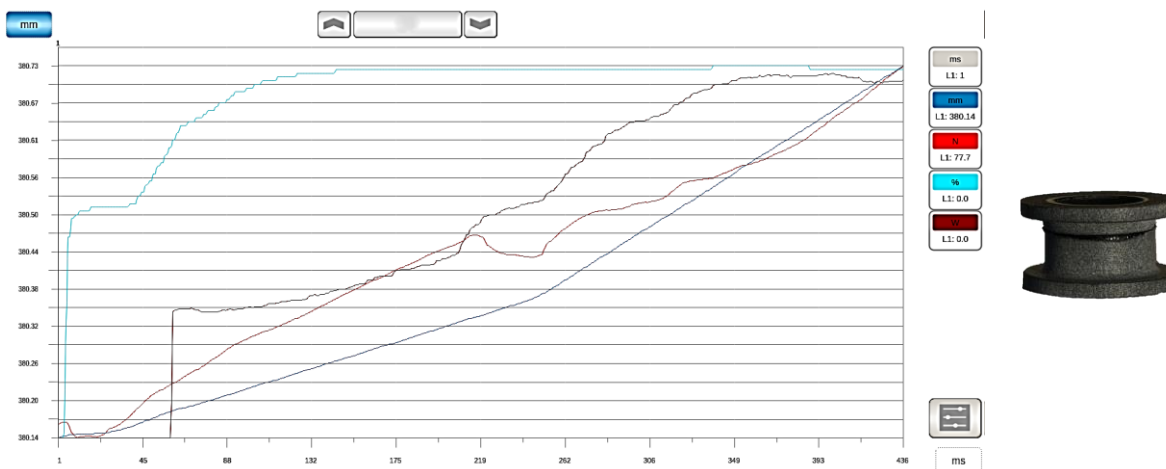
U vzorku č. 2 byl zvýšen relativní posuv v druhé fázi na hodnotu 0,30 mm. Celkem byla posunuta sonotroda o 0,45 mm. Ostatní parametry zůstaly stejné. Na obr. 3.17 vlevo je grafický průběh vzorku č. 2, kde na konci průběhu měly veličiny podobné hodnoty, což byl záměr změny parametru. Vpravo na obr. 3.17 je představen svařený vzorek. Přetoky byly rovnoměrné po celé ploše. Vzorek č. 2 vypadal kvalitně, jak z grafického průběhu svařování, tak optického, měl by dosahovat vyšší pevnosti než vzorek č. 1. Pro experiment bylo vyzkoušeno ještě jedno nastavení, a to bylo zvýšení relativního posuvu pro zjištění, zda bude mít vzorek vyšší pevnost než vzorek č.2.



Obr. 3.17 Vlevo průběh svařování vzorku č. 2 a vpravo svařený vzorek

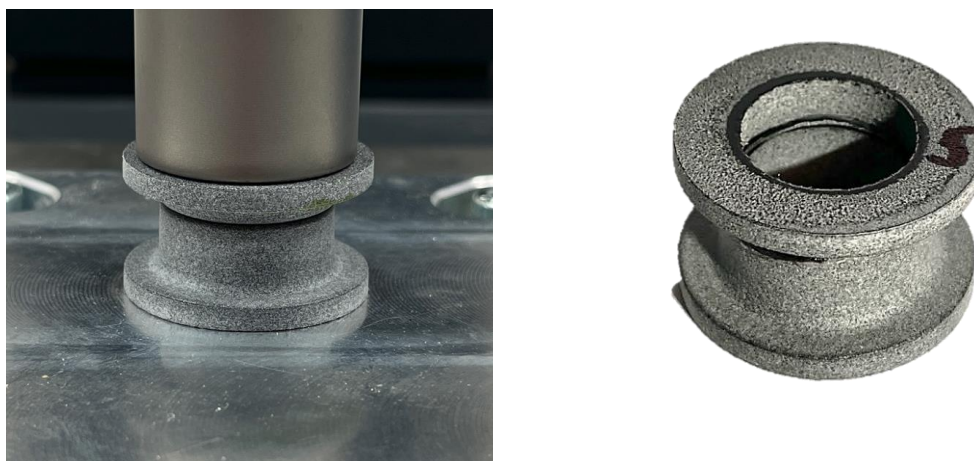
U vzorku č. 3 došlo ke zvýšení relativního posuvu opět v druhé fázi, kde byl celkem posuv zvýšen na 0,5 mm, to už bylo přibližně 83 % teoretické výšky koncentrátoru. Na obr. 3.18 vlevo je průběh svařování, kde síla a výkon měly vyšší hodnoty. Pro dorovnání hodnot by měla být snížena rychlost svařování. Tento grafický průběh je špatný, hodnoty jsou vysoké, výsledná pevnost tím bude ovlivněna. V pravé části obrázku byl už viditelný velký přetok z místa svaru, což už bylo neadekvátní. Tento vzorek by mohl dosahovat vyšší pevnosti, jelikož byl nastaven vyšší relativní posuv, díky kterému vzniklo více svarové lázně. Druhá možnost byla oslabení

pevnosti spoje, jelikož většina makromolekul, které byly propleteny, byly vytlačeny z místa svaru. Vzhledem k optickému a grafickému průběhu svařování nebyl vzorek č. 3 správně parametrově nastaven.



Obr. 3.18 Vlevo průběh svařování vzorku č. 3 a vpravo svařený vzorek

Po svaření vznikly deformace na horní ploše vzorku. Jak bylo předpokládáno, opěrná plocha byla příliš malá a došlo tím k deformaci hrany, viz obr. 3.19 vpravo. Kvůli malé opěrné ploše hrany by mohlo dojít ke snížení přenosu kmitů a tím teoreticky ke snížení pevnosti svaru. Také by mohlo dojít k nestabilitě výsledků, protože hrana v průběhu svařování může být pokaždé zatlačena o jinou hodnotu. Na levé straně obr. 3.19 je detailní zobrazení kontaktu sonotrody s povrchem vzorku.



Obr. 3.19 Vlevo přiblížení doteku sonotrody a vpravo otláčený prstenec po svařování

Dále byl proveden řez svarem, kde bylo zjištěno provaření všech tří nastavení pro nalezení optima. Zde se hodnotilo také slícování dílů na sebe.

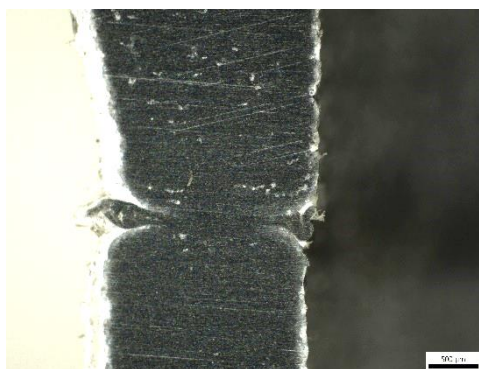
Řez vzorku

Pro zjištění provaření a slícování musely být nejprve vzorky rozřezány, až poté bylo možné se podívat na řezy pod mikroskopem. V řezu svaru vzorků by mohlo být vidět nedokonalé provaření z důvodu zatlačení vystouplé hrany, jak již bylo popsáno v kap. 3.3.3. Svařené vzorky byly rozříznuty na pile Brilliant 220, viz obr. 3.20. Při řezání kotoučem bylo přidáno chlazení, aby vzorky nebyly tepelně ovlivněny. Nastavena byla řezná rychlost na hodnotu 2500 ot/min, dále rychlost posuvu 0,05 mm/s. Kotouč byl centrován na osu vzorků, aby byly rozděleny na dva stejné kusy.



Obr. 3.20 Pila Brilliant 220

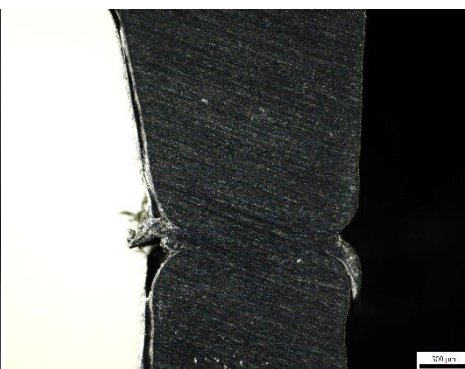
Na zobrazení detailů řezů byl použit mikroskop Olympus SZ61 se zvětšením 20x. Na obr. 3.21 - obr. 3.23 jsou řezy vzorků. Vzorek č. 1. byl málo provařen, patrně jen uprostřed. Makromolekuly nebyly zde plně provázány v jeden celek, díky tomu zde byla možnost snížení pevnosti spoje. Vzorky č. 2 a č. 3 byly více provařeny.



Obr. 3.21 Svar v řezu č. 1



Obr. 3.22 Svar v řezu č. 2

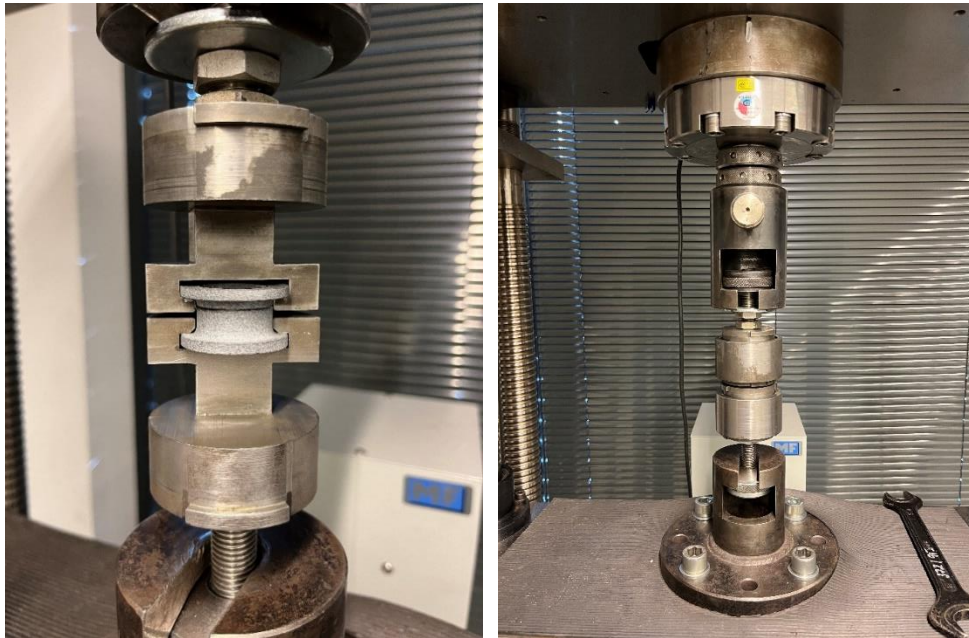


Obr. 3.23 Svar v řezu č. 3

Následně byly mezi sebou porovnány pevnosti svarů u vzorků č. 1–3 na tahové zkoušce. Na základě jejich výsledků pevnosti a provaření bylo rozhodnuto jaké parametry byly zvoleny jako výchozí optimální pro svařování dílů z PA 12.

Tahová zkouška po svařování

Při tahovém zatěžování bylo provedeno určení maximální síly do porušení na tělesech dle DVS-2216-3. Tato zkouška byla realizována za použití zařízení TiraTest 2300. Aby bylo zajištěno souosé namáhání, vzorek byl upnut do přípravku, viz obr. 3.24. Upnutí zajišťovalo, že vzorek byl souosý s působící silou a neovlivňoval přesnost měření ani nezpůsobil jiný druh namáhání.



Obr. 3.24 Otevřený přípravek s tělesem vlevo a uzavřený přípravek vpravo

Charakteristický lom na přetržených vzorcích je vidět na obr. 3.25. Lom by se měl nacházet ze 100 % v místě svaru, aby mohla být hodnocena pevnost svaru. Pokud by se lom nacházel mimo svar, byla by hodnocena pevnost daného materiálu.



Obr. 3.25 Křehký lom vzorku po tahové zkoušce

Pro hodnocení lomu na vzorcích, které vznikly po tahové zkoušce, byla vytvořena tab. 3.3, do které byly zapsány všechny vzorky, ke kterým byla přiřazena procentuální hodnota. Hodnota 100 % znamenala, že vzorek praskl v místě svaru a v opačném případě 0 % značí prasknutí zcela mimo svar. Dle dat CT nejsou žádné vady uvnitř dílů, což bylo potvrzeno, jelikož vzorky praskaly převážně ze 100 % v místě svarového spoje.

Tab. 3.3 Procentuální hodnocení praskání vzorků pro PA 12 – tisk pod úhlem 0°

Procentuální hodnocení praskání vzorků po tahové zkoušce								
Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8
Praskl ze	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	75 %	100 %	100 %
Vzorek	9	10	11	12	13	14	15	
Praskl ze	100 %	100 %	75 %	100 %	100 %	100 %	100 %	

Vzorek č. 1 dle předpokladu měl nejnižší hodnoty maximální síly 956 ± 310 N. Bylo to zapříčiněno malým relativním posuvem, kdy makromolekula neměla možnost se dostatečně proplést, přetok zde byl nejmenší. U druhého vzorku proběhlo svařování kvalitněji oproti vzorku č. 1, zde byla síla 2590 ± 353 N. Díky vyšší hodnotě relativního posuvu sonotrody, byl zvýšen podíl tavné lázně v místě svaru. Makromolekula byla lépe propletena a vznikl tak svar s vyšší pevností, který měl rovnoměrný přetok po celém obvodu. U třetího vzorku byl také zvednut relativní posuv, zde byl předpoklad na pokles nebo zvýšení pevnosti svaru. U vzorku č. 3 byl nepatrný nárůst pevnosti v řádu jednotek N, takže zvýšení relativní vzdálenosti nemělo patřičný vliv na výslednou pevnost. U vzorku č. 3 byly největší přetoky, které byly nechtěny. Z řezu u vzorků č. 2 a 3 bylo vidět provaření ve stejné míře.

Z optického zhodnocení a pevnosti vzorků byl vybrán vzorek č. 2 jako ten, který byl svařen za optimálních podmínek, jelikož splňoval všechny kritéria, která byla předem stanovena pro nalezení.

Pro každou variantu hledání podmínek bylo použito 5 vzorků ke svaření. U minulých prací [35, 37] měly výsledky velkou směrodatnou odchylku, z tohoto důvodu bylo ještě svařeno 10 dalších vzorků pro variantu optimálního nastavení. Tím by mělo dojít ke snížení směrodatné odchylky a hodnota bude více validní pro budoucí porovnávání materiálů. Výsledná hodnota po svaření dalších 10 vzorkách byla 2392 ± 256 N.

Po zjištění maximální síly na tahové zkoušce při přetržení vzorků bylo vypočteno napětí. K výpočtu bylo potřeba určit plochu svaru, viz rovnice (3.1). Bylo bráno v potaz, že byl svar provařen dokonale v celém obvodu, jelikož v předchozích pracích od pana V. Burdy [35] a pana P. Lachamanna [38], bylo velmi složité určit přesnou hodnotu plochy svaru. Byla snaha v pracích určit plochu svaru pomocí CT a řezu z mikroskopu, ale určení plochy zde bylo složité a nerelevantní. Z těchto důvodů byla počítaná plocha svaru jako dokonale provařena v celé ploše. Za R_1 bylo dosaženo vnitřní poloměr a za R_2 vnější poloměr vzorku. Díky byla vypočtena plocha svaru u všech vzorků na $138,23 \text{ mm}^2$.

$$S = \pi * (R_2^2 - R_1^2) \quad (3.1)$$

Po výpočtu plochy svaru bylo dosazeno do rovnice (3.2). Mez pevnosti v tahu byla vypočítána $17,3 \pm 1,85$ MPa.

$$R_m = \frac{F_{max}}{S} \quad (3.2)$$

Cílem tohoto experimentu tedy bylo stanovení optimálního nastavení tisku, které následně umožní relevantní hodnocení pevnosti svaru. Výsledné hodnoty pevnosti mohou být ovlivněny propadlinami, proto se dále pokračovalo s jiným nastavením tisku.

3.3.4 Tisknutí dílů PA 12 - tisk pod úhlem 45°

Pro redukování propadlin byl změněn úhel tisknutí dílů. V kap. 3.3.2 bylo již zmíněno, proč bylo vybráno toto nastavení (0°) a předem bylo předpokládáno, že při něm vzniknou propadliny. Otázkou bylo, jestli propadliny budou vadit při procesu svařování. V předchozí kapitole bylo uvedeno, že propadliny mohou eventuálně snížit pevnost svarového spoje. Z tohoto důvodu byl změněn úhel tisku na 45°, jelikož při tomto nastavení je menší riziko pro vznik propadlin na horních plochách. Jak již bylo zmíněno v kap 3.3.1, u dílů bude horší kolmost, která by mohla ovlivnit upínání na přípravek. Vzorek by nemusel být dokonale slícován plochami k sobě, vznikla by tak mezera v místě svaru a pevnost by se mohla snížit.

3.3.5 Kontrola kvality dílů PA 12 – tisk pod úhlem 45°

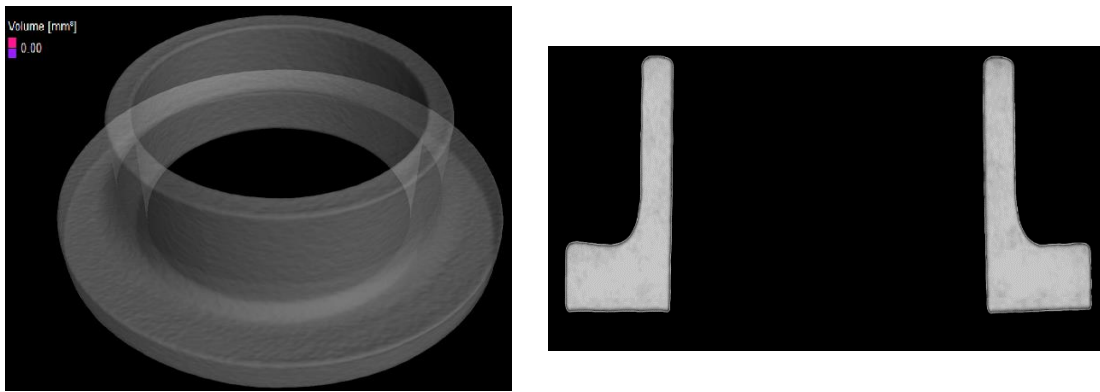
Na obr. 3.26 jsou představeny vytisknuté díly. Na vyšším dílu na horní ploše jsou vidět náznaky pruhů, které vznikly právě díky tisku pod úhlem 45°. Pruhy jsou jednotlivé vrstvičky z postupného vznikání dílu.



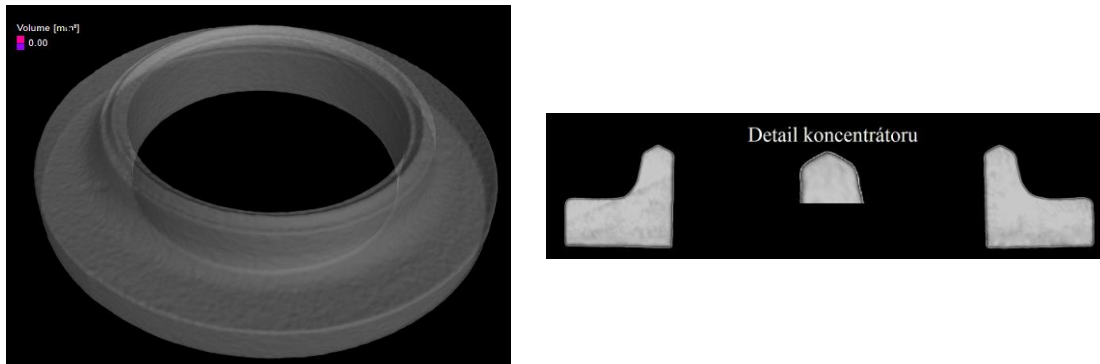
Obr. 3.26 Vytisknuté díly – vyšší díl vlevo a vpravo nižší díl

Vnitřní vady

Na obr. 3.27 je představen řez v ose vyššího dílu z CT, jíž nebyly propadliny na základnách. Na obr. 3.28 je v řezu nižší díl, kde je představen detail hrany koncentrátoru. Byl proveden výpočet pórovitosti pro oba díly. Výpočet měl stejný závěr jako při tisku pod úhlem 0°, tedy žádné vnitřní vady.



Obr. 3.27 Vyšší díl – vlevo výpočet pórovitosti a vpravo díl v řezu



Obr. 3.28 Nižší díl – vlevo výpočet pórovitosti a vpravo díl v řezu

Rozměrová přesnost

Obdobně jako při kontrole rozměrové přesnosti tištěných dílů pod úhlem 0° , proběhla i kontrola pod úhlem 45° . Nejdříve proběhla kontrola kolmosti tisknutých vzorků a poté bylo provedeno měření výšky koncentrátoru. V kap. 3.3.1 bylo zmíněno, že mohou vzniknout nekvalitní hrany koncentrátoru, jelikož hrana se bude skládat z více nanesených vrstev, když je díl tisknut pod úhlem 45° . S čím více vrstviček (0,08 mm) bude hrana složena, tím bude horší její rozměr. Z obdobného důvodu byla snížena kvalita kolmosti mezi válcovou plochou a základnou. Kolmost u vyšších dílů tisknutých pod úhlem 45° byla $0,061 \pm 0,002$ mm, hodnota byla 3krát horší než u dílů pod úhlem 0° . Nicméně změna byla v setinách milimetru, a proto vznikla otázka, zda tato úroveň významně ovlivní svařitelnost. Kolmost u nižších dílů ($0,016 \pm 0,002$ mm) měla podobné hodnoty jako díly tisknuty pod úhlem 0° .

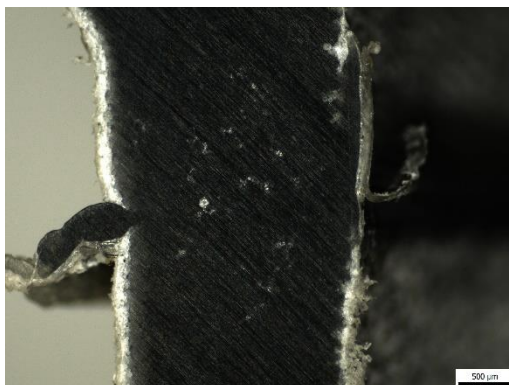
U dílů tisknutých pod úhlem 0° bylo provedeno měření výšky koncentrátoru pomocí mikroskopu, výsledky byly nerelevantní z důvodu zaoblených hran u základny. Z toho důvodu toto měření u dílů tisknutých pod úhlem 45° neproběhlo a dále nebude prováděno.

Měření odchylky absolutní výšky dílů na ultrazvukové svářečce bylo provedeno obdobně jako u dílů s úhlem tisku 0° . Hodnota odchylek výšek byla stanovena na 0,06 mm. Při porovnání hodnot mezi sebou 0° a 45° byla odchylka dílů 45° 3krát vyšší než u dílů tisknutých 0° . Rozdíl byl v setinách milimetru, takže nešlo o nějakou významnou změnu jednotnosti tisku.

3.3.6 Svařování dílů PA 12 – tisk pod úhlem 45°

Po kontrole kvality tisknutých dílů bylo provedeno jejich svařování. Vzorky tisknuty pod úhlem 45° byly svařeny za stejných optimálních podmínek, které byly nalezeny pro tisk pod úhlem 0°. Kde bylo nastaveno do první fáze rychlost 1 mm/s a relativní posuv 0,15 mm. Ve druhé fázi bylo nastavena rychlost na 2 mm/s a relativní posuv 0,3 mm.

Provaření u vzorku 0° nebylo dokonalé v celém průřezu. U vzorku 45°, není skoro viditelná svařovací linie, vzorek byl kvalitně provařen v celé svarové ploše, viz obr. 3.29. Po tomto zjištění by měl vzorek tisknutý pod úhlem 45° dosáhnout vyšší pevnosti než vzorek 0°.



Obr. 3.29 Svar v řezu – tisk pod úhel 45°

Tahová zkouška

Vzorky tisknuté pod úhlem 45° praskaly převážně ze 100 % v místě svaru, což dokazuje přiložená tab. 3.4 s procentuálním hodnocením. Pod tabulkou je obr. 3.30 křehkého lomu.

Tab. 3.4 Procentuální hodnocení praskání vzorků pro PA 12 – tisk pod úhlem 45°

Procentuální hodnocení praskání vzorků po tahové zkoušce								
Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8
Praskl ze	100 %	100 %	100 %	50 %	100 %	75 %	100 %	100 %
Vzorek	9	10	11	12	13	14	15	
Praskl ze	100 %	100 %	75 %	100 %	100 %	100 %	100 %	



Vzorek č. 5
100 %

Obr. 3.30 Křehký lom vzorku po tahové zkoušce – tisk pod úhlem 45°

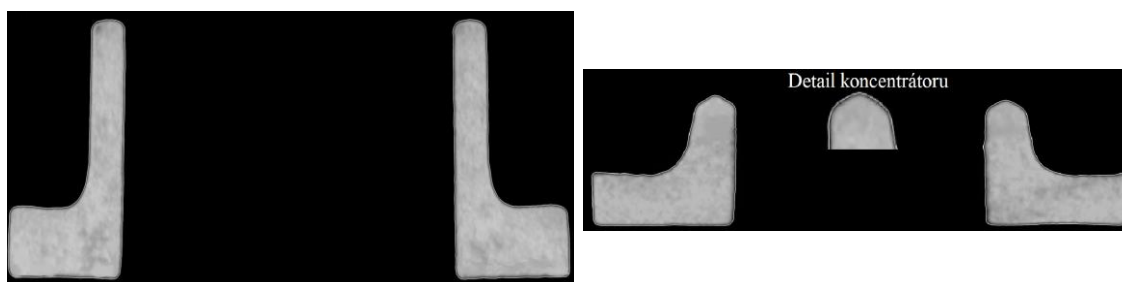
Dle předpokladu byla vyšší pevnost vzorků a to 3779 ± 222 N. Byla dopočítána mez pevnosti v tahu $27,3 \pm 1,6$ MPa. Pevnost je vyšší o 1387 N (10 MPa) oproti nastavení úhlu tisku 0° . Horší kolmost neovlivnila svařování ani pevnost svaru. Bylo potvrzeno, že propadliny ovlivnily přenos kmitů a možná i sílu, kterou působila sonotroda na vzorky. Nastavení úhlu tisku 45° bylo zvoleno výchozím nastavením pro 3D tisk dalších dílů z odlišných materiálů. Po nalezení správného nastavení tisku bylo možné provést chemické vyhlazení povrchu u dílů tisknutých 45° .

Chemické vyhlazení povrchu

Chemické vyhlazení povrchu bylo vybráno, jelikož je to jedna z nejčastěji využívaných dokončovací operace po tisku MJF. Proces chemického vyhlazení je již popsán v kap. 2.2.4, kde byla na povrch dílů naleptána chemická látka na bázi isopropenu, která byla ve formě páry, která následně kondenzovala na povrchu. Po kondenzaci a naleptání je povrch měkký, proto dochází k následnému vytvrzení dílu. Sloučenina zahladí výstupky a zacelí celý povrch.

Kontrola kvality PA 12 – chemicky vyhlazené

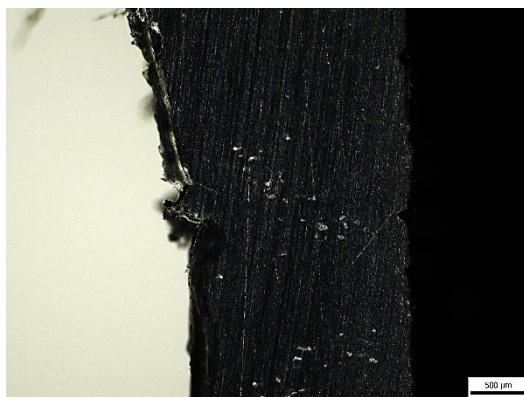
Po chemickém vyhlazení proběhl ten stejný proces měření kvality jako u dílu bez povrchové úpravy. Vnitřní vady nebyly změřeny, jelikož byla upravována pouze povrchová vrstva. Z podobného důvodu nebyla měřena kolmost u dílů, jelikož chemická úprava nezmění kolmost mezi základnou na válcovou plochou. Chemicky vyhlazené díly měly ještě více zaoblené hrany, viz obr. 3.31. Bylo provedeno porovnání vytištěných dílů, zda jsou jednotně vytisknuty. K tomuto porovnání byla stanovena průměrná směrodatná odchylka z měření absolutních výšek vzorku, s hodnotou 0,07 mm. Po měření kvality následovalo samotné svařování dílů.



Obr. 3.31 Řez PA 12 chem. vyhlazený – vlevo pro vyšší díl a vpravo pro nižší díl

Svařování dílu PA 12 – chemicky vyhlazené

Svařování proběhlo za stejného parametrového nastavení jako originál. Bylo očekáváno, že chemicky vyhlazené díly by měly mít horší svařitelnost, jelikož jejich povrch byl hladší a plochy by se měly méně třít o sebe při natahování koncentrátorů energie. Díl byl také rozříznut, viz obr. 3.32 aby bylo následně zkontrolováno jeho důkladné provaření. Provaření bylo kvalitní v celém průřezu jako u dílu bez úpravy povrchu.



Obr. 3.32 Svar v řezu PA 12 chemicky vyhlazený – tisk pod úhel 45°

Po svaření všech vzorků byla provedena tahová zkouška. Vzorky praskaly v nadpoloviční většině ze 100 % v místě svaru, což dokazuje přiložená tab. 3.5. Pod tabulku byl přidán obr. 3.33, na kterém je vidět křehký lom vzorku.

Tab. 3.5 Procentuální hodnocení praskání vzorků pro PA 12 chemicky vyhlazené – tisk pod úhlem 45°

Procentuální hodnocení praskání vzorků po tahové zkoušce								
Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8
Praskl ze	100 %	75 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	0 %
Vzorek	9	10	11	12	13	14	15	
Praskl ze	75 %	100 %	100 %	25 %	100 %	100 %	50 %	



Vzorek č. 3
100 %

Obr. 3.33 Křehký lom vzorku – tisk pod úhlem 45° chemické vyhlazení

Hodnota maximální síly při přetržení vzorku byla 3295 ± 173 N, hodnota byla také přepočítána na mez pevnosti v tahu, kde byla její velikost $23,8 \pm 1,2$ MPa.

3.4 Stanovení svařitelnosti dílů z PA 12 GB

Následně byl proveden obdobný proces u materiálu PA 12 GB s podílem 40 % skelných kuliček. Při takto vysokém podílu skelných kuliček by tato přísada mohla zapříčinit zvýšení tlumení přenosu kmitů a snížit tím pevnost svarového spoje.

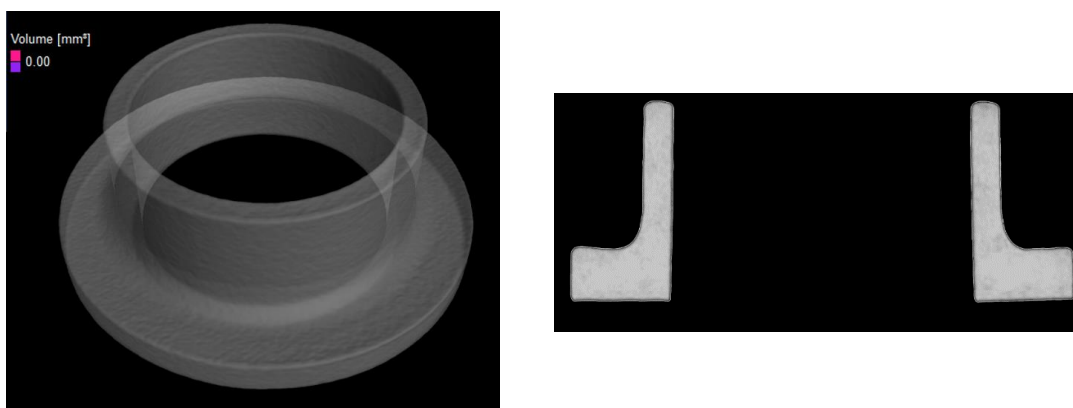
3.4.1 Tisknutí dílů PA 12 GB

Po nalezení optimálního nastavení úhlu tisku (45°), byly vytisknuty díly z PA 12 GB. Také bylo provedeno chemické vyhlazení dílů.

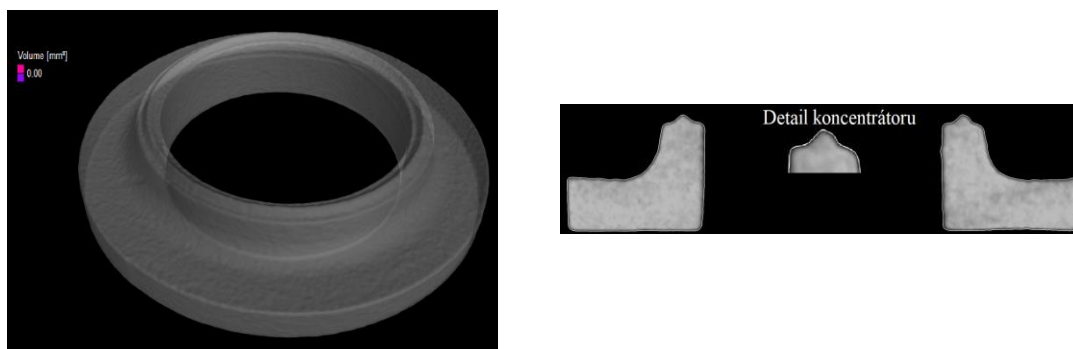
3.4.2 Kontrola kvality PA 12 GB

Vnitřní vady

Kontrola vnitřních vad proběhla totožně jako již dříve provedené. Na obr. 3.34 je představena pórovitost pro vyšší díl a na obr. 3.35 je to samé zobrazeno pro nižší díl. U obou byl stejný výsledek, oba dva nemají vnitřní vady. Na pravé straně obrázku je řez v ose vyššího dílu. Na obr. 3.36 jsou řezy obou dílů po chemickém vyhlazení.



Obr. 3.34 Vyšší díl – výpočet pórovitosti vlevo a vpravo řez dílem PA 12 GB



Obr. 3.35 Nižší díl – výpočet pórovitosti vlevo a vpravo řez dílem PA 12 GB



Obr. 3.36 Vlevo vyšší díl a vpravo nižší díl pro PA 12 GB chem. vyhlazený

Rozměrová přesnost

Rozměrová přesnost byla hodnocena měřením kolmosti a měřením výšky koncentrátoru. Měření kolmosti bylo provedeno jen na dílů bez úpravy povrchu, chemicky vyhlazené nebyly

měřeny. Důvod byl již výše vysvětlen. Hodnota kolmosti byla stanovena u vyšších dílů na $0,068 \pm 0,003$, u nižších dílů byla měřena kolmost $0,015 \pm 0,003$ mm.

Na ultrazvukové svářečce proběhlo také měření, kde byly porovnávány odchylky výšek vytisknutých vzorků. Postup byl obdobný jako u materiálu PA 12. Byla změřena hodnota odchylky pro díly bez chemické úpravy 0,05 mm. Pro chemicky vyhlazený povrch byla stanovena hodnota 0,06 mm.

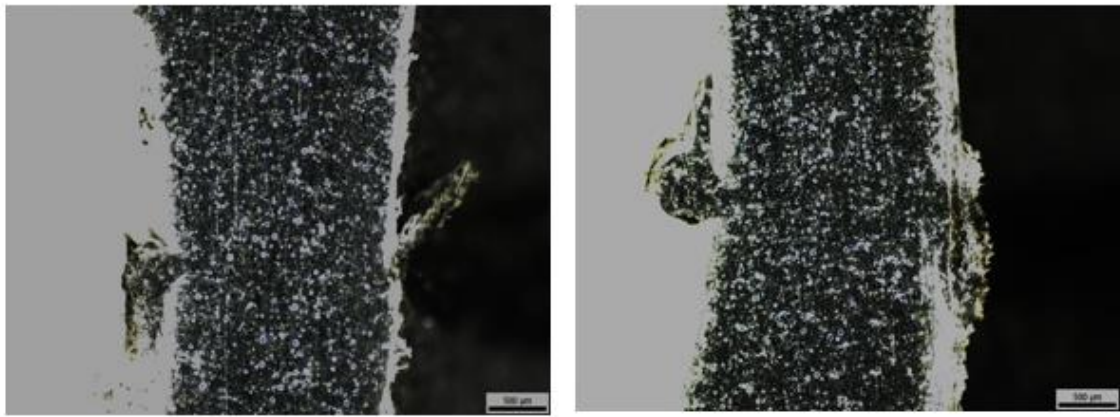
3.4.3 Svařování dílů PA 12 GB

Dále, bylo provedeno hledání optimálních svařovacích podmínek, kde byly upravovány opět tyto dva parametry: rychlost pohybu a relativní posuv sonotrody. Hledání optimálních podmínek probíhalo na základě optického a pevnostního hodnocení vzorků. Stejně jako u předchozího materiálu, nejdříve byly nastaveny technologické parametry pro první vzorek. Byly nastaveny parametry, které byly u PA 12 zvoleny jako optimální, tedy rychlost v první fázi 1 mm/s a relativní posuv 0,15 mm. A do druhé fáze byla zvolena rychlost 2 mm/s a relativní posuv 0,3 mm. Tento vzorek byl následně svařen a vyhodnocen na základě grafického průběhu svařování a optické kontroly. V grafickém průběhu svařování byl na začátku vidět vzestup síly a příkonu nad dráhou. Byla zde potřeba snížit svařovací rychlost, která byla upravena na 0,6 mm/s. Zbytek průběhu byl kvalitní a hodnoty síly a výkonu korelovaly s dráhou. Po úpravě nastavení proběhlo svařování a opět vyhodnocení. Díky nově nastavenému parametru rychlosti splňoval vzorek všechny aspekty pro kvalitní svar. Následně byla zjištěna pevnost obou zkoušených nastaveních. Z výsledků pevnosti svaru a posouzení provaření (z řezu vzorku) bylo vybráno druhé nastavení, které bylo považováno za optimální svařovací podmínky, viz tab. 3.6. Grafický průběh svařování pro vzorek, který byl svařen za optimálních podmínek je přiložen v příloze. Při optimálním nastavení byly svařeny další vzorky i s díly s chemickou úpravou povrchu.

Na obr. 3.37 jsou představeny řezy svařených vzorků pro obě varianty (bez úpravy povrchu a chemicky vychlazené). Řezy byly provedeny za stejných podmínek jako dřívější materiál. Vzorky byly provařeny v celém průřezu, to znamená, že optimální podmínky byly dobře nalezeny.

Tab. 3.6 Optimální svařovací podmínky pro PA 12 GB

Optimální svařovací podmínky pro PA 12 GB		
Fáze	Rychlost posuvu [mm/s]	Relativní vzdálenost [mm]
1	0,6	0,15
2	2	0,3



Obr. 3.37 Řez svarem vlevo chemicky vyhlazený vpravo originál PA 12 GB

Tahová zkouška

Po svaření vzorků bez úpravy povrchu a dílů s chemickým vyhlazením povrchu, byla provedena tahová zkouška, kde byla zjišťována maximální síla při přetržení vzorků. Vzorky praskaly z nadpoloviční většiny případů v místě řezu, což dokazuje i přiložená tab. 3.7. Na obr. 3.38. vlevo bez úpravy povrchu hodnocen 100 % a v pravé části chemicky vyhlazený vzorek, který byl hodnocen 75 %.

Tab. 3.7 Procentuální hodnocení praskání vzorků pro PA 12 GB

Procentuální hodnocení praskání vzorků po tahové zkoušce									
Originál	Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8
	Praskl ze	100 %	25 %	100 %	100 %	100 %	100 %	75 %	100 %
	Vzorek	9	10	11	12	13	14	15	
	Praskl ze	100 %	100 %	75 %	100 %	0 %	100 %	100 %	
Chemicky vyhlazený	Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8
	Praskl ze	0 %	100 %	100 %	100 %	100 %	25 %	100 %	100 %
	Vzorek	9	10	11	12	13	14	15	
	Praskl ze	75 %	100 %	100 %	100 %	100 %	50 %	100 %	



Obr. 3.38 Křehký lom vzorku PA 12 GB – vlevo bez úpravy, vpravo chemicky vyhlazený

Hodnota maximální síly pro vzorky bez úpravy povrchu byla stanovena na 2232 ± 158 N, přepočteno na mez pevnosti v tahu $16,2 \pm 1,2$ MPa. Pro chemicky vyhlazené díly byla síla stanovena na 2358 ± 117 N a mez pevnosti na $17,1 \pm 0,9$ MPa.

3.5 Stanovení svařitelnosti dílů z PP

3.5.1 Tisk dílu PP

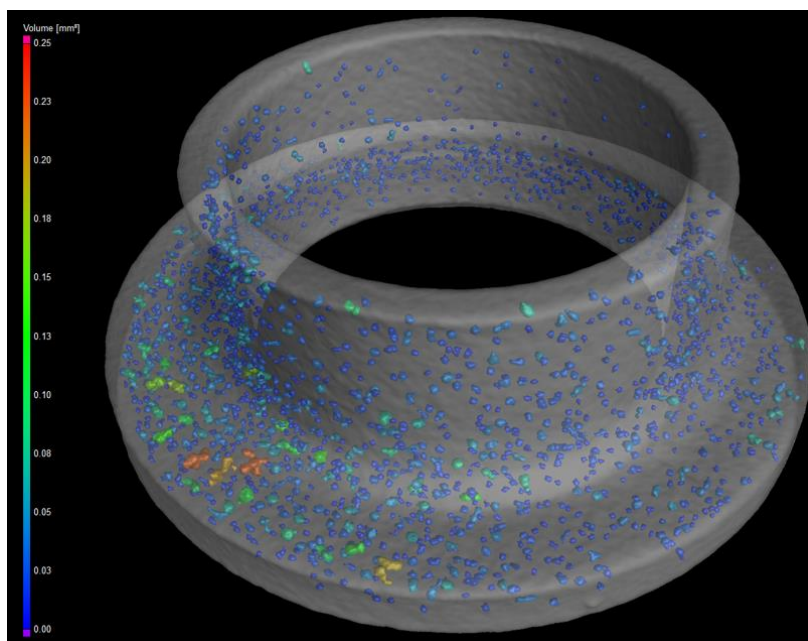
Tisknutí dílů proběhlo také na tiskárně od HP, parametrové nastavení bylo upraveno dle potřeby materiálu. Díly byly tisknuty pod stejnou orientací (45°) jako předchozí materiály. Chemické vyhlazení u PP nebylo možné provést z důvodu vlastnosti materiálu, jelikož PP má vysokou odolnost proti chemikáliím. Při procesu vyhlazení by tak na jeho povrchu samotná chemická reakce inhibovala.

3.5.2 Kontrola kvality PP

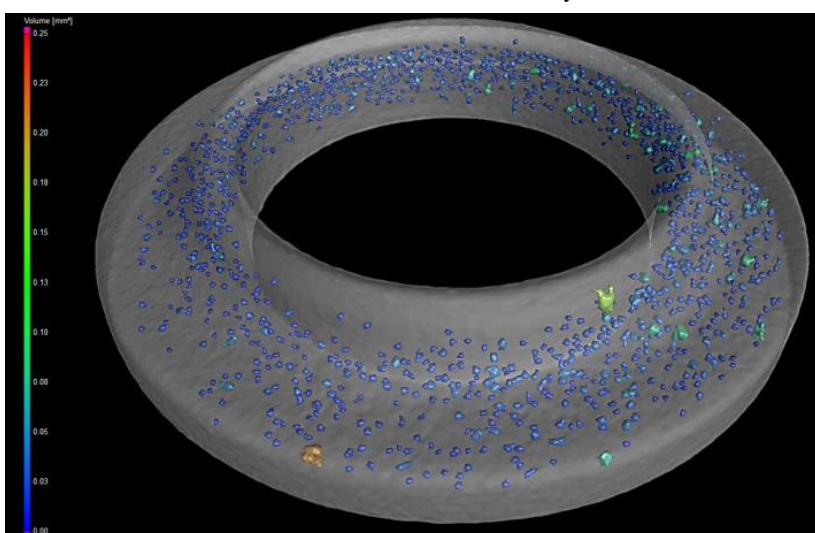
Kontrola kvality byla provedena stejně jako u předchozí materiálů, kde začal proces kontroly kvality vnitřními vadami a následoval kontrolou rozměrů.

Vnitřní vady

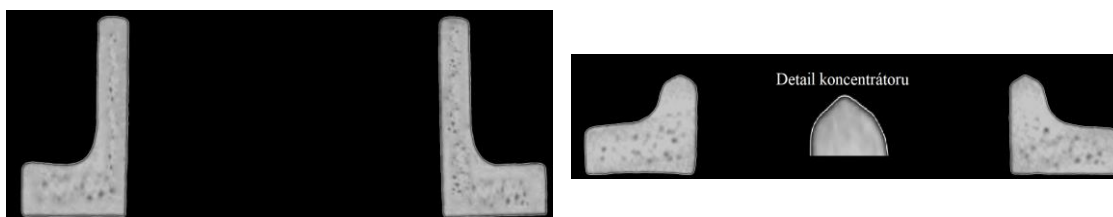
Díly byly analogicky scanovány na CT, kde byla vypočtena pórovitost za stejných podmínek jako u ostatních. Na obr. 3.39 a obr. 3.40 je představena porozita pro vyšší a nižší díl, kde jako u jediného materiálu byly nalezeny póry. Největší pór měl objem $0,25 \text{ mm}^3$. Takto velké póry byly nalezeny v menším výskytu, oproti pórům s objemem $0,05 \text{ mm}^3$, které byly po celém díle náhodně rozmístěny. Na obr. 3.41 jsou představeny řezy obou dílů s detailem pro koncentrátor.



Obr. 3.39 Pórovitost PP – vyšší díl°



Obr. 3.40 Pórovitost PP – nižší díl°



Obr. 3.41 Řezy z CT – vlevo vyšší díl a vpravo nižší díl

Rozměrová přesnost

Měření přesnosti tisknutých dílů bylo provedeno stejně jako předchozí materiál, první bylo provedeno měření kolmosti, poté proběhlo měření výšky koncentrátoru a na závěr odchylka od absolutních výšek vzorků. Data pro měření kolmosti byla získána z CT, která byla poté vyhodnocena v programu GOM, kde byla stanovena jejich kolmost mezi válcovou plochou a základnou. Kolmost na vyšším dílu byla stanovena na $0,065 \pm 0,004$ mm a na nižším $0,014 \pm 0,002$ mm.

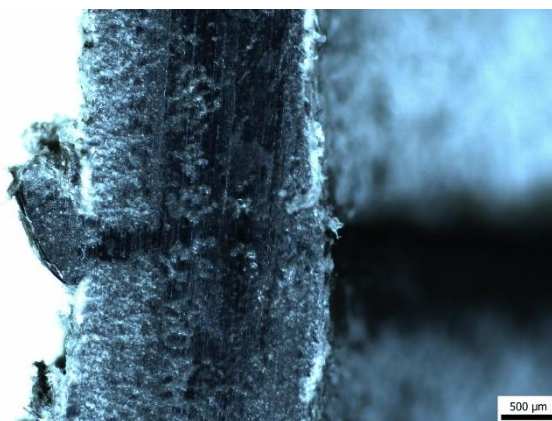
Kontrola jednotnosti vytisknutých dílů byla provedena na ultrazvukové svářečce, kde byl měřen rozdíl mezi absolutními výškami dílů s hodnotou 0,009 mm. Poté proběhl proces svařování.

3.5.3 Svařování dílů PP

Pro nalezení optimálních podmínek byly opět měněny parametry, mezi které patří rychlost pohybu a relativní posuv sonotrody. Mezi konstantní parametry byly znovu zvoleny: působící síla a velikost amplitudy. Optimální svařovací podmínky byly opět hledány v závislosti na optické a pevnostní vlastnosti. PP má úplně jiné útlumové vlastnosti než předchozí materiály, proto první parametrické nastavení bylo čistě náhodné. Celkem (z obou fází) byl nastaven relativní posuv na 0,4 mm. Po svaření a zhodnocení svaru bylo zjištěno, že to bylo příliš a posuv byl snížen na hodnotu 0,35 mm. Opět byl vzorek svařen a vyhodnocen, z grafického průběhu svařování byla v druhé fázi síla moc velká. Z tohoto důvodu byla rychlost snížena v druhé fázi z 2 mm/s na hodnotu 1,5 mm/s. Opět proběhlo svaření a vyhodnocení tohoto nastavení. Z grafického průběhu byla síla stále vysoká, tak došlo k dalšímu snížení rychlosti na 1,2 mm/s. Po svaření a zhodnocení všech aspektů bylo toto nastavení vybráno jako kvalitní a dále se muselo toto nastavení ověřit na tahové zkoušce, zda bude mít nejvyšší pevnost. Byla změřena pevnost všech zkoušených nastavení, kde nejvyšších hodnot dosahoval poslední vzorek a také bylo jeho provaření v celém průřezu, viz obr. 3.42. Optimální podmínky pro svařování PP jsou představeny v tab. 3.8. Grafický průběh svařování pro vzorek, který byl hodnoceno jako optimální, je přiložen v příloze. Při tomto optimálním nastavením byly svařeny další vzorky.

Tab. 3.8 Optimální svařovací podmínky pro PP

Optimální svařovací podmínky pro PP		
Fáze	Rychlost posuvu [mm/s]	Relativní vzdálenost [mm]
1	1	0,15
2	1,2	0,20



Obr. 3.42 Svar v řezu PP°

Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na stejném zařízení a se stejnými nastavenými podmínkami. Díly praskaly skoro všechny ze 100 % v místě svaru, což představuje tab. 3.9. Na obr. 3.43 byl představen křehký lom po tahové zkoušce.

Tab. 3.9 Procentuální hodnocení praskání vzorků pro PP

Procentuální hodnocení praskání vzorků po tahové zkoušce								
Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8
Praskl ze	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	75 %
Vzorek	9	10	11	12	13	14	15	
Praskl ze	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	

Hodnota maximální síly při přetržení vzorku byla stanovena na 2126 ± 167 N, byla také přepočtena na mez pevnosti v tahu $15,4 \pm 1,2$ MPa.



Vzorek č. 3
100 %

Obr. 3.43 Křehký lom vzorku po tahové zkoušce PP

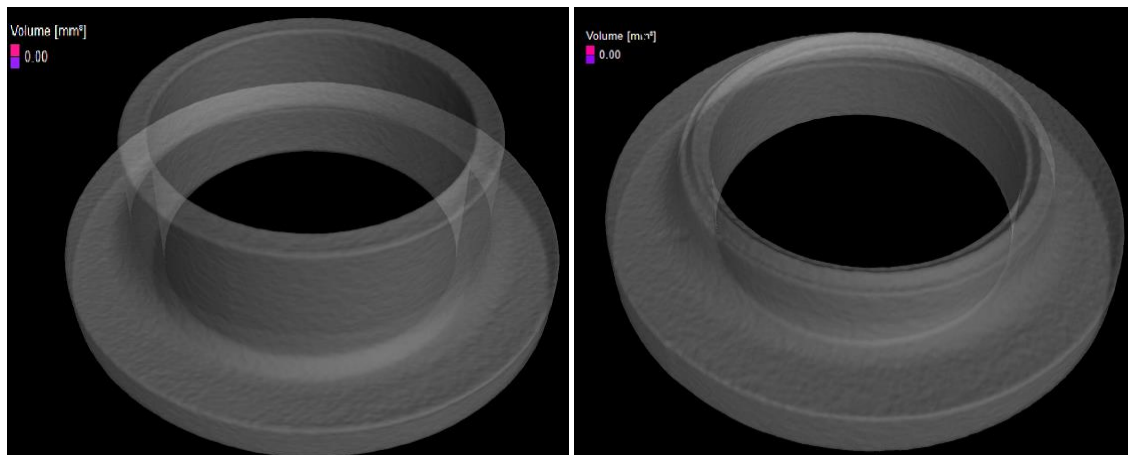
4 Vyhodnocení a diskuze výsledků

Při srovnání výsledků pevnosti svaru v závislosti na úhlu tisku je zřejmé, že díly vytisknuté pod úhlem 0° měly nižší pevnost než díly svařené pod úhlem 45° . Ačkoli díly tisknuté pod úhlem 45° vykazovaly horší kolmost a tvar koncentrátoru, bylo zřejmé, že vliv propadlin je mnohem významnější než tyto aspekty. Z tohoto důvodu byl pro tisk dílů vybrán úhel 45° a další diskuse o nastavení nebude v této části práce pokračovat.

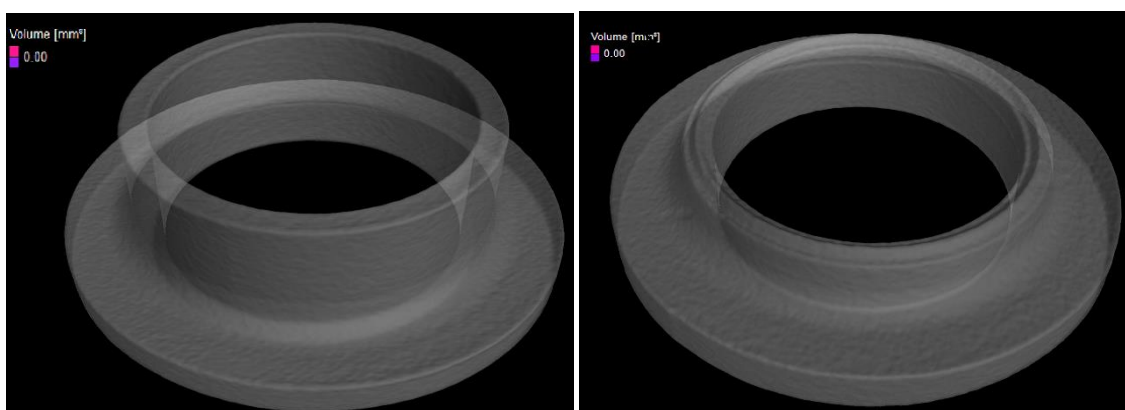
4.1 Vnitřní vady

Níže na obr. 4.1 – obr. 4.3 jsou představeny výsledky porozity všech materiálových variant vytisknutých dílů. U dílů z PP byly jako u jediného zjištěny póry. Dle studie [39] je příčinou vzniku porozity orientace v prostoru. Čím je vzorek z tohoto materiálu tisknut pod vyšším úhlem (45° a víc stupňů), tím je porozita vyšší. Je to zapříčiněno malou absorpcí tepla během procesu tisku. V této práci se zjistilo, že je rozdíl v porozitě u dílů tisknutých u dna stavební plochy oproti těm nahoře ve stavebním prostoru. Části dílů tisknuté ve spodní části absorbují při tisku více tepla než v horní části a jejich porozita je tak v této oblasti nižší. U PP se pravděpodobně stalo, že byly díly uloženy ve stavebním prostoru nahoře a díky tomu u nich byla zjištěna porozita. To potvrzuje obr. 4.3, kdy byly nalezeny největší póry pouze na jedné straně dílů, protože tato strana byla v prostoru výše oproti protilehlé.

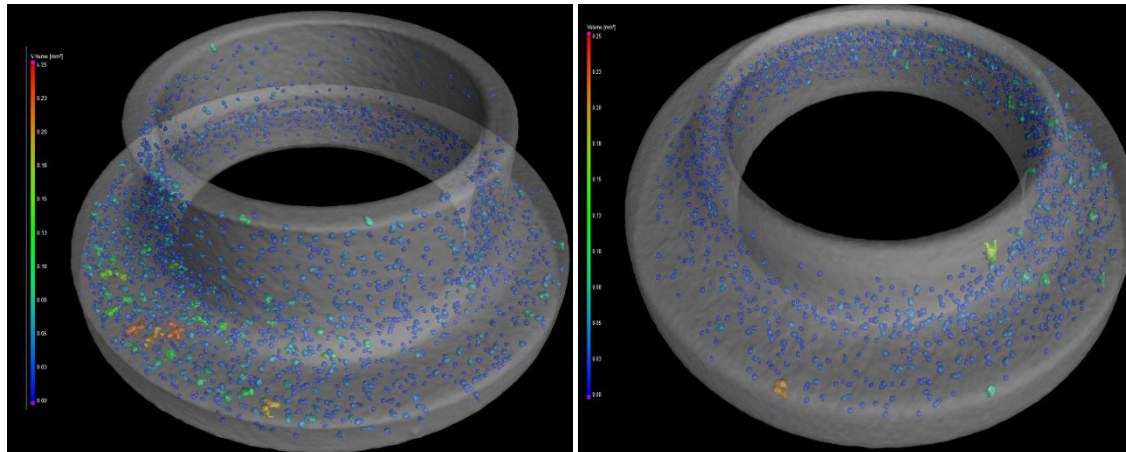
V práci pana Burdy [35] byla použita aditivní technologie FDM pro tisk dílů. Byly zde nalezeny póry na všech šaržích materiálů ASA, ABS a PLA. Póry se vyskytovaly v blízkosti hran dílů a podle materiálu měli velikosti od $0,14 \text{ mm}^3$ (ABS) až po $0,8 \text{ mm}^3$ (PLA). Póry v blízkosti hran oslabily vzorky natolik, že při tahové zkoušce praskaly výhradně v těchto místech. U PP tisknuty technologií MJF měly největší póry objem $0,25 \text{ mm}^3$ a to pouze na jedné straně dílů, jinak byly po dílu náhodně rozprostřeny póry o velikosti $0,05 \text{ mm}^3$.



Obr. 4.1 Výpočet pórovitosti pro PA 12



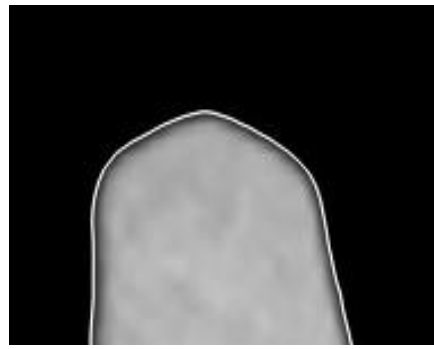
Obr. 4.2 Výpočet pórovitosti pro PA 12 GB



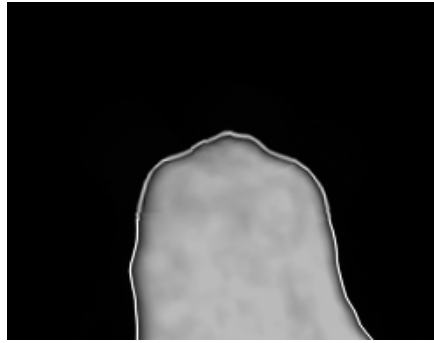
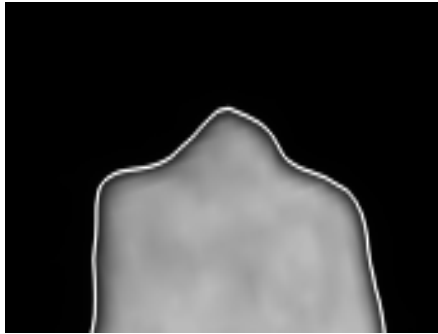
Obr. 4.3 Výpočet pórovitosti pro PP

4.2 Vyhodnocení rozměrové přesnosti dílů

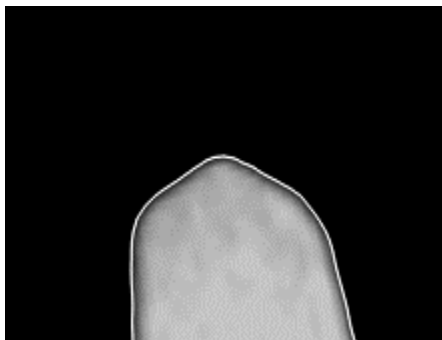
Technologií MJF, nebylo možné vytisknout ostrou hranou. Zaoblené hrany byly problémem při hodnocení specifických rozměrů dílů, jelikož nebylo možné přesně určit základnu. Práškové metody tisku v aditivní výrobě neumožňují tisk ostrých detailů, jelikož prášek měl tvar malých kuliček o průměru 60 μm , který byl následně spečen. Díly s chemickým vyhlazením měly ještě více zaoblené hrany, díky kterým bylo měření komplikovanější. U chemického vyhlazení došlo na povrchu k naleptání výstupků chemickou látkou, čímž došlo k ucelení a vyhlazení povrchu. Na obr. 4.4 – obr. 4.6 jsou detaily na koncentrátory energie z CT. Hrana u PA 12 GB byla špičatější oproti PA 12, což pravděpodobně zapříčinil vysoký podíl plniva v materiálu, kdy kuličky skla zpevnily tisknutou hranu. U PP byla hrana koncentrátoru zaoblenější vůči PA 12, což bylo způsobeno větším smrštěním. U chemicky vyhlazených dílů byla hrana jednoznačně více zaoblená vůči dílům bez úpravy povrchu u PA 12. Po chemické úpravě u PA 12 GB vypadala hrana o dost hůře oproti dílu bez úpravy povrchu. Určení výšky koncentrátoru je pro svařovací proces důležité, jelikož je dle jeho rozměru následně určena velikost posuvu sonotrody. Sonotroda nemůže být posunuta o 100 % výšky koncentrátoru, neboť by nezbyl žádný materiál pro vznik pevného svarového spoje. Nicméně vzhledem k zaoblení hran v oblasti základen nebylo možné relevantní stanovení výšky koncentrátoru.



Obr. 4.4 Detail koncentrátoru PA 12 – vlevo bez úpravy povrchu a vpravo chemicky vyhlazený



Obr. 4.5 Detail koncentrátoru PA 12 GB – vlevo bez úpravy povrchu a vpravo chemicky vyhlazený



Obr. 4.6 Detail koncentrátoru PP

4.2.1 Vyhodnocení měření výšky koncentrátoru a absolutních výšek vzorků

Jak již bylo zmíněno, měření výšky koncentrátoru nebylo možné relevantně určit kvůli zaobleným hranám v oblasti základny koncentrátoru. Pro nerelevantnost nebude měření výšky koncentrátoru na optickém mikroskopu zde diskutováno. Nicméně dále bylo provedeno měření odchylek výšek u jednotlivých vzorků, což poskytlo informace o rozměrové stabilitě vytisknutých materiálů. Měření proběhlo na všech dílech a bylo uskutečněno na ultrazvukové svářečce. V tab. 4.1 jsou představeny výsledky měření. Při porovnání stanovených směrodatných odchylek měření (rozměrové stability) dílů PA 12 s PA 12 GB bez úpravy povrchu, tak u dílů se skleněnými kuličkami, byla zjištěna vyšší odchylka. Důvodem bylo pravděpodobně nerovnoměrná distribuce skleněných kuliček. U PP byla změřena nejvyšší odchylka výrobní šarže ze všech tisknutých variant. Dle výzkumu [40] a [41] to bylo kvůli rozdílné absorpci tepla materiálu nebo kvůli nižším teplotám tavení, což mohlo vést k větším deformacím během chladicího procesu. U chemicky vyhlazených dílů byl vidět nárůst směrodatných odchylek oproti originálům. To by mohlo být zapříčiněno nerovnoměrným

vyhlazením povrchů koncentrátoru ve fázi naleptávání. Výrobce udává rozměrovou přesnost $\pm 0,2$ mm. U PP se tedy jedná o nízké odchylky a je otázkou, jestli tyto odchylky ovlivní proces svařování.

Tab. 4.1 Výsledné porovnání měření odchylek absolutních výšek vzorků

Materiál	Měření odchylky absolutní výšky vzorků [mm]	
	Originál	Chemicky vyhlazený
PA 12	0,02	0,07
PA 12 GB	0,05	0,08
PP	0,09	-

4.2.2 Vyhodnocení měření kolmosti

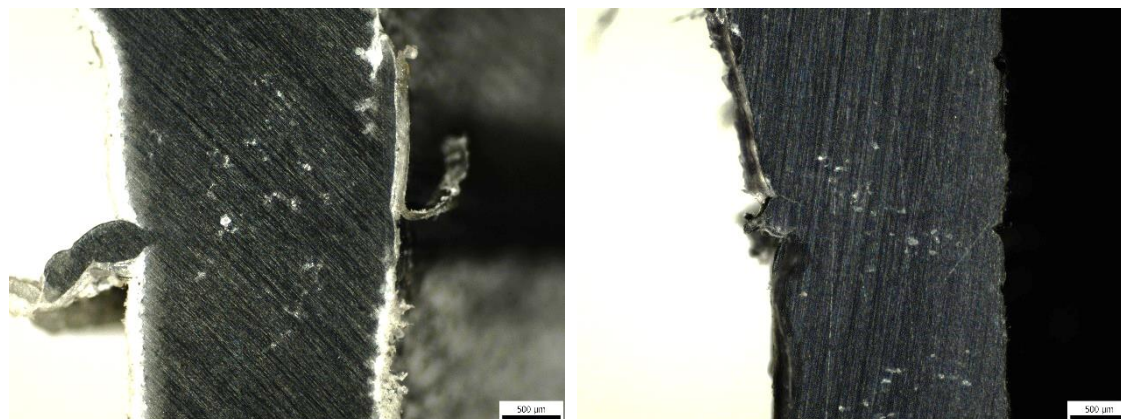
Všechny díly, u kterých byla měřena kolmost PA 12, PA 12 GB a PP měly podobné hodnoty kolmosti. U chemicky vyhlazených dílů nebyla měřena kolmost, jelikož povrchová úprava nemá vliv na kolmost dílů. Výsledné hodnoty byly porovnány s prací pana Burdy [35], kde byla měřena kolmost vstříkovaných dílů. Tyto hodnoty byly přidány do tab. 4.2. Vstříkované díly měly kolmost na vyšších dílech 6x lepší oproti dílům z MJF. Rovněž v porovnání s tiskem pod úhlem 0° je evidována vyšší nepřesnost (odchylka kolmosti). Horší kolmost dílů by mohla ovlivnit dosednutí ploch při upínání na přípravek a tím by mohla být snížena pevnost. Také by horší kolmost mohla ovlivnit dotek sonotrody na styčné ploše. Na jedné straně by byl lepší přenos kmitů oproti druhé straně a tím by mohlo dojít k nerovnoměrnému provaření vzorku. Stejně jako u kontroly stability výrobní šarže se však jedná o nízkou úroveň potenciálně problematického parametru. Z tohoto důvodu bylo otázkou, zda tato rozměrová nepřesnost ovlivní kvalitu svaru jednotlivých materiálů či ne.

Tab. 4.2 Výsledné porovnání z měření kolmosti

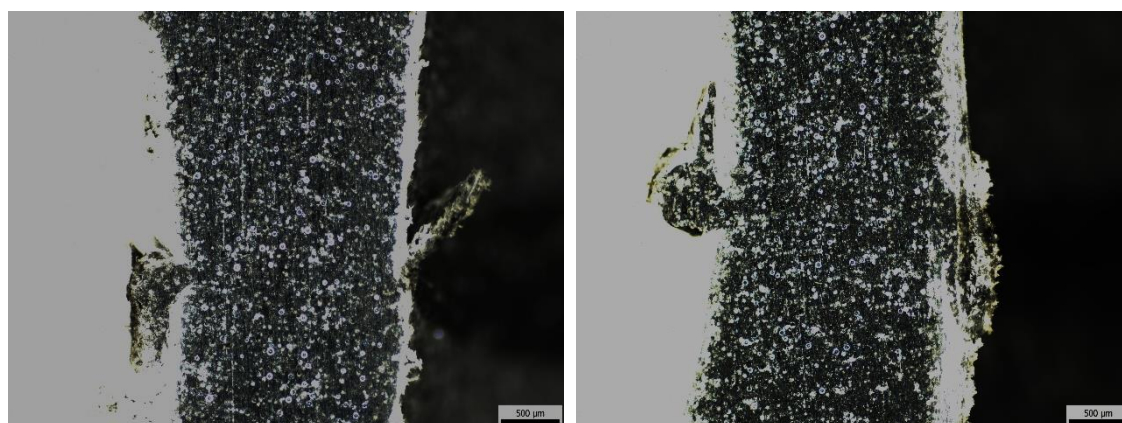
Materiál	Kolmost [mm]		Zdroj
	Vyšší díl	Nižší díl	
PA 12	$0,061 \pm 0,002$	$0,016 \pm 0,002$	-
PA 12 GB	$0,068 \pm 0,003$	$0,015 \pm 0,002$	-
PP	$0,065 \pm 0,004$	$0,014 \pm 0,002$	-
Vstříkovaný ASA	$0,004 \pm 0,001$	$0,003 \pm 0,001$	[35]
Vstříkovaný ABS	$0,006 \pm 0,001$	$0,004 \pm 0,001$	[35]

4.3 Vyhodnocení svažitelnosti

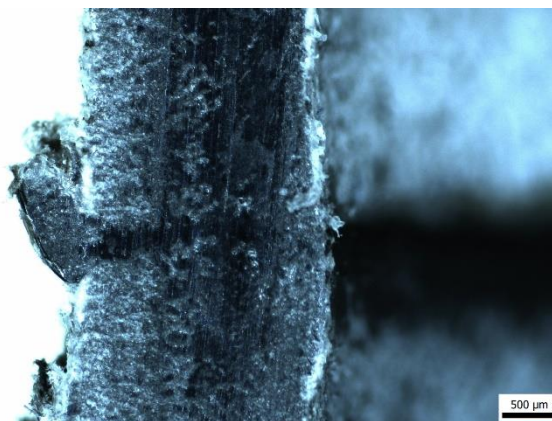
Pro všechny šarže materiálů byly nejprve nalezeny optimální svařovací podmínky. To znamená, že bylo nutné najít takové nastavení parametrů svářečky, při kterém byl svar po optické i pevnostní kontrole kvalitní. K nalezení tohoto stavu (optimálních svařovacích podmínek) bylo využito grafických závislostí v průběhu svařování. Snahou bylo, aby křivky síly a výkonu dosahovaly stejných hodnot jako křivka dráhy. Při optické kontrole byl záměr, aby byly makromolekuly propleteny a vznikl tak pevný spoj, u kterého zároveň nedošlo k vytlačení tavné lázně z místa svařování. Při optimálních podmínkách byly svařeny jak originály, tak chemicky upravené díly. Na obr. 4.7 – obr. 4.9 jsou mezi sebou porovnány všechny řezy testovaných šaržích. Na všech bylo vidět provaření v celém průřezu, vzorky byly také kvalitně slícovány (vliv rozměrové přesnosti). Důkazem dobrého provaření materiálu je distribuce skleněných kuliček u materiálu PA 12 GB. Tato distribuce je zcela rovnoměrná (bílé místa v řezu). Dále je patrné, že skleněné kuličky nebyly z místa svaru vytlačeny, proces byl tedy správně nastaven.



Obr. 4.7 Řez vzorkem PA 12 – vlevo bez úpravy a vpravo chemicky upravený



Obr. 4.8 Řez vzorkem PA 12 GB – vlevo bez úpravy a vpravo chemicky upravený



Obr. 4.9 Řez vzorkem PP

Tahová zkouška

Na tahové zkoušce byla zjišťována maximální síla vzorků při přetržení, viz tab. 4.3. Síla není materiálová vlastnost, proto byla vypočtena mez pevnosti v tahu. Díky pevnosti byla také možnost porovnání výsledků s jinými pracemi a také s materiálovými vlastnostmi definovanými materiálovým listem. Pro stanovení pevnosti jsou jistá omezení u svařovaných dílů ultrazvukem a to taková, že musí být určena reálná plocha svaru. Ze zobrazených řezů svarů lze předpokládat (při optimálních podmínkách), že plocha svaru odpovídá ploše 100 % provařené oblasti (průřez dílu). Do výpočtu byla tedy dosazena celá plocha svaru.

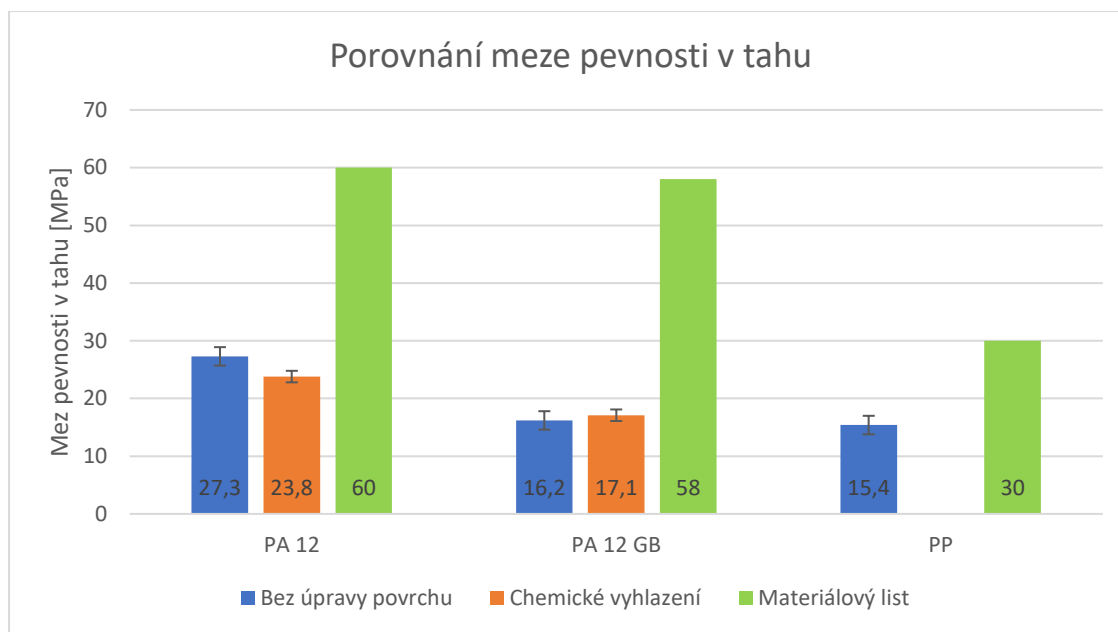
U chemicky vyhlazených vzorků byl předpoklad, že budou mít vyšší odchylky měření, jelikož byla zjištěna vyšší odchylka při porovnávání absolutních výšek dílů na ultrazvukové svářečce. Z rozptylu síly a směrodatné odchylky, viz tab. 4.3, nebyl tento předpoklad potvrzen.

Tab. 4.3 Výsledky maximálních sil z tahových zkoušek

Výsledky maximální síly [N]		
Materiál	Originál	Chemicky vyhlazený
PA 12	3779 ± 222	3295 ± 173
PA 12 GB	2232 ± 158	2358 ± 117
PP	2126 ± 167	-

Výsledky meze pevnosti jsou vzájemně porovnány na obr. 4.10. Nejvyšší pevnosti svaru dosahovaly vzorky z PA 12, které měly pevnost svaru skoro 30 MPa, nicméně tato pevnost byla vůči hodnotám materiálovému listu na 45,5 %. PA 12 GB plněný skleněnými kuličkami měl přibližně o 40 % nižší hodnoty pevnosti oproti PA 12 bez skla. Příčinou byla vysoká koncentrace skleněných kuliček, které snižovaly přenos kmitu do místa svaru. Pevnost dosahovala pouze 30 % hodnoty z materiálového listu. U PP byla možnost snížení pevnosti v důsledku vnitřních vad, které byly odhaleny na snímcích z CT. Vzorek při tahové zkoušce praskal pouze v místech svarového spoje, to tedy znamenalo, že vnitřní vady nezpůsobily

porušení mimo svar. Pevnost v tahu vůči materiálovému listu byla vypočtena na 51 %. Takto vysoká hodnota nebyla předpokládána, jelikož PP jako takový měl nejvyšší schopnost útlumu vibrací.



Obr. 4.10 Výsledky meze pevnosti v grafické podobě

Vzhledem ke změně tvaru koncentrátoru a třecích charakteristik byl u chemicky vyhlazených vzorků očekávaný pokles pevnosti vůči neupraveným vzorkům. Tato úvaha byla potvrzena u PA 12, kde byla pevnost u dílů chemicky vyhlazených nižší o 15 % než u dílů bez povrchové úpravy. U dílu PA 12 GB byl evidován jiný výsledek, jelikož mez pevnosti u originálu a s úpravou povrchu dosahovala v rámci rozptylu směrodatných odchylek obdobných hodnot. Pravděpodobně to bylo kvůli vysokému obsahu skleněných kuliček, díky kterým nedošlo ke změně tření po naleptání povrchu. Deklarovaná změna tvaru koncentrátoru po chemickém vyhlazení tedy významně neovlivnila svařovací proces.

Po porovnání s technologií vstřikováním v práci pana Burdy [35], kde byly ultrazvukově svařovány stejné díly, které byly svařeny také za optimálních podmínek, byly zjištěny výsledky u PLA, který dosahoval 60,4 % pevnosti materiálu. ABS dosahuje 49,4 % a ASA pouze 34,8 % pevnosti materiálu. Oproti tomu u technologie FDM byl pokles výrazně vyšší, u ABS jen 13 %, u PLA dosahovala pevnost 8 % materiálu. Nejnižší hodnoty pevnosti měla ASA, tedy 2,9 % pevnosti základního materiálu.

5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo posoudit svařitelnost dílů vyrobených aditivní technologií HP MJF v závislosti na použitých materiálech. Svařitelnost byla posuzována vzhledem procesu ultrazvukového svařování.

Na experiment byly vybrány tři materiály HP PA 12, HP PA 12 GB a HP PP, které jsou nejběžněji používané pro technologii MJF. Tyto vybrané materiály jsou produktem firmy HP. K těmto třem materiálům byla přidána i nejvíce rozšířená dokončovací operace po tisku, a to chemické vyhlazení povrchu. Tato úprava byla provedena pouze na PA 12 a PA 12 GB. Na PP nebylo možné provést chemické vyhlazení, protože PP má vysokou odolnost proti chemikáliím.

Po nastavení úhlu tisku 0° vznikly propadliny na základnách, ale zároveň byl kvalitní koncentrátor. Otázkou bylo, zda propadliny ovlivní proces ultrazvukového svařování. Z tohoto důvodu byl rovněž analyzován tisk dílů pod úhlem 45° , kde se propadliny na základní ploše svařovaných dílů nevyskytovaly. Tyto díly se však vyznačovaly nižší kvalitou koncentrátoru (tisknutým v nestejných vrstvách) a nepatrně horší rozměrovou kvalitou (kolmost, tvar koncentrátoru). Pro zjištění míry vlivu propadlin na svařitelnost byla provedena prvotní analýza, při které bylo zjištěno, že propadliny u varianty s úhlem 0° měly významný vliv na výslednou pevnost. Výše uvedená nižší kvalita koncentrátoru a geometrická nepřesnost tisku měla menší vliv na pevnost svaru než propadliny. Rozdíl v pevnosti svaru u PA 12 mezi oběma nastavenými úhly tisku byl 10 MPa. Z těchto důvodů byl vybrán úhel tisku 45° jako vhodný pro tento experiment.

Kontrola kvality tisku dílů vyrobených pod úhlem 45° obsahovala kontrolu vnitřních vad, kde byla nalezena pórovitost pouze u materiálu PP. To bylo zapříčiněno tisknutím dílů v horním prostoru tiskárny a nízké absorpci tepla. Kolmost mezi válcovou plochou a základnou dosahovala u všech měřených dílů stejných hodnot. Měření výšky koncentrátoru bylo složité, jelikož hrany základny byly zaoblené. Chemicky vyhlazené díly měly ještě více zaoblené hrany. Kvůli zaobleným hranám nešla přesně stanovit výška koncentrátoru, která byla pro experiment důležitá kvůli nastavení procesu.

Pevnost realizovaných svarů PA 12 dosahovala 45 % hodnoty uvedené v materiálovém listu. Pevnost svarového spoje z PA 12 GB byla o 40 % nižší než u vzorků z PA 12. Dle předpokladu 40 % skelných kuliček snížilo přenos kmitů do místa svaru. Při porovnání PA 12 GB se základním materiálem byla dosažena pevnost pouze 30 %. U PP byla očekávána nižší pevnost, jelikož je to materiál s vyšším stupněm útlumu. Nicméně svary u tohoto materiálu dosáhly největší úrovně pevnosti vzhledem k základnímu materiálu, kdy hodnota přesáhla 51 %. U PP jako jediného byly nalezeny vnitřní vady, které neovlivnily pevnost svaru.

Vliv chemického vyhlazení na vzájemné tření povrchu byl prokázán u PA 12, kde byl evidován pokles pevnosti svaru přibližně o 10 % oproti dílům bez úpravy povrchu. U PA 12 GB s 40 % skleněných kuliček tento jev nebyl pozorován. Vysoký podíl skleněných kuliček zřejmě zapříčinil, že i po chemickém vyhlazení nebylo významně ovlivněno vzájemné tření ploch.

Závěrem lze říci, že nastavení úhlu tisku u technologie MJF ovlivňuje kvalitu vytisknutých dílů (tvar koncentrátoru) a také svařitelnost. Standardně ultrazvukově svařované díly, které mají pevnost svaru kolem 60 % základního materiálu jsou považovány za kvalitní. U testovaných variant materiálů vychází pevnost svaru nejlépe u PP. U PA 12 byl pokles nepatrně nižší a daleko nejvyšší pokles byl u PA 12 GB plněný sklem. Nicméně i tyto poklesy pevnosti svaru oproti hodnotám základního materiálu byly nižší vůči poklesům evidovaných v práci pana Burdy, kde byla použita technologie FDM. Vstříkované díly z jeho práce dosahovaly podobných hodnot pevnosti svaru jako zde testovaný PP a PA 12. Bohužel ale není možné adekvátně porovnat pevnosti, jelikož jeho vstříkované díly byly z amorfních polymerů a zde tisknuté díly jsou semikrystalické. Pro více relativní porovnání technologie vstříkování a MJF by se musel provést experiment, u kterého budou použity stejné materiály.

Z této diplomové práce vyplývá, že díly vyrobené aditivní technologií MJF z materiálů HP PA 12 a HP PP po ultrazvukovém svařování dosahují dobré pevnosti svaru, a proto mohou být použity pro specifické aplikace. Materiál HP PA 12 GB není vhodný pro ultrazvukové svařování.

Použitá literatura

- [1] GIBSON, Ian, David ROSEN, Brent STUCKER a Mahyar KHORASANI. *Additive Manufacturing Technologies* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2021 [vid. 2024-04-16]. ISBN 978-3-030-56126-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-56127-7
- [2] SALEH ALGHAMDI, Saad, Sabu JOHN, Namita ROY CHOUDHURY a Naba K. DUTTA. Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges. *Polymers* [online]. 2021, **13**(5), 753 [vid. 2024-04-16]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13050753
- [3] JANDYAL, Anketa, Ikshita CHATURVEDI, Ishika WAZIR, Ankush RAINA a Mir Irfan UL HAQ. 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers* [online]. 2022, **3**, 33–42 [vid. 2024-04-16]. ISSN 2666-4127. Dostupné z: doi:10.1016/j.susoc.2021.09.004
- [4] ZUKAS, Victoria a Jonas A. ZUKAS. *An Introduction to 3D Printing*. B.m.: First Edition Design Pub., 2015. ISBN 978-1-62287-897-0.
- [5] MEHRPOUYA, Mehrshad, Daniel TUMA, Tom VANEKER, Mohamadreza AFRASIABI, Markus BAMBACH a Ian GIBSON. Multimaterial powder bed fusion techniques. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2022, **28**(11), 1–19 [vid. 2024-04-18]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-01-2022-0014
- [6] LEGUTKO, Stanislaw. Additive techniques of manufacturing functional products from metal materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, **393**, 012003. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/393/1/012003
- [7] MORLING, Rachael. What is Multi Jet Fusion? *Design Solutions* [online]. 14. červenec 2022 [vid. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://designsolutionsmag.co.uk/what-is-multi-jet-fusion/>
- [8] *HP 3D Jet Fusion 4200 - Commercial & Industrial 3D Printer | HP® Official Site* [online]. [vid. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/products/multi-jet-fusion-4200.html>
- [9] *Průmyslová 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200 | 3Dees* [online]. [vid. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/hp-jetfusion-3d>
- [10] *HP-Jet-Fusion-3D-4200-4210-Printing-Solutions-Brochure_May-2021.pdf* [online]. [vid. 2024-04-24]. Dostupné

- z: https://www.3dees.cz/images/printers/hp/jet-fusion-4200/HP-Jet-Fusion-3D-4200-4210-Printing-Solutions-Brochure_May-2021.pdf
- [11] [HTTPS://VISUALIO.CZ](https://VISUALIO.CZ), Visualio; *MJF (Multi Jet Fusion)* [online]. [vid. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
- [12] *Materials-Guide-2021.pdf* [online]. [vid. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.shapeways.com/wp-content/uploads/2021/11/Materials-Guide-2021.pdf>
- [13] Polypropylene (PP)- 3D Printing Material. *Shapeways* [online]. [vid. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.shapeways.com/materials/polypropylene-mjf>
- [14] *Abrazivní tryskání | Očištění dílů od prášku | ONE3D* [online]. [vid. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/post-processing/abrazivni-tryskani/>
- [15] *Postprocessing - kompletní řešení pro výrobu 3D tiskem | 3Dees* [online]. [vid. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/postprocessing>
- [16] *Vibrační omílání | Vhodné pro všechny typy materiálů | ONE3D* [online]. [vid. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/post-processing/vibracni-omilani/>
- [17] *Automatická vaporizace dílů - DyeMansion Powerfuse S | 3Dees* [online]. [vid. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/technologie-pro-upravu-povrchu/dyemansion-powerfuse-s>
- [18] *Barvení máčením | Obarvíte i sebemenší skulinky | ONE3D* [online]. [vid. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/post-processing/barveni-macenim/>
- [19] *Technologie zpracování plastů* [online]. [vid. 2024-04-16]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Cover.html>
- [20] BĚHÁLEK, Luboš, Pavel BRDLÍK, Martin BORŮVKA a Irena LENFELDOVÁ. *Úvod do technologií zpracování plastů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. ISBN 978-80-7494-460-4.
- [21] *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. [vid. 2024-04-16]. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm

- [22] BHUDOLIA, Somen K., Goram GOHEL, Kah Fai LEONG a Aminul ISLAM. Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review. *Materials* [online]. 2020, **13**(6), 1284 [vid. 2024-01-16]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13061284
- [23] How Ultrasonic Welding Works. *HowStuffWorks* [online]. 1. leden 1970 [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/ultrasonic-welding.htm>
- [24] *Guide To US Plastic Assembly.pdf* [online]. [vid. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://documents.dukane.com/DesignGuides/Guide%20To%20US%20Plastic%20Assembly.pdf>
- [25] Ultrasonic Welding Booster 1:2 Enlarging Amplitude. *Knmtech Ultrasonics* [online]. [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.knmsonic.com/ultrasonic-welding-booster-km-b20-12/>
- [26] *What Is Ultrasonic Welding? Joining/Reforming Thermoplastics* [online]. [vid. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.dukane.com/resources/our-processes/ultrasonic-plastic-welding>
- [27] *Elektromagnetické vlny - ppt stáhnout* [online]. [vid. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2907891/>
- [28] KOPÁČ, Dalibor. *Monitorizace svařovacích parametrů při ultrazvukovém svařování polyamidu* [online]. B.m., 2012 [vid. 2024-04-07]. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/12972>
- [29] GROUP, SAE Media. *Medical Plastics: Understanding Ultrasonic Welding, Part 1* [online]. 1. květen 2022 [vid. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/45815-medical-plastics-understanding-ultrasonic-welding-part-1>
- [30] GREWELL, David A. Amplitude and Force Profiling: Studies in Ultrasonic Welding of Thermoplastics. nedatováno.
- [31] TROUGHTON, Michael J. *Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide*. B.m.: William Andrew, 2008. ISBN 978-0-8155-1976-8.
- [32] GOSAR, Aleš, Igor EMRI, Jernej KLEMENC, Marko NAGODE a Simon OMAN. On the Vibration-Damping Properties of the Prestressed Polyurethane Granular Material. *Polymers* [online]. 2023,

- 15(5), 1299 [vid. 2024-05-02]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym15051299
- [33] *Guide To US Plastic Assembly.pdf* [online]. [vid. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://documents.dukane.com/DesignGuides/Guide%20To%20US%20Plastic%20Assembly.pdf>
- [34] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2016. vyd. nedatováno [vid. 2023-04-02]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [35] BURDA, Václav. *Svařitelnost dílů vyrobených technologií FDM pomocí ultrazvukového svařování* [online]. B.m., 2023. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/173968>
- [36] Zeiss Metrotom 1500. *MCAE* [online]. [vid. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/zeiss-metrotom-1500/>
- [37] MAXA, Ondřej. *Svařitelnost PLA bio-kompozitů technologií ultrazvukového svařování* [online]. Liberec, 2022 [vid. 2024-04-28]. Diplomová Práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/166702>
- [38] LACHMANN, Petr. *Vliv typu a koncentrace přísad na proces ultrazvukového svařování PLAbio-kompozitů* [online]. B.m., 2022 [vid. 2024-05-05]. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/166624>
- [39] KAFI, Abdullah, Mahyar KHORASANI, David DOWNING, Kaifur RASHED, Martin LEARY, Danielle ZHANG a Stuart BATEMAN. Prediction of absorptivity in Multi-Jet Fusion manufactured polypropylene structures through laser flash and corrected porosity method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2024, **130**(7), 4041–4052 [vid. 2024-05-13]. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-023-12705-2
- [40] The Ultimate HP Jet Fusion (MJF) Design Guidelines. *RapidMade* [online]. [vid. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://rapidmade.com/3d-printing/the-ultimate-hp-jet-fusion-mjf-design-guidelines/>
- [41] Multi Jet Fusion (MJF) - 3D Printing. *Engineering Product Design* [online]. [vid. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/multi-jet-fusion/>

Seznam příloh

Příloha 1 – Materiálový list HP 3D High Reusability PA 12

Příloha 2 – Materiálový list HP 3D High Reusability PA 12 Glass Beads

Příloha 3 – Materiálový list HP 3D High Reusability PP

Příloha 4 – Grafický průběh svařování pro optimální nastavení PA 12

Příloha 5 – Grafický průběh svařování pro optimální nastavení PA 12 GB

Příloha 6 – Grafický průběh svařování pro optimální nastavení PP

Příloha 1 – Materiálový list HP 3D High Reusability PA 12

Kategorie	Měřený parametr	Hodnota	Metoda
Všeobecné vlastnosti	Teplota tání práškového materiálu (měřeno pomocí DSC)	187 °C	ASTM D3418
	Velikost částic	60 µm	ASTM D3451
	Objemová hmotnost práškového materiálu	0,425 g/cm ³	ASTM D1895
	Hustota	1,01 g/cm ³	ASTM D792
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu, maximální zatížení ⁹ , XY	48 MPa	ASTM D638
	Pevnost v tahu, maximální zatížení ⁹ , Z	48 MPa	ASTM D638
	Modul pružnosti v tahu ⁹ , XY	1700 MPa	ASTM D638
	Modul pružnosti v tahu ⁹ , Z	1800 MPa	ASTM D638
	Prodloužení při přetržení ⁹ , XY	20 %	ASTM D638
	Prodloužení při přetržení ⁹ , Z	15 %	ASTM D638
	Pevnost v ohybu (při 5 %) ¹ , XY	65 MPa	ASTM D790
	Pevnost v ohybu (při 5 %) ¹ , Z	70 MPa	ASTM D790
	Modul pružnosti v ohybu ¹⁰ , XY	1730 MPa	ASTM D790
	Modul pružnosti v ohybu ¹⁰ , Z	1730 MPa	ASTM D790
	Vrubová houževnatost (zkouška metodou Izod, 3,2 mm, 23 °C), XYZ	3,5 kJ/m ²	ASTM D256 Testovací metoda A
	Teplotní vlastnosti	Teplotní deformace (při tlaku 0,45 MPa), XY	175 °C
Teplotní deformace (při tlaku 0,45 MPa), Z		175 °C	ASTM D648 Testovací metoda A
Teplotní deformace (při tlaku 1,82 MPa), XY		95 °C	ASTM D648 Testovací metoda A
Teplotní deformace (při tlaku 1,82 MPa), Z		106 °C	ASTM D648 Testovací metoda A
Opětovná využitelnost	Podíl nového materiálu pro zajištění stabilní kvality tisku	20 %	
Certifikáty	USP třídy I–VI, splňuje požadavky americké FDA na zdravotnické prostředky určené ke styku s neporušenou kůží, požadavky směrnice RoHS ¹¹ , požadavky REACH, PAHs		

Příloha 2 – Materiálový list HP 3D High Reusability PA 12 Glass Beads

Kategorie	Měřený parametr	Hodnota	Metoda
Všeobecné vlastnosti	Teplota tání práškového materiálu (měřeno pomocí DSC)	186 ° C	ASTM D3418
	Velikost částic	58 µm	ASTM D3451
	Objemová hmotnost práškového materiálu	0,48 g/cm ³	ASTM D1895
	Hustota	1,30 g/cm ³	ASTM D792
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu, maximální zatížení ⁷ , XY	30 MPa	ASTM D638
	Pevnost v tahu, maximální zatížení ⁷ , Z	30 MPa	ASTM D638
	Modul pružnosti v tahu ⁷ , XY	2800 MPa	ASTM D638
	Modul pružnosti v tahu ⁷ , Z	2900 MPa	ASTM D638
	Prodloužení při pietržení ⁷ , XY	6,5 %	ASTM D638
	Prodloužení při pietržení ⁷ , Z	6,5 %	ASTM D638
	Vrubová houževnatost (zkouška metodou Izod, 3,2 mm, 23 °C), XYZ	2,7 kJ/m ²	ASTM D256 Testovací metoda A
Teplotní vlastnosti	Teplotní deformace (při 0,45 MPa), Z	173 ° C	ASTM D648 Testovací metoda A
	Teplotní deformace (při 1,82 MPa), Z	121 ° C	ASTM D648 Testovací metoda A
Opětovná využitelnost	Podíl nového materiálu pro zajištění stabilní kvality tisku	30 %	

Příloha 3 – Materiálový list HP 3D High Reusability PP

	Average (XY)	Average Z	Test Method
Tensile strength (MPa) ^{iv v}	30	30	ASTM D638
Tensile modulus (MPa) ^{iv v}	1600	1600	ASTM D638
Heat deflection temperature [@ 0.45 MPa, 66 psi] (°C) ^{vii}	100	100	ASTM D648
Heat deflection temperature [@ 1.82 MPa, 264 psi] (°C) ^{vii}	60	60	ASTM D648
Elongation at yield (%) ^v	10	10	ASTM D638
Elongation at break (%) ^v	20	18	ASTM D638
Impact strength (kJ/m ²) ^{vi}	3.5	3.0	ASTM D256
Density (g/cm ³)	0.89		ASTM D792

i. Based on internal testing and measured using the HP Half_Commercial_Datasheet_Job. Results may vary with other jobs and geometries.

ii. Using HP 3D HR PP enabled by BASF material, 20% refresh ratio, Balanced print profile, natural cooling, and measured after bead-blasting with glass beads (70–110 μm) at 5-6 bars.

iii. Following all HP-recommended printer setup and adjustment processes and printheads aligned using semi-automatic procedure.

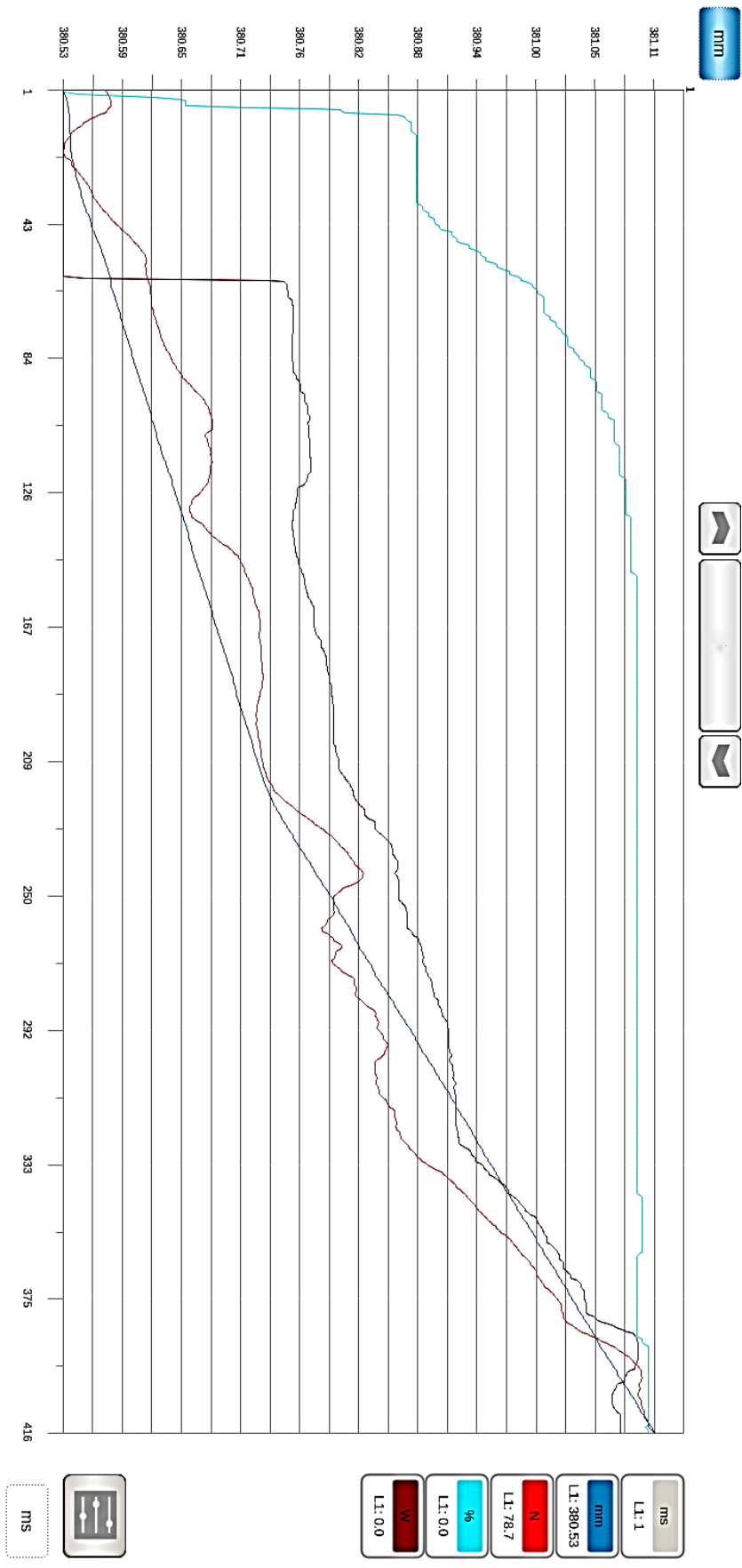
iv. Tensile strength typical variation (95% of parts) falls within the 28-32 MPa range, while tensile modulus values remain within the 1360 to 1840 MPa range.

v. Tensile test type I specimens measured with a pulling speed of 5 mm/min to comply with ASTM D638 test standards.

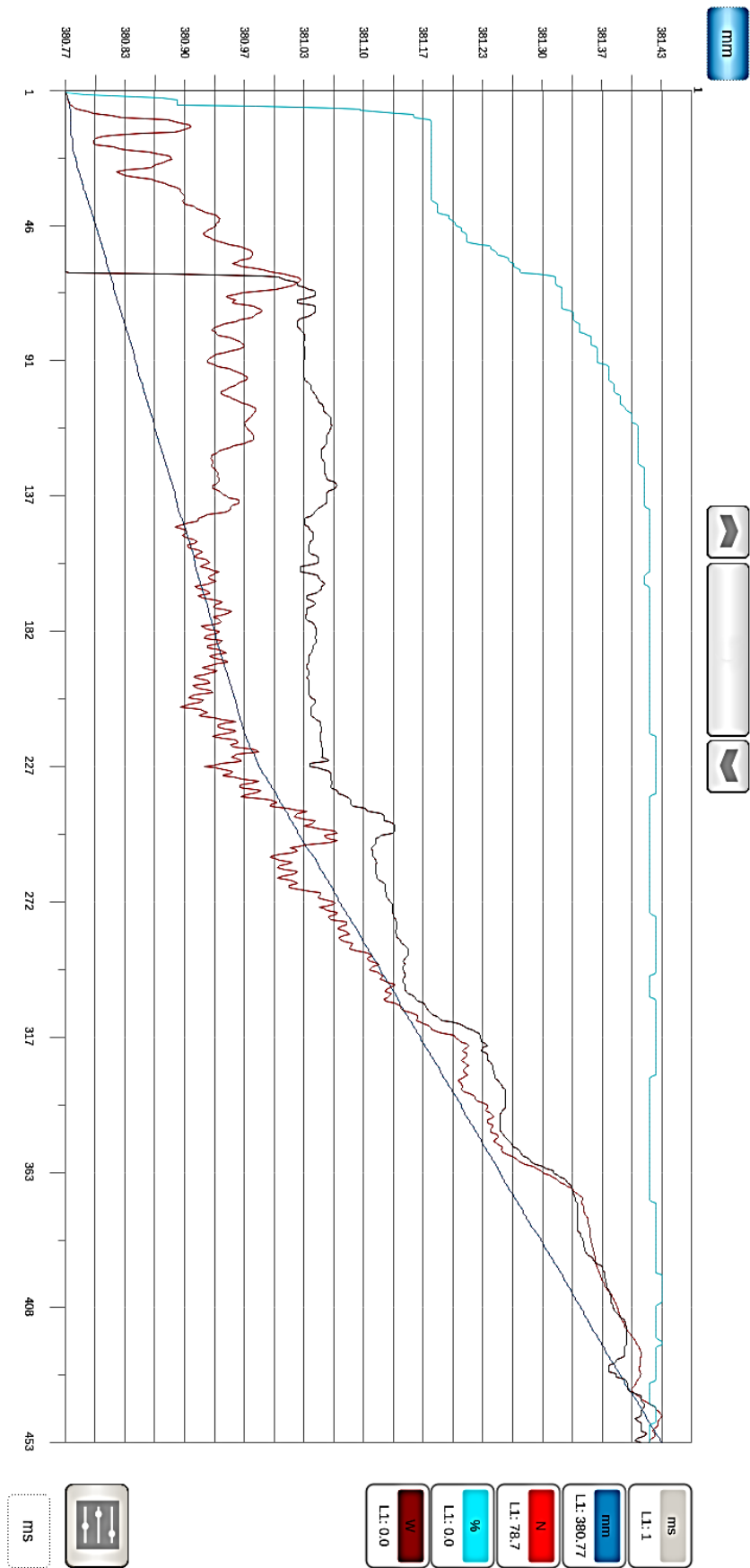
vi. Using the Izod test method A with notched @ 3.2 mm specimen according to the ASTM D256 standard.

vii. Using a standard bar specimen measuring 5" x 1/2" x 1/4" in accordance with ASTM D648.

Příloha 4 – Grafický průběh svařování pro optimální nastavení PA 12



Příloha 5 – Grafický průběh svařování pro optimální nastavení PA 12 GB



Příloha 6 – Grafický průběh svařování pro optimální nastavení PP

