



## **Bakalářská práce**

# **Svařitelnost dílů vyrobených technologií FDM pomocí ultrazvukového svařování**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Václav Burda**

*Vedoucí práce:*

Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



## **Zadání bakalářské práce**

# **Svařitelnost dílů vyrobených technologií FDM pomocí ultrazvukového svařování**

*Jméno a příjmení:*

**Václav Burda**

*Osobní číslo:*

S19000015

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Zadávací katedra:*

Katedra strojírenské technologie

*Akademický rok:*

2022/2023

### **Zásady pro vypracování:**

1. Rozbor problematiky technologií 3D tisku.
2. Rešerše oblasti ultrazvukového svařování
3. Návrh a realizace experimentálního měření (výroba těles, svařování)
4. Hodnocení svařitelnosti dílů vyrobených technologií FDM pomocí ultrazvukového svařování.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy  
Rozsah pracovní zprávy: cca 30 stran  
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická  
Jazyk práce: Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] BARNATT, Ch. *3D printing: the next industrial revolution*. [USA]: ExplainingTheFuture.com, 2013. ISBN 978-1-484-181768.
- [2] WINNAN, Ch. D. *3D printing: The next technology gold rush ; future factories and how to capitalize on distributed manufacturing*. [USA]: [CreateSpace Independent], 2012. ISBN 978-1494213961.
- [3] DIEGEL, Olaf; 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.
- [4] AWARI, G. K.; THORAT, C. S. (ed). *Additive Manufacturing and 3D Printing Technology: Principles and Applications*. B.m.: CRC Press, 2021. ISBN 1-00-033868-1.
- [5] TROUGHTON, Michael J. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. William Andrew, 2008.
- [6] WISE, Roger J. *Thermal welding of polymers*. Woodhead Publishing, 1999.
- [7] GÜRTLER, Juraj. *Vliv technologických parametrů ultrazvukového svařování na pevnost svarového spoje: Influence of technological parameters of ultrasonic welding on strength of weld joint*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. Diplomové práce.

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

Datum zadání práce: 30. listopadu 2022  
Předpokládaný termín odevzdání: 30. května 2024

L.S.

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

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 30. listopadu 2022

## Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

## **Anotace**

Bakalářská práce se zaměřuje na porovnání svařitelnosti dílů vyrobených technologiemi vstřikování a aditivní technologií Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication pomocí ultrazvukového svařování. Teoretická část práce se věnuje aditivním technologiím výroby plastů a ultrazvukovému svařování. Praktická část zkoumá ultrazvukové svařování a porovnává optické a mechanické vlastnosti svaru v závislosti na technologii výroby. Pro experimenty byly použity tři materiály: ASA, ABS a PLA.

**Klíčová slova:** ultrazvukové svařování, aditivní technologie, svařitelnost, ASA, ABS, PLA, Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication

## **Annotation**

The bachelor thesis focuses on comparing the weldability of parts manufactured using injection molding and the additive technology Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication through ultrasonic welding. The theoretical part of the thesis explores additive manufacturing technologies for plastics and ultrasonic welding. The practical part examines ultrasonic welding and compares the optical and mechanical properties of the welds depending on the manufacturing technology. Three materials, namely ASA, ABS, and PLA, were used for the experiments.

**Keywords:** ultrasonic welding, additive technology, weldability, ASA, ABS, PLA, Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication

## **Poděkování**

Tímto bych rád vyjádřil svou upřímnou vděčnost Ing. Pavlu Brdlíkovi Ph.D, za jeho neuvěřitelnou ochotu, trpělivost a cenné odborné rady, které mi poskytl během vypracovávání této bakalářské práce. Jeho vedení mi pomohlo získat hlubší porozumění danému tématu a rozvinout své dovednosti. Rovněž bych rád poděkoval zástupcům firmy MS Ultrasonic Technology Group za jejich přínos, praktické zkušenosti a rady, které mi poskytli. Velké díky patří také mé rodině a přátelům, kteří mi byli vždy oporou a povzbuzovali mě v průběhu celého studia.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	8
1. Úvod.....	9
2. Teoretická část.....	10
2.1. Rozdělení aditivních technologií.....	10
2.1.1. Technologie Laminated Object Manufacturing .....	10
2.1.2. Technologie Stereolithografie.....	10
2.1.3. Technologie Polyjet .....	11
2.1.4. Technologie Multijet Modeling.....	11
2.1.5. Technologie Selective Laser Sintering.....	11
2.1.6. Technologie Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication .....	12
2.2. Ultrazvukové svařování .....	23
2.2.1. Princip ultrazvukového svařování .....	25
2.2.2. Parametry ultrazvukového svařování .....	26
2.2.3. Geometrie svařovaných dílů .....	27
2.2.4. Materiály vhodné pro ultrazvukové svařování.....	29
3. Experimentální část .....	30
3.1. Volba zkušebního tělesa .....	30
3.2. Volba materiálu .....	31
3.3. Příprava vzorků.....	33
3.4. Skenování dílů pomocí počítačové tomografie (CT).....	34
3.5. Ultrazvukové svařování .....	36
3.6. Kontrola kvality.....	40
4. Vyhodnocení a diskuze výsledků .....	45
4.1. Vyhodnocení vnitřních vad.....	45
4.2. Vyhodnocení odchylek od kolmosti.....	51
4.3. Vyhodnocení mikroskopie.....	52
4.4. Vyhodnocení mechanických vlastností .....	54
5. Závěr .....	56
Použitá literatura .....	57

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka Symbol	Význam	Jednotka
ABS	Akrylonitril-butadien styren	
ASA	Acrylic Styrene Acrylonitrile	
AT	Aditivní technologie	
CT	Počítačová tomografie	
DLF	Direct Laser Forming	
$E_t$	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
FDM	Fused Deposition Modeling	
FFF	Fused Filament Fabrication	
$F_{max}$	Síla porušení	[N]
LOM	Laminated Object Manufacturing	
MJM	Multijet Modeling	
MJS	Multiphase Jet Solidification	
MKP	Metoda konečných prvků	
PA	Polyamid	
PC	Polykarbonát	
PE	Polyethylen	
PE-HD	Vysokohustotní polyethylen	
PE-LD	Nízkohustotní polyethylen	
PET	Polyethylentereftalát	
PETG	Glykolem modifikovaný Polyethylentereftalát	
PLA	Polylactic acid - kyselina polymléčná	
PP	Polypropylen	
SLA	Stereolithografie	
SLS	Selective Laser Sintering	
UV	Ultra fialové	
3D	Trojrozměrné	
$\epsilon_{tb}$	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení	[%]
$\sigma$	Napětí	[MPa]
$\sigma_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]



# 1. Úvod

V současné době se aditivní technologie, známé také jako 3D tisk, stává stále více populární metodou výroby, která nabízí rychlé a přesné vytváření komplexních geometrií. Jednou z nejčastěji používaných aditivních technologií je Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication (FDM/FFF). Tato metoda umožňuje postupně vrstvené vytváření dílů pomocí tavení a následného vytlačování plastového filamentu.

Na druhé straně, ultrazvukové svařování se stále častěji využívá jako efektivní a ekonomicky výhodná metoda spojování plastových dílů. Tento proces umožňuje rychlé a pevné spojení dílů bez použití přídavných materiálů nebo lepidel. Ultrazvukové svařování nachází uplatnění v různých odvětvích průmyslu, jako je automobilový, textilní, obalový, potravinářský a lékařský průmysl.

Přestože se ultrazvukové svařování používá v mnoha různých oblastech průmyslu, porovnání vlastností svarů u dílů vyrobených různými technologiemi výroby je stále důležitým výzkumným tématem. V kontextu aditivních technologií je zvláště zajímavé porovnat vlastnosti svarů u dílů vyrobených technologií FDM/FFF s vlastnostmi svarů u dílů vyrobených tradičním vstřikováním plastů.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na porovnání vlastností svarů vytvořených ultrazvukovým svařováním u dílů vyrobených aditivní technologií FDM/FFF a dílů vyrobených vstřikováním. Práce analyzuje tři často používané materiály v aditivní výrobě: ASA, ABS a PLA. Cílem práce je hodnotit vliv těchto technologií výroby na kvalitu svaru a svařitelnost.

V praktické části práce budou provedeny experimenty zaměřené na ultrazvukové svařování v závislosti na technologii výroby. Bude svařováno s použitím dílů vyrobených aditivní technologií FDM/FFF a dílů vyrobených vstřikováním. Mechanická kontrola kvality bude použita k hodnocení svarových spojů. Výsledky těchto experimentů poskytnou užitečné informace o vlastnostech svarů v závislosti na použité technologii výroby.

Cílem této bakalářské práce je přispět k rozšíření poznatků o porovnání vlastností svarů vytvořených ultrazvukovým svařováním u dílů vyrobených aditivní technologií FDM/FFF a u dílů vyrobených vstřikováním. Výsledky práce mohou sloužit jako vodítko při výběru vhodné technologie výroby a materiálů při navrhování a výrobě plastových dílů, které budou podrobeny ultrazvukovému svařování.

## 2. Teoretická část

V teoretické části bakalářské práce jsou popsány aditivní technologie (AT) z hlediska aplikovatelnosti, s větším důrazem na technologie Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication (FDM/FFF). Další diskutovanou oblastí je problematika ultrazvukového svařování.

### 2.1. Rozdělení aditivních technologií

Existuje více způsobů dělení AT, například: podle způsobu spojování materiálu (UV zářením, laserem, teplem, lepením), podle použitého materiálu z hlediska druhu (polymerní, nebo kovové) a další. Pravděpodobně tím nejpoužívanějším způsobem je podle použitého materiálu z hlediska stavu (pevné, kapalné a na bázi prášků).

#### a) **Pevné**

Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication (FDM/FFF)  
Laminated Object Manufacturing (LOM)

#### b) **Kapalné**

Stereolithografie (SLA)  
Polyjet  
Multijet Modeling (MJM)

#### c) **Na bázi prášků**

Selective Laser Sintering (SLS)  
Multiphase Jet Solidification (MJS) (tisk kovů)  
ProMetal 3D Printing (tisk kovů)  
Direct Laser Forming (DLF) (tisk kovů)

#### 2.1.1. Technologie Laminated Object Manufacturing

Tato technologie pracuje na principu vrstvení fólií či papírů potažených lepidlem. Po každé nanesené vrstvě se k sobě vrstvy přitlačí vyhřívanými válečky, čímž dojde k jejich slepení. Po slepení je obrys každé vrstvy vyříznut do požadovaného tvaru CO<sub>2</sub> laserem. Vlastnosti výrobku jsou podobné dřevu. Mezi výhody patří možnost výroby velkorozměrných dílů, tisku bez podpor (podpory tvoří zbytkový materiál) a nízká pořizovací cena stroje. Nevýhodami jsou velké množství odpadu a nízká kvalita povrchu. Tato technologie se používá hlavně pro výrobu prototypů. [1–3]

#### 2.1.2. Technologie Stereolithografie

Technologie SLA je založena na využití UV světla k vytvrzení vrstvy polymerního materiálu. Princip spočívá v tom, že laser nebo jiný zdroj UV světla postupně vytvrzuje tenké vrstvy tekutého polymerního materiálu, který se nachází v nádobě. Po vyzáření UV světla polymerní materiál tuhne a tvrdne, čímž se vytváří pevná vrstva. Tento proces se opakuje postupně, dokud se nevytvoří požadovaný tvar. Poté se hotový výrobek odstraní z nádoby a vyčistí se od zbytků nevytvořeného

materiálu. Po tisku se dá ještě dále vytvrdit ve vytvrzovací komoře. Tento postup je velmi přesný a umožňuje vytvářet složité geometrické tvary s vysokou přesností a detailností. Tiskárna a materiály pro tisk bývají drahé, výtisky jsou citlivé na UV záření, je nutné důkladné čištění výtisků a odstranění podpor a asi největší nevýhodou jsou pro zdravý nebezpečné tiskové materiály. Technologie SLA se používá především k výrobě prototypů a dílů s vysokou přesností, jako jsou například modely pro lékařství nebo pro automobilový průmysl. [4–6]

### **2.1.3. Technologie Polyjet**

PolyJet je technologie 3D tisku vyvinutá společností Stratasys. Tato technologie funguje tak, že tenké vrstvy fotopolymerové pryskyřice jsou postupně nanášeny na tiskovou platformu prostřednictvím tiskových hlav. Fotopolymerová pryskyřice je následně vytvrzena UV zářením. Tento proces se opakuje vrstva po vrstvě, dokud není vytvořen celý 3D model. PolyJet umožňuje vysokou kvalitu tisku s jemnými detaily a je schopen kombinovat různé materiály a barvy. Nevýhodami jsou vysoká cena jak tiskáren, tak i materiálů pro tisk, horší mechanické vlastnosti v porovnání s jinými AT, nízká odolnost vůči UV záření a v některých případech nutnost tisku podpor. Tato technologie je vhodná pro výrobu prototypů, detailních modelů budov v architektuře, anatomických modelů pro chirurgickou přípravu a školení, nebo uměleckých modelů. [7–10]

### **2.1.4. Technologie Multijet Modeling**

MJM je aditivní technologie 3D tisku vyvinutá společností 3D Systems. Fungují na stejném principu jako Polyjet, jen místo fotopolymerové pryskyřice používá termoplastický materiál ve formě voskových nebo plastových tiskových hmot. Tiskové hlavy nanášejí materiál na tiskovou platformu ve formě kapek tvořících tenké vrstvy. Po vytvoření celého 3D modelu se odstraní podpory a model se může dále zpracovávat (brousit, vrtat, barvit, ...). MJM má vysoké rozlišení tisku, hladký povrch a umožňuje barevný tisk. Nevýhodami jsou vysoká cena jak tiskáren, tak i materiálů pro tisk a v některých případech nutnost tisku podpor. Stejně jako Polyjet je technologie MJM vhodná pro výrobu prototypů, detailních modelů budov v architektuře, anatomických modelů pro chirurgickou přípravu a školení, nebo uměleckých modelů. [7, 8, 11]

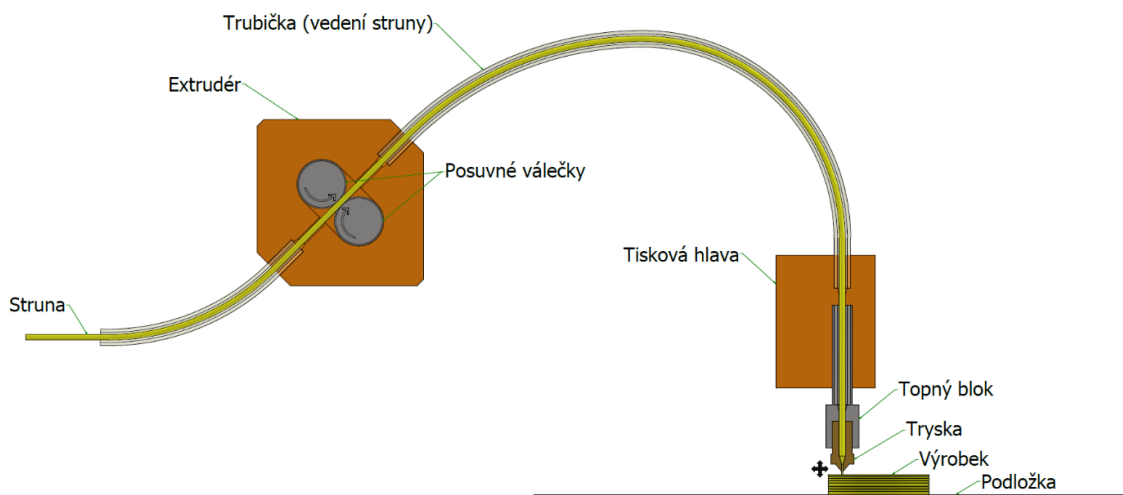
### **2.1.5. Technologie Selective Laser Sintering**

SLS pracuje na principu spékání polymerních, keramických, nebo kovových prášků pomocí laseru. Tisková deska je posypána práškem, který se laserem speče do požadovaného tvaru. Po spečení jedné vrstvy tisková deska klesne, je nanášena další vrstva prášku a proces se opakuje. Nespečený prášek slouží jako podpůrný materiál pro další vrstvy. Výhodami jsou tisk bez podpor, velké množství tisknutelných materiálů a dobré mechanické vlastnosti. Nevýhodami jsou nízká

kvalita a pórovitost povrchu, nutnost čištění po tisku a nízká přesnost. Je to ideální technologie pro prototypování, výrobu nástrojů či malosériovou výrobu. [12–14]

### 2.1.6. Technologie Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication

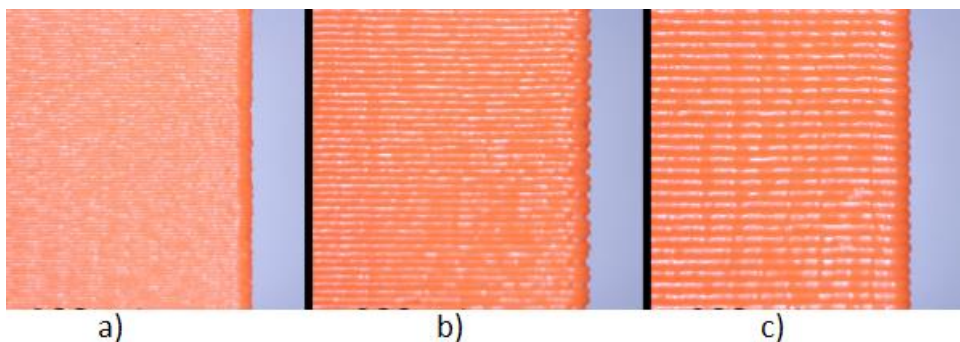
Jedná se pravděpodobně o nejrozšířenější metodu AT, pracující na principu, při kterém je materiál ve formě struny konstantně vytlačován pomocí dvou protichůdně otáčejících se válečků skrze extrudér a tavnou trysku na podložku. Vytlačený materiál se vrství vedle a na sebe. Pozice trysky se vůči výrobku mění, při vytváření jedné vrstvy se tryska vůči výrobku pohybuje v osách rovnoběžných s podložkou, po dokončení jedné vrstvy se tryska vůči výrobku posune směrem v ose kolmé na podložku o tloušťku jedné vrstvy, tento proces se opakuje, dokud se nezíská výrobek požadovaných rozměrů a tvaru (obr.1). [15]



**Obr. 1** Schéma jedné z možných konfigurací FDM/FFF 3D tiskárny

V roce 1989 byla firmou Stratasys patentována AT FDM. Součástí patentu bylo, že 3D tiskárna musí mít extruder, trysku, systém pro vedení filamentu a tiskovou komoru, ve které je udržována konstantní teplota a odehrává se v ní celý tisk. V roce 2004 vznikl projekt RepRap (Replicating Rapid Prototyper), který se snažil snížit cenu 3D tiskáren. Šlo o nápad vytvářet díly pro 3D tiskárny přímo na 3D tiskárnách. Nicméně cena tiskáren byla dále navyšována licenčním poplatkem za výše uvedený patent, který končil až v roce 2009. Proto v roce 2005 přišli s volně dostupnou AT FFF. Hlavní rozdíl mezi těmito technologiemi spočíval v absenci tiskové komory u AT FFF. Po skončení platnosti patentu FDM začali vznikat tiskové komory pro FFF tiskárny, čímž rozdíl mezi FDM a FFF prakticky vymizel. Od té doby je nutné dávat pozor při nákupu materiálů. Materiály pro FDM počítají s tiskovou komorou a v případě použití na FFF bez tiskové komory může dojít k odlepování vrstev, prohýbání a dalšímu poškození výtisku. [16]

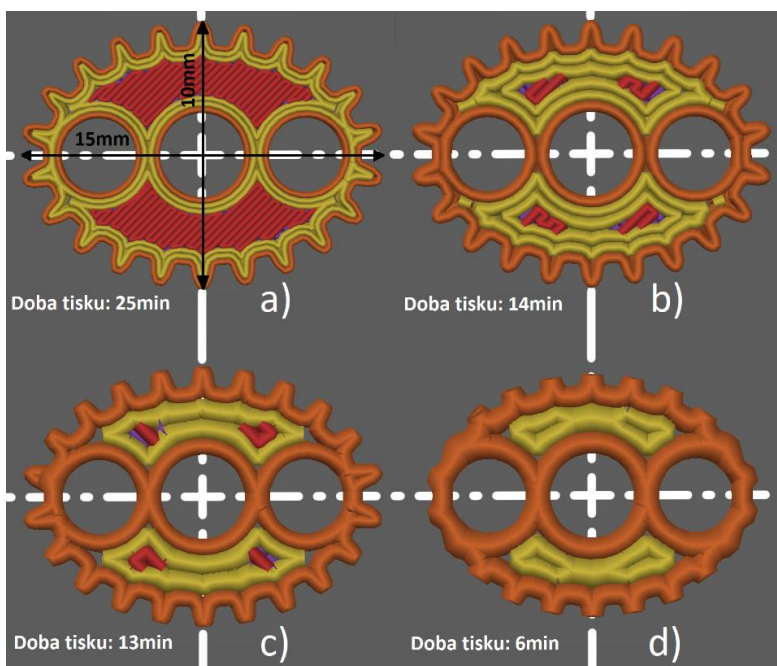
Rozlišením je myšlena přesnost tisku. Každá 3D tiskárna má dva typy rozlišení, a to v ose Z a osách XY. Rozlišení v ose Z je určeno výškou jedné tisknuté vrstvy. Čím menší tloušťka vrstvy je zvolena tím vyšší je rozlišení (obr.2), na druhou stranu se zvyšuje i doba tisku. Díly tisknuté s tloušťkou vrstvy 0,1mm se budou tisknout třikrát tak dlouho co díly s tloušťkou vrstvy 0,3mm. Je nutné tedy vědět, zda je vysoké rozlišení v ose Z nutné či nikoli. [17]



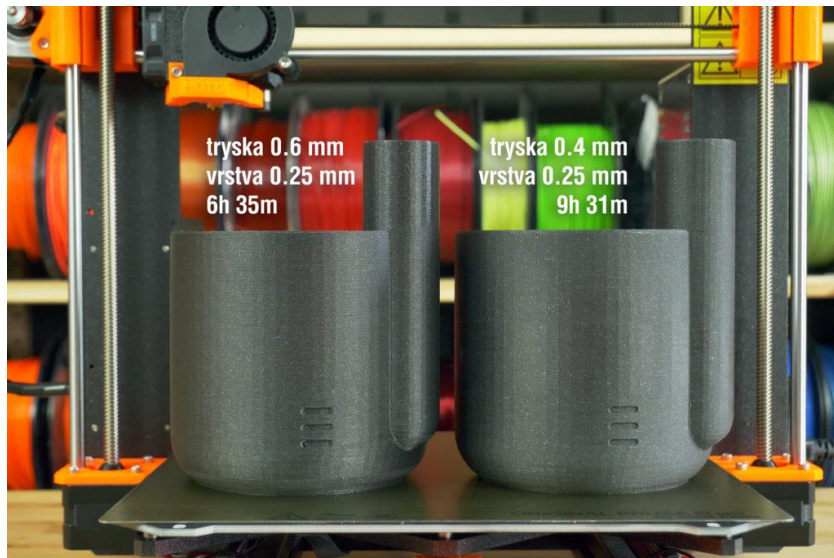
**Obr.2** Závislost rozlišení na tloušťce vrstvy:

a) tloušťka vrstvy 0,1mm b) tloušťka vrstvy 0,2mm c) tloušťka vrstvy 0,3mm [17]

Rozlišení v osách XY říká, jak přesný je tvar jedné vrstvy. Toto je ovlivněno velikostí trysky. FDM/FFF tiskárny nejčastěji používají trysky v průměrech 0,25 - 0,8mm, čím menší průměr trysky zvolíme tím detailnější výtisk můžeme získat. Na obrázku s ozubenou elipsou (obr.3) je patrné, že pro daný výrobek (nominální rozměr 15 mm) je největší použitelná tryska velikosti 0,4mm. Žádná větší již není dost detailní, aby byla schopná vytisknout funkční tvar zubů. Na druhou stranu při tisku méně detailních dílů či výrobků větších je možné a vhodné použití větších průměrů trysky, aby se co nejvíce zkrátila doba tisku, která je velmi často pro tuto technologii limitním faktorem (obr.4). [17, 18]



**Obr.3** Závislost rozlišení na velikosti trysky: a) tryska průměru 0,25mm b) tryska průměru 0,4mm c) tryska průměru 0,6mm d) tryska průměru 0,8mm

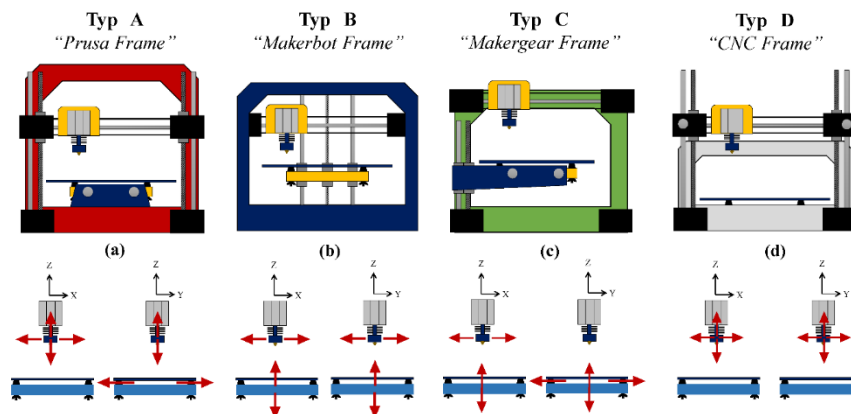


Obr.4 Závislost doby tisku na průměru trysky [18]

Základní dělení FDM/FFF tiskáren je podle toho, zda a jakým způsobem se pohybuje tryska a tisková podložka.

### Kartézské tiskárny

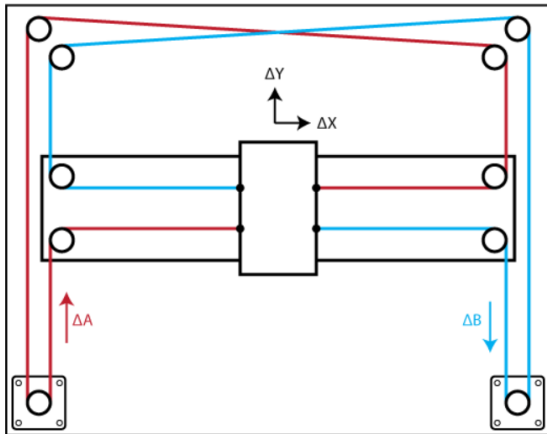
Pravděpodobně nejrozšířenější konfigurace 3D tiskáren. Jak z názvu vyplývá pracují s kartézským souřadným systémem, kde je pozice trysky vůči podložce určována na sobě nezávislými pohyby v osách X, Y a Z. Jsou relativně levné, jednoduché na pochopení, dají se snadno opravit či upravit, což je důvodem jejich širokého rozšíření (mají velkou podporu komunity). Nevýhodou těchto typů tiskáren je velikost vůči velikosti tiskové podložky a váha os, která při rychlém tisku snižuje kvalitu. Kartézské tiskárny se dají dále dělit podle množství os ve kterých se pohybuje tryska a tisková podložka. Hlavními rozdíly mezi nimi jsou stabilita a velikost tiskárny vůči velikosti tiskové podložky. V případech Makerbot a CNC rámců, kde se pohybuje tryska v osách X a Y její stabilita mírně nižší v porovnání s Prusa a Makergear rámcům, ale tisková podložka je téměř stejně velká, jako je velikost celé tiskárny (obr.5). [19, 20]



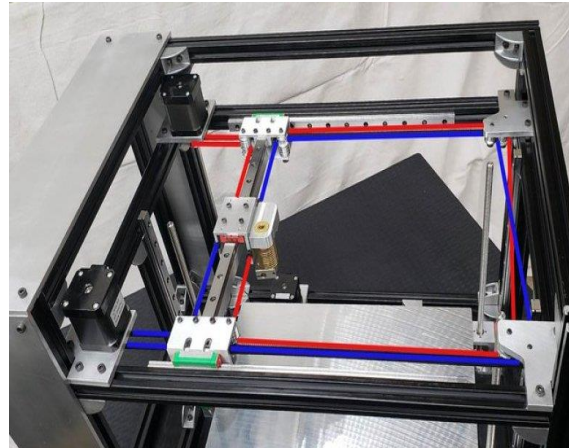
Obr. 5 Nejběžnější tříosé hardwarové konfigurace s ukázanými stupni volnosti [21]

## Tiskárny CoreXY

Stejně jako u kartézských tiskáren se tryska a tisková podložka pohybují v osách X, Y a Z. Na rozdíl od kartézských tiskáren je pohyb v osách X a Y na sobě závislý, toto je docíleno systémem řemenů (obr.6,7). Dalším rozdílem je, že pohyby v osách X a Y vždy vykonává tryska a v ose Z tisková podložka. Kvůli menší hmotnosti os X a Y je možné tisknout rychleji než při tisku na kartézských tiskárnách a dosáhnout stejné kvality tisku. Dále tyto tiskárny umožňují velké pracovní plochy vůči celkové velikosti tiskárny. Nevýhodami jsou délky řemenů, náročnost oprav, nutnost stability a kolmosti rámu. V případě nepřesností se snižuje kvalita tisku. [19, 20, 22]



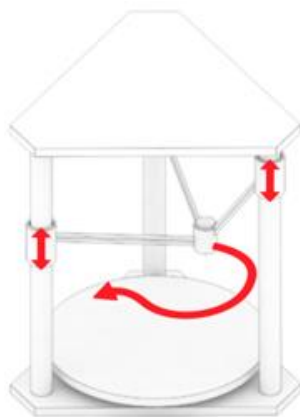
Obr.6 Schéma CoreXY tiskárny [20]



Obr.7 CoreXY tiskárna [22]

## Delta tiskárny

Pracují s pevnou tiskovou podložkou a se třemi nebo více rameny posuvně připevněnými ke svislým kolejím (obr.8,9). Tisková hlava je připojena ke konci každého ramene pomocí kloubů. Pozice jednotlivých ramen určuje polohu trysky. Nízká váha tiskové hlavy povoluje rychlý tisk s dobrou kvalitou. Tyto tiskárny jsou vhodné pro tisk vysokých výtisků. Nicméně tisková plocha je malá a složitosti konstrukčního řešení tiskárny se promítá v obtížnějším servisu. [19, 20]



Obr.8 Schéma Delat tiskárny [20]



Obr.9 Delta tiskárna [20]

## Pásové tiskárny

V případě těchto tiskáren je tisková podložka nahrazena pásem (obr.10) a tryska vůči němu není kolmá, nýbrž je pootočená o 45°. Tím vzniká situace, kde je pozice v ose Y definována, jak pohybem pásu, tak pohybem trysky. Na těchto tiskárnách se dá teoreticky tisknout nekonečně dlouhý díl (obr.10). Nevýhodami tohoto typu tiskárny jsou relativně nízká rychlost tisku a nutnost dalších podpor při tištění delších dílů. Tato problematika je obzvláště významná pro díly velkých hmotností, kde jakmile výtisk opustí prostor pásu, může dojít k jeho deformaci. [19]



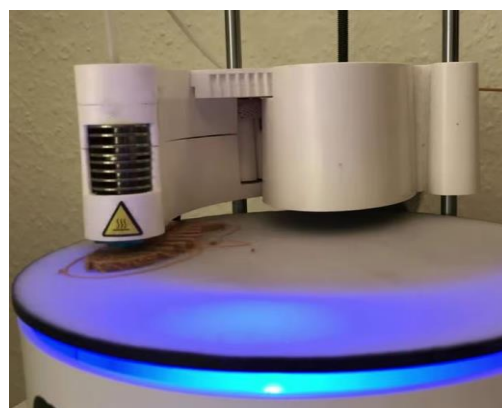
Obr.10 Pásová tiskárna [23]

## Tiskárna Polar

Tyto tiskárny využívají polárního systému souřadnic. Při tisku se tisková podložka otáčí a může se i posouvat (obr.11), nebo je tryska upevněna na otočném rameni (obr.12). Jejich výhodou je velikost tiskové plochy vůči velikosti tiskárny a verze s posuvným ramenem je díky menšímu množství pohonných jednotek energeticky méně náročná než například kartézské tiskárny. Jedná se o technologii, která je stále v ranné fázi vývoje. Proto je jejich cena značně vyšší a prakticky neexistuje technická podpora. [20, 24]



Obr.11 Tiskárna Polar s posuvným stolem [20]



Obr.12 Tiskárna Polar s otočným ramenem [19]



Jednou z velkých výhod FDM/FFF tiskáren je široká škála použitelných materiálů. Mezi nejčastější patří PLA, PETG, ASA, ABS, PC, PP a PA, v níže uvedené tabulce jsou popsány jejich vlastnosti. Vlastnosti materiálů se dají dále ovlivnit různými plnivými, například karbonovými vlákny.

**Tab.1** Příklady vhodných materiálů pro tisk FDM/FFF a jejich vlastnosti po tisku [25]

Materiál	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Teplota tvarové stálosti [°C]	Rázová houževnatost Charpy [kJ/m <sup>2</sup> ]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Cena [Kč/kg]
PLA	185-235	50-60	50-80	12-21	29-65	495-1435
PETG	215-270	70-90	63-78	18-75	33-53	480-2781
ASA	220-275	90-110	86-101	25-44	34-45	800-1265
ABS	230-255	95-110	81-97	21-72	30-47	430-1143
PC	270-275	100-115	86-113	50-74	50-63	841-1780
PP	220-245	100	56-80	-	14-26	1280-1780
PA	240-285	70-115	76-135	-	27-61	712-4551

**PLA** – (Polylactic acid - kyselina polymléčná) Jedná se o bio rozložitelný materiál, vyráběný z kukuřice, řepy či cukrové třtiny. Nicméně jeho rozložitelnost je značně limitována teplotou a degradačním prostředím. PLA je velice rychle rozložitelný (několik měsíců) pouze v tzv. termofilních podmínkách (58°C), které jsou dosažitelné například v průmyslových kompostárnách. PLA je jeden z nejnázve tisknutelných materiálů s nízkou smrštitostí, poměrně nízkou hygroskopičností (pohlcování vlhkosti) a nízkými deformacemi vzniklými rozdílem teplot mezi výtiskem a okolím. Při vystavení UV záření či zvýšené teplotě snadno degraduje. Je vhodný k tisku detailních dílů jakékoli velikosti, nejvhodnější pro hobby výroby například na výrobu uměleckých předmětů, kloubů, pantů, nádob (obr.13), krabiček (obr.14), atd. Dá se použít i pro výrobu prototypů, které jsou jen mírně tepelně, chemicky či mechanicky namáhané. [26]

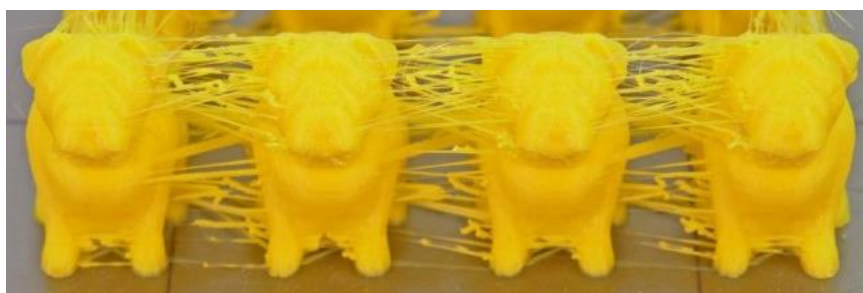


**Obr.13** Použití PLA – Nádob (Vázy) [26]



**Obr.14** Použití PLA – Krabičky (Lékovky) [27]

**PETG** - (Glykolem modifikovaný Polyethylentereftalát) Další z řady snadno tisknutelných materiálů. Technický materiál s dobrými mechanickými vlastnosti, téměř se nedeformuje vlivem rozdílu teplot mezi výtiskem a okolím, má vysokou teplotní odolnost, nízkou smrštitivost a hygroskopičnost a díky dobré přilnavosti vrstev jsou výtisky vodotěsné. Nevýhody jsou větší množství takzvaného stringování, kde při přechodu volným prostorem dochází k tomu, že tryska za sebou táhne tenká vlákna plastu (obr. 15). Dále špatné přemostění a převisy, horší tisk detailů, náročnější odstraňování podpor, silná přilnavost k podložce a mnoho dalších. Hodí se k tisku mechanicky namáhaných dílů (obr.16) a často se používá pro tisk plastových částí 3D tiskáren (obr.17). [28]



**Obr.15** Stringování při 3D tisku [29]



**Obr.16** Použití PETG – Mechanicky namáhané díly (karabina, svěrka) [28]



**Obr.17** Použití PETG – Díly pro tiskárnu (kryt elektroniky tiskárny Prusa i3 MK3S+) [28]

**ASA** - (Akrylonitril Styren Akrylát) Technický materiál, je považován za nástupce ABS. Díky své vysoké UV a teplotní odolnosti je ideálním materiálem pro tisk výrobků pro venkovní použití. Je vhodná i pro tisk mechanicky namáhaných dílů. Dá se použít pro výrobu detailních tisků. Tento materiál se nevyznačuje problematikou stringování a jeho výhodou je skutečnost, že se dá povrch chemicky vyhladit acetonem. Je otěruvzdorný a má snadný post processing (lepení, barvení, atd). Mezi hlavní nevýhody patří toxicita při tisku (vypouští do ovzduší styren) a silné kroucení. Z těchto důvodů je vhodné mít kryt tiskárny, pro udržení stálé zvýšené teploty okolí a mít ji na dobře odvětrávaném místě. ASA je částečně hygroskopický a je nutné ho tisknout při vysokých teplotách. [30]

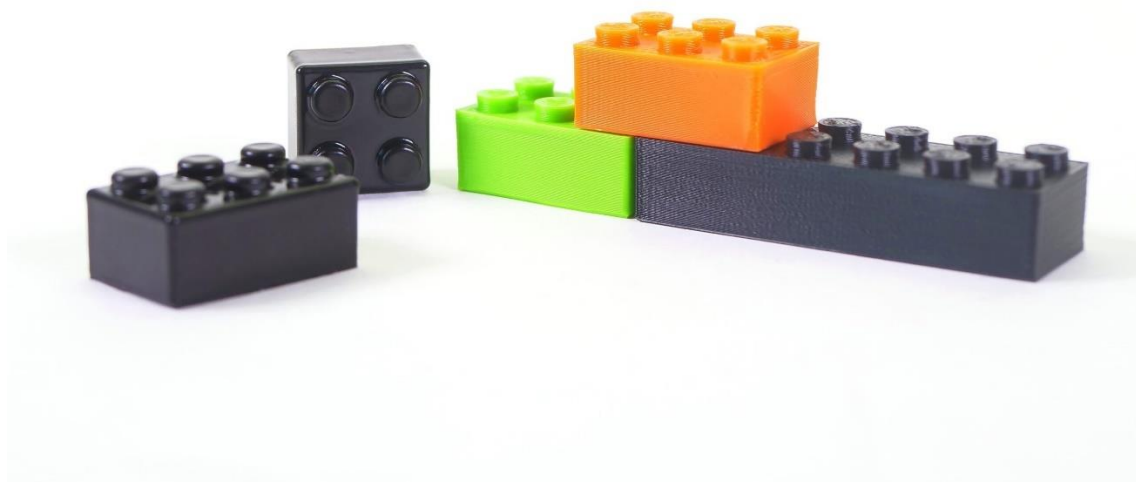


**Obr.18** Použití ASA – Výtisk namáhaný UV zářením (číslo ulice) [30]



**Obr.19** Acetonem vyhlazené ASA výtisky (přechodky, krytky) [30]

**ABS** - (Akrylonitril Butadien Styren) Levný technický materiál, předchůdce ASA. Má velmi podobné vlastnosti jako ASA, oproti ASA bývá levnější, více se deformuje kvůli rozdílu teplot mezi výtiskem a okolím a má nižší UV odolnost (křehkost dílů ve venkovním prostředí). Je vhodný pro tisk mechanicky namáhaných dílů pracujících za zvýšených teplot. [31]



**Obr.20** Použití ABS – LEGO kostky (vlevo vyhlazené acetonem) [31]

**PC -** (Polykarbonát) Jedná se o technický materiál, velmi náročný na tisk se skvělou houževnatostí, odolností v tahu. Je také velmi odolný vůči vysokým teplotám a má dobré elektrické izolační vlastnosti. Čistý PC je extrémně hygroskopický a kvůli své tepelné roztažnosti po zchlazení materiálu může docházet k praskání výtisků, proto se do PC přidávají aditiva. I po přidání aditiv je stále jedním z nejhůře tisknutelných materiálů. Další nevýhodou je jeho vysoká cena. Při tisku je nutné použít separační vrstvu mezi podložku a tisknutý díl. I přes výše uvedené nevýhody nachází své uplatnění pro tisk vysoce mechanicky a tepelně namáhaných dílů. [32]



**Obr.21** Použití PC – Mechanicky namáhané díly (kolečka) [32]



**Obr.22** Použití PC – Mechanický díl (krytka vzduchového filtru) [32]

**PP -** (Polypropylen) Drahý technický materiál. Jeho hlavní výhodou je vysoká houževnatost, nízká hmotnost a má vysokou chemickou odolnost. Má špatnou přilnavost k povrchu podložky a značně se deformuje kvůli rozdílu teplot mezi výtiskem a okolím. Jeho ohebnost z něj činí ideální materiál pro tisk pantů, řemínků a dalších flexibilních dílů. [33]



**Obr.23** Použití PP – Flexibilní díly (stahovací pásy, krabička) [33]

**PA -** (Polyamid / Nylon) Jedná se o technický materiál velmi náročný na tisk. Vyznačuje se však vynikajícími mechanickými vlastnostmi, vysokou teplotní a chemickou odolností a nízkým koeficientem tření. Je zároveň tvrdý, otěruvzdorný a při tisku v tenkých vrstvách flexibilní. Na druhou stranu je extrémně hygroskopický (za 24 hodin může pohltit vodu vážící více než 10% vlastní hmotnosti), deformuje se kvůli rozdílu teplot mezi výtiskem a okolím. Jedná se o velmi drahý materiál a některé PA při tisku uvolňují potenciálně nebezpečné látky. Proto je vhodné tisknout ve větraném prostředí, nebo v tiskárně s tiskovou komorou. Z výše uvedeného je zřejmé, že se jedná o ideální materiál pro tisk mechanicky, tepelně i chemicky namáhaných dílů. [34]



**Obr.24** Použití PA – Mechanicky namáhané díly (ozubené kolo) [34]



**Obr.25** Použití PA – Flexibilní díly (stahovací pásky) [35]

### **Klady FDM/FFF technologií**

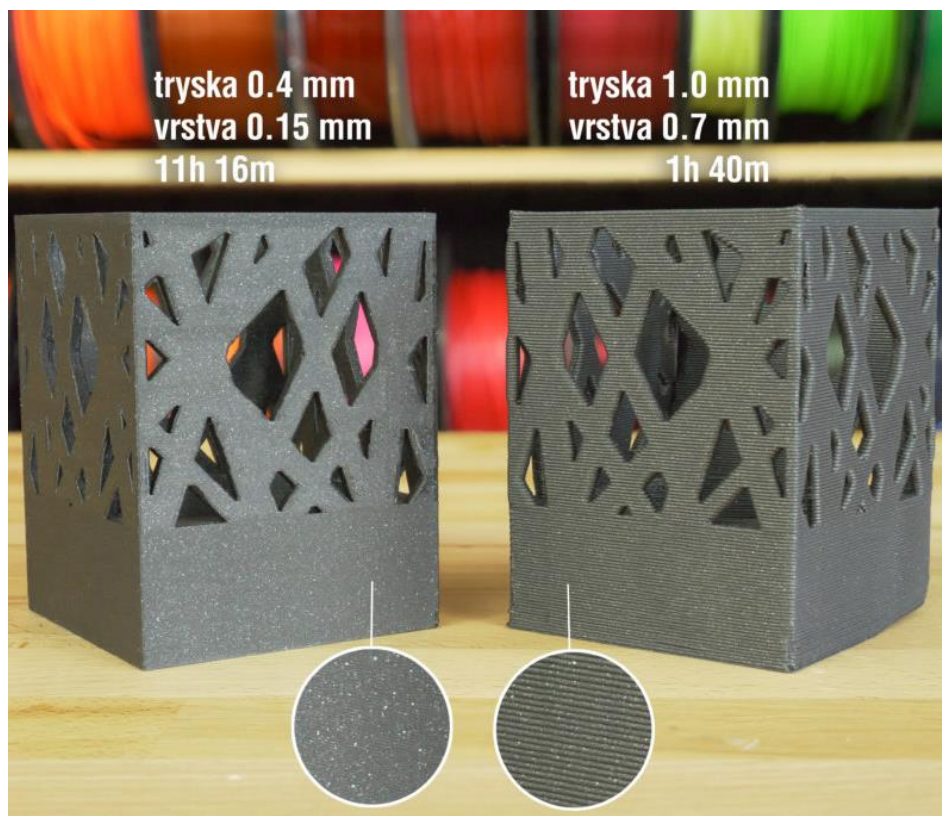
Při tisku nemusí vznikat žádný odpad, jediný odpad vzniká při tvorbě podpor, které nejsou vždy nutné. Tiskové plochy mohou být velké i několik metrů.

Ve srovnání s ostatními aditivními technologiemi má mnohem větší škálu materiálů, dobré mechanické vlastnosti, nízkou pořizovací cenu a je jednou z AT, které umožňují barevný tisk.

### **Zápory FDM/FFF technologií**

Není tak přesná jako například SLA technologie, která může dosahovat rozměrových tolerancí až  $\pm 0,01$  mm. FDM/FFF technologie dosahují rozměrových tolerancí  $\pm 0,2$  až  $\pm 0,5$  mm. Další problematikou je stálost produkce. Proto je nutné 3D tiskárny pravidelně kalibrovat. [36] Rozměrová přesnost je také ovlivněna smrštěním materiálu, které je závislé na druhu použitého materiálu, rozměrech, teplotě podložky a dalších jiných faktorech. [37, 38]

Další nevýhodou, je že z AT má technologie FDM/FFF pravděpodobně nejhorší kvalitu povrchu. Na výtiscích jsou patrné vrstvy, které jsou viditelné i pouhým okem. Nicméně jak již bylo uvedeno, kvalita povrchu se dá ovlivnit tloušťkou vrstvy (obr.26). Při tisku z určitých materiálů se dají výtisky vyhladit (obr.27), což v mnoha případech zlepšuje nejen kvalitu povrchu ale i mechanické vlastnosti. [39]



**Obr.26** Závislost kvality povrchu na tloušťce vrstvy [18]

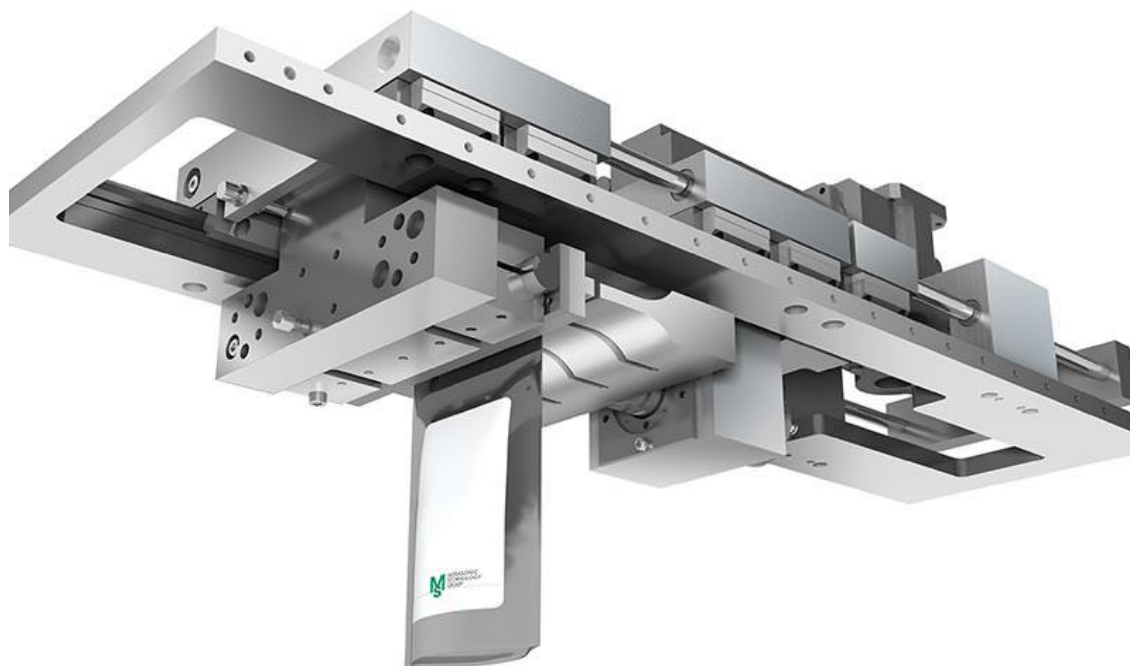


**Obr.27** Vyhlazené modely [39]

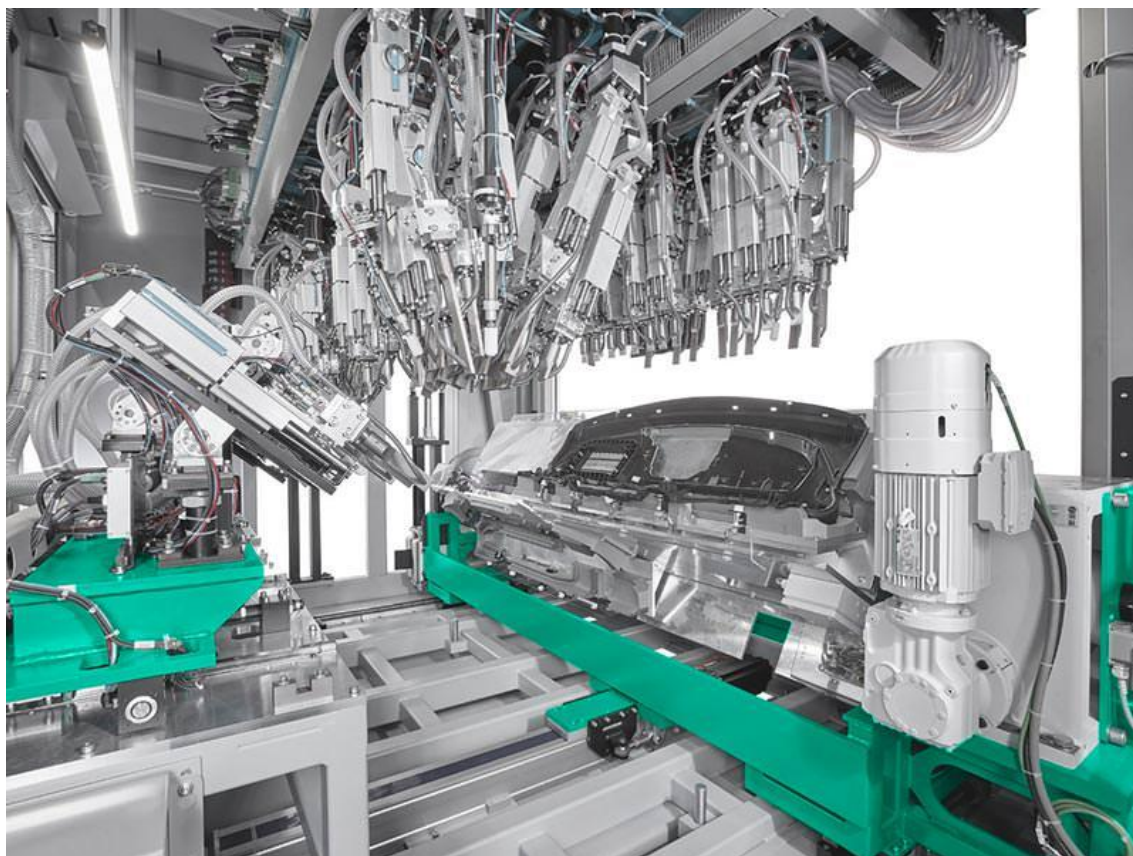
Dále je vhodné poznamenat, že i přesto, že je mnoho materiálů používaných při výrobě AT zdravotně nezávadnými, nelze je používat pro potravinářský průmysl. Při výrobě dílů mezi vrstvami vzniká prostor, který napomáhá snadnému zachycení bakterií. Stává se tak ideálním místem pro jejich množení. Pro zajištění zdravotně nezávadného výtisku je nutné provést povrchovou úpravu. Například zalitím epoxidovou pryskyřicí. Vyhlazení povrchu za pomoci evaporace není pro tyto účely vhodné, bývá totiž mnohdy dosahováno toxickými materiály. [40]

## 2.2. Ultrazvukové svařování

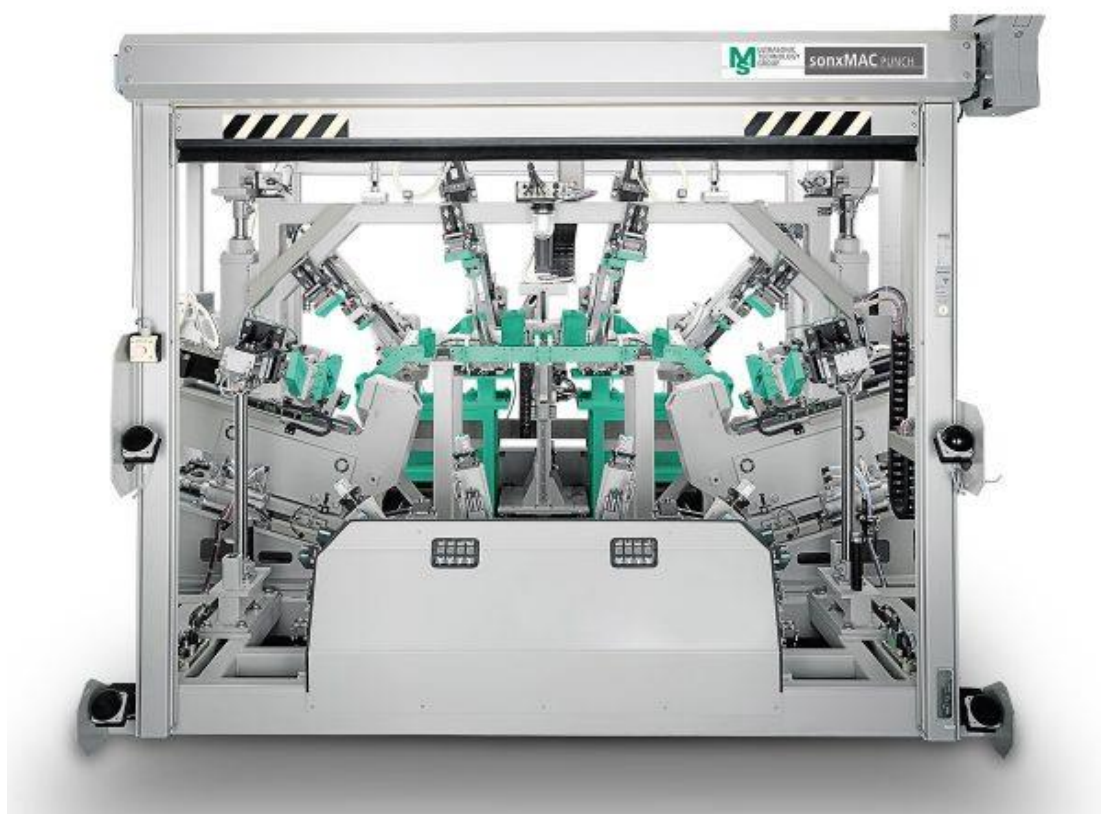
Ultrazvukové svařování spadá do kategorie třecího svařování. Jedná se o velice rychlý proces spojování plastů a pracuje na principu aplikace vysokofrekvenčních vibrací s nízkou amplitudou na rozhraní svařovaných ploch. Na rozdíl od mechanického spojování nezvyšuje hmotnost, což je velice důležité například v letectví a kosmonautice. Při porovnávání s lepenými spoji není nutné čekat na vytvrzení lepidel. Výhodou vůči ostatním druhům svařování plastů je jeho rychlost, ke svaření může dojít i během desetin vteřiny. Dnes se využívá v mnoha odvětvích průmyslu, například medicínském, elektrotechnickém, obalovém (obr.28), v letectví a kosmonautice. Velké využití má ultrazvukové svařování v automobilovém průmyslu, kde se používá jak v interiéru, tak exteriéru automobilu. V interiéru vozu se jedná například o přístrojovou desku (obr.29), dveřní obložení a podobně. Příklady využití u exteriéru vozu jsou kryty nárazníků (obr.30), prahy, lemy kol a jiné. Další odvětví průmyslu, kde se ultrazvukové svařování hojně využívá, je spotřební průmysl, jedná se například o svařování textilií, hraček, krytů elektronických spotřebičů.[41–44].



**Obr.28** Speciální jednoúčelový stroj pro ultrazvukové svařování fólií [45]



**Obr.29** Speciální jednoúčelový stroj pro ultrazvukové svařování palubní desky [46]

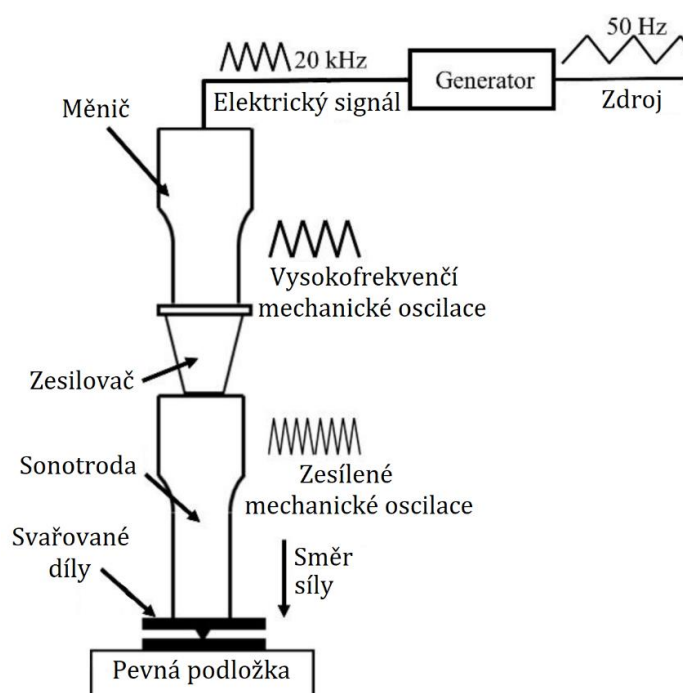


**Obr.30** Speciální jednoúčelový stroj pro ultrazvukový prostřih a ultrazvukové svařování krytů nárazníků [42]



## 2.2.1. Princip ultrazvukového svařování

Princip ultrazvukového svařování spočívá v převodu elektrické energie na mechanickou. Ultrazvuková svářečka se skládá ze čtyř hlavních částí: generátoru, měniče, zesilovače a sonotrody (obr.31). Generátor svářečky převádí napětí z elektrické sítě (230V) na potřebnou frekvenci, nejčastěji 20-40kHz. Elektrické pulzy vycházející z generátoru jdou do měniče, který je převádí na mechanické vibrace. Pro tento efekt se využívá piezokeramika, která se rozpíná a smršťuje při vystavení střídavému napětí. Získané vibrace prochází přes zesilovač, který zvětší jejich amplitudu, do sonotrody. Sonotroda je komponenta, která se přímo setkává se svařovaným dílem. Přenáší vysokofrekvenční vibrace (15-70kHz) o nízké amplitudě (10-100 $\mu$ m) a svařovací sílu/tlak přímo na svařovaný díl. Mají různé tvary (Stupňovité, Gausovy, Katenoidové, Biezorovy, Válcové a další (obr.32)), díky těmto tvarům dochází ke změně amplitudy (zvětšení).



Obr.31 Schéma ultrazvukové svářečky [41]



Obr.32 Různé tvary sonotrod [47]

Vlivem vibrací a tlaku vzniká třecí teplo na rozhraní svařovaných dílů. Vytvořené teplo způsobuje natavení materiálu a tak mezi nimi vytvoří vazbu. Hlavní mechanismy zahřívání jsou viskoelastické a povrchové tření. Povrchové tření způsobuje začátek svařovacího procesu, zatímco viskoelastické dominuje po dosažení teploty skelného přechodu a dodává nejvíce tepla během svařování. Tato část svařování se nazývá vibrační fáze. Druhou důležitou etapou je fáze tuhnutí. Během ní už je vyvozen pouze tlak po dobu, než materiály zatuhnou. [41, 48, 49]

## **2.2.2. Parametry ultrazvukového svařování**

### **Frekvence**

Většina ultrazvukových svářeček dnes pracuje na frekvencích okolo 20kHz. Mezi výjimky patří svářečky pro malé komponenty dosahující frekvencí 30-40kHz, nebo svářečky pro semikrystalické materiály s frekvencí 15kHz. Výhody vyšší frekvence jsou: vyšší ochrana dílů díky sníženému cyklickému napětí, snížení šíření tepla mimo svařované oblasti, potřebná nižší přitlačná síla, rychlejší svařování, méně hluku a menší komponenty stroje. Mezi nevýhody patří větší útlum vibrací a náročnější svařování v dalekém poli, kvůli snížené amplitudě. [50]

### **Amplituda**

Velikost amplitudy ovlivňuje rychlost zahřívání materiálu. Při použití vyšších amplitud dochází k rychlejšímu zahřívání a tečení materiálů, což může zapříčinit tvorbu přetoků. V extrémních případech může dojít k přehřátí materiálu, což jej může poškodit a snížit pevnost svaru. V případě nízkých amplitud může naopak dojít k nerovnoměrnému tání materiálu. Při následném zvyšování amplitudy, dochází k většímu rozptýlení vibrací v materiálu a svařované díly jsou více namáhané. V případě semikrystalických látek je vliv amplitudy mnohem větší než u amorfních, pravděpodobně kvůli vyšší energii potřebné ke svaření semikrystalických látek. [50]

### **Svařovací síla/tlak**

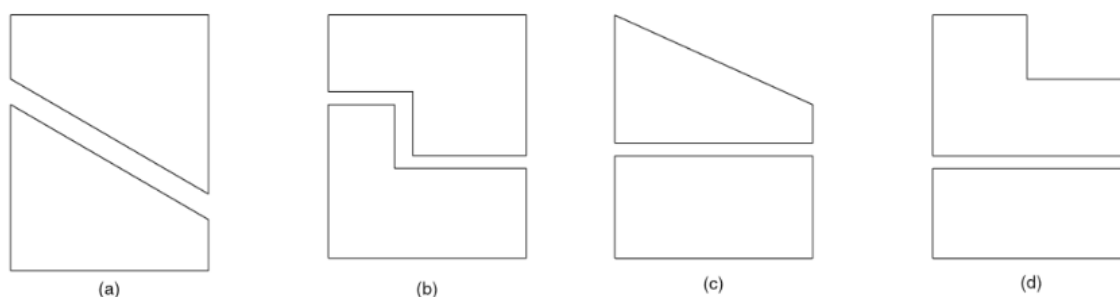
Svařovací síla je potřebná k přenosu vibrací ze sonotrody do svařovaných dílů. Tato síla také zaručuje, že jsou díly drženy u sebe během fáze tuhnutí/dotlaku. Určení správné síly/tlaku je nutné pro získání dobré kvality svaru. Při nízkých silách/tlacích dochází ke špatnému přenosu energie nebo nedostatečnému tání a toku materiálu, což má za následek delší svařovací časy či pokles pevnosti svaru. Naopak při příliš vysokých silách/tlacích dojde k nadměrnému tání, což může způsobit větší přetoky. Ve většině případech se během celého svařování udržuje konstantní síla/tlak. Některé moderní ultrazvukové systémy umožňují programovatelné nastavení síly a tlaku během svařování (nutnost servopohonu). Svařovací síla je postupně snižována, což má za následek snížení množství přetečeného materiálu a současně umožňuje optimalizaci difuzní fáze, snížení molekulární orientace, a tedy zvýšení síly svaru. Profilování svařovací síly je obzvláště vhodné pro materiály s nízkou viskozitou, jako například polyamid. [50]

## Svařovací čas

Svařovací čas je ovlivněn ostatními parametry ultrazvukového svařování. Při příliš krátkém svařovacím čase nedojde k dostatečnému svaření a vznikne svar s malou pevností. Naopak, když je příliš dlouhá doba svařování, tak může dojít k poškození materiálu, čímž se opět snižuje pevnost svaru. [41, 50]

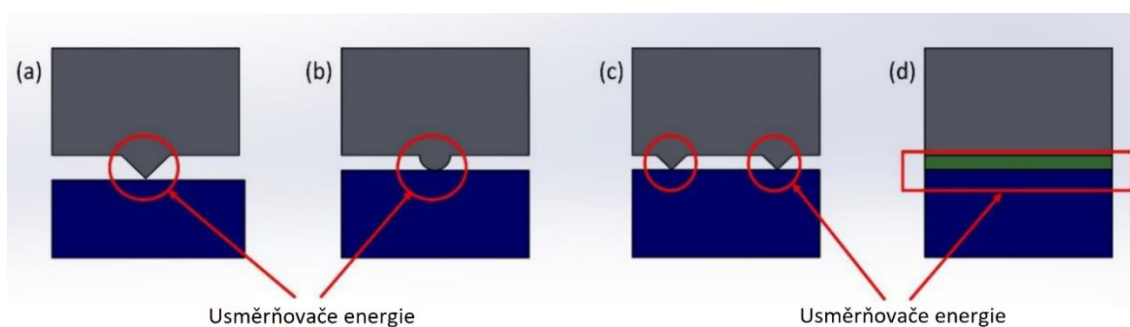
### 2.2.3. Geometrie svařovaných dílů

K dosažení optimálního svaru je důležité, aby svařované plochy byly rovnoběžné s kontaktní plochou sonotrody. Tím je zaručeno že ultrazvuková energie prochází stejnou vzdáleností ke svařované ploše po celém svařovaném díle. V jiném případě může dojít k nerovnoměrnému ohřevu, tudíž i k nerovnoměrnému svaření (obr.33). [48, 50]



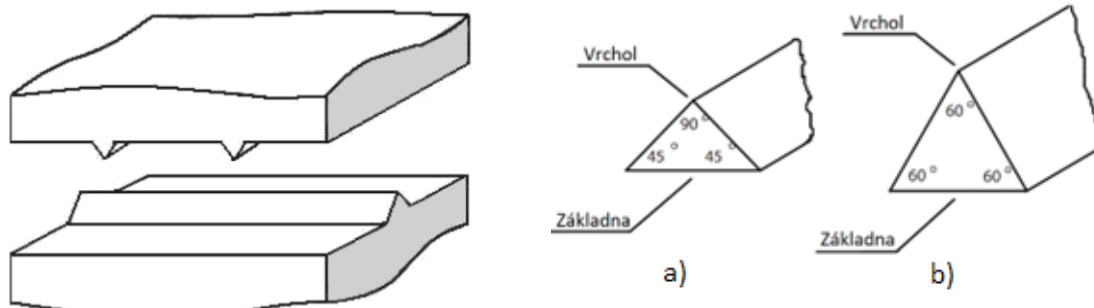
**Obr.33** Nežádoucí tvary spojů a) svařovaná plocha není rovnoběžná s kontaktní plochou sonotrody b) svařovaná plocha je stupňovaná c) kontaktní plocha sonotrody není rovnoběžná se svařovanými plochami d) plocha pro kontakt se sonotrodou je stupňovaná [50]

Pro zvýšení kvality svaru jsou velmi často pro ultrazvukově svařované díly využívány konstrukční prvky tzv. usměřovače energie. Usměřovače energie usměřují kmitočet amplitudy do menší plochy. Toho je dosaženo tím, že je umožněn relativní pohyb mezi usměřovačem energie a povrchem jednoho ze svařovaných dílů, za stálého tlaku. Usměřovače energie jsou výstupky většinou trojúhelníkového, obdélníkového, nebo půlkruhového tvaru na svařované ploše jednoho, či více ze svařovaných dílů. Pokud je potřeba může být více usměřovačů energie na jedné ploše (obr.34, obr.35). [41, 50, 51]



**Obr.34** Usměřovače energie  
a) Trojúhelníkový b) Půlkruhový c) Vícenásobný d) Plochý/Obdélníkový [41]

Trojúhelníkový tvar je pravděpodobně tím nejčastěji aplikovaným konstrukčním řešením. Používá se pro svařování materiálů s výrazným rozdílem v tloušťce a dílů trubkového tvaru. Jeho tvar umožňuje soustředit energii do jednoho bodu, což vede k rychlejšímu a přesnějšímu svařování. Dále se jeho tvar liší, podle struktury materiálu. Pro amorfní materiály se používá pravoúhlý rovnoramenný trojúhelníkový profil, kde má vrchol  $90^\circ$  úhel. Semikrystalické materiály mají usměrňovače energie profilu rovnostranného trojúhelníka (obr.36). [48]



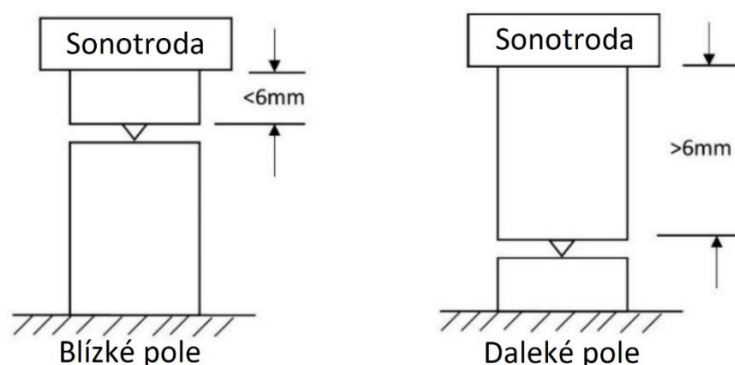
**Obr.35** Křížem dané usměrňovače energie [50]

**Obr.36** a) usměrňovač energie pro amorfní strukturu b) usměrňovač energie pro semikrystalickou strukturu [48]

Půlkruhový usměrňovač energie se často používá pro svařování silnějších plastů. Jeho půlkruhový tvar umožňuje snadnou koncentraci ultrazvukové energie na svařované oblasti, což zvyšuje účinnost svařování. Půlkruhový usměrňovač je také vhodný pro svařování větších průměrů a objemných plastových součástí.

Obdélníkový usměrňovač energie se často používá pro svařování plastů, které mají větší plochu. Jeho obdélníkový tvar umožňuje snadnou distribuci ultrazvukové energie na větší ploše, což zvyšuje účinnost svařování. Obdélníkový usměrňovač je také vhodný pro svařování plastů s vysokou pevností.

V mnoha případech je důležitá pozice (vzdálenost) svařových ploch dílů vůči sonotrodě, jelikož ultrazvuková energie musí projít skrz materiál, aby se dostala ke svařovaným plochám. Podle pozice sonotrody vůči svařovaným plochám se ultrazvukové svařování dělí na dvě kategorie: na svařování v blízkém, nebo v dalekém poli. Svařování v blízkém poli znamená, že svařujeme nejdále do 6 mm. V případě větší vzdálenosti se jedná o svařování v poli dalekém (obr.37). [41, 48]



**Obr.37** Svařování v blízkém a dalekém poli [41]

Z hlediska pevnosti svaru je samozřejmě nejvhodnější aplikovat energii v co nejbližší vzdálenosti od místa svaru. Svařování v dalekém poli obecně požaduje vyšší než běžnou amplitudu, delší svařovací časy a vyšší tlak k získání srovnatelného svaru. Svařování v dalekém poli je obecně doporučováno pouze pro amorfnní materiály, které přenášejí energii lépe než semikrystalické. [48]

#### 2.2.4. Materiály vhodné pro ultrazvukové svařování

Pro ultrazvukové svařování se obvykle používají termoplastické materiály, jako jsou PE, PP, PET, PA, PC, ABS, ASA, PMMA, PVC a další. Obecně platí, že se amorfnní materiály svařují ultrazvukem snáze než semikrystalické, které lépe tlumí vibrace.

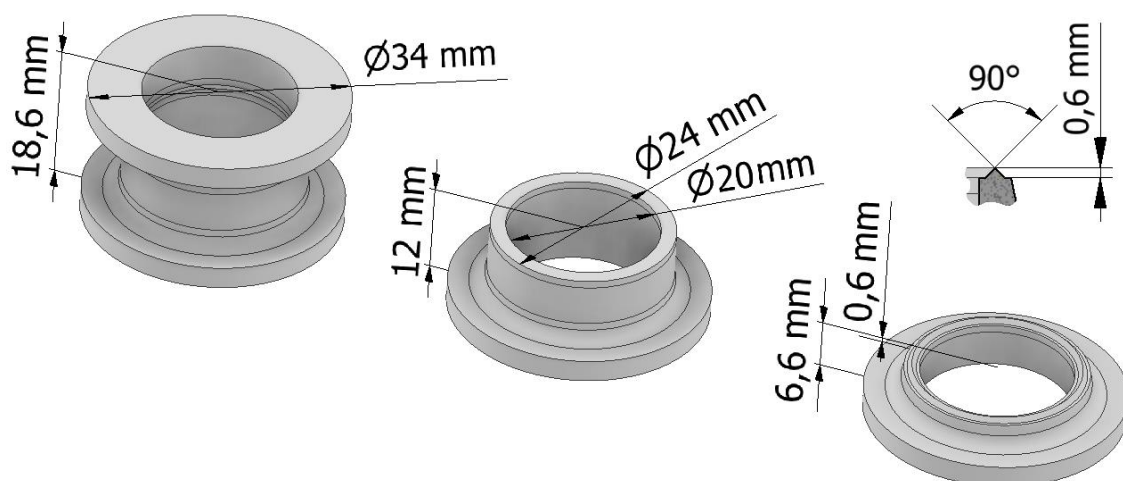
- ABS** - (Akrylonitril Butadien Styren) Amorfnní materiál vhodný pro svařování ultrazvukem, a to jak v blízkém, tak dalekém poli. Používá se při výrobě interiéru i exteriéru automobilů, krytů domácích spotřebičů, fotoaparátů. [52, 53]
- PC** - (Polykarbonát) Amorfnní materiál vhodný pro ultrazvukové svařování, jak v blízkém, tak dalekém poli. Používá se v automobilovém a medicínském průmyslu. [52, 53]
- PMMA** - (Polymethylmethakrylát) Amorfnní materiál dobře svařitelný v blízkém poli a hůře svařitelný v dalekém poli. Používá se při výrobě oken, světel, koncových světel automobilů. [52, 53]
- PVC** - (Polyvinylchlorid) Amorfnní materiál relativně dobře svařitelný v blízkém poli a hůře v dalekém poli. Používá se při výrobě kanalizačních rour, okenních ráků. [52, 53]
- PA** - (Polyamid) Semikrystalický materiál relativně dobře svařitelný v blízkém poli a velmi obtížně svařitelný v dalekém poli. Používá se při výrobě krytů motorů, ručních vrtaček, brusek. [52, 53]
- PP** - (Polypropylen) Semikrystalický materiál obtížně svařitelný v blízkém poli a velmi obtížně svařitelný v dalekém poli. Používá se při výrobě nárazníků aut, reflektorů, kanalizačních systémů, injekčních stříkaček. [52, 53]
- PET** - (Polyethylentereftalát) Existuje jak v amorfnní, tak semikrystalické podobě. Je obtížně svařitelný v blízkém poli a velmi obtížně svařitelný v dalekém poli. Používá se při výrobě vláken, fólií, nápojových lahví, triček. [52, 53]
- PE** - (Polyethylen) Semikrystalický materiál velmi obtížně svařitelný v blízkém poli a téměř nesvařitelný v dalekém poli. Používá se k výrobě potrubí, fólií, tašek, lahvíček, nádob, kanýstrů. [52, 53]

### 3. Experimentální část

V experimentální části bakalářské práce byla provedena analýza ultrazvukem svařených dílů vyrobených technologií vstřikování plastů a AT FDM/FFF. Kvalita svaru byla hodnocena jak z hlediska mechanických vlastností spoje, tak z hlediska optické kvality svaru.

#### 3.1. Volba zkušební tělesa

Pro porovnání svařitelnosti ultrazvukem dílů vyrobených technologiemi vstřikování a AT FDM/FFF bylo vybráno zkušební těleso VS-2216-3. Zkušební těleso se skládalo ze dvou částí s odlišnou výškou, tvar a rozměry jsou uvedeny na obrázku č. 38. Odlišné výšky obou dílů umožňují svařování v blízkém i dalekém poli. V běžné praxi je snaha svařovat vždy v blízkém poli. Svařování v dalekém poli je aplikováno jen v případech, kdy geometrie dílů neumožňuje svařovat v blízkém poli a jde o ultrazvukem dobře svařitelné materiály, tedy amorfní materiály. Z tohoto důvodu bylo pro následující experiment zvoleno svařování v blízkém poli.

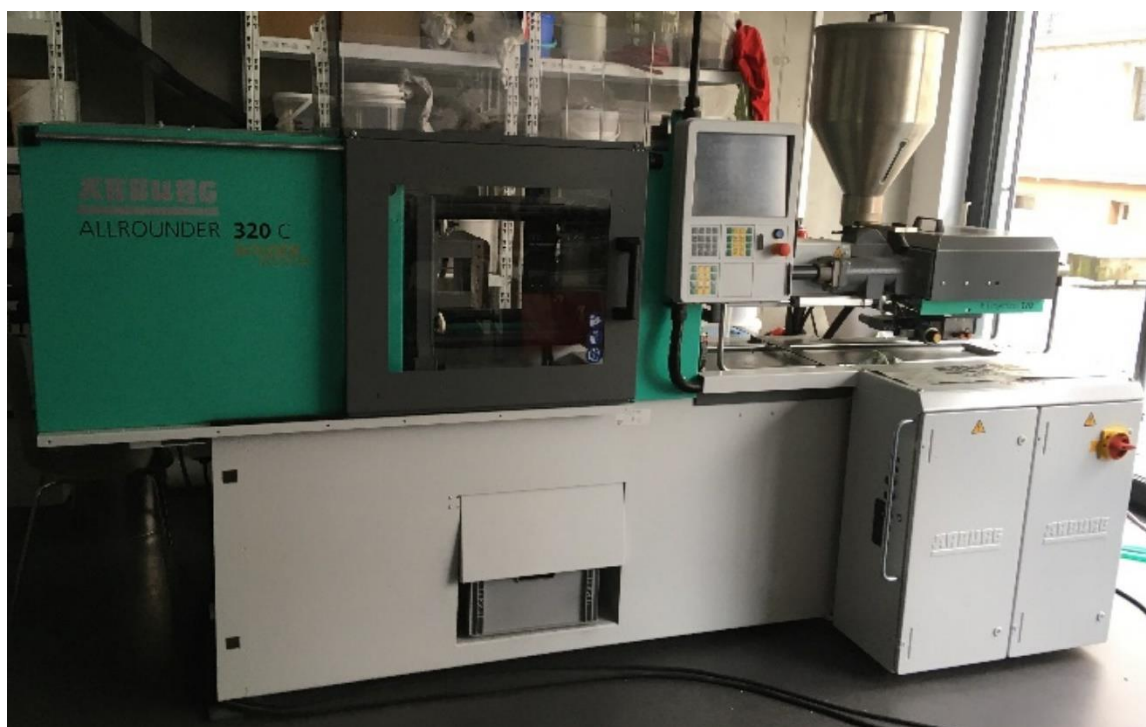


Obr.38 Zkušební těleso VS-2216-3

### 3.2. Volba materiálu

Pro tento experiment byly vybrány materiály ASA, ABS a PLA z důvodu jejich rozsáhlého využití v oblasti 3D tisku. Jako zástupce materiálu ASA byl použit produkt NEBULA ASA 301 BLACK od firmy NEBULA, pro ABS byl použit produkt „ABS Bílá“ od firmy Filament PM a pro PLA byl použit produkt „PLA Transparentní“ taktéž od firmy Filament PM. Materiály ABS a PLA byly k dispozici v podobě jak strun, tak granulátů. Na rozdíl od materiálu ASA, který byl dostupný pouze ve formě strun, a musel proto být zpracován v nožovém mlýnu pro potřeby vstřikování.

Doporučené zpracovatelské podmínky pro tisk byly získány od výrobců. K zajištění relevantních dat pro hodnocení svažitelnosti bylo nezbytné znát (stanovit) mechanické vlastnosti materiálů. Pro tyto účely byla vyrobena zkušební tahová tělesa dle normy ČSN EN ISO 3167 na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 320C (obr.39) za podmínek specifikovaných v tabulce č. 2. Před procesem vstřikování byly jednotlivé materiály sušeny ve vakuové sušárně při teplotě 80°C po dobu 12h.



Obr.39 Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 320 C

**Tab. 2** Parametry vstřikovacího stroje při výrobě zkušebních těles

Parametry	ASA	ABS	PLA
Objem dávky [cm <sup>3</sup> ]	14	14	14
Teplotní profil [°C]	250-250-240-230-220	240-240-230-220-210	210-210-200-190-180
Teplota formy [°C]	50	50	30
Uzavírací síla [kN]	250	250	300
Velikost dotlaku [bar]	650	650	800
Zpětný tlak [bar]	40	40	50
Vstřikovací rychlost [cm <sup>3</sup> /s]	20	20	20
Obvodový rychlost šneku [m/min]	15	15	15
Čas vstřikování [s]	0,5	0,5	0,5
Čas dotlaku [s]	15	15	15
Celková doba cyklu [s]	28	28	28

Po vstřikování byly vzorky kondicionovány po dobu 48 hod. Dále byly stanoveny mechanické vlastnosti pomocí tahové zkoušky na zařízení TiraTest 2300 dle normy ČSN EN ISO 527. Rychlost tahové zkoušky byla nastavena na 1 mm/min do poměrného prodloužení 0,3 %, poté byla rychlost zvýšena na 5 mm/min. Parametry těchto materiálů, získané jak od výrobců, tak měřením, jsou shrnuty v tabulce č. 3.

**Tab. 3** Parametry materiálů ASA, ABS a PLA

	ASA	ABS	PLA	
Parametr	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Metoda
Teplota trysky [°C]	250-265	230-250	200-220	Od výrobce
Teplota podložky [°C]	90-100	100-110	60	Od výrobce
Mez pevnosti v tahu $\sigma_m$ [MPa]	44,7 ± 0,2	40,2 ± 0,2	53,7 ± 0,7	ČSN EN ISO 527-1
Modul pružnosti v tahu $E_t$ [MPa]	2228 ± 10	2314 ± 6,8	3562 ± 24	ČSN EN ISO 527-1
Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení $\epsilon_{tb}$ [%]	21,8 ± 5,3	33 ± 6,1	5,7 ± 1,4	ČSN EN ISO 527-1



### 3.3. Příprava vzorků

#### Příprava vzorků metodou vstřikování

Výroba zkušebních těles technologií vstřikování byla realizována na stejném vstřikovacím stroji a za stejných podmínek, jako při výrobě zkušebních tahových těles popsanych v kapitole 3.2 Volba materiálu.

#### Příprava vzorků metodou AT FDM/FFF

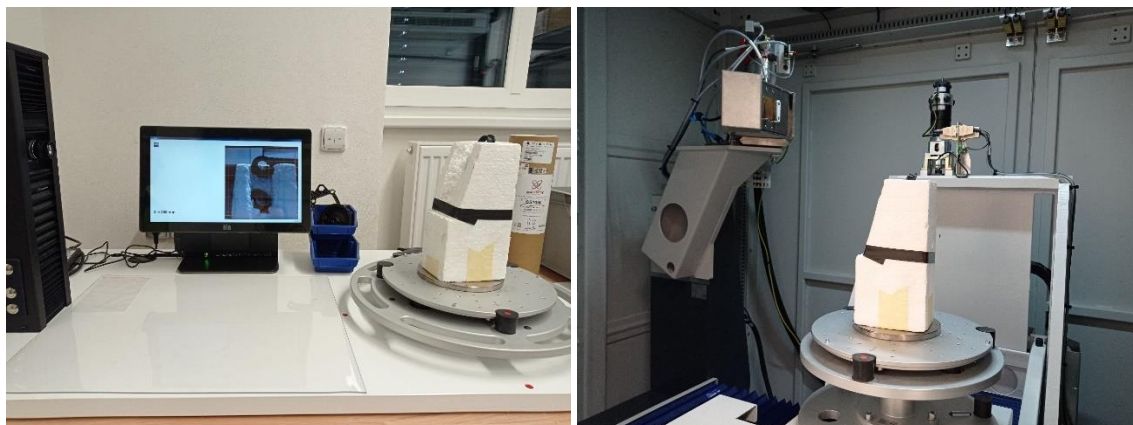
Výroba zkušebních těles AT FDM/FFF byla realizována na jedné z nejvíce používaných 3D tiskáren a to Original Prusa i3 MK3S+ a nejběžnější tryskou s průměrem 0,4 mm. Tato tiskárna disponuje maximálními rozměry tisku 250x210x210 mm, maximální rychlostí posuvu 200 mm/s, maximální teplotou trysky 300 °C a teplotou podložky 120 °C. Vysoká a nízká část zkušebního tělesa byla tisknuta současně se 100 % výplně pro zajištění maximální pevnosti. Parametry tisku byly optimalizovány a jsou uvedeny v tabulce č. 4. Pro kompenzaci smrštivosti materiálu byly modely u všech materiálů zvětšeny v osách X a Y a to pro vysokou část o +0,6% a nízkou část o +0,7%.

**Tab. 4** Parametry 3D tiskárny při výrobě zkušebních těles

Parametry	ASA	ABS	PLA
Teplota trysky [°C]	260	255	215
Teplota podložky [°C]	110	110	60
Průměr trysky [mm]	0,4	0,4	0,4
Tloušťka vrstvy [mm]	0,2	0,2	0,2
Tisk s ochranným štítem	Ano	Ano	Ano
Rychlosti pohybu trysky při tisku perimetrů [mm/s]	40	40	40
Rychlosti pohybu trysky při tisku vnější perimetrů [mm/s]	25	25	25
Rychlosti pohybu trysky při tisku výplně [mm/s]	40	40	40

### 3.4. Skenování dílů pomocí počítačové tomografie (CT)

Pro kontrolu vnitřních vad, jako trhlin, pórovitosti, staženin, ale také pro kontrolu kolmosti vyrobených vzorků byla použita CT. Před měřením musel být díl umístěn co nejbližší k ose otočného stolu, aby nebylo nutné skenovat zbytečně velkou oblast a zjištěna vzdálenost mezi měřeným dílem a zdrojem záření (obr.40). Samotná kontrola proběhla na zařízení ZEISS-metrotom 1500 (obr.40; 41), za podmínek uvedených v tabulce č. 5.



**Obr.40** Vlevo umístění vzorku do osy otočného stolu a určení vzdálenosti mezi měřeným dílem a zdrojem záření

*Vpravo díl s určenou pozicí přesunut do Počítačového tomografu ZEISS METROTOM 1500*

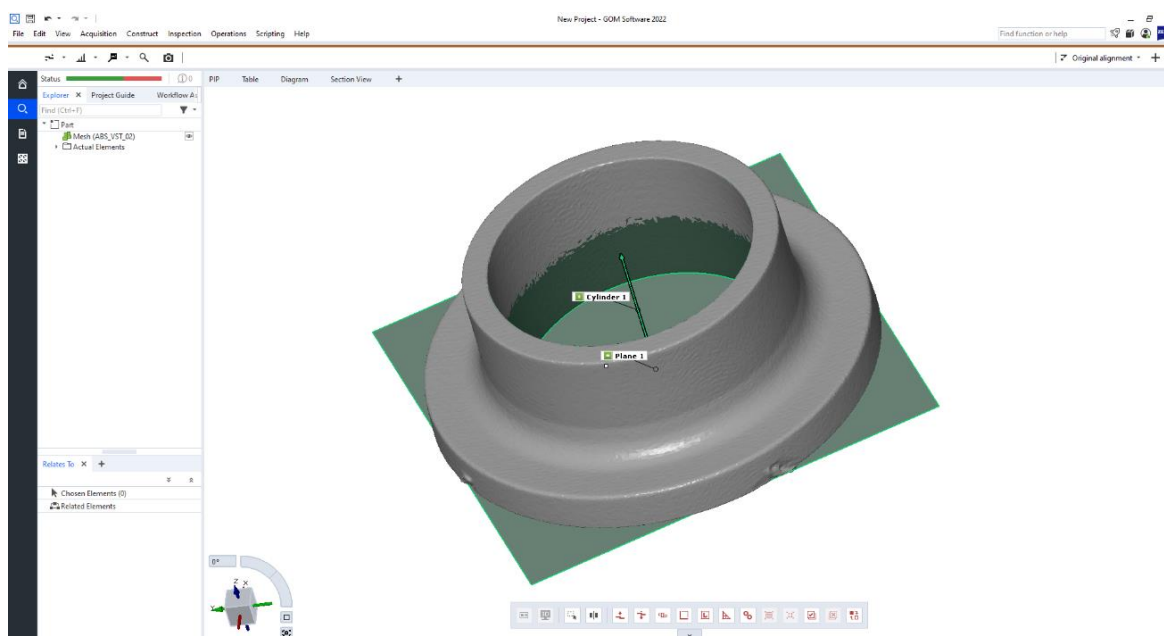


**Obr.41** Počítačový tomograf ZEISS METROTOM 1500 [54]

**Tab. 5** Parametry počítačového tomografu

Část CT	Parametry	Hodnoty
Rentgenová výbojka	Napětí [kV]	180
	Proud [ $\mu$ A]	420
Detektor	Doba integrace [ms]	1000
	Filtr a jeho tloušťka [mm]	Cu 0,25 mm
	Zesílení [-]	16 x
	Binning (zmenšení základního rozlišení) [-]	2x2
Pohlcovací systém	Vzdálenost dílu od RTG trubice [mm]	305
	Výška polohovacího systému od polohy 0 [mm]	221
	Doba skenování [min]	25

Z CT byly exportovány modely ve formátu STL. Pro kontrolu kolmosti získaných skenů byl použit program GOM Software 2022. V tomto programu byla vytvořena základní rovina a válec, jak je zobrazeno na obrázku č. 42, s použitím metody Gaussian best-fit. Kolmost těchto dvou prvků byla následně ověřena. Toto bylo provedeno kvůli velkým směrodatným odchylkám při měření pevnosti v předchozích pracích, a to v diplomové práci Ing. Maxy „Svařitelnost PLA bio-kompozitů technologií ultrazvukového svařování“ [55] a bakalářské práci Bc. Lachmana „Vliv typu a koncentrace přísad na proces ultrazvukového svařování PLA bio-kompozitů“ [56]. Cílem byly tedy eliminovat vliv změny tvaru dílu na jeho svařitelnost.



**Obr.42** Naskenovaný díl s rovinou a válcem vytvořených pro určení kolmosti v programu GOM Software 2022

### 3.5. Ultrazvukové svařování

Pro získání porovnatelných dat byly použity stejné parametry ultrazvukového svařování, jak pro díly vyrobené metodou vstřikování, tak AT FDM/FFF. Jediným odlišným parametrem byla velikost svarové mezery, která byla ovlivněna výškou koncentrátoru energie.

#### Měření výšky koncentrátoru energie

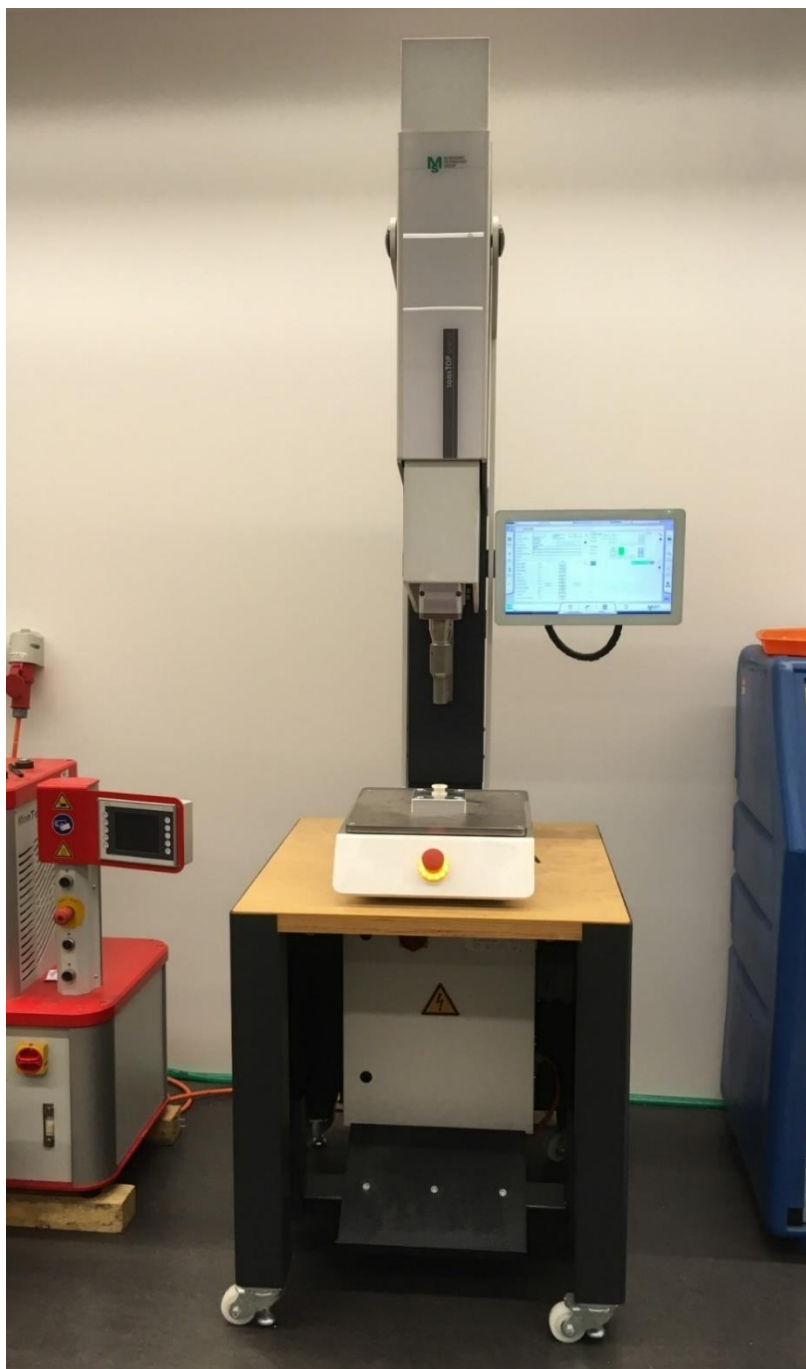
Smrštivost materiálu ovlivnila rozměry koncentrátorů energie. Jejich výška byla podstatná pro správné nastavení vzdálenosti pohybu sonotrody. Z tohoto důvodu byly přeměřeny digitálním úchylkoměrem ID-H0530 od firmy Mitutoyo corp. Od každého materiálu a technologie bylo měřeno 5 vzorků a 5 měřených míst, ze kterých byla spočítána průměrná výška koncentrátorů energie. Změřené hodnoty ukázali, že díly vyrobené AT se díky nastavené korekci smrštění (kapitola 3.3) více blíží k požadované hodnotě 0,6mm, než vstřikované díly viz tabulka č. 6.

**Tab. 6** Naměřené výšky koncentrátorů energie

Výška koncentrátoru energie materiálu ASA 301 BLACK [mm]		Výška koncentrátoru energie materiálu ABS [mm]		Výška koncentrátoru energie materiálu PLA [mm]	
Vstřikování	Aditivní technologie	Vstřikování	Aditivní technologie	Vstřikování	Aditivní technologie
0,568±0,006	0,610±0,008	0,556±0,007	0,568±0,006	0,568±0,003	0,586±0,009

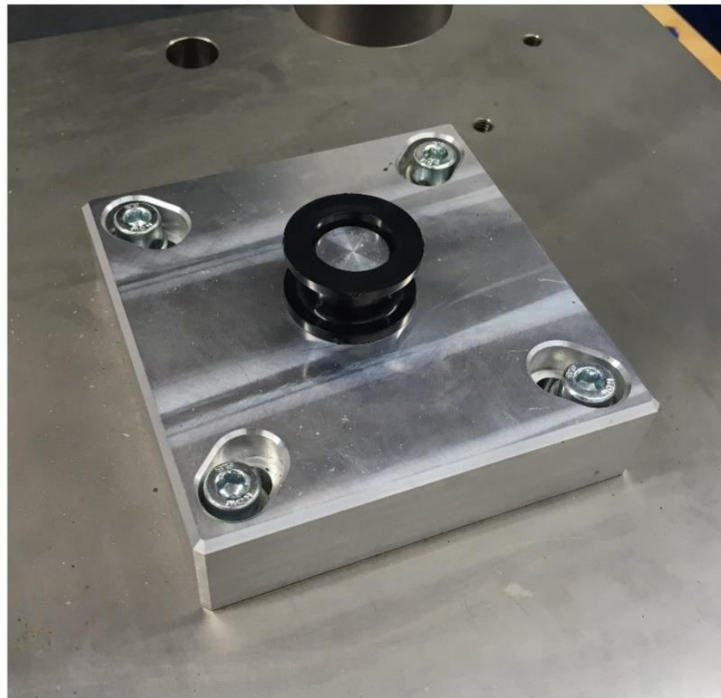
#### Ultrazvukové svařovací zařízení

V experimentu této bakalářské práce bylo využito ultrazvukového svařovacího zařízení MS sonxTOP GENESIS (obr.43). Toto zařízení poskytuje širokou škálu nastavitelných parametrů, jako jsou čas svařování, energie svařování, absolutní a relativní dráha a přítlačná síla. Piezokeramický generátor tohoto přístroje dokáže generovat vibrace o frekvencích 20, 30 a 35 kHz. Síla, kterou může stroj aplikovat na svařované materiály, se pohybuje mezi 10 až 3000 N pro frekvence 20 a 30 kHz a mezi 10 až 1000 N pro frekvenci 35 kHz. Maximální pracovní výška činí 630 mm. Posuv sonotrody je řízen elektromechanickým servopohonem, což umožňuje použití zařízení i v prostředích, kde je třeba zachovávat hygienické a sterilní podmínky. Stroj je ovládán pomocí dotykového panelu a umožňuje export svařovacích dat pro další analýzu.



**Obr.43** Ultrazvukové svařovací zařízení MS sonxTOP GENESIS

Pro svaření byla použita sonotroda s identifikačním číslem 634949 a aretační přípravek určený pro svařování zkušebních těles VS-2216-3 (obr.44). Sonotroda byla navržena pro frekvenci 20 kHz a rozsah amplitudy mezi 67 až 100 % (20,6-30,7  $\mu\text{m}$ ). Pro zajištění rovnoměrného rozložení svařovacích sil byla sonotroda a aretační přípravek před svařováním zkalibrovány tak, aby jejich pracovní plochy byly kolmé vůči ose svařovacího zařízení. Sonotroda byla dále kalibrována pomocí ovládacího panelu svařovacího zařízení, do kterého byly vloženy parametry sonotrody. Hodnoty sonotrody jsou uvedeny v tabulce č. 7.



**Obr.44** Vlevo Sonotroda 634949

Vpravo Aretační přípravek se zkušební tělesem připraveným ke svařování

**Tab. 7** Parametry sonotrody 634949

Sonotroda 634949	
Maximální amplituda [%]	100
Minimální amplituda [%]	67
Frekvence [kHz]	20
Průměr styčné plochy [mm]	30
Poměr transformace zesilovače	1:1,25
Poměr transformace zesilovače	1:2,74

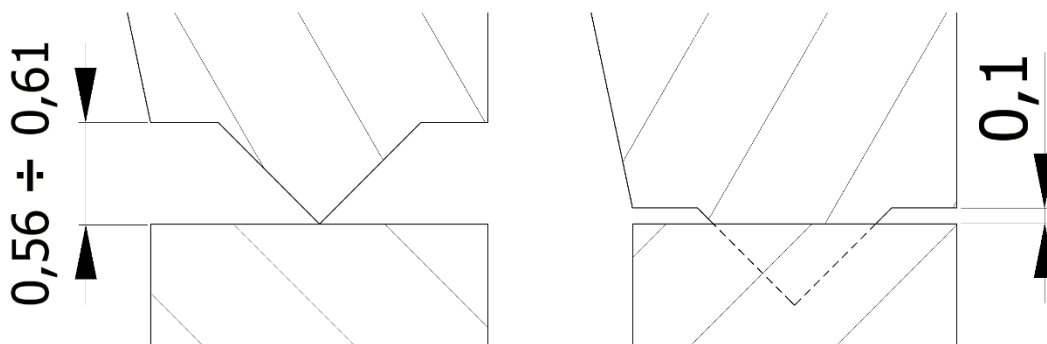
### Volba svařovacích parametrů

V experimentu byl cílem dosáhnout nejvyšší možné pevnosti svaru. Během svařovacího procesu byla vnitřní strana zkušebního tělesa považována za pracovní a vnější strana za nepohledovou. Rozměrová tolerance pracovní strany byla zajištěna aretačním přípravkem. Po konzultaci s pracovníkem firmy MS ultrasonic byly použity parametry běžně používané v praxi.

Jak již bylo zmíněno, bylo zvoleno svařování v blízkém poli, které umožňuje použít menších amplitud, svařovacích sil a současně zkracuje dobu svařování oproti svařování v dalekém poli. Následně byla nastavena amplituda a pro dosažení nejvyšší pevnosti svaru byla použita 100 % amplituda svařovacího zařízení, což odpovídá 30,7  $\mu\text{m}$ .

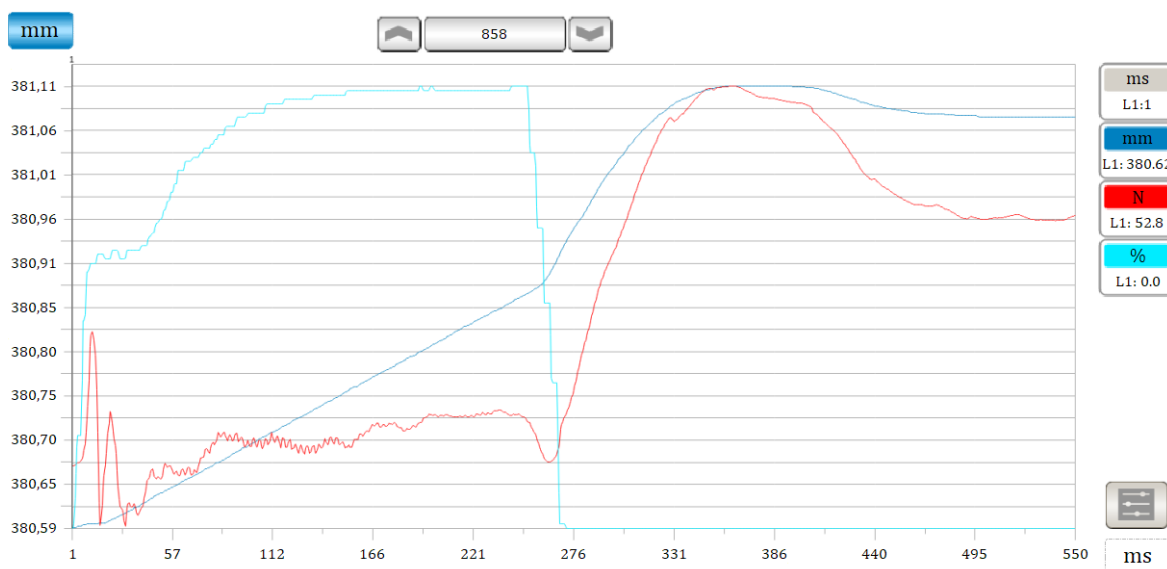
Rychlost posuvu sonotrody byla dalším nastaveným parametrem. Nejprve byla nastavena na hodnotu 1,2 mm/s. Ukázalo se však, že tato rychlost byla příliš vysoká, protože svařování probíhalo příliš rychle a při dokončení svaru byla maximální rychlost posuvu sonotrody na 1 mm/s. Tato rychlost se zdála pro zkoušené materiálové kombinace optimální.

Dále byla nastavena dráha sonotrody, tak aby byla svarová mezera pro všechny experimenty shodná 0,1mm, jak je ukázáno na obrázku č. 45. Pro každý materiál, dle velikosti koncentrátoru energie a metodu výroby byla dráha nastavena samostatně.



Obr.45 Schéma svarové mezery Vlevo před svařením Vpravo po svaření

Od každého materiálu a metody výroby bylo svařeno celkem dvacet vzorků. Graf průběhu svařování je zobrazen na obrázku 46.



Obr.46 Názorový graf průběhu svařování

### 3.6. Kontrola kvality

Kvalita svaru byla hodnocena z hlediska mechanických vlastností tahovou zkouškou. Aby bylo možné získat relevantní výsledky pevnosti, bylo nutné určit plochu svaru. Přesná plocha svaru však není snadno stanovitelná nedestruktivními metodami kvůli výronkům (vytlačenému materiálu z plochy svaru). Z toho důvodu byly vybrány svažené vzorky pro provedení řezu, který umožnil posoudit i kvalitu svaru.

#### Řezání vzorků

Řezání vzorků probíhalo na rozbrušovací pile Brilliant 220 (obr.47). Během celé doby řezání bylo zajištěno stálé chlazení emulzí, aby nedošlo k tepelnému poškození materiálu nebo ke změně struktury materiálu ve svaru. Parametry řezání zahrnovaly řeznou rychlost nastavenou na 2500 ot/min a rychlost posuvu 0,02 mm/s. Tělesa byla rozdělena na dvě stejné poloviny, přičemž řez procházel osou vzorku.



Obr.47 Rozbrušovací pila Brilliant 220

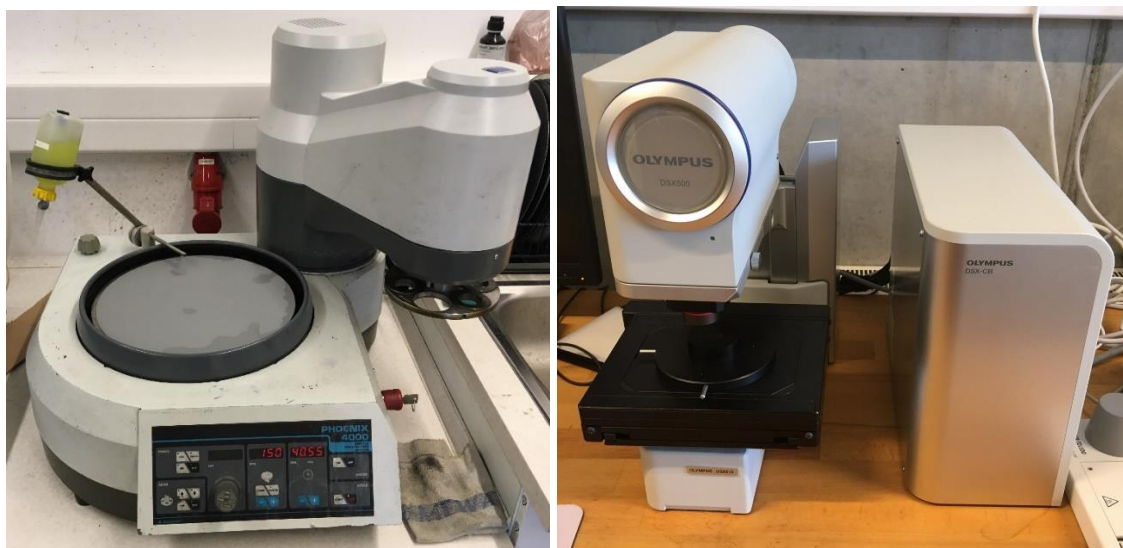


## Broušení

Broušení bylo prováděno na leštícím zařízení Phoenix 4000 (obr.57), které nabízí dvě různá nastavení rychlosti, a to 150 nebo 300 ot/min. Dále umožňuje broušení či leštění při chlazení vodou, nebo s použitím zvolené suspenze. Broušení proběhlo při rychlosti 150 ot/min, na brusných papírech s velikostí zrn 800, 2000 a 4000  $\mu\text{m}$  za konstantního chlazení vodou.

## Optická kontrola

Optická kontrola probíhala na mikroskopu Olympus DSX500 (obr.48), jak již bylo řečeno za účelem zjištění plochy svaru. Dále byla pozorována kvalita povrchu a pórovitost jednotlivých dílů, z hlediska materiálu a technologie výroby.



Obr.48 Vlevo leštícím zařízením Phoenix 4000 Vpravo mikroskop Olympus DSX500

## Výpočet plochy svaru

Plocha svaru ( $S$ ) byla spočítána podle rovnice (1). Jak již bylo ukázáno, optická kontrola prokázala, že díly byly provařeny v celé ploše. Z tohoto důvodu lze velikost vnitřního poloměru ( $R_1$ ) považovat jako vnitřní poloměr zkušebního tělesa a vnější poloměr ( $R_2$ ) za vnější poloměr zkušebního tělesa. Proto bylo ve všech případech počítáno se stejnou plochou svaru a to 138,23  $\text{mm}^2$ .

$$S = \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2) \quad (1)$$

## Zkouška tahem

Zkouška tahem probíhala na trhacím zařízení TiraTest 2300 (obr.49) v souladu s normou ČSN EN ISO 527 při konstantní rychlosti posuvu 2 mm/min a s aplikovaným předpětím 50 N. Trhací přípravek byl vložen do tzv. „misek“, kde horní část přípravku byla vložena pevně a dolní volně, tím se zamezilo vyosení částí přípravku. Od každého materiálu a technologie proběhla zkouška na dvaceti vzorcích, což znamená, že celkově byla zkouška provedena stovacetkrát. Hodnoty získané z měření jsou uvedeny v tabulkách č. 8 a 9.



Obr.49 Trhací zařízení TiraTest 2300

**Tab. 8** Hodnoty získané tahovou zkouškou pro vstříkované díly

Číslo měření	Vstříkovaná ASA		Vstříkované ABS		Vstříkované PLA	
	Síla při přetržení $F_{max}$ [N]	Napětí $\sigma$ [MPa]	Síla při přetržení $F_{max}$ [N]	Napětí $\sigma$ [MPa]	Síla při přetržení $F_{max}$ [N]	Napětí $\sigma$ [MPa]
1	2290,9	16,58	2138,5	15,48	4939,5	35,75
2	1738,9	12,59	2896,7	20,97	4250,9	42,23
3	2848,4	20,62	1674,7	12,12	4145,1	30
4	1584,8	11,47	3619,8	26,2	5221,8	37,8
5	1393,5	10,09	2825,7	20,45	4529,4	32,78
6	1584,0	11,46	2903,0	21,01	4162,1	30,11
7	1959,0	14,18	2691,5	19,48	4181,5	30,25
8	2708,9	19,61	2760,6	19,98	4091,1	29,61
9	1728,7	12,51	3147,6	22,78	4695,8	33,99
10	2019,3	14,62	3233,7	23,41	4296,7	31,1
11	1968,8	14,25	2515,0	18,2	4168,2	30,17
12	2932,0	21,22	1824,8	13,21	4394,6	31,81
13	3197,9	23,15	2885,0	20,88	4326,6	31,32
14	2519,2	18,23	2831,9	20,5	4412,7	31,94
15	2281,8	16,52	2459,1	17,8	4078,3	29,52
16	1718,8	12,44	3110,4	22,51	4706,5	34,07
17	1947,4	14,1	2711,3	19,62	4206,0	30,44
18	2625,0	18,99	2632,9	19,6	4167,6	30,15
19	2139,8	15,48	2779,8	20,11	4753,1	34,4
20	1802,5	13,04	3200,0	23,15	4338,7	31,4
<b>Průměr</b>	2149,5 ± 495,1	15,6 ± 3,6	2742,1 ± 452,8	19,9 ± 3,3	4403,3 ± 303,7	32,4 ± 3,1

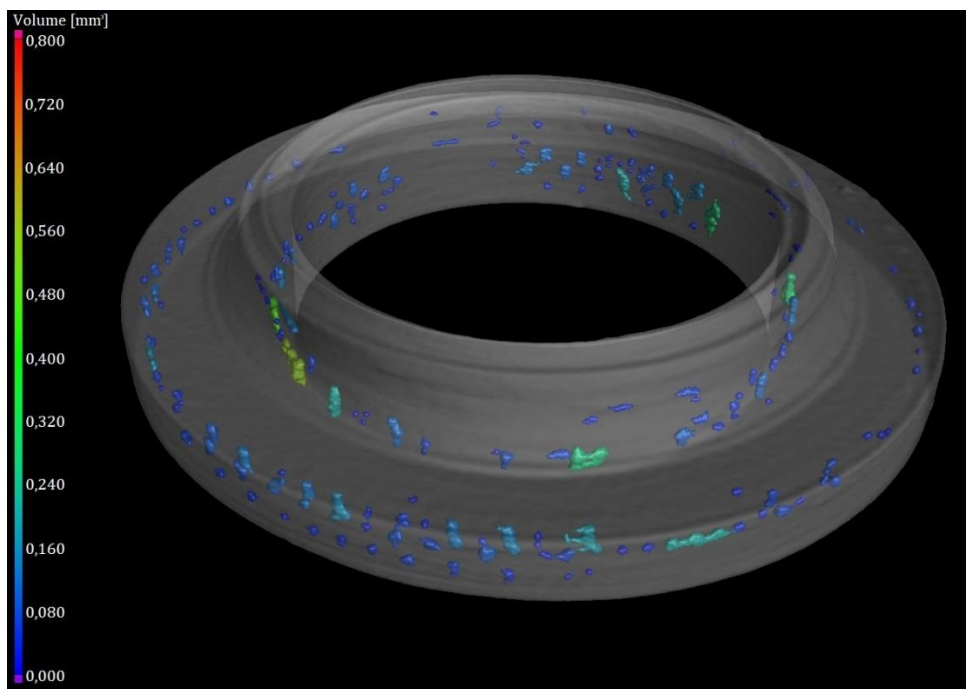
**Tab. 9** Hodnoty získané tahovou zkouškou pro díly vyrobené AT

Číslo měření	ASA vyrobené AT		ABS vyrobené AT		PLA vyrobené AT	
	Síla při přetržení $F_{\max}$ [N]	Napětí $\sigma$ [MPa]	Síla při přetržení $F_{\max}$ [N]	Napětí $\sigma$ [MPa]	Síla při přetržení $F_{\max}$ [N]	Napětí $\sigma$ [MPa]
1	137,0	0,99	779,0	5,64	509,7	3,69
2	187,5	1,36	823,9	5,96	675,3	4,89
3	197,9	1,43	701,1	5,07	550,8	3,99
4	138,7	1	573,9	4,15	642,4	4,65
5	174,2	1,26	512,4	3,71	659,3	4,77
6	224,6	1,63	775,6	5,61	517,9	3,75
7	221,3	1,6	639,6	4,63	415,9	3,01
8	190,1	1,38	928,5	6,72	692,8	5,01
9	158,3	1,15	854,0	6,18	692,8	5,01
10	177,5	1,28	499,3	3,61	540,9	3,92
11	145,1	1,05	757,5	5,48	554,3	4,01
12	186,6	1,35	859,8	6,22	624,8	4,52
13	168,6	1,22	740,9	5,36	673,2	4,87
14	208,7	1,51	688,4	4,98	583,3	4,22
15	193,5	1,4	899,9	6,51	573,7	4,15
16	201,8	1,46	774,1	5,6	691,2	5
17	141,0	1,02	536,3	3,88	489,3	3,54
18	186,6	1,35	624,8	4,52	564,0	4,08
19	176,9	1,28	709,1	5,13	685,6	4,96
20	164,5	1,19	815,6	5,9	577,8	4,18
Průměr	179,1 ± 25,4	1,3 ± 0,2	724,7 ± 124,1	5,2 ± 0,9	595,7 ± 77,8	4,3 ± 0,6

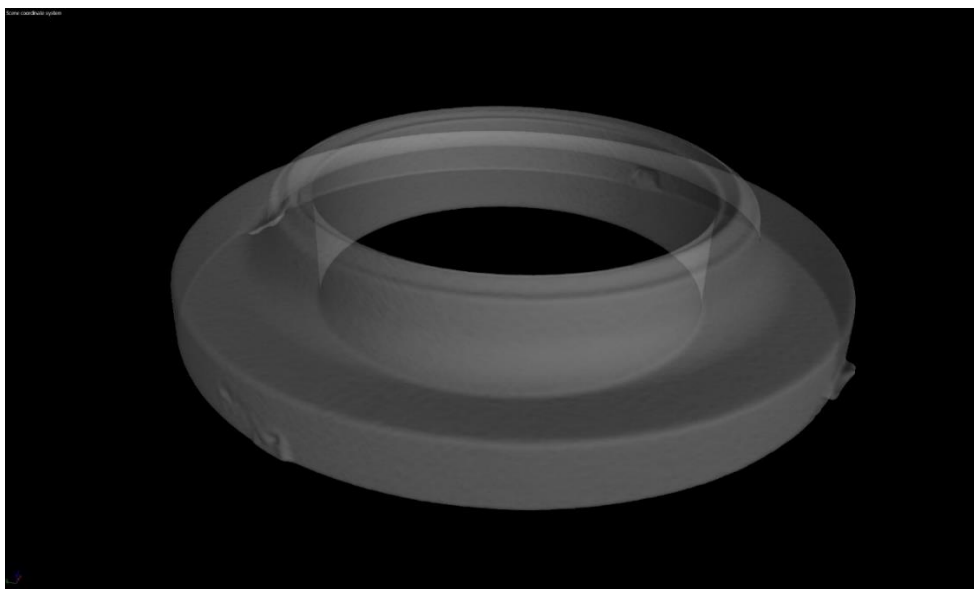
#### 4. Vyhodnocení a diskuze výsledků

Tato část bakalářská práce byla zaměřena na vyhodnocení a diskuzi výsledků kvality svaru dílů vyrobených vstříkováním a AT FDM/FFF z ASA, ABS a PLA. Vyhodnocení bylo provedeno z hlediska optické kvality a mechanických vlastností svaru a samotných dílů.

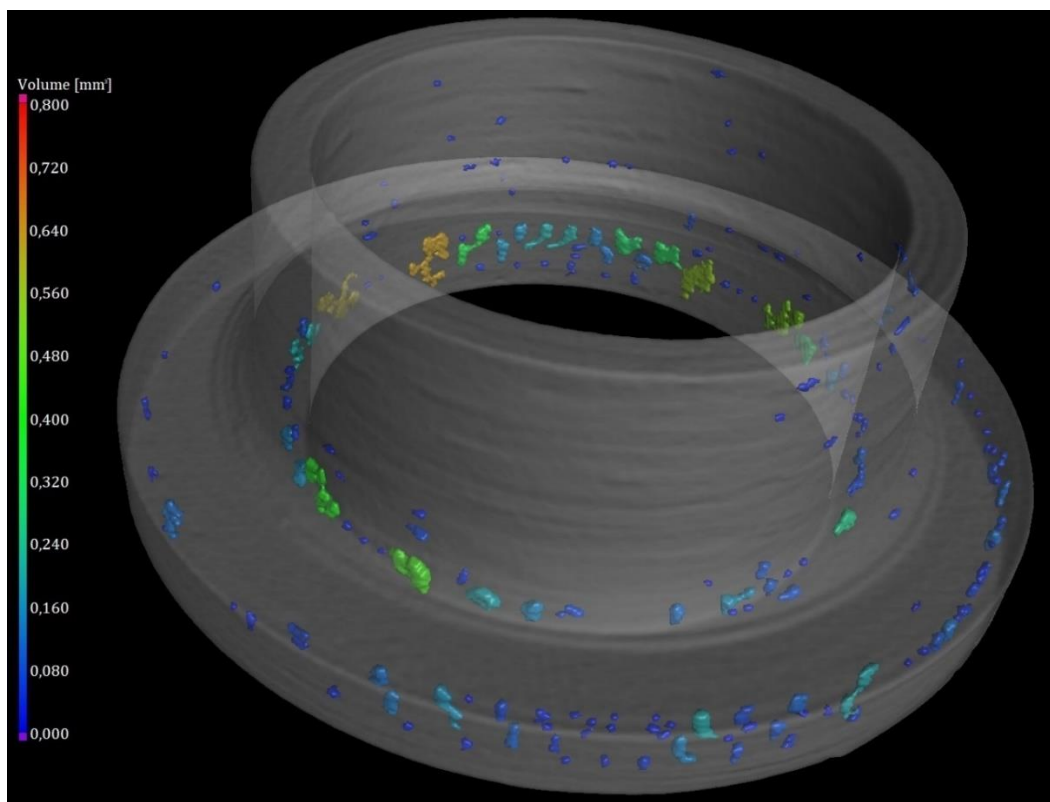
##### 4.1. Vyhodnocení vnitřních vad



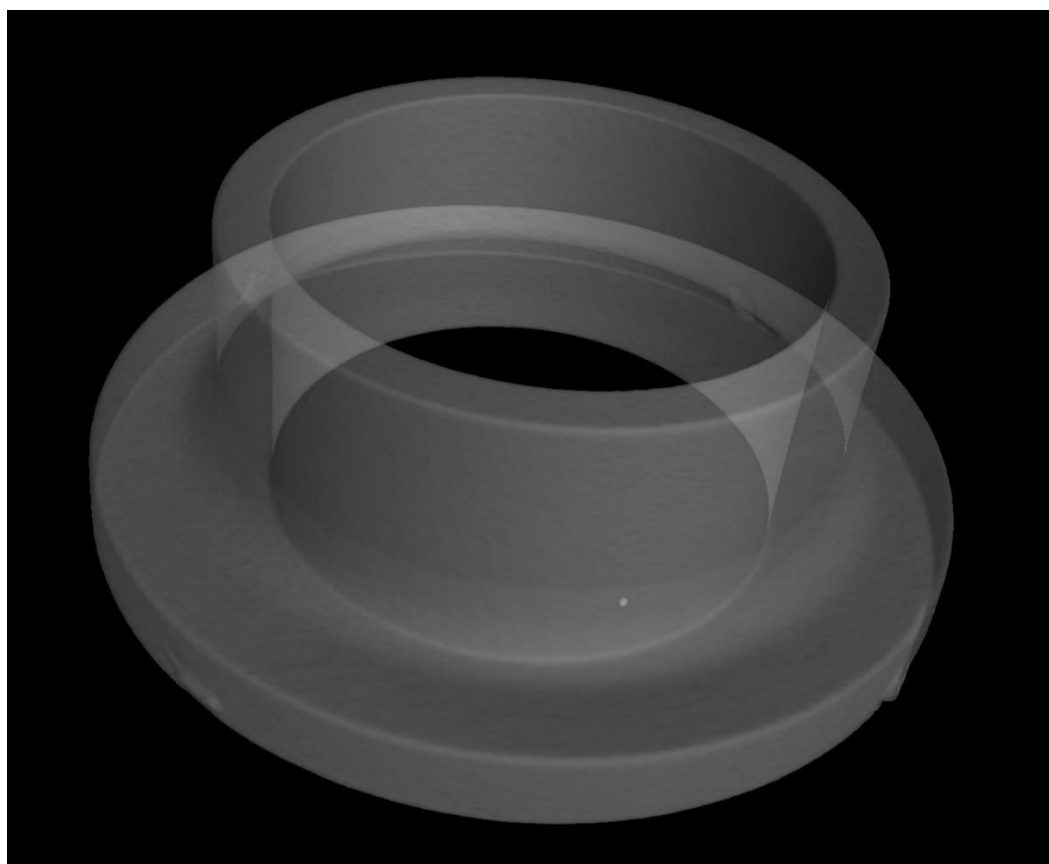
**Obr.50** Vyhodnocení vnitřních vad nízké části zkušebního tělesa z materiálu ASA vyrobené AT



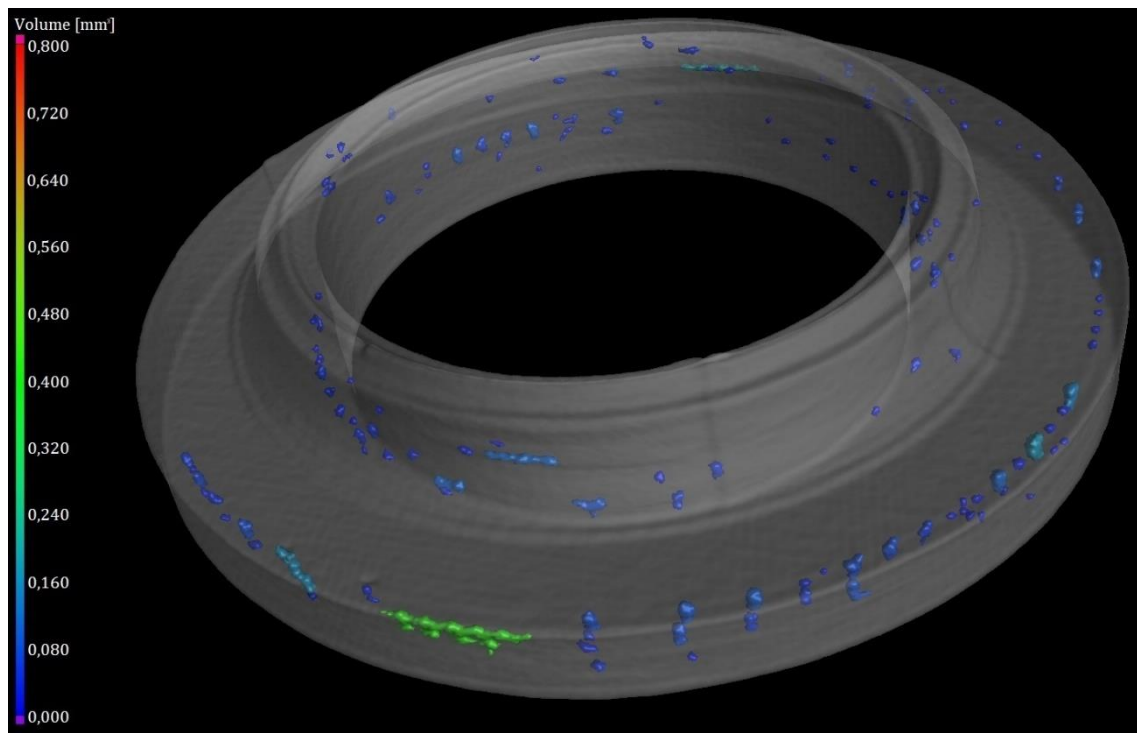
**Obr.51** Vyhodnocení vnitřních vad nízké části zkušebního tělesa z materiálu ASA vyrobené vstříkováním



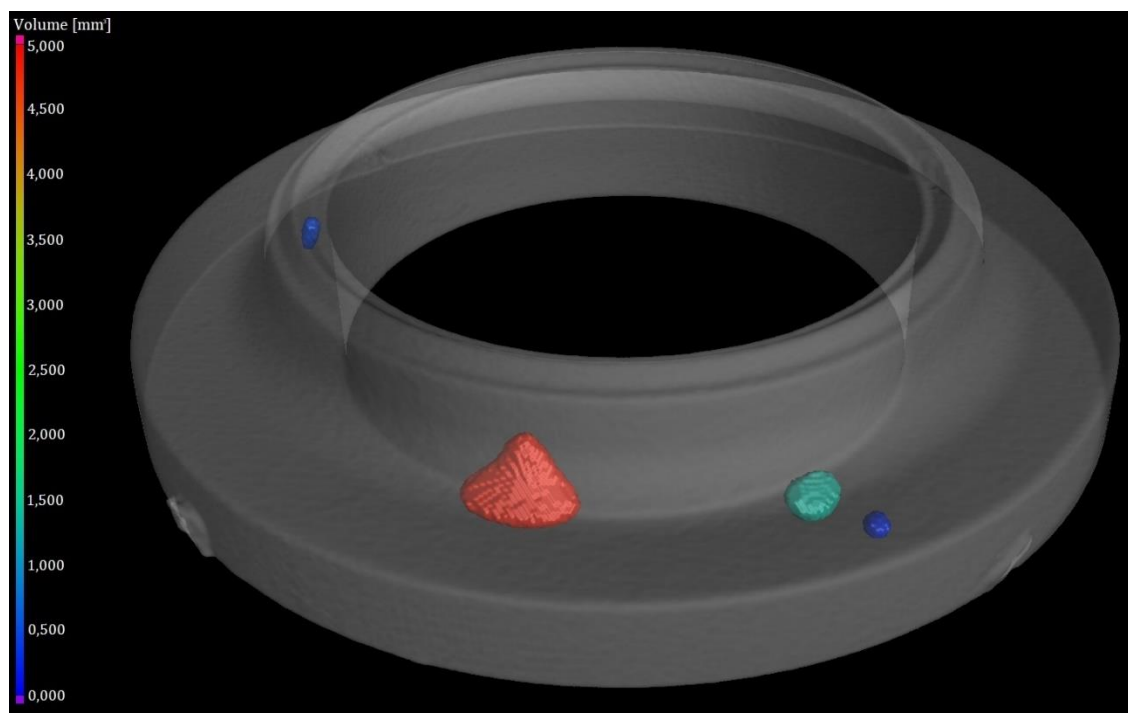
**Obr.52** Vyhodnocení vnitřních vad vysoké části zkušebního tělesa z materiálu ASA vyrobené AT



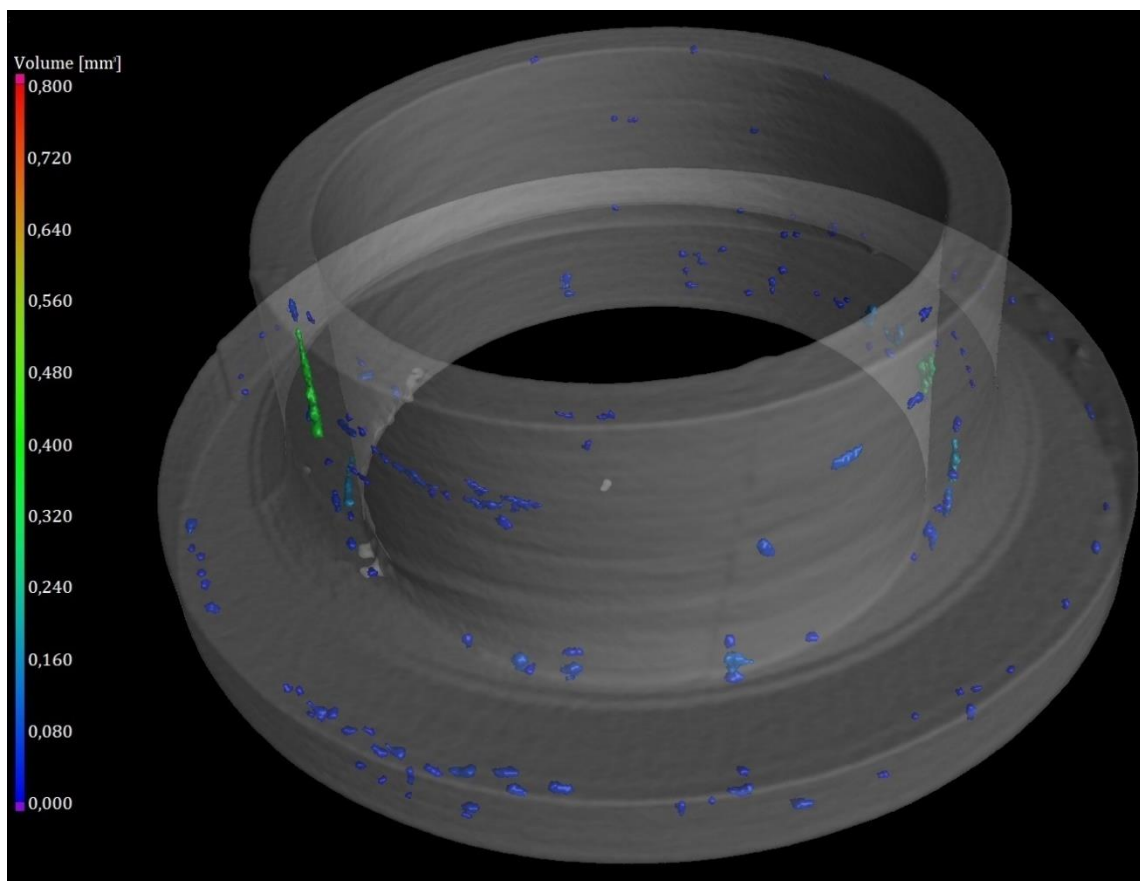
**Obr.53** Vyhodnocení vnitřních vad vysoké části zkušebního tělesa z materiálu ASA vyrobené vstříkováním



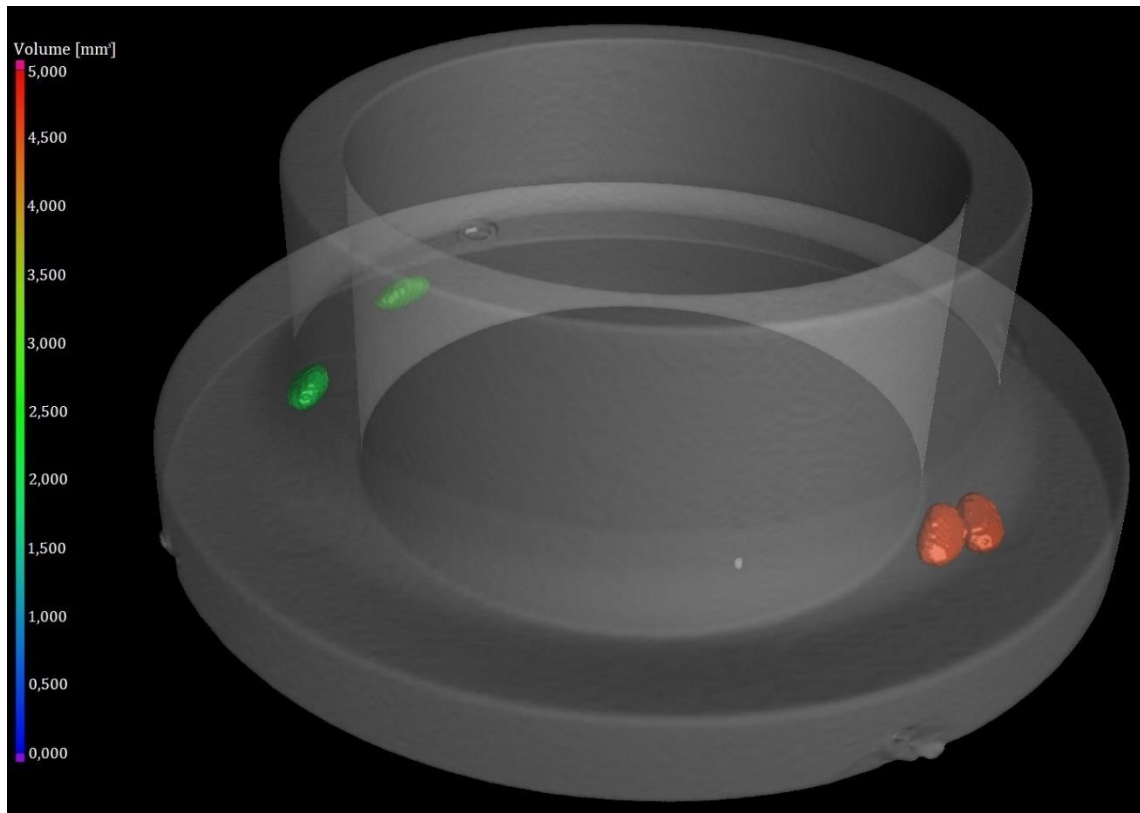
**Obr.54** Vyhodnocení vnitřních vad nízké části zkušebního tělesa z materiálu ABS vyrobené AT



**Obr.55** Vyhodnocení vnitřních vad nízké části zkušebního tělesa z materiálu ABS vyrobené vstřikováním

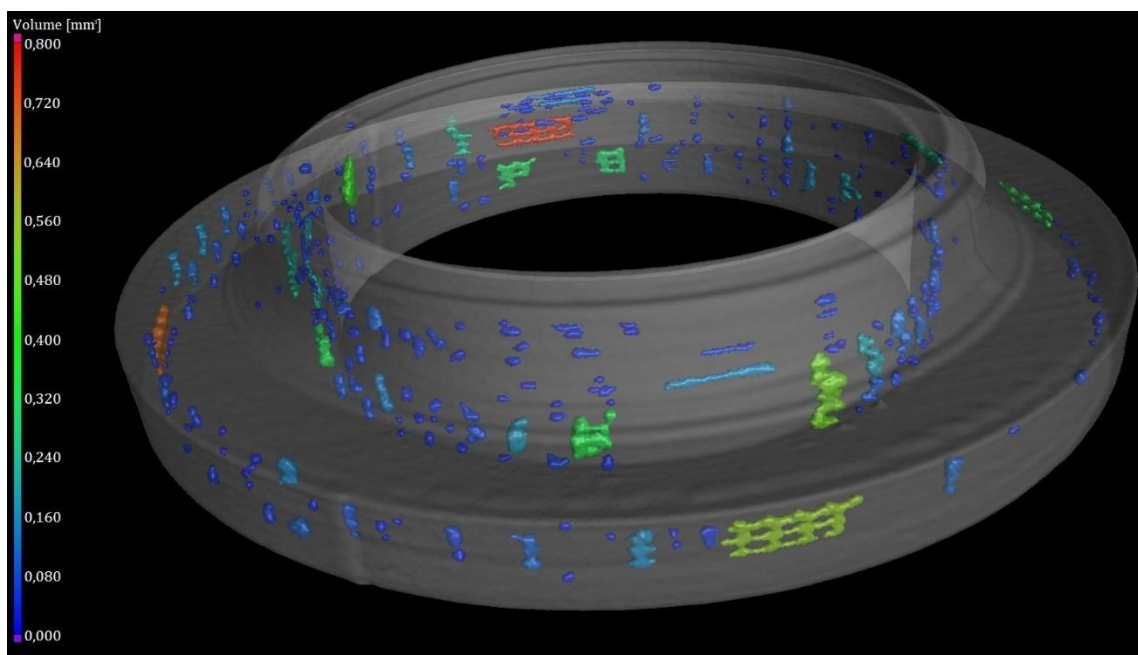


**Obr.56** Vyhodnocení vnitřních vad vysoké části zkušebního tělesa z materiálu ABS vyrobené AT

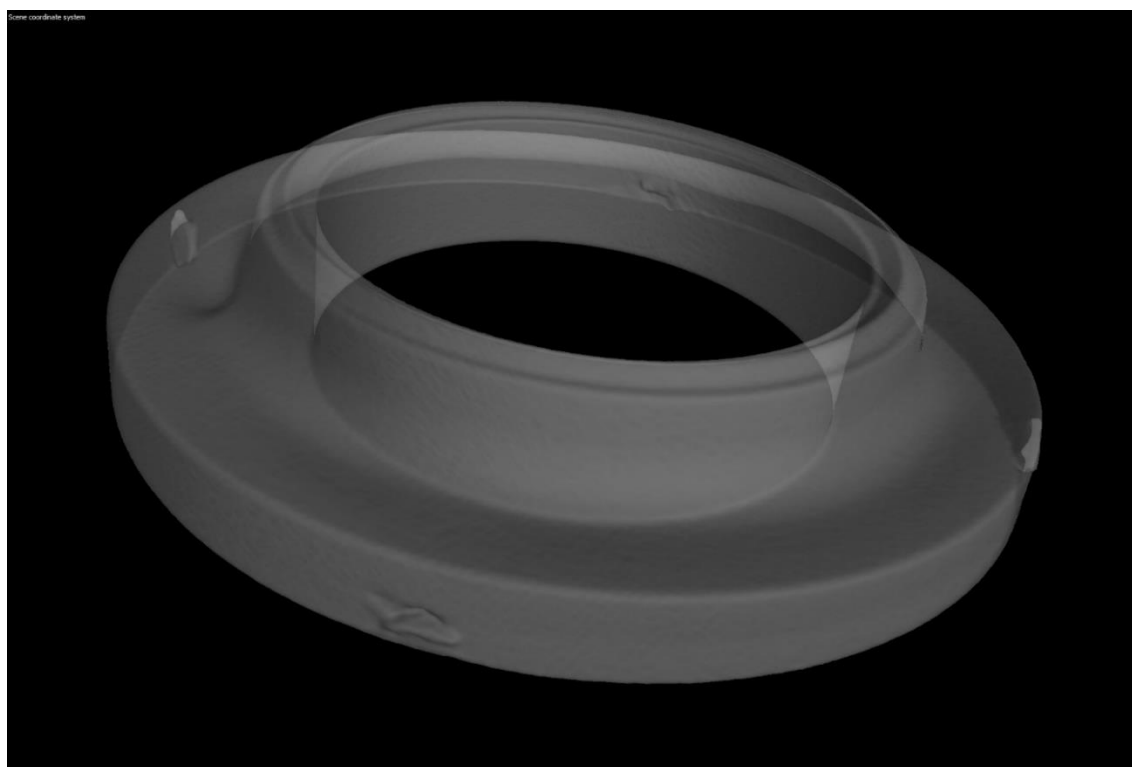


**Obr.57** Vyhodnocení vnitřních vad vysoké části zkušebního tělesa z materiálu ABS vyrobené vstřikováním

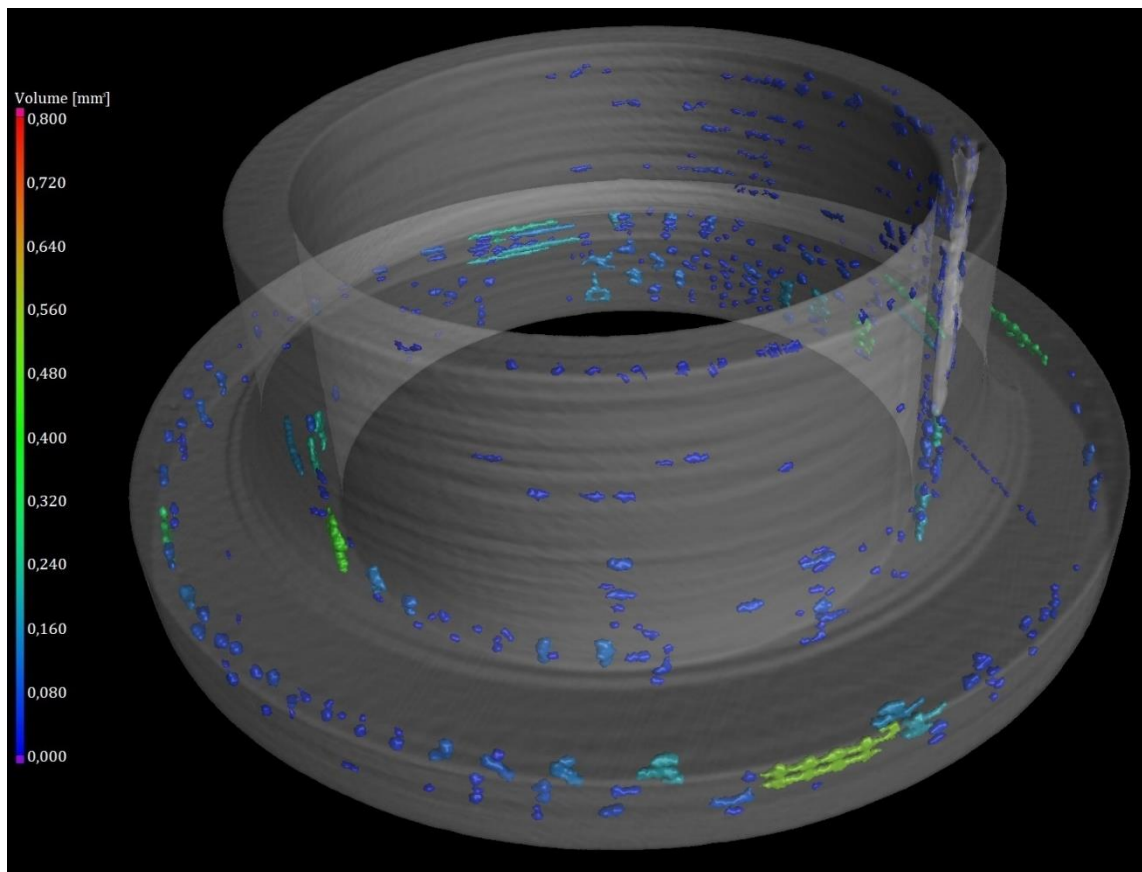




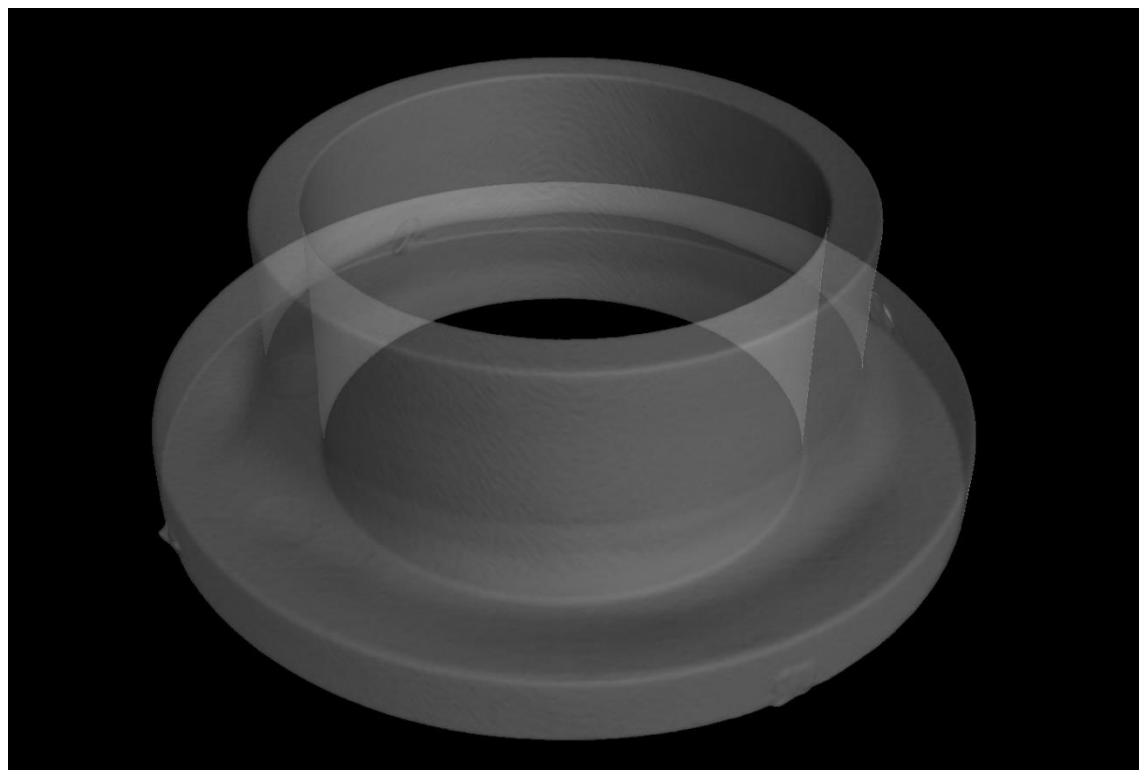
**Obr.58** Vyhodnocení vnitřních vad nízké části zkušebního tělesa z materiálu PLA vyrobené AT



**Obr.59** Vyhodnocení vnitřních vad nízké části zkušebního tělesa z materiálu PLA vyrobené vstříkováním



**Obr.60** Vyhodnocení vnitřních vad vysoké části zkušebního tělesa z materiálu PLA vyrobené AT



**Obr.61** Vyhodnocení vnitřních vad vysoké části zkušebního tělesa z materiálu PLA vyrobené vstříkování

Na obrázcích 50 až 61, získaných pomocí CT, je zobrazeno, že díly vyrobené AT jsou, na rozdíl od těch vstřikovaných, pórovité. Tato pórovitost by mohla negativně ovlivnit kvalitu. Nejvyšší pórovitost byla zaznamenána u materiálu PLA a nejnižší u ABS, což platí i pro velikost pórů. Lze tedy předpokládat, že mechanické vlastnosti PLA budou tímto nejvíce ovlivněny. Z hlediska výskytu byl u PLA největší počet pórů v celé obvodové stěně, přičemž další oblastí s výraznějším výskytem pórů byla v blízkosti hrany největšího průměru základny. Velikosti pórů se v závislosti na pozici liší podle typu materiálu. U materiálu ASA byly nalezeny největší póry v oblasti zaoblení, dosahující velikosti až 0,64 mm<sup>3</sup>. Naopak u materiálu ABS se velikost pórů téměř neměnila, s většinou pórů dosahující velikosti 0,16 mm<sup>3</sup>, s výjimkou dvou pórů, jejichž velikost činila přibližně 0,48 mm<sup>3</sup>. U materiálu PLA byly největší póry zaznamenány v blízkosti největšího průměru základny, kde dosahovaly velikosti až 0,8 mm<sup>3</sup>. Avšak velké póry byly přítomny i v oblasti zaoblení, kde se jejich velikost blížila hodnotě 0,56 mm<sup>3</sup>. Dle očekávání se ve vstřikovaných dílech nevyskytuje žádná pórovitost, pouze u ABS dílů se byly detekovány staženiny (obr.56, 58). Je proto otázkou, zda a jak tyto staženiny ovlivní proces svařování.

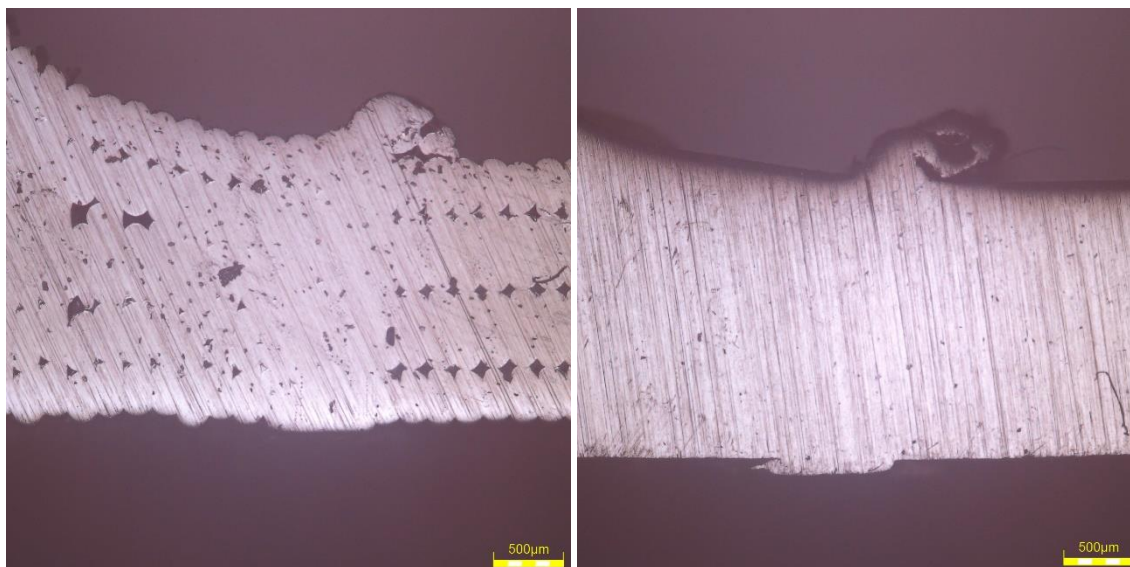
## 4.2. Vyhodnocení odchylek od kolmosti

Další rozdíly, které CT ukázala byly v odchylkách od kolmosti vstřikovaných dílů a dílů vyrobených AT. Díly vyrobené AT vykazují řádově větší odchylky od kolmosti než vstřikované. Nejvyšší odchylka byla zaznamenána u materiálu PLA a nejnižší u ABS. Hodnoty odchylek jsou uvedeny v tabulce č. 10. Je však nutné podotknout, že pro danou aplikaci lze v obou případech výroby těles odchylku považovat za velmi nízkou, která vzhledem k rozměrům svařovaných těles negativně neovlivní proces svařování.

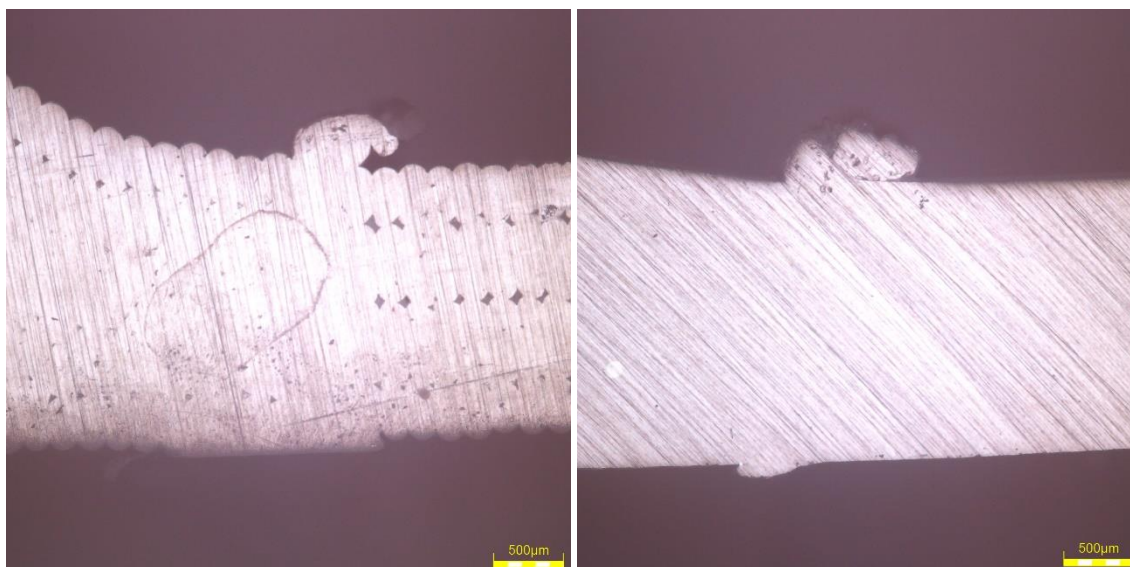
**Tab. 10** Odchylka od kolmosti

Část zkušebního tělesa	Odchylka od kolmosti ASA 301 BLACK [mm]		Odchylka od kolmosti ABS Bílá [mm]		Odchylka od kolmosti PLA Transparentní [mm]	
	Vstřikování	Aditivní technologie	Vstřikování	Aditivní technologie	Vstřikování	Aditivní technologie
Nízká	0,003	0,056	0,004	0,043	0,017	0,034
Vysoká	0,004	0,047	0,005	0,035	0,016	0,094

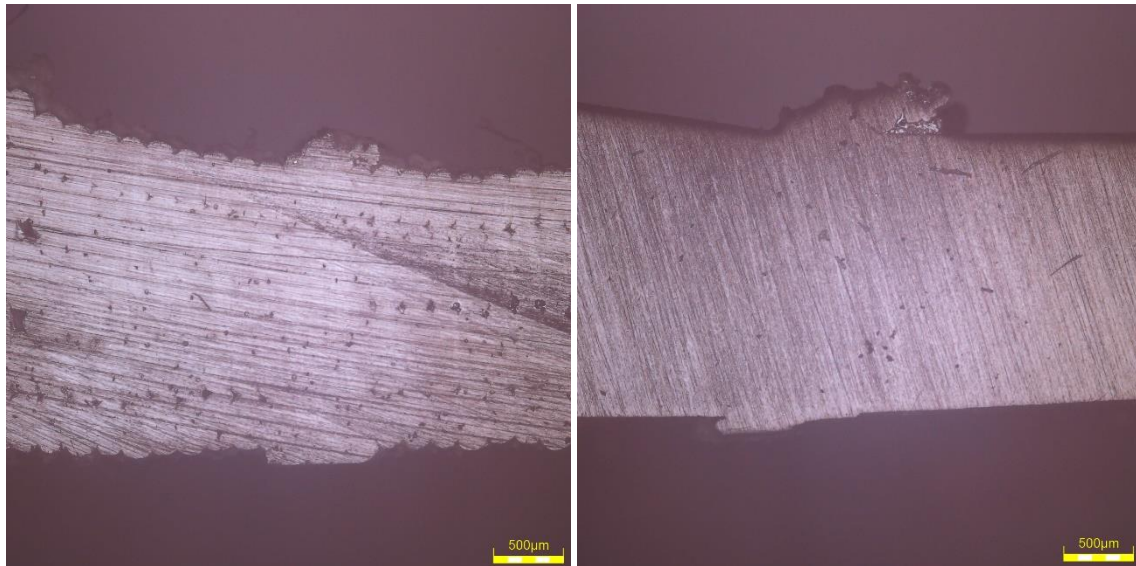
### 4.3. Vyhodnocení mikroskopie



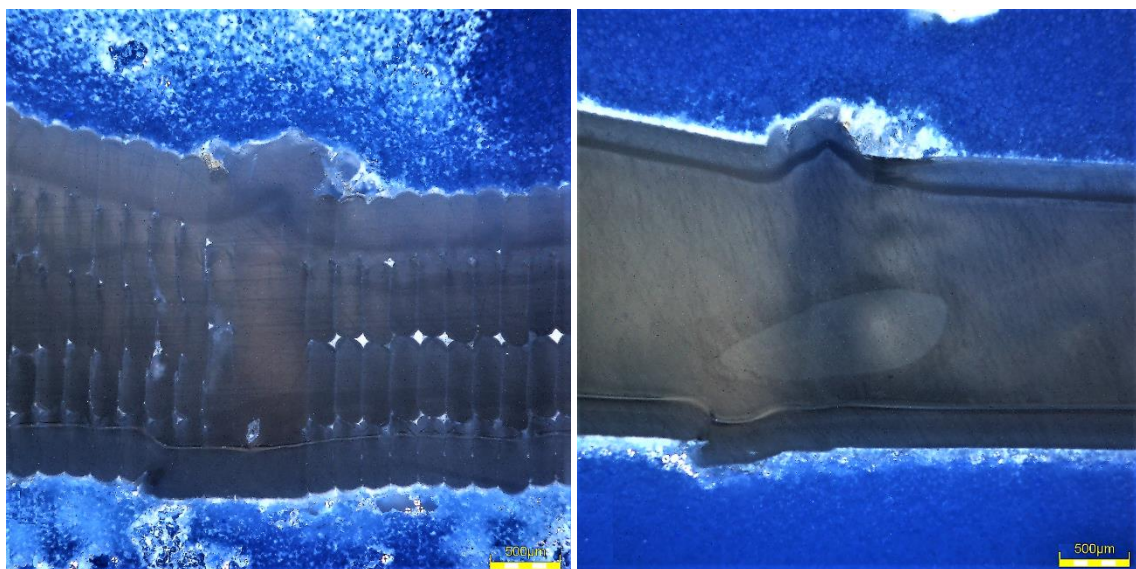
**Obr.62** Porovnání svaru vzorků z materiálu ASA Vlevo vyrobený AT Vpravo vyrobený vstřikováním



**Obr.63** Porovnání svaru vzorků z materiálu ABS Vlevo vyrobený AT Vpravo vyrobený vstřikováním



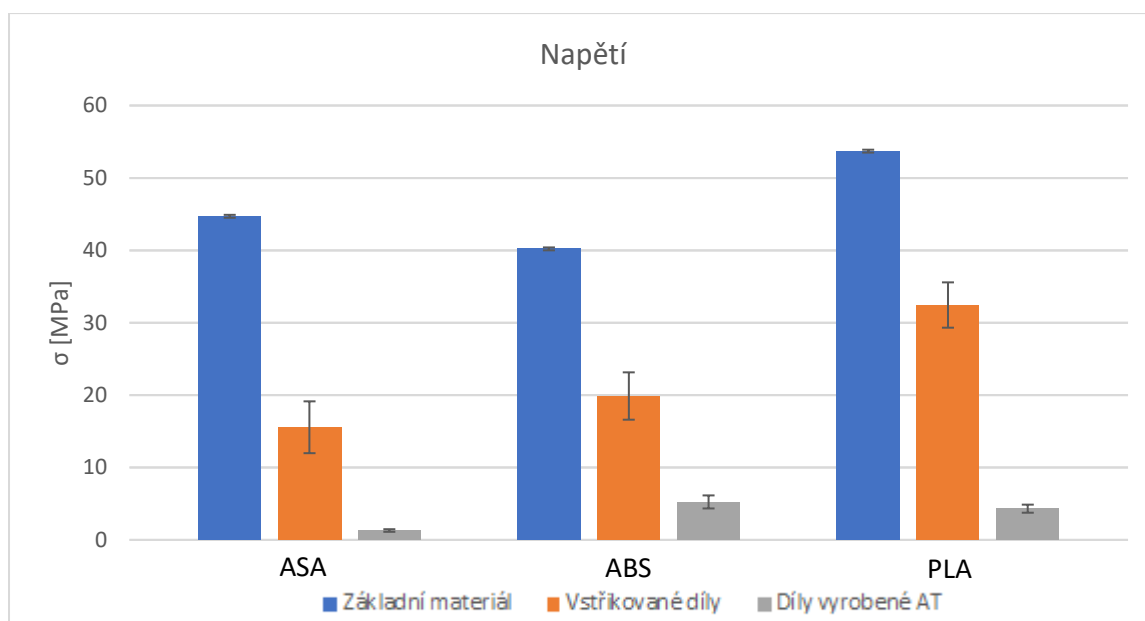
**Obr.64** Porovnání svaru vzorků z materiálu PLA Vlevo vyrobený AT Vpravo vyrobený vstřikováním



**Obr.65** Porovnání svaru vzorků z materiálu PLA prozářené polarizovaným světlem  
Vlevo vyrobený AT Vpravo vyrobený vstřikováním

Optická kontrola svaru realizovaná na mikroskopu Olympus DSX500, prezentovaná na obrázcích 62 až 65, odhalila, že vzorky byly provařeny v celé ploše bez ohledu na materiál nebo způsob výroby. Z pořízených obrázků je také patrný rozdíl v kvalitě povrchu mezi jednotlivými metodami výroby, přičemž díly vyrobené metodou AT vykazovaly výrazně hrubší povrch než díly vyrobené vstřikováním (vliv vrstvení struny). Dále lze u vzorků vyrobených AT potvrdit predikci (vyhodnocení vnitřních vad kapitola 4.1) výskytu pórů v jejich struktuře. V oblasti svarů se však díky lokálnímu natavení materiálu pórovitá struktura nevyskytuje, což je názorně vidět na obrázku 65. Zde bylo pro PLA svařená tělesa použito polarizované světlo. U ostatních materiálů vzhledem k jejich amorfnní struktuře bohužel není v tomto světle tato problematika vidět.

#### 4.4. Vyhodnocení mechanických vlastností



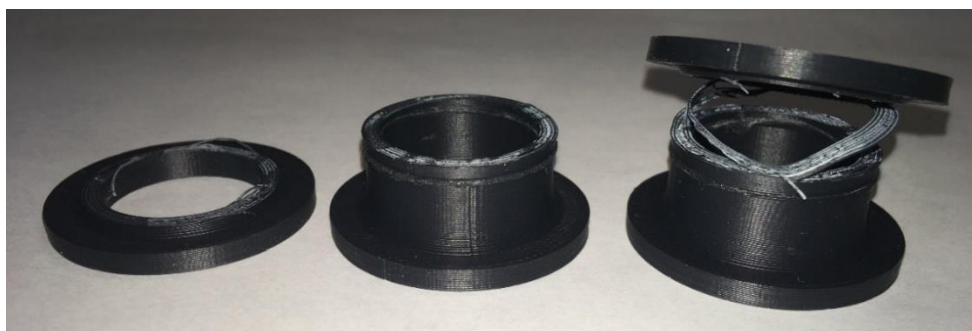
**Obr.66** Graf pevnosti základního materiálu a napětí při přetržení zkušebních těles

Na obrázku č. 66 jsou porovnávána napětí potřebná k přetržení jednotlivých vzorků. Při porovnávání pevnosti svaru u vstříkovaných dílů se ukázalo, že nejvyšších pevností dosahoval materiál PLA, který dosahuje 60,4 % pevnosti základního materiálu. Materiál ABS dosahuje 49,4 % a materiál ASA pouhých 34,8 % pevnosti základního materiálu. Tato skutečnost byla nejpravděpodobněji ovlivněna houževnatostí jednotlivých materiálů (schopnost tlumení ultrazvukových vibrací), kde materiály ASA a ASA dle změřených vlastností (volba materiálu kapitola 3.2) vykazuje výrazně vyšší tažnosti, nižší pevnosti a moduly pružnosti v tahu v porovnání s PLA. U materiálu ASA tedy došlo pravděpodobně k největšímu útlumu vibrací při svařování. U svařených dílů z ASA a ABS vyrobených technologií vstříkování bylo evidováno porušení v celém průřezu svarové plochy. U PLA vstříkovaných dílů byla pevnost svaru tak vysoká, že docházelo i k porušení v jiných oblastech, viz obr. 67.



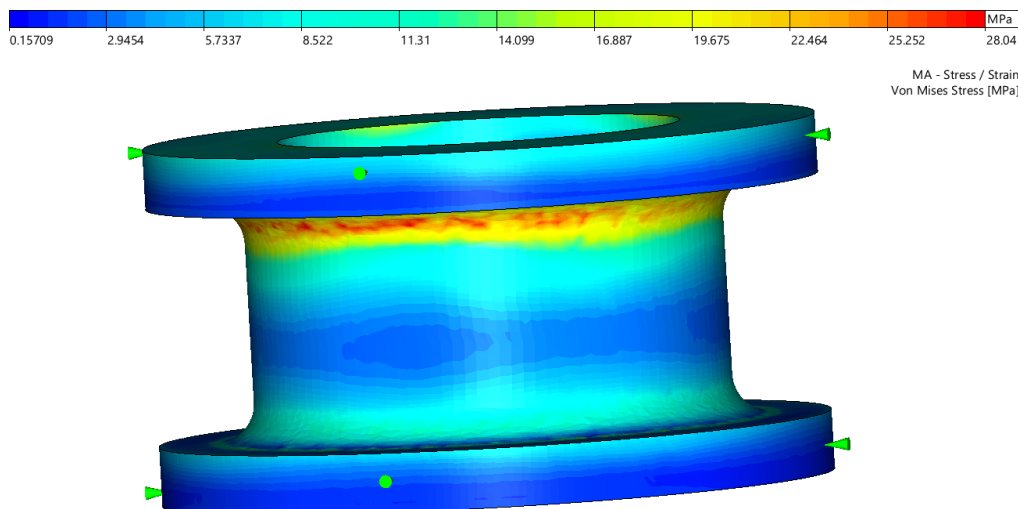
**Obr.67** Lom vstříkovaného materiálu PLA Vlevo porušení v celém průřezu svarové plochy  
Vpravo částečné porušení v oblasti mimo svarovou plochu

U dílů vyrobených AT dosahuje největších pevností materiál ABS, ale ty dosahují jen 13 % pevnosti základního materiálu. PLA dosahuje 8 % pevnosti základního materiálu a ASA pouhých 2,9 %. U dílů vyrobených AT došlo k porušení materiálu vždy mimo oblast svaru. Znamená to tedy, že pevnost svaru je tedy vyšší než pevnost v jiných částech dílů. K tomu mohlo přispět mnoho faktorů, jedním z nich jsou již zmíněné póry (vyhodnocení vnitřních vad v kapitole 4.1 a vyhodnocení mikroskopie v kapitole 4.3). Podle množství a velikosti pórů by se dalo očekávat, že nejmenší procentuální pevnost vůči základnímu materiálu bude mít PLA a největší ABS, avšak jak již bylo ukázáno skutečnost je nepatrně jiná. Dalším faktorem mohl být způsob spojování jednotlivých vrstev při výrobě AT FDM/FFF. Při té jsou jednotlivé vrstvy materiálu spojovány teplotní a někdy i mechanickou adhezí. Ze získaných dat lze tedy usuzovat, že adhezní síly vzniklé při tisku materiálu ASA 301 BLACK jsou velice nízké. I přesto, že zbylé dva materiály jsou na tom o něco lépe, jejich pevnost je stále nesrovnatelná s pevností základního materiálu. Kvůli této skutečnosti lze ultrazvukem svařované díly vyrobené AT FDM/FFF použít pouze u mechanicky nenamáhaných dílů.



**Obr.69** Lom materiálu ASA vyrobeného AT

K porušení materiálu dílů vyrobených AT navíc vždy docházelo přibližně ve stejném místě, a to v oblasti zaoblení. Proto byl v programu CADMODUL analyzován napěťový stav zkušebního tělesa vyvolaný tahovou zkouškou, viz obr. 70. Z výsledků je evidentní, že oblast výskytu největších napětí se shodují s místy porušení svařených zkušebních těles. Vyšší úroveň napětí společně s vysokou pórovitostí detekovanou v těchto oblastech vyvolala porušení právě zde.



**Obr.70** Rozložení napětí získané MKP

## 5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat vlastnosti svaru, u ultrazvukem svařených dílů vyrobených AT FDM/FFF a ultrazvukem svařených dílů vyrobených technologií vstřikování.

Pro experiment byly vybrány tři nejběžněji používané materiály pro AT FDM/FFF: ASA (ASA 301 Black od firmy NEBULA), ABS („ABS Bílá“ od firmy Filament PM) a PLA („PLA Transparentní“ taktéž od firmy Filament PM). Z nich byla vyráběna zkušební tělesa VS-2216-3, vstřikováním na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 320C a AT FDM/FFF na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3S+ s tryskou průměru 0,4 mm a výškou vrstvy 0,2 mm. Před svařením zkušebních těles proběhla nejprve kontrola vnitřních vad a kolmosti jednotlivých technologií výroby v závislosti na materiálech pomocí CT. Ta ukázala, že díly vyrobené AT obsahují velké množství pórů. Největší množství a velikost pórů byla zjištěna u materiálu PLA a nejmenší u materiálu ABS. Kontrola kolmosti ukázala, že díly vyrobené AT mají odchylku od kolmosti řádově vyšší než díly vyrobené vstřikováním. Nicméně i tato odchylka je na velmi malé úrovni a vzhledem k rozměrům svařovaných těles nelze uvažovat o negativním ovlivnění kvality svaru.

Zkušební tělesa byla následně svařena ultrazvukem na ultrazvukovém svařovacím zařízení MS sonxTOP GENESIS. Svařování proběhlo s cílem získat co největší pevnost svaru. Dále byly stanoveny mechanické vlastnosti na trhacím zařízení TiraTest 2300.

Při porovnávání pevnosti svaru u vstřikovaných dílů se ukázalo, že nejvyšší pevnost, a tedy i kvalita svaru byla dosažena u materiál PLA, který dosahuje 60,4 % pevnosti základního materiálu. Materiál ABS dosahuje 49,4 % a materiál ASA pouhých 34,8 % pevnosti základního materiálu. Tato skutečnost byla nejpravděpodobněji ovlivněna houževnatostí jednotlivých materiálů, kde materiál ASA je nejvíce houževnatý a materiál PLA nejméně. U materiálu ASA tedy došlo pravděpodobně k největšímu útlumu vibrací při svařování.

U dílů vyrobených AT došlo k porušení materiálu vždy mimo oblast svaru, není tedy možné porovnávat pevnost svaru. Byla tedy srovnána napětí nutná k porušení materiálu mezi jednotlivými vrstvami. ABS dosahuje největších pevností, ale ty dosahují jen 13 % pevnosti základního materiálu. PLA dosahuje 8 % pevnosti základního materiálu a ASA pouhých 2,9 %. Jedním z možných důvodů porušení mimo svar mohou být již zmíněné póry. Další faktor, který mohl pevnost ovlivnit, jsou adhezni síly, které vznikají mezi vrstvami při tisku. Ze získaných dat lze tedy usuzovat, že adhezni síly vzniklé při tisku materiálu ASA jsou velice nízké. I přesto, že zbylé 2 materiály jsou na tom o něco lépe, jejich pevnost je stále nesrovnatelná s pevností základního materiálu.

Na základě výsledků z těchto testů lze konstatovat, že ultrazvukem svařované díly vyrobené AT FDM/FFF lze použít pouze na mechanicky nenamáhaných dílech.



## Použitá literatura

- [1] Nekonenční metody obrábění 10. díl | MM Průmyslové spektrum. *www.mmspektrum.com* [online]. [vid. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonevncni-metody-obrabeni-10-dil>
- [2] LIGON, Samuel Clark, Robert LISKA, Jürgen STAMPFL, Matthias GURR a Rolf MÜLHAUPT. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews* [online]. 2017, **117**(15), 10212–10290. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/acs.chemrev.7b00074
- [3] LOM (Laminated Object Manufacturing): 3D Printing with Layers of Paper. *Sculpteo* [online]. [vid. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>
- [4] KOČÍ, Jakub. Vše co jste chtěli vědět o tiskových pryskyřicích a bezpečnosti SLA tisku (ale báli jste se zeptat). *3D tiskárny Original Prusa* [online]. 13. září 2022 [vid. 2023-03-27]. Dostupné z: [https://blog.prusa3d.com/cs/vse-co-jste-chteli-vedet-o-tiskovych-pryskyricich-a-bezpecnosti-sla-tisku-ale-bali-jste-se-zeptat\\_70758/](https://blog.prusa3d.com/cs/vse-co-jste-chteli-vedet-o-tiskovych-pryskyricich-a-bezpecnosti-sla-tisku-ale-bali-jste-se-zeptat_70758/)
- [5] HUANG, Jigang, Qin QIN a Jie WANG. A review of stereolithography: Processes and systems. *Processes*. 2020, **8**(9), 1138. ISSN 2227-9717.
- [6] Nekonenční metody obrábění 9. díl | MM Průmyslové spektrum. *www.mmspektrum.com* [online]. [vid. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonevncni-metody-obrabeni-9-dil>
- [7] *3D Printing Technology | Objet Polyjet 3D Printing | VeroWhitePlus* [online]. [vid. 2023-03-27]. Dostupné z: <http://www.3daddfab.com/technology/>
- [8] Polyjet 3D printing: Technology Overview. *3Faktur* [online]. [vid. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://3faktur.com/en/3d-printing-materials-technologies/polyjet-3d-printing-technology-overview/>
- [9] *PolyJet Technology for 3D Printing | Stratasys* [online]. [vid. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/polyjet-technology/>
- [10] *Case Study* [online]. [vid. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/resources/case-studies/>
- [11] *Resources | 3D Systems* [online]. [vid. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/resources/case-studies>
- [12] Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. *Formlabs* [online]. [vid. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [13] What is SLS 3D printing? *Hubs* [online]. [vid. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>
- [14] Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing Service in India. *THINK3D* [online]. [vid. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.think3d.in/services/3d-printing/selective-laser-sintering/>

- [15] GIBSON, Ian, David W. ROSEN, Brent STUCKER a Mahyar KHORASANI. *Additive manufacturing technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2021. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [16] FFF vs FDM: 3d printing, extrusion, 3d printer. *Digital Manufacturing Store Top 3D Shop* [online]. [vid. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://top3dshop.com/blog/fff-vs-fdm-difference-and-best-printers>
- [17] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Getting Started with 3D Printing*. B.m.: Maker Media, Inc., 2021. ISBN 1-68045-640-7.
- [18] PRŮŠA, Josef. Vše o tryskách s různým průměrem. *Josef Prusa - 3D tisk a tiskárny* [online]. 28. květen 2018 [vid. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruznym-prumerem/>
- [19] The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY, & More. *All3DP* [online]. 23. duben 2022 [vid. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scarabelt-corexy-polar/>
- [20] *Typy tiskáren a rozdíly mezi nimi | Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2023-03-12]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi\\_112464](https://help.prusa3d.com/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi_112464)
- [21] PATTERSON, Albert E, Charul CHADHA a Iwona M JASIUK. Identification and mapping of manufacturability constraints for extrusion-based additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021, 5(2), 33. ISSN 2504-4494.
- [22] *CoreXY Kinematics - 3D Distributed* [online]. 7. prosinec 2020 [vid. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://3ddistributed.com/corexy-3d-printer/corexy-kinematics/>
- [23] P, Alexandra. Blackbelt, the first 3D printer using a conveyer belt. *3Dnatives* [online]. 12. květen 2017 [vid. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/blackbelt-autodesk-3d-printer120520174/>
- [24] FLYNT, Joseph. Cartesian, Delta, and Polar 3D Printers: What are They and What's the Difference? *3D Insider* [online]. 13. březen 2019 [vid. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/cartesian-vs-delta-vs-polar/>
- [25] *Prusa Tabulka Materiálů | Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/materials#\\_ga=2.74934802.1264355706.1668244773-708131406.1652699427](https://help.prusa3d.com/materials#_ga=2.74934802.1264355706.1668244773-708131406.1652699427)
- [26] *PLA | Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/article/pla\\_2062#\\_ga=2.103314176.129120882.1677330635-2005279087.1667224373](https://help.prusa3d.com/article/pla_2062#_ga=2.103314176.129120882.1677330635-2005279087.1667224373)
- [27] Pill Box 2 weeks. *Cults 3D* [online]. [vid. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://cults3d.com/en/3d-model/home/pill-box-2-weeks>
- [28] *PETG | Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2023-03-03]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/article/petg\\_2059](https://help.prusa3d.com/article/petg_2059)

- [29] PRŮŠA, Josef. Jak vyřešit nejčastější problémy při 3D tisku. *Josef Prusa - 3D tisk a tiskárny* [online]. 27. duben 2018 [vid. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-vyresit-nejcastejsi-problemy-pri-3d-tisku/>
- [30] ASA | *Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2023-03-04]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/article/asa\\_1809](https://help.prusa3d.com/article/asa_1809)
- [31] ABS | *Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2023-03-04]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/article/abs\\_2058](https://help.prusa3d.com/article/abs_2058)
- [32] Polykarbonát (PC) | *Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2023-03-04]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/article/polykarbonat-pc\\_165812](https://help.prusa3d.com/article/polykarbonat-pc_165812)
- [33] Polypropylen (PP) | *Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2023-03-17]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/article/polypropylen-pp\\_167126](https://help.prusa3d.com/article/polypropylen-pp_167126)
- [34] Polyamid (Nylon) | *Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2023-03-17]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/article/polyamid-nylon\\_167188](https://help.prusa3d.com/article/polyamid-nylon_167188)
- [35] *Ultimate Materials Guide - 3D Printing with Nylon* [online]. [vid. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/nylon/>
- [36] HOMOLA, Jan. Jak přesný je 3D tisk? Co musíte vědět o tolerancích a rozměrové přesnosti u tištěných dílů. *3D-tisk.cz* [online]. 7. duben 2022 [vid. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/jak-presny-je-3d-tisk-co-musite-vedet-o-tolerancich-a-rozmerove-presnosti-u-tistenych-dilu/>
- [37] ROSLI, Amirah Azwani, Raa Khimi SHUIB, Ku Marsilla Ku ISHAK, Zuratul Ain Abdul HAMID, Muhammad Khalil ABDULLAH a Arjulizan RUSLI. Influence of bed temperature on warpage, shrinkage and density of various acrylonitrile butadiene styrene (ABS) parts from fused deposition modelling (FDM). In: *AIP Conference Proceedings*. B.m.: AIP Publishing LLC, 2020, s. 020072. ISBN 0-7354-2030-0.
- [38] DILBEROGLU, Ugur M, Seyda SIMSEK a Ulas YAMAN. Shrinkage compensation approach proposed for ABS material in FDM process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2019, **34**(9), 993–998. ISSN 1042-6914.
- [39] KOČÍ, Jakub. Jak vyhladit 3D tisky pomocí chemického vyhlazování. *3D tiskárny Original Prusa* [online]. 25. červen 2020 [vid. 2023-03-20]. Dostupné z: [https://blog.prusa3d.com/cs/jak-vyhladit-3d-tisky-pomoci-chemickeho-vyhlazovani\\_36268/](https://blog.prusa3d.com/cs/jak-vyhladit-3d-tisky-pomoci-chemickeho-vyhlazovani_36268/)
- [40] KOČÍ, Jakub. Jak tisknout zdravotně nezávadné 3D modely. *3D tiskárny Original Prusa* [online]. 4. prosinec 2020 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: [https://blog.prusa3d.com/cs/jak-tisknout-zdravotne-nezavadne-3d-modely\\_40666/](https://blog.prusa3d.com/cs/jak-tisknout-zdravotne-nezavadne-3d-modely_40666/)
- [41] 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. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13061284
- [42] Automotive. *MS Ultrasonic Technology Group* [online]. [vid. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.ms-ultrasonic.cz/odvetvi/automotive/>

- [43] Textilní průmysl. *MS Ultrasonic Technology Group* [online]. [vid. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.ms-ultrasonic.cz/odvetvi/textilni-prumysl/>
- [44] Spotřební zboží. *MS Ultrasonic Technology Group* [online]. [vid. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.ms-ultrasonic.cz/odvetvi/spotrebni-zbozi/>
- [45] MS sonxSYS SEAL pouch. *MS Ultrasonic Technology Group* [online]. [vid. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.ms-ultrasonic.cz/produkty/ultrazvukove-systemy-ms-sonxsys/ms-sonxsys-seal-pouch/>
- [46] Ultrazvukové speciální jednoúčelové stroje MS sonxMAC. *MS Ultrasonic Technology Group* [online]. [vid. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.ms-ultrasonic.cz/produkty/ultrazvukove-specialni-jednoucelove-stroje-ms-sonxmac/>
- [47] Ultrazvukové svařování - Ultratech - svářečky-sonotrody-konvertory. *Ultratech* [online]. [vid. 2023-04-14]. Dostupné z: <http://ultratech.cz/ultrazvukove-svarovani/>
- [48] *Guide To US Plastic Assembly.pdf* [online]. Dostupné z: <https://documents.dukane.com/DesignGuides/Guide%20To%20US%20Plastic%20Assembly.pdf>
- [49] RANI, M Roopa a R RUDRAMOORTHY. Computational modeling and experimental studies of the dynamic performance of ultrasonic horn profiles used in plastic welding. *Ultrasonics*. 2013, **53**(3), 763–772. ISSN 0041-624X.
- [50] TROUGHTON, Michael J. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. B.m.: William Andrew, 2008. ISBN 0-8155-1976-1.
- [51] VILLEGAS, Irene Fernandez. Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites. *Frontiers in Materials* [online]. 2019, **6** [vid. 2023-02-05]. ISSN 2296-8016. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2019.00291>
- [52] KOPÁČ, Dalibor. *Monitorizace svařovacích parametrů při ultrazvukovém svařování polyamidu*. B.m., 2012. Disertační práce. TUL.
- [53] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2015 [vid. 2023-03-30]. ISBN 978-80-88058-66-3. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/book/180-polymery>
- [54] *ZEISS METROTOM 1500 - (CT) computed tomography machine by ZEISS Industrial Metrology / DirectIndustry* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/zeiss-industrial-metrology/product-5693-555780.html>
- [55] MAXA, Ondřej. *Svařitelnost PLA bio-kompozitů technologií ultrazvukového svařování*. Liberec, 2022. Technická univerzita v Liberci.
- [56] LACHMANN, Petr. *Vliv typu a koncentrace přísad na proces ultrazvukového svařování PLA bio-kompozitů*. Liberec, 2022. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.