

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a  
komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

Jakub Jančí



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## POKOVENÍ VYBRANÝCH MATERIÁLŮ PRO 3D TISK

PLATING OF MATERIALS FOR 3D PRINTING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Jančí

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý,  
Ph.D.

BRNO 2024



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Jakub Jančí

**ID:** 240845

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Pokovení vybraných materiálů pro 3D tisk

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte technické listy vybraných materiálů pro 3D tisk zejména z pohledu chemické odolnosti, pokovení a pájení.

Navrhněte a diskutujte metody chemického a elektrolytického pokovení.

Navrhněte a dle možností realizujte testovací vzorky.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího práce

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 30.5.2024

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Starý, Ph.D.

**doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá úvodem do problematiky pokovování plastových dílů vytištěných na 3D tiskárně. Součástí práce je představení a porovnání technologií 3D tisku a materiálů, zejména z pohledu chemické odolnosti, pokovování a pájení, které se pro technologii výroby 3D tisku používají. V rámci bakalářské práce je detailně popsána a diskutována problematika nanášení kovových povlaků na vytištěné objekty z různých materiálů pro 3D tisk. Praktická část bakalářské práce byla zaměřena na výrobu testovacích vzorků a jejich následný proces pokovování.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

3D tisk, chemické bezproudé pokovování, galvanické pokovování, PLA, ABS, PETG, PEI, Shadow.

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with an introduction to the issue of plating plastic parts printed on a 3D printer. The thesis includes an overview and comparison of 3D printing technologies and materials, particularly from the perspective of chemical resistance, plating, and soldering, which are used in 3D printing manufacturing technology. The thesis provides a detailed description and discussion on the application of metal coatings to printed objects made from various 3D printing materials. The practical part of the thesis focused on the production of test samples and their subsequent plating process.

## **KEYWORDS**

3D printing, chemical non-electrolytic metallization, electroplating, PLA, ABS, PETG, PEI, Shadow.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

JANČÍ, Jakub. Pokovení vybraných materiálů pro 3D tisk [online]. Brno, 2024 [cit. 2024 05-29]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160336>.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Starý.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Jakub Jančí</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>240845</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Bakalářská práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2023/24</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Pokovení vybraných materiálů pro 3D tisk</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2024

-----  
podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za veškerou poskytnutou odbornou pomoc, rady a cenné připomínky, které mě vedly správným směrem při vypracovávání bakalářské práce. Dále děkuji firmě Čemebo Blansko a technologovi panu Josefovi Valentovi za odbornou pomoc a poskytnutí profesionální chemie.

V Brně dne: 24. května 2024

-----  
podpis autora

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1. TECHNOLOGIE 3D TISKU</b> .....	<b>12</b>
1.1 FDM – FUSED DEPOSITION MODELING .....	12
1.2 SLS – SELECTIVE LASER SINTERING .....	13
1.3 SLA – STEREOLITHOGRAPHY .....	14
<b>2. MATERIÁLY PRO 3D TISK</b> .....	<b>16</b>
2.1 PLA – POLYLACTIC ACID .....	16
2.1.1 Výroba filamentu PLA .....	16
2.1.2 Chemické odolnost .....	17
2.1.3 Mechanická odolnost .....	17
2.1.4 Pokovování PLA .....	17
2.2 PETG – POLYETHYLENE TEREPHTHALATE MODIFIED WITH GLYCOL .....	18
2.2.1 Výroba filamentu PETG .....	18
2.2.2 Chemická odolnost .....	19
2.2.3 Mechanická odolnost .....	19
2.2.4 Pokovování PETG .....	20
2.3 ABS – ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE .....	20
2.3.1 Výroba filamentu ABS .....	20
2.3.2 Chemická odolnost .....	21
2.3.3 Mechanické vlastnosti .....	21
2.3.4 Pokovování ABS .....	21
2.4 PEI – POLYETERIMID .....	22
2.4.1 Výroba filamentu PEI .....	22
2.4.2 Chemická odolnost .....	23
2.4.3 Mechanické vlastnosti .....	23
2.4.4 Pokovení PEI .....	23
<b>3. NANÁŠENÍ KOVOVÝCH POVLAKŮ</b> .....	<b>24</b>
3.1 CHEMICKÉ BEZPROUDÉ POKOVOVÁNÍ .....	24
3.1.1 Bezproudé nanášení na plastové materiály .....	24
3.2 GALVANICKÉ POKOVOVÁNÍ .....	26
3.2.1 Princip galvanického pokovování .....	26
3.2.2 Příprava vytištěných dílů .....	26
3.3 POKOVOVÁNÍ MĚDÍ .....	27
3.3.1 Proces pokovování mědi na plastových materiálech .....	28
3.4 POKOVOVÁNÍ NIKLEM .....	29
3.5 POKOVOVÁNÍ ZLATEM .....	29
3.6 BEZPEČNOST PRÁCE .....	29
<b>4. PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>30</b>
4.1 POZOROVÁNÍ POVRCHU MATERIÁLŮ .....	30
4.2 NÁVRH TESTOVACÍCH DESTIČEK .....	31
4.3 3D TISK DESTIČEK .....	32
4.4 APLIKACE GRAFITOVÉ VRSTVY .....	32

4.4.1	<i>Laboratorní předúprava povrchu</i> .....	32
4.4.2	<i>Průmyslová příprava povrchu</i> .....	33
4.4.3	<i>Proces Shadow s koloidním grafitem</i> .....	34
4.5	KONTROLA POVRCHU GRAFITU .....	36
4.5.1	<i>Optická kontrola</i> .....	36
4.5.2	<i>Tloušťka vrstvy grafitu</i> .....	37
4.5.3	<i>Měření vodivosti</i> .....	39
4.6	LABORATORNÍ GALVANICKÉ POKOVOVÁNÍ MĚDÍ .....	40
4.6.1	<i>Příprava pro pokovování</i> .....	40
4.6.2	<i>Proces pokovování</i> .....	41
4.6.3	<i>Optická kontrola povrchu</i> .....	41
4.6.4	<i>Tloušťka vrstvy Cu</i> .....	42
4.6.5	<i>Zkoušení pájení PEI destičky</i> .....	44
4.6.6	<i>Zkoušení pájení ABS destičky</i> .....	46
5.	<b>ZÁVĚR</b> .....	47
	<b>SEZNAM ZKRATEK</b> .....	51

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 - FDM tiskárna Elego Neptune 3 Plus [3] .....	13
Obrázek 1.2 - Bastianova 3D tiskárna OpenSLS [13] .....	14
Obrázek 1.3 - SLA 3D tiskárna Formlabs [14] .....	15
Obrázek 2.1 - Chemická struktura monomeru kyseliny mléčné [15] .....	16
Obrázek 2.2 - Chemická struktura (a) PET a (b) PETG [16] .....	18
Obrázek 2.3 - Chemická struktura ABS [17] .....	20
Obrázek 2.4 - Chemická struktura PEI [22] .....	22
Obrázek 3.1 - Vytisknutý 3D díly [25] .....	28
Obrázek 3.2 - 3D díly pokovené mědí [25] .....	28
Obrázek 4.1 - PEI .....	30
Obrázek 4.2 - ABS .....	30
Obrázek 4.3 - PETG .....	30
Obrázek 4.4 - PEI po mechanickém lisování .....	30
Obrázek 4.5 - ABS po mechanickém lisování .....	30
Obrázek 4.6 - PETG po mechanickém lisování .....	30
Obrázek 4.7 - Mikroskop Olympus .....	31
Obrázek 4.8 - Mechanický lis .....	31
Obrázek 4.9 - Výkres destičky pro materiál ABS .....	31
Obrázek 4.10 - 3D tiskárna Ender 3 .....	32
Obrázek 4.11 - Linka povrchové úpravy Čemebo Blansko .....	34
Obrázek 4.12 - Držák pro uchycení dílů v lázních .....	34
Obrázek 4.13 - Sušička HS 61 A .....	35
Obrázek 4.14 - PEI povrch pokrytý grafitem, 45x přiblížení mikroskopu .....	36
Obrázek 4.15 - PEI povrch pokrytý grafitem, 90x přiblížení mikroskopu .....	36
Obrázek 4.16 - Vážení očištěné destičky .....	37
Obrázek 4.17 - Vážení po nanesení grafitu .....	37
Obrázek 4.18 - Ohm-metr UT58C .....	39
Obrázek 4.19 - Destička s body pro měření .....	39
Obrázek 4.20 - Držák na destičky pro galvanické pokovování .....	40
Obrázek 4.21 - Háček pro uchycení měděných anod .....	40
Obrázek 4.22 - Destička PEI po vyndání z galvanické lázně .....	41
Obrázek 4.23 - PEI - galvanická Cu, přiblížení 45x .....	41
Obrázek 4.24 - PEI - galvanická Cu, přiblížení 90x .....	41
Obrázek 4.25 - ABS - galvanická Cu, přiblížení 45x .....	42
Obrázek 4.26 - ABS - galvanická Cu, přiblížení 90x .....	42
Obrázek 4.27 - PETG - galvanická Cu, přiblížení 45x .....	42
Obrázek 4.28 - PETG - galvanická Cu, přiblížení 90x .....	42
Obrázek 4.29 - Pájecí stanice JBC .....	44
Obrázek 4.30 - Pájka PbSnBi .....	44
Obrázek 4.31 - Pájený spoj s drátkem na destičce PEI .....	45
Obrázek 4.32 - Utržený spoj .....	45
Obrázek 4.33 - Místo vytrženého spoje .....	45
Obrázek 4.34 - Očištěný utržený spoj od grafitu .....	46
Obrázek 4.35 - Utržený spoj .....	46
Obrázek 4.36 - Pájený spoj na destičce ABS .....	46



## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Změřené hmotnosti vzorků a vypočítaná tloušťka grafitu.....	38
Tabulka 2 - Měření vodivosti grafitu na rozdílných materiálech.....	39
Tabulka 3 - Změřené hmotnosti vzorků a vypočítaná tloušťka mědi .....	44

# ÚVOD

V současné době se výroba nových konstrukčních dílů či náhradních dílů připravuje technologií 3D tisku. Technologie 3D tisku spočívá v procesu vrstvení nových vrstev na již vytištěné předchozí vrstvy. V našem případě používaný FDM 3D tisk, který pracuje na principu roztavení filamentu a nanášení roztaveného plastu, nejčastěji PLA, ABS nebo jiné materiály, které se používají. Po jeho následném vychladnutí a vytvrzení je objekt vyroben.

S technologií 3D tisku se váže i spousta problémů, především jejich odolnost a vodivost, neboť většina filamentu je z plastových materiálů, které se chovají jako ideální izolant. V případech, kdy chceme, nebo aplikace vodivost objektu a jeho následné použití v elektrotechnických a elektrických aplikacích vyžaduje, lze nanášet kovové povlaky na vytištěné plastové objekty.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na zkoumání a hodnocení efektivity metody galvanického pokovování 3D tištěných dílů. Zvláštní důraz je kladen na studium mechanické pevnosti a mikrostruktury výsledných povrchů, což je klíčové pro jejich praktické využití. Práce také analyzuje vliv různých předúprav povrchu na konečné vlastnosti pokovených dílů. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

Teoretická část popisuje druhy materiálů pro 3D tisk, především z hlediska chemické a mechanické odolnosti. Následně se zabývá technologií pokovování, kterou lze rozdělit na dva základní principy. Chemické bezproudé pokovování a galvanické pokovování.

Praktická část se zaměřuje na návrh testovacích destiček a jejich následný 3D tisk. Dále jsou zkoumány jejich mechanické a chemické vlastnosti. Zabývá se předúpravou povrchu před následným procesem Shadow s koloidním grafitem a následným galvanickým pokovováním. Výsledky technologických experimentů jsou popsány v závěru bakalářské práce.

# 1. TECHNOLOGIE 3D TISKU

V této části bakalářské práce se věnujeme technologii 3D tisku. 3D tisk je technologie, kdy za pomoci specializovaných programů pro návrh a modelaci 3D objektů v počítači vytváříme digitální soubor, který je následně pomocí 3D tiskárny vyroben (vytištěn). V dnešní době máme možnost zvolit z více druhů 3D tiskáren a materiálů, z kterých chceme, aby daný výrobek byl. Každá technologie 3D tisku má své výhody a nevýhody a je potřeba správně zvolit metodu i materiál podle potřebné aplikace, pro který má být náš výrobek použit. [1]

## 1.1 FDM – Fused Deposition Modeling

Fused deposition modeling neboli zkráceně FDM, je v současné době nejpoužívanější a nejvíce rozsáhlá metoda 3D tisku. Je to metoda vytlačování materiálu aditivní výroby, kde se materiály vytlačují tryskou a spojují se za účelem vytvoření 3D objektu. [1]

Typická FDM 3D tiskárna (viz. Obrázek 1.1), která vlákno na bázi polymeru protlačí vyhřívanou tryskou, která roztaví materiál a uloží jej ve 2D vrstvách na stavební platformu. Ještě teplé se tyto vrstvy vzájemně spojí, a nakonec vytvoří trojrozměrnou část. Ve svém jádru je technika FDM relativně přímočará. Jeho hlavní funkce jsou vykonávány dvěma odlišnými systémy, jeden je zodpovědný za vytlačování a nanášení a druhý za pohyb tiskové hlavy. Obecně řečeno, systém vytlačování a nanášení lze rozdělit na dva hlavní systémy: „studený konec“ a „horký konec“. Termoplasty používané při FDM 3D tisku se často dodávají v cívkách s filamentem a studený konec je zodpovědný za podávání tohoto materiálu z cívky do 3D tiskárny. Studený konec také řídí rychlost, jakou je materiál ukládán na druhý konec, lze taky nazvat jako „průtok“. Horký konec je na druhé straně 3D tiskárny zodpovědný za zahřívání pohybujícího se plastového materiálu do té míry, že je dostačující pro průchod tryskou. Tento krok zahrnuje různé komponenty, včetně topných patrol, chladičů a trysek. [1]

Posuvy horkého konce lze dosáhnout různými způsoby. Zdaleka dominantním souřadnicový systém pro 3D tiskárny je kartézský systém, kde je poloha dána třemi lineárními souřadnicemi (X, Y a Z). Kartézské stroje lze dále kategorizovat z hlediska pohybového systému. 3D tiskárny Delta používají vertikální kolejnice a tři nezávisle ovládaná ramena připojená k horkému konci, tiskárny SCARA využívají k provádění pohybu vodorovně se pohybující ramena. Zcela nejpoužívanějším typem 3D tiskárny s kartézským souřadnicovým systémem jsou přímočaré stroje, které pro svůj pohyb používají krokové motory, kteří řídí pohyb v osách X, Y a v ose Z pomocí systémů šroubů, řemenů a kladek. V poslední době se objevil nový typ pásové 3D tiskárny. Nabízí kontinuální tisk v tom smyslu, že se stavební platforma pohybuje jako dopravní pás, což umožní výrobu dlouhých dílů nebo nepřetržitou výrobu. Existuje však malá kategorie 3D

tiskáren FDM, které používají systém polárních souřadnic, který k popisu fyzické polohy používají lineární a úhlové hodnoty. [1]

Filament neboli materiál pro 3D tisk, dlouhý pramen materiálu na bázi polymeru, který je navinutý na cívce. Nejběžnější vlákna pro FDM jsou PLA, PETG a ABS. S materiálem se váže i jedna z největších výhod FDM tiskáren, protože běžná vlákna jsou zdaleka nejlevnějším materiálem pro 3D tisk, zejména se srovnáním s jinými metodami 3D tisku, jako je SLS nebo tisk na bázi pryskyřic. Výhodou je i flexibilita materiálů, na jakékoli FDM tiskárně lze tisknout širokou škálu termoplastických materiálů. Hlavní nevýhodou tiskáren je fakt, že tiskárny vyžadují často mnoho úprav a seřizování (zejména vyrovnávání lůžka), aby tisk dosáhl úrovně spolehlivosti a kvalit jiných metod. [1]



Obrázek 1.1 - FDM tiskárna Elegoo Neptune 3 Plus [3]

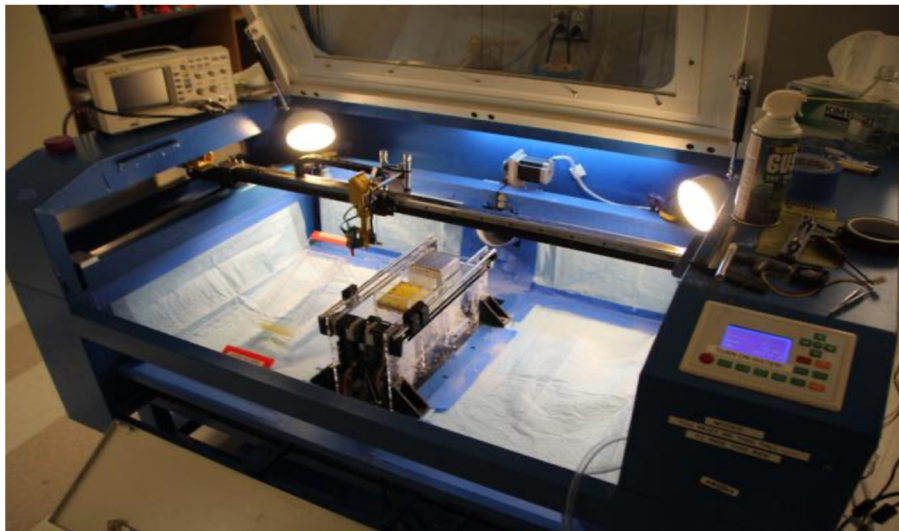
## 1.2 SLS – Selective Laser Sintering

Selective Laser Sintering je technika 3D tisku v práškovém loži využívající laser k selektivnímu spékání (viz Obrázek 1.2), částic polymerního prášku a jejich tavení dohromady teplem a tlakem způsobem vrstva po vrstvě, dokud není vyroben 3D objekt. Tiskárna SLS může mít jeden nebo více laserů různých typů např. vláknový laser, diodový laser, CO<sub>2</sub> atd. a také různé druhy výkonů od desítek až stovek watt. [4]

Proces SLS tisku začíná zahřátím zásobníku prášku plného práškového materiálu těsně pod teplotu tání polymeru. Čepel pro přetírání nanese tenkou vrstvu prášku přes stavební platformu, dále laser skenuje obrys vrstvy a spéká částice prášku. Pro kontrolu, zda je součást zcela pevná, je naskenovaný celý průřez požadované součásti. Jakmile je

vrstva dokončena, stavební platforma se posune dolů a čepel znovu pokryje povrch čistým práškem. Tento proces se opakuje, dokud není díl kompletní. Po dokončení procesu tisku následuje značné množství následného zpracování. Nejprve je zapotřebí ochladit stavební komoru, což může trvat i několik hodin, následně je potřeba dostat vytištěné díly z neslinutého sypkého prášku, který nebyl vypálen lasery. Pomocí štětce, stlačeného vzduchu nebo jiné formy tryskající techniky odstraníme volný prášek a shromáždíme jej pro použití v dalším tisku, lze použít i odprašovací jednotky, které snižují nepořádek, ale zvyšují cenu SLS tiskáren.[4]

Hlavní výhody pro volbu technologie SLS před FDM tiskárnami je získání výtisku s vynikajícím a konzistentním mechanickým výkonem a kvalitou povrchu. Lasery používané v SLS spojují částice polymeru do pevné látky, takže vrstvy jsou prakticky nepostřehnutelné, díky tomuto je pevnost a odolnost dílu srovnatelná nebo lepší úroveň než u vstříkovaných dílů. Jedna z hlavních nevýhod SLS tiskáren je fakt, že ne všechny materiály jdou použít ve všech tiskárnách a je potřeba dbát na to, jaké výkony mají lasery a další, proto výrobci tiskáren určují, které materiály lze pro tisk v určité tiskárně použít, aby tiskárna fungovala co nejlépe. Nejpoužívanější materiály pro SLS tiskárny jsou PA 12 (nylon), PA 11, TPU a další.[4]



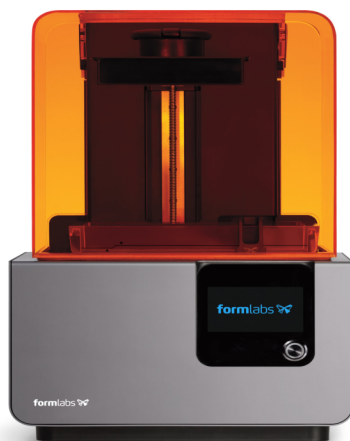
Obrázek 1.2 - Bastianova 3D tiskárna OpenSLS [13]

### 1.3 SLA – Stereolithography

Polymerizační 3D tiskárny na bázi pryskyřice využívají fotocitlivou pryskyřici, která při kontaktu s UV světlem vytvrzuje nebo tuhne. Většina pryskyřičných tiskáren má nádobu s čirou, pružnou spodní vrstvou, nazývanou také jako vana, která je naplněna fotocitlivou pryskyřicí, která při kontaktu s UV světlem vytvrzuje.

Konstrukční platforma je poté ponořena do vany a světelný zdroj pod čirým dnem vytvrzuje pryskyřici podle specifického vzoru a váže vytvrzenou první vrstvu k platformě. Stavební deska se poté posune nahoru, aby vytvořila prostor pro další vrstvu a umožnila nové pryskyřici protékat mezi předchozí vrstvou a dnem vany. Tato nová vrstva je poté vytvrzena prostřednictvím světelného zdroje a proces se opakuje, dokud není vytvořen celý výrobek. Rozdíl mezi typy pryskyřičných tiskáren spočívá v tom, jak je světlo generováno a aplikováno na pryskyřici.[5]

Nejpoužívanější pryskyřičnou 3D tiskárnu je SLA, která používá jako zdroj UV světla laser (viz Obrázek 1.3), přesně řízený rotujícími zrcadly, aby vykreslily každou tištěnou vrstvu. Hlavními výhodami této metody jsou vyšší přesnost a lepší kvalita tisku, protože přesný pohyb a malé rozměry laseru umožňují jemnější detail a rozlišení, což vede k nevýhodám, kde SLS tisk je dražší a časově náročnější.[6]



Obrázek 1.3 - SLA 3D tiskárna Formlabs [14]

DLP neboli digitální zpracování světla využívá jako zdroj UV světla UV projektory, které fungují pomocí mikro zrcadel k řízení promítaného světla. Průřezy každé vrstvy se promítnou jediným tahem, čímž se vše ve vrstvě vytvrdí najednou. Ve srovnání s SLA se tím ztrácí rozlišení a použité projektory mohou být objemné a drahé. Lze tím však dosáhnout mnohem vyšší rychlosti tisku, protože lze vytvrdit celou vrstvu najednou.[6]

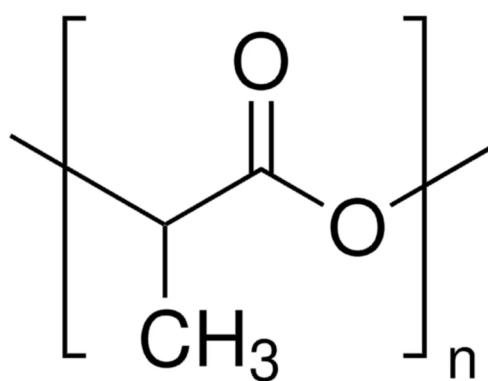
Poslední variantou pryskyřičného 3D tisku je LCD a LCD maskování. Všechny LCD tiskárny fungují na stejném principu šíření světla, UV světlo pocházející z řady LED prosvítá přes LCD obrazovku. Obrazovka funguje jako maska, odhaluje pouze pixely potřebné pro aktuální vrstvu a zbytek zatemňuje.[6]

## 2. MATERIÁLY PRO 3D TISK

### 2.1 PLA – Polylactic Acid

#### 2.1.1 Výroba filamentu PLA

PLA neboli kyselina polymléčná (viz Obrázek 2.1), je termoplastický polyester se vzorcem páteře  $[C_3H_4O_2]$ , získávaný kondenzací kyseliny mléčné, se ztrátou vody. PLA se stal oblíbeným materiálem díky tomu, že se ekonomicky vyrábí z obnovitelných zdrojů. Monomer kyseliny mléčné je typicky vyroben z fermentovaného rostlinného škrobu, jako je kukuřice, cukrová třtina nebo dužina cukrové řepy.[7]



Obrázek 2.1 - Chemická struktura monomeru kyseliny mléčné [15]

Kyselina mléčná pak může být zpracována na PLA materiál dvěma způsoby. Buď kondenzací kyseliny mléčné na laktid a poté použitím polymeračního procesu, nebo použitím kondenzačního procesu přímo s kyselinou mléčnou. Po zpracování PLA se plast granuluje a prodává jako surovina. Při výrobě PLA filamentu výrobci nejprve smíchají tyto PLA pelety s jinými látkami. Tyto přísady obvykle zlepšují vlastnosti konečného produktu. Nová směs je poté vložena do speciálního extrudéru na vlákna, která taví zrna a poté ochlazuje v lankové formě na přesný průměr (1,75 nebo 2,85mm). Nakonec se lankový plast omotává kolem cívky.[7]

## 2.1.2 Chemické odolnost

Kategorie odolnosti:

1. Kategorie – odolává velmi dobře. Polymer se nerozpouští, neabsorbuje látku, ani nebobtná během týdenního ponoření (změna hmotnosti a rozměru pod 1 %)
  - Voda [H<sub>2</sub>O] [9]
2. Kategorie – odolává středně až dobře. U polymeru došlo k mírnému bobtnání nebo změně hmotnosti (změna hmotnosti a rozměru pod 2-3 %)
  - Kyselina octová 8 % [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>]
  - Chlorid sodný 10 % [NaCl]
  - Kyselina citrónová [C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>]
  - Peroxid vodíku 30 % [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] [9]
  - Fridex (chladicí kapalina v automobilech) [C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>]
3. Kategorie – odolává špatně. Při delší době expozice polymeru dochází k výraznému bobtnání a změně hmotnosti zkušební vzorku (změna hmotnosti a rozměru pod 4-5 %)
  - Isopropylalkohol (IPA 75 %) [C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O]
  - Isopropylalkohol (IPA 99 %) [C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O]
  - Kyselina chlorovodíková 37 % [HCl]
  - Kyselina fosforečná 85 % [H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>]
  - Ethanol [C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O] [9]
4. Kategorie – neodolává. Významná změna hmotnosti, silné bobtnání (změna hmotnosti nebo rozměrů nad 5 %) nebo úplné zničení vlákna
  - Kyselina dusičná 69 % [HNO<sub>3</sub>]
  - Kyselina sírová 96 % [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]
  - Aceton [C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O] [9]

## 2.1.3 Mechanická odolnost

Materiál PLA je nejpoužívanější filament. Hlavními výhodami jsou malá tepelná roztažnost a skoro nulová deformace během tisku. Tyto vlastnosti jsou ideální pro tisk velkých dílů. Při tisku nesmíme ale zapomenout i na špatné vlastnosti materiálu. Materiál PLA je teplotně odolný pouze do 70 °C. Vzhledem k nízké teplotní odolnosti se nehodí na použití v exteriéru. Mimo jiné i kvůli nízké odolnosti proti UV-záření. Je rovněž velice křehký, což vylučuje použití materiálu PLA ve všech kategoriích, kde požadujeme pružnost dílu, neboť by velice lehce došlo k jeho zlomení. PLA je ideální materiál pro tisk konceptů, prototypů, jednoduchých hraček atd. [19]

## 2.1.4 Pokovování PLA

Materiál PLA lze galvanicky pokovovat, ale díky svým vlastnostem, především malé tepelné odolnosti, je potřeba si dát pozor, abychom vytištěný výrobek nezdeformovali.



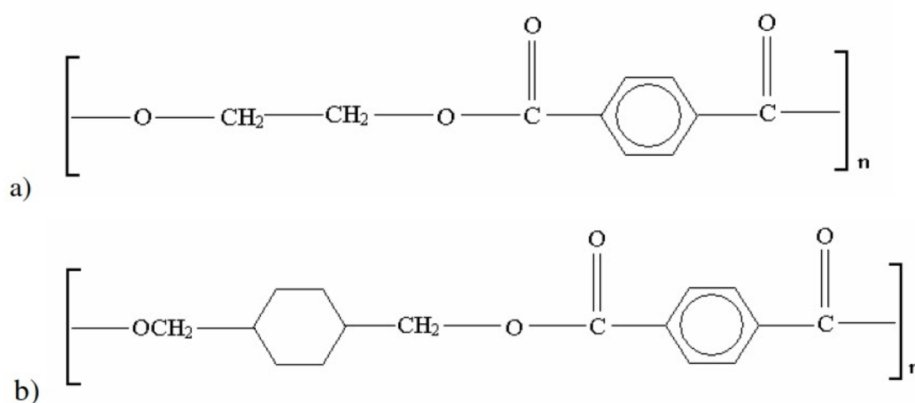
Stejně tak, jako PETG a ABS není PLA vodivý a je potřeba ho nejprve ošetřit vodivým povrchem, aby šlo výrobek galvanicky pokovovat. [31]

## 2.2 PETG – Polyethylene Terephthalate modified with Glycol

### 2.2.1 Výroba filamentu PETG

Polyethylentereftalátglykolem modifikovaný, běžně známý pod zkratkou PETG, je materiál používaný v průmyslových aplikacích (např. i jako elektrický izolátor). Ve světě 3D tisku se používá v modelech, které vyžadují dobrou odolnost proti nárazům nebo určitou flexibilitu, jako jsou komponenty pro zacvaknutí. Další jeho velkou výhodou je, že může být použitý pro tisk související s potravinami, není toxický a je schválen FDA (Food and Drug Administration – americký Úřad pro kontrolu potravin a léčiv). [10]

PETG byl upraven z PET, materiál, který je nejpoužívanější plast na světě. PET se využívá především pro výrobu plastových lahví a krytů pro potraviny. Samotný materiál PET je nevhodný pro 3D tisk, při vysokých teplotách má tendenci krystalizovat, čímž se stává neprůhledným, oslabuje svoji strukturu a stává se křehkým. PETG má podobné složení, nicméně rozdíl je v tom, jak je jí chemicky dosaženo. PET vytváří esterifikací z glykolu a kyseliny tereftalové, což vede k dlouhému řetězci polyethylentereftalátu. Naproti tomu PETG je dosaženo nahrazením etylenglykolu cyklohexandimethanolem, který je větší monomer (viz Obrázek 2.2). Pomáhá vyhnout se pevně spojeným molekulám PET, čímž snižuje svoji krystalizaci a díky tomu je PETG vhodný materiálem pro 3D tisk. [10]



Obrázek 2.2 - Chemická struktura (a) PET a (b) PETG [16]

### 2.2.2 Chemická odolnost

Kategorie odolnosti:

1. Kategorie – odolává velmi dobře. Polymer se nerozpouští, neabsorbuje látku, ani nebobtná během týdenního ponoření (změna hmotnosti a rozměru pod 1 %)
  - Voda [H<sub>2</sub>O]
  - Isopropylalkohol (IPA 75 %) [C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O]
  - Kyselina octová 8 % [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>]
  - Chlorid sodný 10 % [NaCl]
  - Kyselina citrónová [C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>]
  - Kyselina chlorovodíková 37 % [HCl]
  - Peroxid vodíku 30 % [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]
  - Fridex (chladicí kapalina v automobilech) [C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>][9]
2. Kategorie – odolává středně až dobře. U polymeru došlo k mírnému bobtnání nebo změně hmotnosti (změna hmotnosti a rozměru pod 2-3 %)
  - Isopropylalkohol (IPA 99 %) [C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O]
  - Ethanol [C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O][9]
3. Kategorie – odolává špatně. Při delší době expozice polymeru dochází k výraznému bobtnání a změně hmotnosti zkušebního vzorku (změna hmotnosti a rozměru pod 4-5 %)
  - Kyselina fosforečná 85 % [H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>]
  - Aceton [C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O][9]
4. Kategorie – neodolává. Významná změna hmotnosti, silné bobtnání (změna hmotnosti nebo rozměrů nad 5 %) nebo úplné zničení vlákna
  - Kyselina dusičná 69 % [HNO<sub>3</sub>]
  - Kyselina sírová 96 % [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>][9]

### 2.2.3 Mechanická odolnost

PETG je velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností. PETG má univerzální využití, ale je zejména vhodný pro tisk mechanických částí. Vlivem malé teplotní roztažnosti se materiál PETG při tisku na podložce nekrotí a není problém použít materiál při tisku velkých dílů. Vlivem své chemické skladby je materiál PETG více pružný než PLA, a proto se hodí ho použít tam, kde se počítá s mechanickým namáháním. Zlomení použitelného dílu není tak snadné jako u PLA. Zajímavou vlastností PETG je jeho vodotěsnost. Díky velmi dobrému spojování vrstev se do vytištěného dílu nedostává vlhkost a lze takové díly použít v situacích, kde očekáváme od dílu vodotěsnost. Lze použít i pro potravinářské účely. [20]

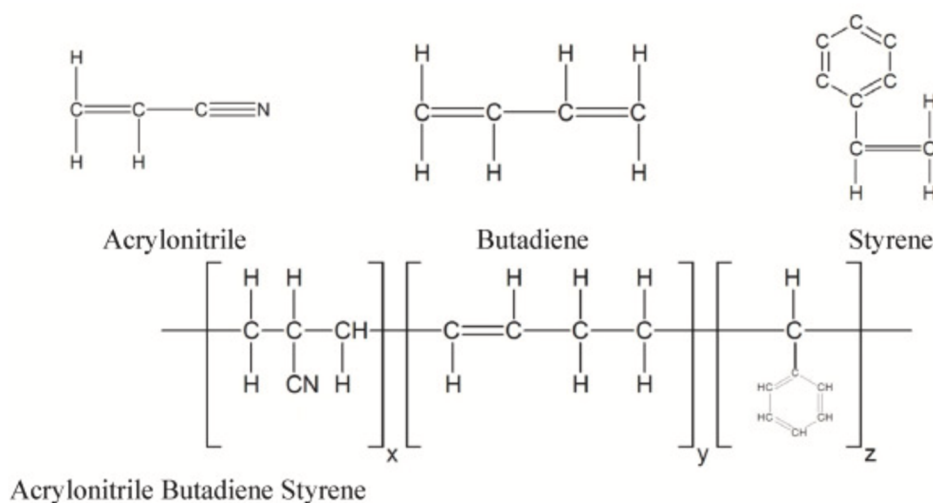
## 2.2.4 Pokovování PETG

Materiál PETG lze galvanicky pokovovat, při elektrolytickém pokovování PETG vykazuje výbornou adhezi k pokoveným vrstvám a odolnost vůči delaminaci i při ohybu. Nevýhoda tohoto materiálu je stejná jako u ABS. Materiál není vodivý a je potřeba ho nejprve provést aplikacemi, které udělají povrch materiálu PETG vodivý. [31]

## 2.3 ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene

### 2.3.1 Výroba filamentu ABS

ABS je zkratka pro akrylonitributadienstyren (viz Obrázek 2.3). Je to termoplastický a amorfní polymer známý pro svou odolnost proti nárazům a další mechanické vlastnosti. Skládá se ze tří monomerů (styrenu, butadienu a akrylnitrilu). Styren je vyroben z etylbenzenu po jeho dehydrataci. Dává ABS jeho syntetickou tuhost a zpracovatelnost pro vytváření forem. Butadien je jen vedlejším produktem procesu výroby etylenu v parních krakování a přesně odpovídá za to, jak ABS polymer získává tvrdost a energii. Akrylonitril je syntetický monomer odvozený z propylenu a amoniaku, který napomáhá hmotové a tepelné odolnosti materiálu ABS. [11]



Obrázek 2.3 - Chemická struktura ABS [17]

Materiál ABS je výborný pro další možné mechanické procesy jako jsou obrábění, leštění, broušení, pilování, lepení a další. Po těchto procesech má vytištěný objekt dobrý povrch. ABS nachází nejvíce svůj potenciál v aplikacích prototypování, zejména pro estetické prototypy a díly pro konečné použití, díky svým vlastnostem jako je pevnost, pružnost, odolnost proti nárazu a opotřebením se dá použít pro rychlý návrh náhradních dílů či součástí. Hlavní nevýhodou materiálu ABS je jeho složitost při tisku, kdy je tištěný materiál zvláště náchylný k deformacím, zvlněním a praskáním, což může vést k nekvalitě tisku nebo dokonce k selhání.[11]

### 2.3.2 Chemická odolnost

Kategorie odolnosti:

1. Kategorie – odolává velmi dobře. Polymer se nerozpouští, neabsorbuje látku, ani nebobtná během týdenního ponoření (změna hmotnosti a rozměru pod 1 %)
  - Chlorid sodný 10 % [NaCl]
  - Peroxid vodíku 30 % [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]
  - Kyselina fosforečná 85 % [H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>]
  - Kyselina dusičná 69 % [HNO<sub>3</sub>]
  - Ethanol [C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O][9]
2. Kategorie – odolává středně až dobře. U polymeru došlo k mírnému bobtnání nebo změně hmotnosti (změna hmotnosti a rozměru pod 2-3 %)
  - Voda [H<sub>2</sub>O]
  - Isopropylalkohol (IPA 75 %) [C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O]
  - Isopropylalkohol (IPA 99 %) [C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O]
  - Kyselina octová 8 % [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>][9]
3. Kategorie – odolává špatně. Při delší době expozice polymeru dochází k výraznému bobtnání a změně hmotnosti zkušební vzorku (změna hmotnosti a rozměru pod 4-5 %)
  - Kyselina chlorovodíková 37 % [HCl][9]
4. Kategorie – neodolává. Významná změna hmotnosti, silné bobtnání (změna hmotnosti nebo rozměrů nad 5 %) nebo úplné zničení vlákna
  - Kyselina dusičná 69 % [HNO<sub>3</sub>]
  - Kyselina sírová 96 % [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>][9]

### 2.3.3 Mechanické vlastnosti

ABS je neprůhledný termoplast, který se běžně vyskytuje v domácnostech a spotřebních výrobcích. Je to velmi pevný a odolný materiál. Má dobrou odolnost vůči teple a nárazu. Materiál ABS se může před nárazem deformovat a ohýbat se, takže je vhodný pro předměty, které se často používají v každodenním životě. Hlavní problém materiálu je to, že při tisku se uvolňují nebezpečné výpary, což ztěžuje práci s filamentem. Z tohoto důvodu bude potřeba buďto kryt s filtračním systémem, což však může být finančně náročné nebo samostatná místnost pro tisk, kde se bude větrat. Nicméně, ABS je poměrně náchylný na průvan. Pro ideální tisk a zabránění deformacím dílu a praskání je potřeba vyhřívat prostor okolo tištěného dílu, teplota pod krytem by měla být mezi 90–110 °C.

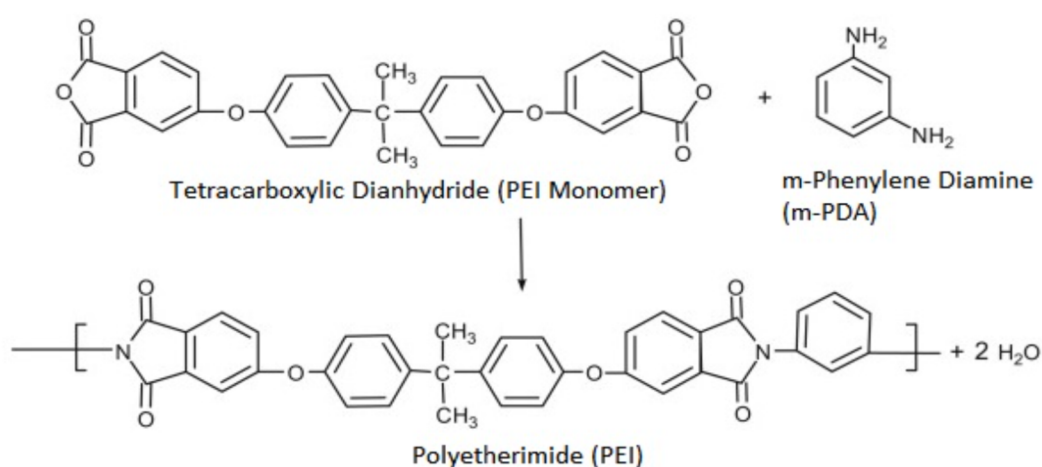
### 2.3.4 Pokovování ABS

ABS je ideální materiál pro galvanické pokovování, ale materiál není vodivý. Proto musíme ABS nejprve upravit jistými technologickými kroky, aby se stal povrch objektu ABS vodivý a vznikla možnost pro galvanické pokovování. Nejúčinnější metodou zvodivění je bezproudé chemické pokovování (viz. 3.1) [30]

## 2.4 PEI – Polyeterimid

### 2.4.1 Výrova filamentu PEI

Polyeterimid byl poprvé vyvinut v roce 1982 společností General Electric Company pro obchodním názvem pryskyřice ULTEM. PEI se získává polykondenzační reakcí mezi dianhydridem bisfenolu-A, jako je dianhydrid kyseliny tetrakarboxylové, reakcí bisfenolu A s anhydridem kyseliny ftalové, a diaminem, jako je m-fenylendiamin. Raný laboratorní proces zahrnoval nákladnou a obtížnou syntézu. Další vývoj vedl k řadě průlomů, které vedly ke zjednodušenému a nákladově efektivnímu výrobnímu procesu. Konečný krok procesu zahrnuje imidizaci anhydridu dikyseliny m-fenylendiaminem (viz. Obrázek 2.4) [22]



Obrázek 2.4 - Chemická struktura PEI [22]

PEI je amorfní termoplastická pryskyřice s jantarovou průhledností. Materiál, jež se vyznačuje kombinací vynikajících tepelných, mechanických a elektrických vlastností, si získal své místo ve vysoce výkonových aplikacích, jako je automobilový průmysl, letecký průmysl a mnoho dalších. Použití PEI v automobilovém průmyslu se zvyšuje díky jeho nahrazení kovy, termoplasty a jiné. Polyeterimid se používá v aplikacích, který vyžadují vysokou tepelnou odolnost, vysokou pevnost a modul širokou chemickou odolností. Mezi hlavní automobilové aplikace patří zejména elektrické a osvětlovací systémy jako jsou reflektory světlometů, reflektory mlhových světel, rámečky a objímky žárovek. PEI je v těchto aplikacích vybrán pro svou vysokou tepelnou odolnost (až 200 °C). V leteckých aplikacích se PEI doporučuje pro svou nízkou hmotnost a elektrických vlastností vhodný pro stínění proti EMI a mimořádnou mechanickou pevnost. [22]

## 2.4.2 Chemická odolnost

Kategorie odolnosti:

1. Kategorie – odolává velmi dobře. Polymer se nerozpouští, neabsorbuje látku, ani nebobtná během týdenního ponoření (změna hmotnosti a rozměru pod 1 %)
  - Kyselina octová 8 % [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>]
  - Voda [H<sub>2</sub>O]
  - Kyselina citrónová [C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>]
  - Kyselina chlorovodíková 37 % [HCl]
  - Kyselina fosforečná 10 % [H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>]
  - Kyselina dusičná 2 % [HNO<sub>3</sub>]
  - Ethanol [C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O]
  - Aceton [C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O] [23]
2. Kategorie – odolává středně až dobře. U polymeru došlo k mírnému bobtnání nebo změně hmotnosti (změna hmotnosti a rozměru pod 2-3 %)
  - Methylethylketon [C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>O]
  - Fenol [C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O]
  - Toluén [C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>]
  - Xylen [C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>] [23]
3. Kategorie – odolává špatně. Při delší době expozice polymeru dochází k výraznému bobtnání a změně hmotnosti zkušební vzorku (změna hmotnosti a rozměru pod 4-5 %)
  - Amoniak 10% [NH<sub>3</sub>]
  - Chloroform [CHCl<sub>3</sub>]
  - Metylenchlorid [CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>] [23]

## 2.4.3 Mechanické vlastnosti

PEI se vyznačuje vysokým rozsahem pracovních teplot, minimální stálá provozní teplota je okolo 170 °C. Při těchto teplotách zachovává vytištěný objekt dobré mechanické vlastnosti. Má unikátní kombinaci vysoké pevnosti, tuhosti, pružnosti, dobré odolnosti proti UV záření a povětrnostním podmínkám, proto se používá v automobilovém a leteckém průmyslu. PEI navíc vykazuje dobré elektrické vlastnosti, které zůstávají stabilní v širokém rozsahu teplot a frekvencí. Tyto vlastnosti přispívají k použití PEI v několika možných aplikacích v elektrotechnice jako je EMC nebo v procesu pokovování plastových dílů. Stejně jako u ostatních materiálů je potřeba připravovat povrch tak, aby byl vodivý. [22]

## 2.4.4 Pokovení PEI

Materiál PEI je velice odolný vůči chemikáliím a neměl by mít žádný problém s galvanickými lázněmi. Hlavní výhodou materiálu PEI je jeho tepelná odolnost, která by měla přispět ve snaze tyto materiály pájet.[30]

## 3. NANÁŠENÍ KOVOVÝCH POVLAKŮ

### 3.1 Chemické bezproudé pokovování

Bezproudé pokovování, také známé jako autokatalytické pokovování, je proces, který zahrnuje nanášení kovového povlaku na substrát bez použití vnějšího elektrického proudu. Základními komponenty potřebné pro bezproudé pokovování jsou substrát, kovové ionty, redukční činidlo, komplexotvorné činidlo, pH pufr a katalyzátor. [12]

Substrát je materiál, na který je nanesen kovový povlak. Může být vyroben z různých materiálů. V našem případě to bude plast (materiály pro 3D tisk). Kovové ionty jsou zdrojem kovu, který se nanáší na substrát. Ve většině případů jsou kovové ionty obsaženy v roztoku, který obsahuje i další chemikálie nezbytné pro proces pokovování. Redukční činidlo se typicky přidává do pokovovacího roztoku jako sůl nebo jiná sloučenina. Komplexotvorné činidlo je chemikálie, která pomáhá udržet kovové ionty v roztoku a zabraňuje jejich vysrážení. Pomáhá také kontrolovat rychlost procesu pokovování. pH pufr je chemikálie, která udržuje stabilní pH v pokovovacím roztoku. Proces pokovování je závislý na pH a změna pH by mohla ovlivnit rychlost a kvalitu pokovování. Katalyzátor je materiál, který podporuje redukci kovových iontů redukčním činidlem. Katalyzátorem je typicky kov, jako je nikl, palladium nebo měď, nanesený na substrát v samostatném kroku před pokovováním. [12]

#### 3.1.1 Bezproudé nanášení na plastové materiály

Bezproudé nanášení na plasty využijeme za účelem vytvoření elektricky aktivního povrchu, který usnadňuje další následné nanášení elektrostatickými nebo jinými metodami. Bezproudé pokovování plastových substrátů začíná přípravou povrchu před ponořením do bezproudové lázně. Ionty v lázni se ukládají jako tenký kovový film na povrch v důsledku chemické reakce mezi aktivovaným povrchem a složkami v lázni. K dosažení bezproudového povlaku na plastových površích jsou nezbytné následující kroky. [12]

#### Čistění

Čistění povrchu začíná mechanickou úpravou materiálu, kdy pomocí kartáčování nebo broušením povrchu brusným papírem opracujeme, aby se z povrchu odstranily nečistoty, mastnoty a také dojde k vyhlazení povrchu po 3D tisku. Dalším krokem je čistění povrchu pomocí čistících prostředků, kdy ale musíme vybírat takové čističe, které by nezneškodily námi čistěný materiál (např. ABS se obvykle čistí v ultrazvukem ethylalkoholem po dobu 5 minut při pokojové teplotě). [12]

## **Leptání**

Tento proces je považován za nejkritičtější událost v procesu ukládání; leptání významně přispívá k příslušným povrchovým vlastnostem potřebným pro zlepšené spojení kov – plast. Proces leptání vytváří v substrátech póry, čímž se zvyšuje celková plocha povrchu pro proces nanášení. Navíc lokálně vyvinutá hydrofilní místa účinně absorbují leptadlo na povrchu. Proto je prvním krokem ponoření substrátu do leptací lázně. V závislosti na povrchu substrátu je leptacím roztokem kyselina chromová v kyselině sírové nebo kyselina fluorovodíková v kyselině sírové. [12]

## **Neutralizace**

Redukčními činidly, jako jsou metabisulfit nebo železnaté ionty, jsou z leptaných povrchů odstraněny zbývající stopy oxidantu, což jim brání v interferenci s katalytickou aktivitou povrchu. Nečistoty jakékoliv velikosti zhoršují bezproudový povlak kovu na plastových površích. [12]

## **Akcelerace**

Částice adsorbovaného katalyzátoru jsou v této fázi aktivovány za účelem zvýšení jejich aktivity. Urychlovače rozpouštějí přebytečné částice aktivátoru a uvolňují přilnuté částice z povrchu, čímž brání jakékoliv lokální katalytické reakci vyvolané absorbovanými částicemi. Aktivované povrchy jsou omyty a ponořeny do urychlovací lázně při jisté teplotě na určený čas. [12]

## **Povlak**

Během procesu depozice jsou aktivované substráty ponořeny do bezproudové lázně obsahující redukční činidla, kovové ionty a stabilizátory v kyselém nebo alkalickém roztoku. Na předem aktivovaném povrchu se v důsledku redoxní reakce vytvoří bezproudé usazeniny. Proto jsou teplota lázně a doba nanášení kritickými parametry při nanášení kovů na plastové povrchy pro dosažení kvality povrchu. Typická bezproudá lázeň obsahuje kovové soli, redukční činidla (formaldehyd), chelatační činidla (Rochelleovy soli, Quadrol a EDTA) a stabilizátory. Přítomnost formaldehydových a hydroxidových iontů v lázni poskytuje potřebnou redukční sílu pro usazování kovových iontů na povrch. [12]



## 3.2 Galvanické pokovování

Galvanické pokovování je proces konečné úpravy předmětu vytištěného na 3D tiskárně tenkou kovovou vrstvou. Galvanicky ve skutečnosti lze pokovovat cokoli, co je elektricky vodivé. Kovová vrstva zlepšuje nejen vzhled, ale také pevnost a odolnost, aniž by se muselo jít cestou mnohem dražšího kovového tisku. [18]

### 3.2.1 Princip galvanického pokovování

Galvanické pokovování neboli galvanizace využívá řízenou elektrolyzu k dosažení elektrického vylučování kovových kationtů z kladně nabitého základního materiálu (anody) na záporně nabitý substrát (katodu). Když je zaveden elektrický náboj, kladně nabité ionty (kationty) se rozpouštějí oxidací a následují elektrický proud, aby se na substrát uložila kovová vrstva. Nejběžnějšími kovy používanými pro galvanické pokovování jsou měď, nikl, zlato, stříbro, palladium, cín atd. [18]

Můžeme rozlišit hlavní způsoby galvanického pokovování podle potřeby procesu. Bubínkové pokovování převaluje substrát v bubínku (sudu), aby se usnadnil rovnoměrný povlak. Vzhledem k tomu, že do sudu lze umístit mnoho dílů naráz, je to užitečné pro velkosériovou výrobu. Stojanové pokovování se používá pro složité díly a díly náchylné k mechanickému zničení, kdyby se měly převalovat v sudech. Umístěním dílu do stojanu zajistíme, že během celého procesu nedojde k mechanickému zničení dílu. Tato metoda je nejvíce používaná v případech, kdy díl ukotvíme pomocí drátu na jednom místě. [18]

Každý proces probíhá při ponoření do vodivého roztoku elektrolytu, který obvykle obsahuje soli kovu, kterým chceme pokovovat, kyselinu sírovou a rozpouštědla spolu s dalšími přísadami, jako jsou kyseliny, zásady nebo zjasňovače. Úspěch pokovování závisí na různých faktorech, z nichž nejdůležitější je délka expozice, geometrie součástí a proudová hustota. Pro správné nanesení kovového povlaku musí být nanášený díl vodivý. Nevodivé plastové výtisky proto musí být optimálně předupraveny, aby bylo zajištěno vhodné pokovování. [18]

### 3.2.2 Příprava vytištěných dílů

#### Broušení částí

Jedním z nejzákladnějších požadavků na galvanické pokovování je hladký povrch. Čím hladší povrch, tím lesklejší je finální kovový povlak. Kvalitní povrch dílů zajistíme několika koly intenzivního broušení a nástřiku plničů. Polyuretanový lak také pomáhá vyplnit jakoukoliv mezeru mezi tiskem. [18]

#### Čištění dílů

Stejně důležitou částí jako hladký povrch je i povrch čistý, a to před každým krokem, nejen před procesem galvanizace. Prach a mastnota jsou smrtelnými nepřáteli

galvanického pokovování. Nejen že brání plnivu a vodivému nátěru, ale především následným kovovým povlakům v rovnoměrném napojení na vytištěný díl. Ideálním odmašťovadlem mezi kroky před galvanizací je destilovaná voda, která nejen že dobře očistí povrch, ale zároveň nepoškodí díl tím, že by ho rozleptala nebo poškodila jeho strukturu. [18]

### **Vytvoření vodivého povrchu**

Před procesem galvanizace je potřeba, aby byl díl vodivý. Na očištěný povrch nanese se vodivý nátěr, nejčastěji se používá niklová nebo měděná barva. V levnějším případě grafitová barva, která se však před ponořením do elektrolytu musí ještě přebrousit. [18]

### **Ponoření dílů**

Přípravou elektrického obvodu připojením elektrod ke zdroji. Anodu připevníme ke kovu tvořící pokovení, katodu připevníme pomocí drátu k již připravenému dílu na pokovení. Jakmile je díl dobře přikotven, aby nemohlo dojít k jeho samovolnému odpojení, můžeme do připravené nádoby nalít vhodný elektrolyt. Elektrolytem naplníme nádobu tak, aby byl celý díl dostatečně ponořen. [18]

### **Galvanické pokovování**

Celý proces začne zapnutím napájecího zdroje. Před samotným zapnutím je však potřeba správně nastavit hodnotu proudové hustoty. Kdybychom nastavili příliš malou proudovou hustotu, vedlo by to k nedostatečnému usazování kovu, která by způsobila tenké nebo nerovnoměrné pokovení. Vysoká proudová hustota by naopak vedla k nerovnoměrnému povlaku s hrubými a zrnitými usazeninami a rychlejší degradaci elektrolytu. Ideálním případem je nastavit takovou proudovou hustotu, při které proces dobře probíhá a jeho pomalým zvyšováním během procesu povede k ideální vrstvě. [18]

## **3.3 Pokovování mědi**

Měď je kovový prvek s červeno-oranžovou barvou známý pro svou vysokou elektrickou vodivost, tepelnou odolnost, kujnost a odolnost proti korozi. Tyto vlastnosti dělají z mědi velice oblíbený materiál pro použití v průmyslu, především pro svoje elektrické vlastnosti, protože měď je druhý nejlepší vodič, hned po stříbře. To je i hlavním důvodem, proč chceme galvanicky pokovovat plastové díly (viz. Obrázek 3.1) mědí, měď zajistí nejen vodivost základního materiálu, ale dodá i ochranu proti korozi a díky své tvárnosti může být použita na součásti, které se ohýbají.

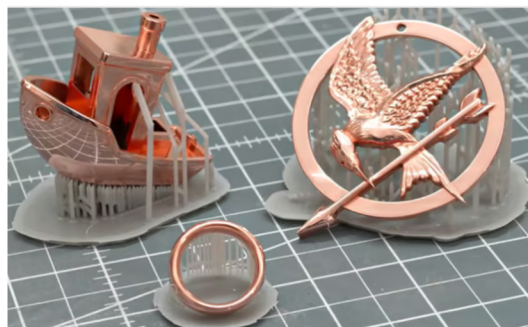
### 3.3.1 Proces pokovování mědi na plastových materiálech

Před samotnou galvanizací mědi je potřeba, aby povrch plastových dílů byl vodivý. Pro úpravu povrchu použijeme bezproudé pokovování, jež nanese na povrch dílu přilnavý kovový film, který jej činí vodivým. Pro proces bezproudého pokovování se v dnešní době nejvíce využívá niklová lázeň. Nejpoužívanější niklové lázně jsou s obsahem fosforu. Výhodou této lázně je, že materiál po nanesení filmu je nejen vodivý, ale i nemagnetický, což přispívá k ideálním vlastnostem pro elektroniku a zařízení, které potřebují vrstvu stínění. Dalším variantou jsou lázně na bázi boru, které vytváří špičkový povlak s velkou odolností. Jejich jedinou nevýhodou je to, že bor není odolný vůči korozi. V praxi se používají i jiné lázně, které mají své uplatnění v jistých aplikacích. [24]

Po tomto procesu bude díl připravený pro galvanické pokovování mědi (viz. Obrázek 3.2). Mezi základní typy galvanického pokovování mědi patří alkalická kyanidová mědicí lázeň, která poskytuje vynikající pokovovací výkon a rovnoměrnou tloušťku nánosu. Kyanidová složka nicméně dělá tento pokovovací roztok extrémně toxický a musí se s ním zacházet velmi opatrně. Alkalický nekyanid je pokovovací roztok bez obsahu kyanidu. Jeho výhodou je to, že není toxický, ale nemusí být účinný jako alkalické kyanidové lázně ve všech aplikacích pokovování mědi. Poslední základním druhem lázně je kyselá měď, která se skládá z iontů mědi, přísad, kyselin a buď fluorboritanových, nebo síranových iontů. Mezi výhody kyselých roztoků mědi patří nízké materiálové náklady, široký rozsah složení a relativně snadná údržba a kontrola lázně. Nevýhoda tohoto roztoku je kyselá povaha, tedy to, že tato lázeň není kompatibilní pro pokovování přímo na aktivní kovy, jako je zinek a ocel, kvůli nedostatečné adhezi. [26]



Obrázek 3.1 - Vytisknutý 3D díly [25]



Obrázek 3.2 - 3D díly pokovené mědí [25]

### **3.4 Pokovování niklem**

Galvanické pokovování niklem je proces nanášení niklového povlaku na předem upravený povrch, aby plastový díl byl vodivý (lze metodou bezproudého pokovování (viz. 3.3 ). Niklování se používá pro zajištění větší odolnosti proti korozi a pro přidání poddimenzovaných dílů. Rozlišujeme dvě základní metody galvanického pokovování niklem. Niklsulfamátová lázeň, slabě kyselý elektrolyt, je jednoduchý na údržbu a málo citlivý na kovové a organické znečištění. Niklsulfátová lázeň (nizkochloridový), lázeň známá jako Watts.[27], [28]

### **3.5 Pokovování zlatem**

Zlato obsahuje řadu jedinečných vlastností, díky kterým se ideálně hodí pro četné procesy pokovování. Pro galvanické pokovování zlatem existuje technická norma ASTM B488, která splňuje specifikaci pro zvýšenou odolnost substrátu vůči korozi a zabránění matování. Existuje i specifikace pozlacení MIL-DTL-45204D, která splňuje požadavky ministerstva obrany USA a jiných podpůrných agentur. Tato specifikace se zabývá minimálním obsahem zlata. V elektrotechnice používáme zlato především tam, kde potřebujeme, aby byla zajištěna spolehlivost ve všech klimatických podmínkách. Nejčastěji pro konektory, kontakty a spínače.[29]

### **3.6 Bezpečnost práce**

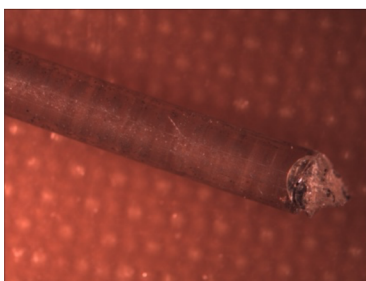
Při práci v laboratořích, kde se budeme v našem případě setkávat s velkou řadou chemických látek, jako jsou kyseliny, zásady, rozpouštědla, aktivátory a pokovovací roztoky, musíme dbát zvýšené opatrnosti s jejich manipulací a přijmout nezbytná bezpečnostní opatření, které vedou k minimalizaci rizika při manipulaci s chemikáliemi. Při práci s těmito látkami budeme používat ochranné prostředky a pomůcky.

## 4. PRAKTICKÁ ČÁST

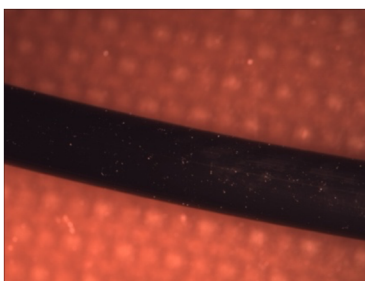
V praktické části bakalářské práce bylo úkolem nejprve seznámit se s materiály používanými pro FDM 3D tisk. Největší pozornost byla věnována materiálu PEI, následně ABS, PETG a PLA.

### 4.1 Pozorování povrchu materiálů

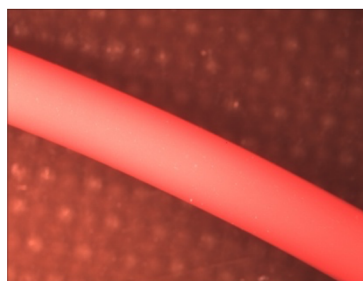
V této části bakalářské práce jsme se podívali na strukturu materiálů PEI (viz. Obrázek 4.1 - PEI), ABS (viz. Obrázek 4.2 - ABS) a PETG (viz. Obrázek 4.3 - PETG) pomocí mikroskopu Olympus (viz. Obrázek 4.7) v jeho základním tvaru a následně jsme pomocí mechanického lisu (viz. Obrázek 4.8) tyto filamenty mechanicky namáhali a zkoumali jejich chování opět pod mikroskopem.



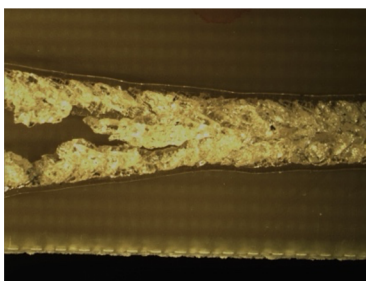
Obrázek 4.1 - PEI



Obrázek 4.2 - ABS



Obrázek 4.3 - PETG



Obrázek 4.4 - PEI po  
mechanickém lisování



Obrázek 4.5 - ABS po  
mechanickém lisování



Obrázek 4.6 - PETG po  
mechanickém lisování

Nejzajímavější strukturu nám nabídl materiál PEI (viz. Obrázek 4.4), který jako jediný praskl. To mohl způsobit fakt, že jeho struktura se velice podobá sklu a pod mechanickým tlakem má větší tendenci praskat, nikoli se chovat více plasticky, tak jako jiné materiály ABS (viz. Obrázek 4.5) a PETG (viz. Obrázek 4.6).



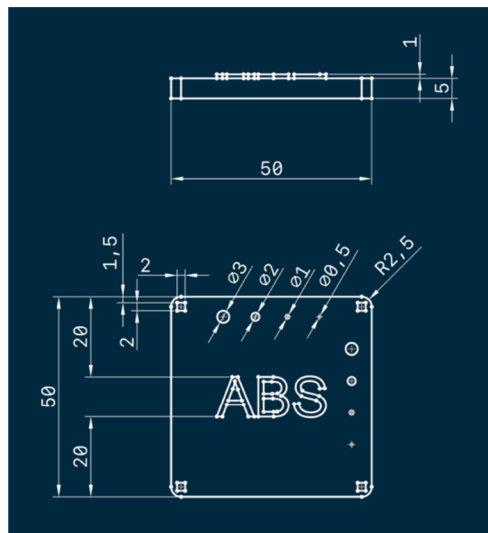
Obrázek 4.7 - Mikroskop Olympus



Obrázek 4.8 - Mechanický lis

## 4.2 Návrh testovacích destiček

Před samotným 3D tiskem bylo nejdříve nutné připravit 3D model destiček, které byly poté použity pro následné testování materiálů v této bakalářské práci. 3D modely testovacích destiček byly vytvořeny v CAD softwaru Sharp3D. Všechny destičky mají stejné rozměry (viz Obrázek 4.9) 50 x 50 x 5 mm a velikost písma je 10 mm a vyčnívá nad povrch o 1 mm. V destičkách jsou vytvořeny 4 čtvercové otvory 2 x 2 mm, které slouží pro uchycení během procesu pokovování. Ve dvou osách byly vytvořeny 4 kruhové otvory s rozměry 3 mm, 2 mm, 1 mm a 0,5 mm, které byly použity pro simulaci prokovů pro THT součástky.

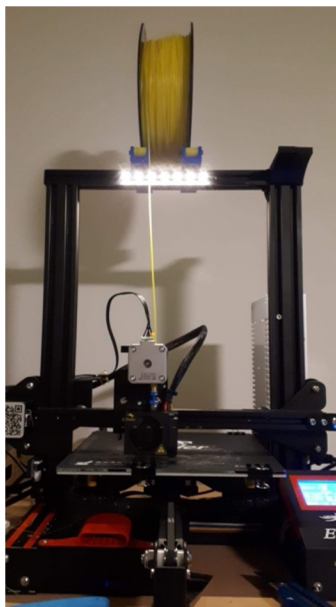


Obrázek 4.9 - Výkres destičky pro materiál ABS



### 4.3 3D tisk destiček

3D tisk testovacích destiček byl prováděn pomocí technologie tisku FDM na 3D tiskárně Ender 3 (viz. Obrázek 4.10). Destičky materiálu PEI byly realizovány v kooperaci.



Obrázek 4.10 - 3D tiskárna Ender 3

### 4.4 Aplikace grafitové vrstvy

Předtím než je možné díly vytisknuté na 3D tiskárně galvanicky pokovovat, bylo zapotřebí na ně nanést vodivý povrch. Z technologických, ekologických aspektů i dostupnosti jsme se rozhodli zkoušet zvodivění povrchu pomocí grafitu. Nanášení grafitu na povrch nevodivého materiálu je možné provést více způsoby. V tomto případě byla vybrána technologie Shadow koloidním grafitem, která se používá při výrobě desek plošných spojů pro zvodivění vyvrtaných otvorů v DPS a jejich následného pokovení a vytvoření propojení mezi horní a spodní stranou desky.

#### 4.4.1 Laboratorní předúprava povrchu

Vytištěné díly na 3D tiskárně je potřeba nejprve mechanicky očistit od nečistot vzniklých tiskem (otřepy). Následně byl povrch destiček zbroušený brusným papírem hrubosti 600 tak, aby byl povrch hladký a zlepšila se tak mechanická adheze mezi povrchem destičky a koloidním grafitem. Po očištění a odmaštění destiček bylo na řadě předleptat povrch destičky. Pro materiál ABS a PETG se zdálo jako dostatečné předleptání použitím kyseliny solné po dobu 2 minut při pokojové teplotě. Problém nastává u materiálu PEI, na kterém nejsou patrné po uplynuté době žádné znaky naleptání povrchu a struktura destičky je bez jakéhokoliv narušení.

#### 4.4.2 Průmyslová příprava povrchu

Vyčištěné destičky materiálu PEI, bylo potřeba podrobit jinému druhu předúpravy, než jaký byly prováděny v laboratoři. Byl vybrán proces EC-RESIN Series Permanganan. Je to systém koncentrovaného manganistanu (permangananu) sodného navrženého k desmearu otvorů DPS. E-Prep proces se skládá ze tří základních kroků:

- Předúpravy EC RESIN-SOLV NDG
- Deasmering s EC RESIN-ETCH Series
- Neutralizace s EC RESIN-ETCH N – neutralizer

Proces desmearu byl prováděn v 7 krocích:

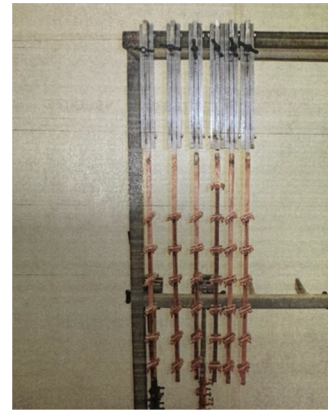
1. EC RESIN-SOLV NDG  
Po dobu 10 minut při teplotě 60 °C, úkolem tohoto procesu je očistit povrch před následujícími kroky.
2. Oplach H<sub>2</sub>O  
Po dobu 1 minuty při pokojové teplotě
3. EC RESIN-ETCH Series  
Po dobu 20 minut při teplotě okolo 80 °C, v této lázni dochází k leptání manganistanem sodným.
4. Kyselý oplach H<sub>2</sub>O+H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
Po dobu 2 minut za pokojové teploty
5. Oplach H<sub>2</sub>O  
Po dobu 1 minuty při pokojové teplotě
6. EC RESIN-ETCH N – neutralizer  
Po dobu 10 minut při teplotě 30 °C
7. Oplach H<sub>2</sub>O  
Po dobu 2 minuty při pokojové teplotě

Celý proces byl prováděn na lince povrchové úpravy (viz. Obrázek 4.11) v Čemebu Blansko za dohledu odborného operátora výroby. Destička byla nejprve upevněna do specializovaných držáků (viz. Obrázek 4.12) pomocí nichž byla přendávána z lázni po uplynutí časového intervalu. Po kompletním procesu bylo potřeba destičku důkladně umýt na mycí lince od veškerých chemikálií, které byly v procesu použity.





Obrázek 4.11 - Linka povrchové úpravy Čemebo Blansko



Obrázek 4.12 - Držák pro uchycení dílů v lázních

#### 4.4.3 Proces Shadow s koloidním grafitem

Pokud byl povrch destiček očištěn a dostatečně naleptán, je připravený pro nanášení koloidního grafitu. Pro celý proces bylo zapotřebí používat rozdílných teplot látek a následné vysušení celého povrchu po nanesení grafitu, proto byla použita sušička HS 61 A (viz. Obrázek 4.13). Celý proces lze shrnout do 6 kroků:

1. Kondicionování povrchu  
Úkolem tohoto kroku je nanést a vytvořit silně kladné náboj na povrchu destiček. Kondicionér byl nanášen po dobu 1 minuty při teplotě kondicionéru 50 °C.
2. Oplach demineralizovanou vodou  
oplach je prováděn po dobu 1 minuty při pokojové teplotě, destičkou v lázni mícháme, aby byl oplach po kondicionéru co nejlepší.
3. Nanášení koloidního grafitu  
Nanášení grafitu provádíme po dobu 1,5 minuty při pokojové teplotě. V grafitu s destičkou pohybujeme tak, aby byl grafit rovnoměrně nanesen na všech stranách destičky a aby nedošlo k jeho usazení v otvorech pro THT součástky.

4. Nanesení fixeru

Fixer má za úkol ustálit koloidní grafit na povrchu, aby zůstal na povrchu destičky. Destičku vkládáme do fixeru na 1,5 minuty při teplotě 50 °C a při stálém pohybu s destičkou dochází k jemnému oplachu grafitu.

5. Oplach demineralizovanou vodou

Po vyndání destičky z fixeru následuje opět oplach v demineralizované vodě po dobu 1 minuty za pokojové teploty.

6. Sušení

Po vyndání destičky po oplachu demineralizovanou vodou vkládáme destičku do sušičky na dobu 5-10 minut při teplotě 75 °C. Pokud je povrch stále vlhký sušíme delší dobu.



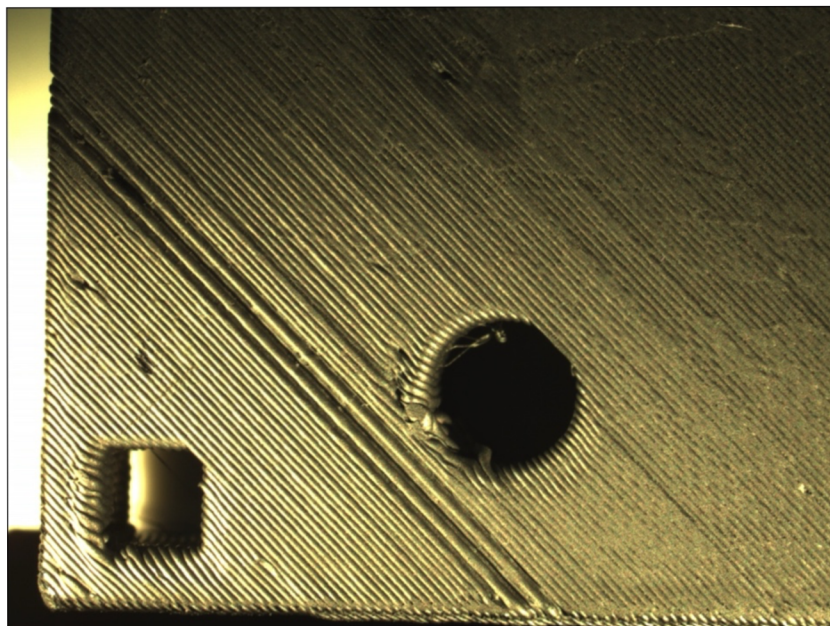
Obrázek 4.13 - Sušička HS 61 A

## 4.5 Kontrola povrchu grafitu

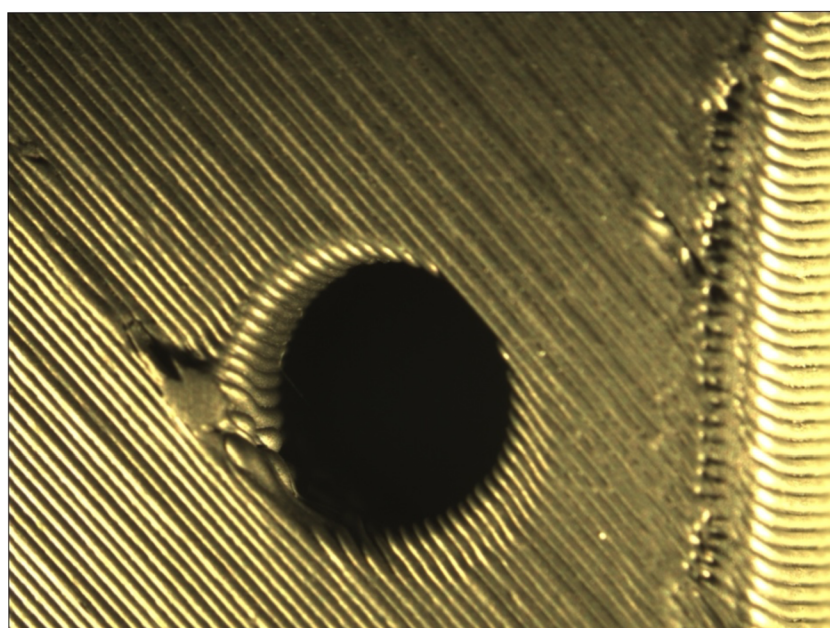
Po procesu nanášení koloidního grafitu 4.4 bylo potřeba zkontrolovat, jak se povedlo uchycení grafitu, jaká tloušťka vrstvy se nanasla a jaká je vodivost povrchu.

### 4.5.1 Optická kontrola

Pro kontrolu povrchu jsme opět využili mikroskop Olympus s přiblížením 45x (viz. Obrázek 4.14). a s přiblížením 90x (viz. Obrázek 4.15)



Obrázek 4.14 - PEI povrch pokrytý grafitem, 45x zvětšeno

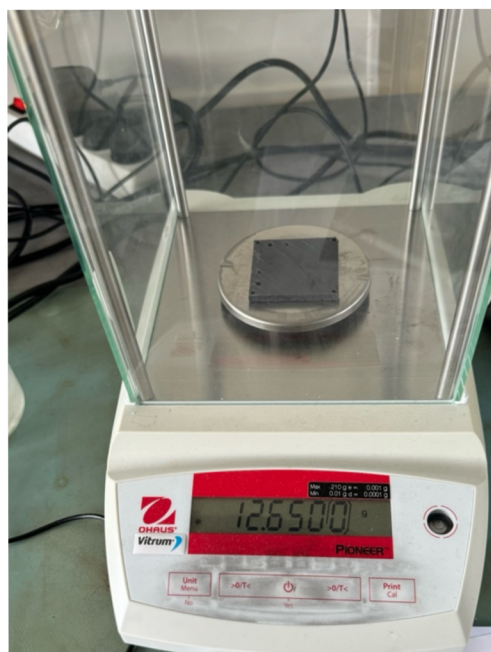
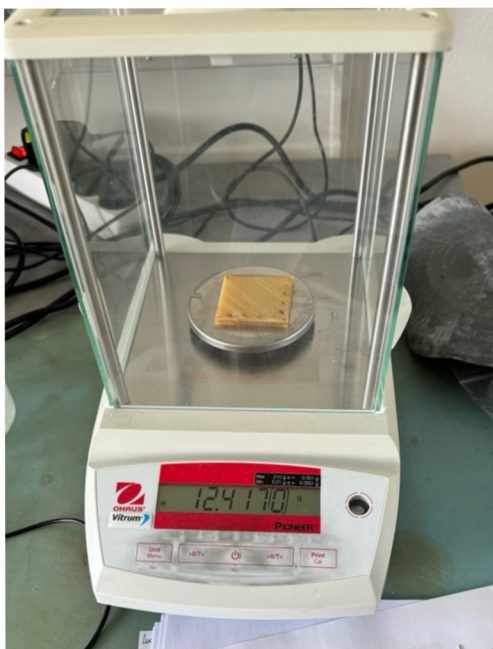


Obrázek 4.15 – PEI povrch pokrytý grafitem, 90x zvětšeno



#### 4.5.2 Tloušťka vrstvy grafitu

Pro změření tloušťky povrchu byla použita laboratorní přesná váha OHAUS Pioneer (viz. Obrázek 4.16). Měření bylo prováděno nejprve po základní úpravě povrchu (broušení povrchu) a následně po vysušení vzorku po nanesení koloidního grafitu. Všechny naměřené a vypočítané hodnoty byly zapsány do Tabulka 1.



Obrázek 4.16 - Vážení očištěné destičky    Obrázek 4.17 - Vážení po nanesení grafitu

Výpočet tloušťky:

Výpočet rozdílu hmotností  $\Delta m_1$ :

$m_1 = 12,417\text{g}$  ... hmotnost vzorku před nanesením grafitu

$m_2 = 12,650\text{g}$  ... hmotnost vzorku po nanesení

$$\Delta m_1 = m_2 - m_1 = 12,650 - 12,417 = 0,233\text{ g} = 0,233 \cdot 10^{-3}\text{ kg} \quad (1)$$

Výpočet objemu naneseného grafitu  $V_1$ :

$\rho = 2200\text{ kg/m}^3$  ... hustota grafitu

$$V_1 = \frac{\Delta m}{\rho} = \frac{0,233 \cdot 10^{-3}}{2200} = 1,06 \cdot 10^{-7}\text{ m}^3 \quad (2)$$

Výpočet obsahu destičky:

Rozměry destičky 1:

$$a = 50 \text{ mm}$$

$$b = 50 \text{ mm}$$

$$c = 5 \text{ mm}$$

$$S_1 = 2(ab + bc + ac) = 2(50 \cdot 50 + 50 \cdot 5 + 50 \cdot 5) = 6000 \text{ mm}^2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (3)$$

Rozměry destičky 2:

$$a = 50 \text{ mm}$$

$$b = 50 \text{ mm}$$

$$c = 2 \text{ mm}$$

$$S_2 = 2(ab + bc + ac) = 2(50 \cdot 50 + 50 \cdot 2 + 50 \cdot 2) = 5400 \text{ mm}^2 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (3)$$

Výpočet tloušťky naneseného grafitu:

$$t_{Graf} = \frac{V_1}{S_1} = \frac{1,06 \cdot 10^{-7}}{6 \cdot 10^{-3}} = 17,65 \text{ } \mu\text{m} \quad (4)$$

Tabulka 1 - Změřené hmotnosti vzorků a vypočítaná tloušťka grafitu

Měření tloušťky grafitu					
materiál	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	Δm <sub>1</sub> [g]	V <sub>1</sub> [mm <sup>3</sup> ]	t <sub>GRAF</sub> [μm]
PEI 1.	12,4170	12,6500	0,2330	105,91	17,652
PEI 2.	11,8300	11,9313	0,1013	46,05	7,674
PEI 3.	12,0918	12,1707	0,0789	35,86	5,977
PLA	6,6134	6,6078	-0,0056	-2,55	-0,471
ABS 1.	5,3987	5,5029	0,1042	47,36	7,894
ABS 2.	3,7025	3,7814	0,0789	35,86	6,641
PETG	9,5019	9,6240	0,1221	55,50	9,250

Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že průměrná vrstva naneseného grafitu se pohybuje v rozmezí 5–10 μm. Když je grafitu nanesená velká vrstva, jako byla nanesena v pokusu PEI 1., dochází k rychlému loupání tlusté vrstvy grafitu ihned po galvanickém nanesení mědi. Tato tlustá vrstva byla nanesená z důvodu stáří a hustoty koloidního roztoku, který již na další pokus použitý nebyl. Místo něj byl použitý nový grafit, který jsme obdrželi s další odbornou chemií pro proces Shadow firmou Čemebo Blansko. Materiál PLA jako

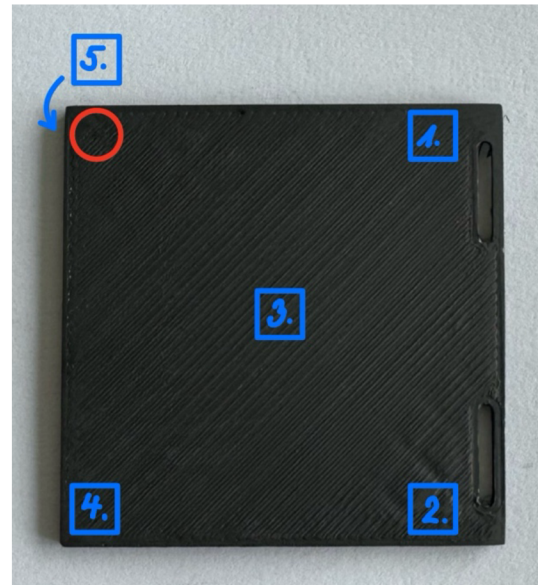
jediný ztratil svoji hmotnost během procesu Shadow. To mohlo být způsobené tím, že materiál nebyl po tisku plně vytvrzen. Zároveň mohlo dojít k významnějšímu vlivu leptání, neboť materiál PLA není příliš odolný vůči chemikáliím.

### 4.5.3 Měření vodivosti

Měření vodivosti povrchu bylo provedeno pomocí ohm-metru UT58C (viz. Obrázek 4.18) na 5 bodech destičky (viz. Obrázek 4.19), Body měření 1-4. byly měřeny na horní straně destičky, bod 5. byl měřen ze spodní strany. Hodnoty odporu povrchu byly zapsány do Tabulka 2.



Obrázek 4.18 - Ohm-metr UT58C



Obrázek 4.19 - Destička s body pro měření

Tabulka 2 - Měření vodivosti grafitu na rozdílných materiálech

měření vodivosti					
Materiál	1.	2.	3.	4.	5.
PEI 2. [kΩ]	1,51	2,15	1,3	1,17	2,13
PEI 3. [kΩ]	3,75	11,5	3,55	4,96	2,16
ABS 2. [kΩ]	0,91	0,92	0,76	1,17	0,87
PLA [kΩ]	1,44	1,73	1,21	1,39	1,77
PETG [kΩ]	1,09	1,67	0,99	1,12	1,27

Z měřených hodnot odporů je patrné, že čím byla předúprava povrchu lepší a vrstva grafitu hladší, tím byla i hodnota odporu vrstvy menší. Nejhorší vodivost je v případě

destičky PEI 3., která byla při procesu průmyslového naleptávání lehce poškozena prasknutím v místě, kde byla při procesu EC-RESIN Series Permanganan držena držákem.

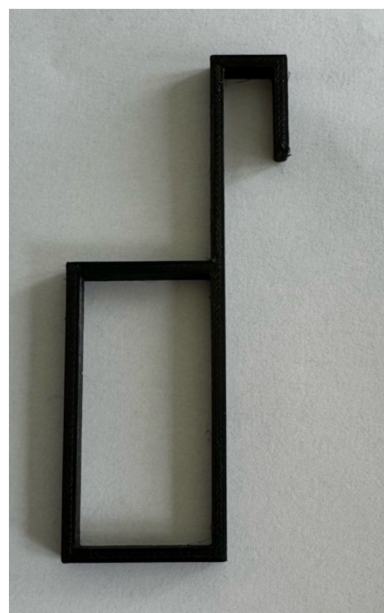
## 4.6 Laboratorní galvanické pokovování mědi

### 4.6.1 Příprava pro pokovování

Galvanické pokovování mědi bylo prováděno na vzorcích materiálů: PEI, PETG a ABS pomocí pokovovací lázně  $\text{CuSO}_4$  Slotocup 40 od firmy Schloetter. Jako katoda (-) je použita destička a anoda (+) je tvořena měděnými elektrodami uvnitř lázně. Do lázně byla přidána hadička s dírkami, která má za úkol neustálého promíchávání lázně během procesu pokovování. Destička je do lázně umístěna pomocí kovového držáku (viz. Obrázek 4.20) a anody byly k sobě připevněny pomocí háčků vytištěných na 3D tiskárně (viz. Obrázek 4.21) a jejich propojení bylo zajištěno pomocí měděných propojovacích plíšků a měděného drátu.



Obrázek 4.20 - Držák na destičky pro galvanické pokovování



Obrázek 4.21 - Háček pro uchycení měděných anod



#### 4.6.2 Proces pokovování

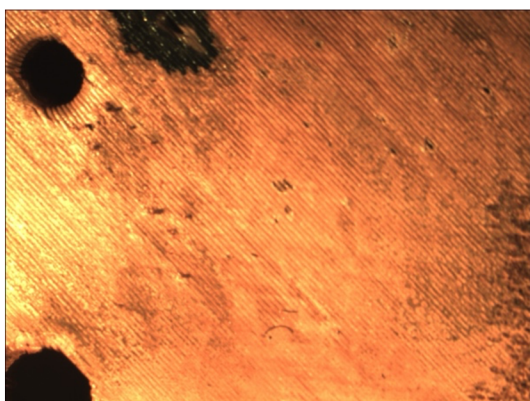
Pomocí laboratorního zdroje byla nastavena hodnota proudu, která byla vypočítána pro správnou proudovou hustotu lázně na rozměr destičky, v našem případě to byla hodnota proudu 1,5 A. Destička byla v lázni po dobu 10 minut, poté byla destička vyndána a opláchnuta nejprve pod tekoucí vodou a následně i pomocí demineralizované vody.



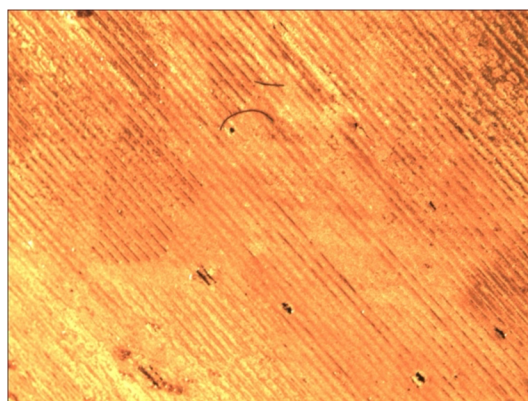
Obrázek 4.22 - Destička PEI po vyndání z galvanické lázně

#### 4.6.3 Optická kontrola povrchu

Všechny destičky byly prozkoumány pod mikroskopem.



Obrázek 4.23 – PEI – galvanická Cu, přiblížení 45x

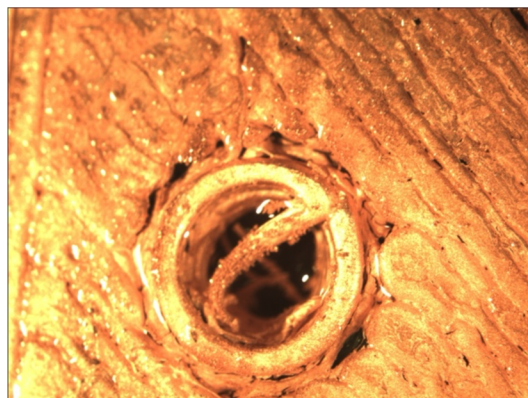


Obrázek 4.24 - PEI – galvanická Cu, přiblížení 90x

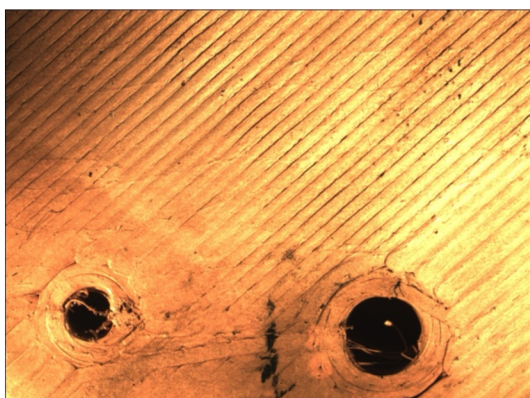




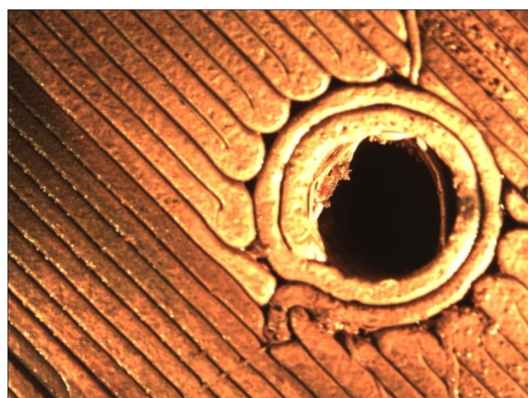
Obrázek 4.25 – ABS – galvanická Cu,  
přiblížení 45x



Obrázek 4.26 – ABS – galvanická Cu,  
přiblížení 90x



Obrázek 4.27 - PETG – galvanická Cu,  
přiblížení 45x



Obrázek 4.28 - PETG – galvanická Cu,  
přiblížení 90x

#### 4.6.4 Tloušťka vrstvy Cu

Pro měření tloušťky vrstvy nanesené mědi byla opět použita laboratorní přesná váha OHAUS Pioneer (viz. Obrázek 4.16). Vážení bylo provedeno po oplachu povrchu a jeho následném důkladném vysušení, aby nebylo ovlivněno vážení zbylou vodou, která by se mohla držet v otvorech destičky. Následující výpočty byly prováděny stejně jako v kapitole 4.5.2 pomocí rovnic (1) – (4). Naměřené a vypočtené hodnoty pro všechny materiály byly zapsány do Tabulka 3.

Výpočet tloušťky:

Výpočet rozdílu hmotností  $\Delta m_2$ :

$m_2 = 11,9313\text{g}$  ... hmotnost vzorku po nanesení grafítu

$m_3 = 12,259\text{g}$  ... hmotnost vzorku po galvanickém pokovování

$$\Delta m_2 = m_3 - m_2 = 12,259 - 11,9313 = 0,3277\text{ g} = 0,3277 \cdot 10^{-3}\text{ kg} \quad (1)$$

Výpočet objemu tloušťky nanesené mědi  $V_2$ :

$\rho_{\text{Cu}} = 8920\text{ kg/m}^3$  ... hustota mědi

$$V_2 = \frac{\Delta m}{\rho_{\text{Cu}}} = \frac{0,3277 \cdot 10^{-3}}{8920} = 3,68 \cdot 10^{-8}\text{ m}^3 \quad (2)$$

Výpočet obsahu destičky:

Rozměry destičky 1:

$a = 50\text{ mm}$

$b = 50\text{ mm}$

$c = 5\text{ mm}$

$$S_1 = 2(ab + bc + ac) = 2(50 \cdot 50 + 50 \cdot 5 + 50 \cdot 5) = 6000\text{ mm}^2 = 6 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2 \quad (3)$$

Rozměry destičky 2:

$a = 50\text{ mm}$

$b = 50\text{ mm}$

$c = 2\text{ mm}$

$$S_2 = 2(ab + bc + ac) = 2(50 \cdot 50 + 50 \cdot 2 + 50 \cdot 2) = 5400\text{ mm}^2 = 5,4 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2 \quad (3)$$

Výpočet tloušťky nanesené mědi:

$$t_{\text{Cu}} = \frac{V_2}{S_1} = \frac{3,68 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 10^{-3}} = 6,136\text{ }\mu\text{m} \quad (4)$$

Tabulka 3 - Změřené hmotnosti vzorků a vypočítaná tloušťka mědi

Měření tloušťky mědi					
materiál	$m_2$ [g]	$m_3$ [g]	$\Delta m_2$ [g]	$V_2$ [mm <sup>3</sup> ]	$t_{Cu}$ [ $\mu$ m]
PEI 1.	12,6500	12,8977	0,2477	27,77	4,628
PEI 2.	11,9313	12,2597	0,3284	36,82	6,136
PEI 3.	12,1707	12,5694	0,3987	44,70	7,450
PLA	6,6078	6,8321	0,2243	25,15	4,657
ABS 1.	5,5029	5,8759	0,3730	41,82	6,969
ABS 2.	3,7814	4,1800	0,3986	44,69	8,275
PETG	9,6240	9,9594	0,3354	37,60	6,267

Hlavní rozdíl v tloušťce vrstvy mědi je patrný na vzorcích PEI 1. a PLA, u kterých byl celý proces galvanického pokovování nastaven proud na hodnotu 1,5 A po dobu 10 minut. Ostatní vzorky byly v lázni nechány po dobu 20 minut, neboť u vzorku PEI 1. nedošlo ke kompletnímu pokrytí povrchu mědi.

#### 4.6.5 Zkoušení pájení PEI destičky

Pomocí pájecí stanice JBC CD-2BQF (viz. Obrázek 4.29) byla testována nejen funkce mědi na povrchu destičky PEI, ale i její tepelná výdrž vůči pájecímu hrotu. Nejprve bylo vyzkoušeno, zda olovnatá pájecí slitina Pb48Sn32Bi20 (viz. Obrázek 4.30) s nižší teplotou tavení (140–160 °C) bude na měděném povrchu destičky držet. Pomocí měkké pájky byla vytvořena malá ploška, na kterou byl připájen následně malý drátek, který byl následně pomocí mikroskopu Olympus zkoumán (viz. Obrázek 4.31).

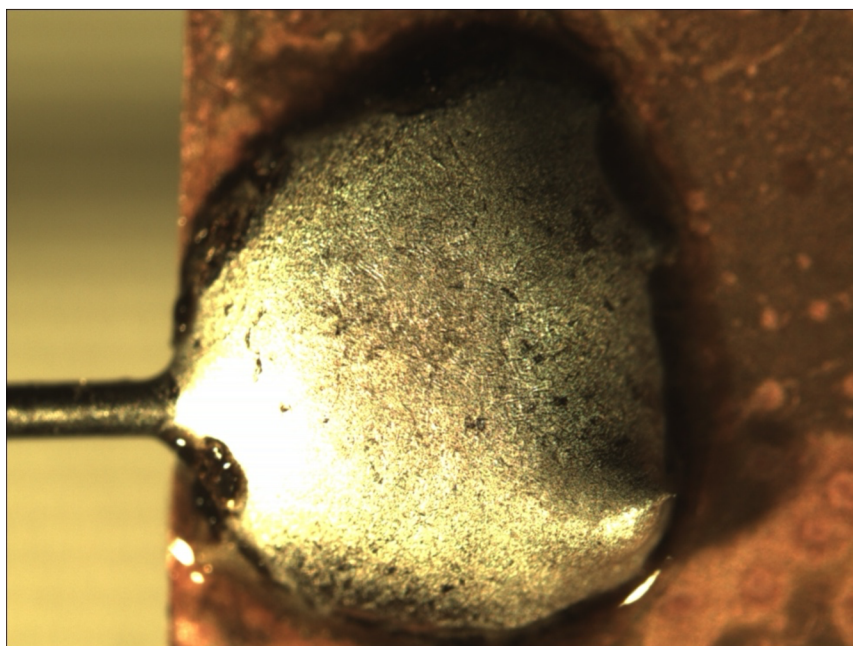


Obrázek 4.29 - Pájecí stanice JBC



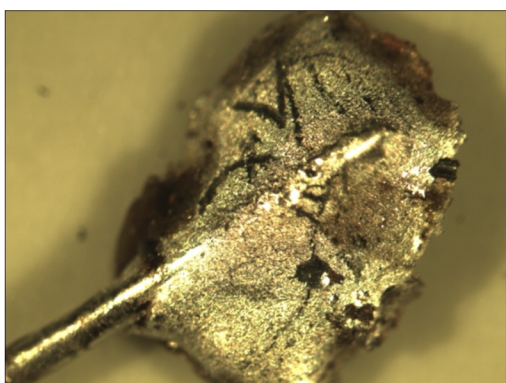
Obrázek 4.30 - Pájka PbSnBi



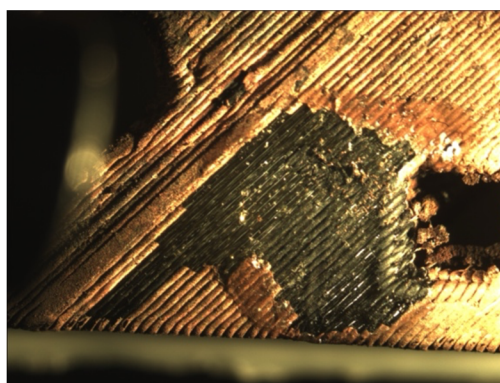


Obrázek 4.31 - Pájený spoj s drátkem na destičce PEI

Pájený spoj neměl úplně lesklý povrch z důvodu nižší teploty pájení a krátké doby pájení, aby nedošlo k poškození destičky. Hlavní problém spoje byla mechanická pevnost. Při větším mechanickém tlaku na destičku došlo k odtržení spoje společně s mědí a grafitem (viz. Obrázek 4.32, Obrázek 4.33 a Obrázek 4.35). Toto úskalí bylo zjištěno už v předchozích procesech, kde grafit nedrží ideálně na povrchu PEI. Je zde pouze mechanická adheze a chybí chemická, která by nám více pomohla k uchycení spoje. Při pájení došlo k lehkému natavení destičky a zdálo se, že spoj se dostal i do povrchu destičky, čímž by se mohla zvýšit adheze a tím i pevnost spoje, kde by bylo zapotřebí testovat do jaké teploty lze takto namáhat povrch a jaký vliv by to mělo na adhezi povrchu.

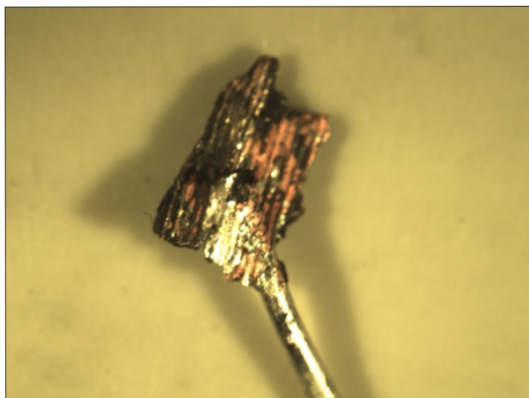


Obrázek 4.32 - Utržený spoj

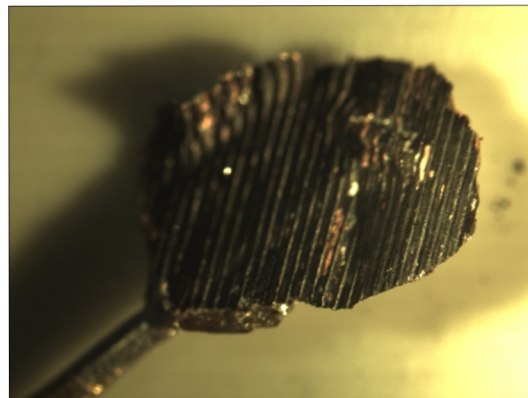


Obrázek 4.33 - Místo vytrženého spoje

Utržený spoj byl očištěný ze spodní strany, při čemž bylo zjištěno, že hlavní problém je opět v grafitu a jeho adhezi s povrchem. Měď držela s pájkou PbSnBi velice dobře a vykazovala velmi dobrou pevnost, tak že nedošlo k jejímu oddělení. Měď byla následně podrobena optické kontrole na mikroskopu Olympus.



Obrázek 4.34 - Očištěný utržený spoj od grafitu



Obrázek 4.35 - Utržený spoj

#### 4.6.6 Zkoušení pájení ABS destičky

Pájení bylo vyzkoušeno na destičce z materiálu ABS, kde sice došlo k lehkému napadení povrchu destičky, nicméně spoj drží velice pevně. Vše bylo prozkoumáno na mikroskopu Olympus (viz. Obrázek 4.36)



Obrázek 4.36 - Pájený spoj na destičce ABS

## 5. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala zkoumáním a hodnocením efektivitu metody galvanického pokovování 3D tištěných dílů. V první části práce byly detailně popsány různé technologie 3D tisku a materiály vhodné pro FDM tisk. Byly analyzovány jejich chemické a mechanické vlastnosti, které jsou klíčové pro výběr vhodné metody pokovování.

V praktické části bylo navrženo a realizováno několik testovacích vzorků z materiálů PEI, ABS, PETG a PLA, na kterých bylo aplikováno galvanické pokovování. Bylo použito Shadow procesu nanášení koloidního grafitu pro přípravu materiálů pro galvanické nanášení měděných vrstev na povrchy destiček. Výsledky naznačují, že předúprava povrchu, prováděná jak v laboratoři UETE FEKT VUT v Brně, tak i pro porovnání kvality v profesionálním prostředí ve firmě Čemebo Blansko, je nejdůležitějším krokem celého procesu. Jedním z hlavních důvodů, proč jsme se obrátili na profesionálního výrobce DPS, firmu Čemebo Blansko, bylo zjistit, jakým způsobem připravit destičku PEI tak, aby se na ní grafit pevně uchytil. I po předúpravě ve firmě Čemebo Blansko však vrstva grafitu nedosahovala požadované adheze a nedržela dostatečně na povrchu destičky. Je zřejmé, že je to další výzva k optimalizaci procesu předúpravy povrchu.

Měřeními tloušťky nanesených vrstev mědi a hodnocením mechanické pevnosti a mikrostruktury pokovených dílů bylo zjištěno, že optimálních výsledků bylo dosaženo při použití galvanického pokovování s pečlivou přípravou povrchu. Byly identifikovány specifické problémy, jako je adheze grafitové vrstvy u materiálu PEI, což otevírá prostor pro další výzkum a optimalizaci těchto procesů.

Celkově práce přispěla k lepšímu porozumění procesu pokovování plastových dílů z 3D tisku a přinesla nové praktické poznatky a doporučení pro jejich efektivní využití v elektrotechnických aplikacích. Další technologické experimenty a získávání praktických poznatků by měly směřovat k optimalizaci předúprav povrchů a zlepšení adheze grafitových vrstev na různé plastové materiály, a především materiál PEI, který odolává vyšším teplotám a umožňuje následné pájení na povrchu galvanické mědi. Dále by se technologické experimenty mohly zabývat následným zkoumáním mechanické odolnosti povrchu v Scratch testech a proměřením teplotně časové závislosti vybraných plastů za působení pokovovacího mědicího roztoku typu: Slotocup 40.

# LITERATURA

- [1] Technologický princip 3D tisku. Technologický princip 3D tisku [online]. [cit.2023-10-30]. Dostupné z: <https://www.sspvc.cz/skola/technologicky-princip-3d-tisku>
- [2] CAROLO, Lucas. Fused Deposition Modeling [online]. 20.5. 2023 [cit. 2023-10-31]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- [3] *3D tisk* [online]. [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://3dstisk.cz/produkt/elegoo-neptune-3-plus/>
- [4] SCHWAAR, Carolyn. SLS 3D Printing – The Ultimate Guide [online]. 2023, 2.3.2023 [cit. 2023-11-05]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/sls-3d-printing-the-ultimate-guide/>
- [5] REITINBER, Vincent. FDM vs Resin 3D Printer: The Differences [online]. 2023, 10.1.2023 [cit. 2023-11-05]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/resin-vs-filament-3d-printer-fdm-vs-sla/>
- [6] NUNEMAKER, Joseph. Resin Print Support: 5 Great Tips & Tricks [online]. 2023, 22.10.2023 [cit. 2023-11-05]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/resin-print-support-tips/>
- [7] VIJAYAKUMAR, J., R. ARAVINDAN a T. VIRUTHAGIRI. Recent Trends in the Production, Purification and Application of Lactic Acid. In: Chemical and biochemical engineering quarterly. 22 (2). Zagreb: Croatian Society of Chemical Engineers, 2008, s. 245-264. ISSN 0352-9568. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/27208692\\_Recent\\_Trends\\_in\\_the\\_Production](https://www.researchgate.net/publication/27208692_Recent_Trends_in_the_Production)
- [8] Purification\_and\_Application\_of\_Lactic\_AcidO'CONNELL, Jackson. PLA Plastic/Material – The Ultimate Guide [online]. 2023, 22.1.2023 [cit. 2023-11-05]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>
- [9] POLYMERS TEAM, Prusa. Chemical resistance of 3D printing materials [online]. 2021, 18.10.2021 [cit. 2023-11-05]. Dostupné z: <https://prusament.com/chemical-resistance-of-3d-printing-materials/>
- [10] FUENTES, Lauren. What Is PETG? – Simply Explained [online]. 2021, 17.8.2021 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-petg-material-plastic/>



- [11] ABS Material: Plastic Material for Prototyping and Parts [online]. 2021, 8.10.2021 [cit. 2023-11-16]. Dostupné z: <https://www.rapidirect.com/blog/abs-material-guide/>
- [12] R. MURALIRAJA, R. ANTHONI SAGAYA SELVAN, A. SELVAKUMAR, M. FRANCO, T.R. TAMILARASAN, U. SANJITH, WEI SHA a J. SUDAGAR. A review of electroless coatings on non-metals: Bath conditions, properties and applications Author links open overlay panel [online]. 2023, 24.5.2023, 23 [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838823020261?via%3Dihub#bib21>
- [13] 3DPrint.com [online]. [cit. 2023-11-03]. Dostupné z: <https://3dprint.com/5104/opensls-sls-3d-printer/>
- [14] Shop3D.CA [online]. [cit. 2023-10-24]. Dostupné z: <https://shop3d.ca/products/form2>
- [15] MERCK [online]. [cit. 2023-10-28]. Dostupné z: [https://www.sigmaaldrich.co.th/th\\_en/38534-5g-ph](https://www.sigmaaldrich.co.th/th_en/38534-5g-ph)
- [16] MOLECULAR DYNAMICS IN POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) (PET) AND POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE)-GLYCOL (PETG) [online]. 2 [cit. 2023-11-23]. Dostupné z: [https://www.ifj.edu.pl/conf/mrj/mrj06/abstrakty/baranowski\\_m.pdf](https://www.ifj.edu.pl/conf/mrj/mrj06/abstrakty/baranowski_m.pdf)
- [17] VANDOME, J. Poly(styrène/butadiène/acrylonitrile) ABS [online]. 2021 [cit. 2023-11-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711221000187?via%3Dihub#bib9>
- [18] LOTH, Nick. *Electroplating 3D Prints – All You Need to Know* [online]. 2023, 7.6.2023 [cit. 2023-11-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/electroplating-3d-prints-all-you-need-to-know/>
- [19] PRUSAMENT [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-pla/>
- [20] PRUSAMENT. [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
- [21] SLUMP, Gabriel. *PLA vs ABS vs PETG: The Main Differences* [online]. 7.11.223n. I. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/pla-vs-abs-vs-petg-differences-compared/>



- [22] COPYRIGHT © SPECIALCHEM 2023. *Polyetherimide (PEI): A Comprehensive Review* [online]. [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetherimide-pei-high-heat-plastic>
- [23] PLASTIC SHEET, ROD AND TUBING DISTRIBUTOR. *Chemical Resistance Chart of Popular Plastic Materials* [online]. [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://k-mac-plastics.net/data/chemical/chemical.htm>
- [24] *5 UNIQUE ELECTROLESS NICKEL PLATING PROCESSES* [online]. [cit. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/blog/5-unique-electroless-nickel-plating-processes/>
- [25] ELECTROPLATING 3D PRINTS – All You Need to Know [online]. In: . 2023, 7.6.2023 [cit. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/electroplating-3d-prints-all-you-need-to-know/>
- [26] *COPPER PLATING ON PLASTICS* [online]. [cit. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/blog/copper-plating-on-plastics/>
- [27] *Typy Řešení Niklování Pro Elektrické Galvanické Pokovování Topných Trubek* [online]. 2023, 4.4.2023 [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://cz.top-heaterchina.com/info/types-of-nickel-plating-solution-for-electric-86791218.html>
- [28] *NICKEL* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/coatings/nickel>
- [29] *GOLD ELECTROPLATING SERVICES* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/coatings/gold>
- [30] *PLASTICS* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/base-materials/plastics>
- [31] BERNASCONIA, R., G. NATALE, M. LEVI, M. TIRONI a L. MAGAGNIN. *Electroless Plating of PLA and PETG for 3D printed Flexible Substrates* [online]. [cit. 2023-12-10]. Dostupné z: [https://re.public.polimi.it/retrieve/e0c31c0e-bde0-4599-e053-1705fe0aef77/Electroless%20Plating%20of%20PLA%20and%20PETG%20for%203D%20printed%20Flexible%20Substrates\\_11311-987278\\_Magagnin.pdf](https://re.public.polimi.it/retrieve/e0c31c0e-bde0-4599-e053-1705fe0aef77/Electroless%20Plating%20of%20PLA%20and%20PETG%20for%203D%20printed%20Flexible%20Substrates_11311-987278_Magagnin.pdf)

## SEZNAM ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
FDM	Fused Deposition Modeling
SLS	Selective Laser Sintering
PA 12	Nylon
PA 11	Nylon 11 CF
TPU	Houževnatý elastomer (nylon)
SLA	Stereolithography
UV	Ultrafialové záření
DLP	Digitální zpracované světlo
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting diode
PLA	Polylactic Acid
IPA	Isopropylalkohol
PETG	Polyethylene Terephthalate modified with Glycol
FDA	Food and Drug Administration
PET	Polyethylentereftalát
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
PEI	Polyeterimid
EMI	Elektromagnetická interference
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EDTA	Kyselina Ethylendiamintetraoctová
USA	United States of America
ASTM	America Society for Testing and Materials
MIL-DTL	Konstrukční parametry pokovování zlatem
CAD	Computer Aided Design
UETE	Ústav elektrotechnologie



