



# 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

**PŘÍSTROJ PRO GALVANICKÉ POKOVENÍ 3D**

**TISKNUTÝCH DÍLŮ**

DEVICE FOR GALVANIC PLATING OF 3D PRINTED PARTS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Sebastián Orgoň**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.**

**BRNO 2024**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Sebastián Orgoň

**ID:** 240869

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Přístroj pro galvanické pokovení 3D tisknutých dílů**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s metodou galvanického pokovování a s technologií 3D tisku plastů. Navrhněte zařízení pro pokovení plastových dílů s příslušnou předúpravou. Provedte sérii experimentů pro nalezení optimálních parametrů celého procesu a výsledky vyhodnoťte pomocí mikroskopu.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 30.5.2024

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

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

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být 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.

## **Abstrakt**

Táto práca má za cieľ priblížiť postup pri pokovovaní 3D výtlačkov, venuje sa jednotlivým častiam procesu. Počínajúc 3D tlačou, kde sú opísané najpoužívanejšie typy tlače a materiály použité pri tlačení. Ďalej poukazuje na dôležitosť predúprav pred galvanickým pokovením a rozoberá jednotlivé možnosti týchto predúprav. Venuje sa taktiež samotnému galvanickému pokoveniu, kde rozoberá princíp tejto technológie depozície tenkej vrstvy a rozlišuje jednotlivé typy možných použitých povlakov. Zároveň sa venuje parametrom ovplyvňujúcim tento proces a kvalitu nanenesenej vrstvy. Ďalej sa venuje konceptu komplexného zariadenia pre takéto galvanické pokovenie a jeho realizácií. Na záver sériou experimentov hľadá optimálne nastavenie parametrov pre pokovovací proces.

## **Kľúčové slová**

Galvanické pokovenie, 3D tlač, úprava povrchu

## **Abstract**

This work aims to bring closer the process of galvanic plating of 3D prints, it is dedicated to individual parts of 3D printing where we go through different types of printing and materials. Also points out the importance of pre-treatments before galvanic plating and discusses the individual options for these pre-treatments. It also deals with galvanic plating itself, where it analyzes the principle of this technology of thin layer deposition and differentiates between the individual types of possible coatings used. At the same time, it deals with the parameters affecting this process and the quality of the applied layer. It also deals with the concept of the complex device for such galvanic plating and its implementation. At the end, through a series of experiments, searches for the optimal setting of the parameters for the plating process.

## **Key words**

Galvanic plating, 3D print, Surface treatment

## **Bibliografická citace**

ORGONĚ, Sebastián. Přístroj pro galvanické pokovení 3D tisknutých dílů. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159742>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Vyroubal.



# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Sebastián Orgoň*

**VUT ID studenta:** *240869*

**Typ práce:** *Bakalárska práce*

**Akademický rok:** *2023/24*

**Téma závěrečné práce:** *Přístroj pro galvanické pokovení 3d tisknutých dílů*

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: 27. květen 2024

-----  
podpis autora

## Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Petrovi Vyroubalovi, Ph.D. za odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa: 27.5.2024

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>1. TEORETICKÁ ČASŤ</b> .....	<b>11</b>
1.1 POSTUP PRI GALVANICKOM POKOVENÍ 3D VÝTLAČKU .....	11
1.2 3D TLAČ .....	11
1.4.1 FDM technológia .....	12
1.4.2 SLA technológia .....	12
1.4.3 SLS technológia.....	12
1.3 ÚPRAVA POVRCHU.....	13
1.3.1 Mechanické úpravy povrchu .....	13
1.3.2 Chemické úpravy povrchu.....	14
1.3.3 Špeciálne úpravy povrchu .....	15
1.4 GALVANICKÉ POKOVENIE.....	16
1.4.1 História galvanického pokovenia.....	16
1.4.2 Princíp elektrodepozície .....	16
1.4.3 Lokálne galvanické pokovenie (tamponovanie) .....	17
1.4.4 Faradayov 1. a 2. zákon elektrolýzy.....	18
1.5 PARAMETRE OVPLYVŇUJÚCE POKOVENIE.....	19
1.5.1 Chemické parametre .....	19
1.5.2 Elektrické parametre.....	20
1.5.3 Fyzikálne parametre .....	21
1.5.4 Elektrolyt a deponované materiály.....	21
<b>2. CIELE BAKALÁRSKEJ PRÁCE</b> .....	<b>24</b>
<b>3. ZARIADENIE PRE GALVANICKÉ POKOVENIE</b> .....	<b>25</b>
3.1 ZDROJ KONŠTANTNÉHO PRÚDU .....	27
3.2 OVLÁDANIE VÝSTUPNÝCH PERIFÉRIÍ .....	28
<b>4. REALIZÁCIA ZARIADENIA</b> .....	<b>29</b>
4.1 DOSKA PLOŠNÝCH SPOJOV.....	29
4.2 MECHANICKÁ ČASŤ .....	30
4.3 POUŽÍVATEĽSKÉ ROZHRAŇIE.....	33
<b>5. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ</b> .....	<b>35</b>
5.1 POSTUP PRI POKOVANÍ .....	35
5.2 MERANIE HRÚBKY VRSTVY NA ZÁKLADE ZMENY PRÚDU .....	37
5.3 MERANIE HRÚBKY VRSTVY NA ZÁKLADE ZMENY ČASU.....	38
5.4 VYHODNOTENIE OPRACOVANIA VÝTLAČKU .....	39
<b>ZÁVER</b> .....	<b>42</b>

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Bloková schéma postupu práce pri pokovení 3D výtlačku .....	11
Obrázok 2 Principiálna schéma pokovenia[6] .....	17
Obrázok 3 Principiálna schéma lokálneho galvanického pokovenia[11].....	18
Obrázok 4 Bloková schéma zariadenia [19] .....	25
Obrázok 5 Schéma regulácie prúdu [19].....	27
Obrázok 6 MOSFET pre ovládanie vzduchového čerpadla [19] .....	28
Obrázok 7 Doska plošných spojov v 2D zobrazení [19].....	29
Obrázok 8 Doska plošných spojov v 3D zobrazení [19].....	30
Obrázok 9 Detail na zadný panel [20] .....	31
Obrázok 10 Zariadenie na pokovenie [20].....	31
Obrázok 11 Detail na predný panel [20].....	31
Obrázok 12 Detail na mechanizmus brúsky [20].....	32
Obrázok 13 Detail na pokovovaciu kúpeľ [20].....	32
Obrázok 14 Zrealizované pracovisko na galvanické pokovenie .....	33
Obrázok 15 Bloková schéma užívateľského rozhrania [19] .....	34
Obrázok 16 Opracovaný 3D výtlačok.....	35
Obrázok 17 3D výtlačok nastriekaný grafitovým sprejom .....	35
Obrázok 18 Pokovený 3D výtlačok .....	36
Obrázok 19 Vyznačené body merania na pokovenom výtlačku .....	37
Obrázok 20 Závislosť hrúbky vrstvy od prúdu v rôznych bodoch.....	38
Obrázok 21 Závislosť hrúbky vrstvy od doby pokovenia v rôznych bodoch.....	39
Obrázok 22 Materiál pred opracovaním oddialený pohľad .....	40
Obrázok 23 Materiál pred opracovaním priblížený pohľad .....	40
Obrázok 24 Materiál po opracovaní oddialený pohľad.....	41
Obrázok 25 Materiál po opracovaní priblížený pohľad .....	41

# ZOZNAM TABULIEK

5.1 TABUĽKA ZÁVISLOSTI HRÚBKY VRSTVY OD PRÚDU .....	37
5.2 TABUĽKA ZÁVISLOSTI HRÚBKY VRSTVY OD DOBY POKOVENIA .....	39

# ÚVOD

V súčasnej dobe sa kladie čím ďalej, tým väčší dôraz na použité materiály a ich cenu. Pri hotovom produkte chceme dosiahnuť čo najlepšie výsledné vlastnosti. Či už nízku hmotnosť, ľahkú vyrobiteľnosť, ale aj dostatočne odolný povrch a to všetko pri nízkej cene. Tieto vlastnosti vieme vo veľa prípadoch zabezpečiť pomocou galvanického pokovenia 3D výtlačkov.

Povrchová úprava galvanickým pokovením je relatívne jednoduchá technológia, ktorá má veľké využitie v priemysle spolu s 3D tlačou. Keď spojíme tieto dve technológie, môžeme získať ľahký a lacný výsledný produkt s odolným povrchom. Táto technológia sa tak ako v priemysle dá využiť aj v domácom prostredí, keďže v súčasnej dobe rastie počet užívateľov 3D tlačiarní v domácom prostredí. Pri kombinácii so zariadením na galvanické pokovenie je možné dosiahnuť väčších možností. Galvanické pokovenie okrem povrchovej úpravy dodáva aj lepší vzhľad jednotlivým produktom.

V súčasnosti na trhu neexistuje komplexné zariadenie, ktoré by bolo určené na galvanické pokovenie, v praxi sa používajú laboratórne zdroje vedľa ktorých sa umiestni nádoba a do jej vnútra sa spoločne s elektrolytom ponorí pokovovaný prvok a materiál, ktorý sa na neho nanáša. Preto sa táto práca venuje návrhu a realizácii takéhoto zariadenia ako aj teórií predúprav a samotného galvanického pokovenia.

# 1. TEORETICKÁ ČASŤ

## 1.1 Postup pri galvanickom pokovení 3D výtlačku



Obrázok 1 Bloková schéma postupu práce pri pokovení 3D výtlačku

V prípade galvanického pokovenia plastov alebo obecné galvanického pokovenia nevodivých súčastí, ide o zdĺhavejší proces oproti pokoveniu už vodivej súčiastky, keďže je potrebné daný komponent zvodiviť. Postup takéhoto procesu je zobrazený v blokovej schéme na obrázku č. 1. Samotné zvodivenie je možné viacerými spôsobmi, najvyužívanejším spôsobom je využitie spreju s vodivou farbou. Medzi najčastejšie používané farby sa radí grafitová, medenná a strieborná farba. Najväčší rozdiel jednotlivých farieb je v cene a vodivosti farieb. Ďalším spôsobom je technológia airbrush, prípadne klasické nanesenie pomocou štetca. V týchto prípadoch sa využívajú rovnaké typy farieb ako pri spreji. Najmenej častým spôsobom je primiešanie vodivého materiálu do plastu pri 3D tlači, kde je najčastejšie používaný materiál s prímiesou uhlíku. Táto metóda pri pokovení nie je taká účinná a vyžaduje väčšiu námahu a kvalitu ostatných faktorov pri procese pokovenia. Po takto upravenom povrchu je možné pokračovať v klasickom pokovovacom procese ako je vysvetlené v kapitole 1.4.2.

## 1.2 3D tlač

V súčasnosti je 3D tlač veľmi využívaná v priemysle, a aj v domácnosti sa postupne uchyťava čoraz viac. Vo všeobecnosti sa jedná o aditívny proces výroby, kde sa postupne nanáša po vrstvách materiál na základe predlohy z počítaču. To zaručuje menší odpad pri výrobe ako pri použití obrábacích strojov, kde sa materiál redukuje a tak vzniká výsledný produkt. V dnešnej dobe už existuje niekoľko rôznych technológií a používaných materiálov pre 3D tlač. Ďalej si rozoberieme najpoužívanejšie technológie a ich výhody a nevýhody.[15]

### **1.4.1 FDM technológia**

FDM je v súčasnosti najlacnejšia a pravdepodobne aj najrozšírenejšia technológia 3D tlače, jedná sa o technológiu, kde materiál vo forme filamentu prechádza extrúderom, ktorý ho roztaví a tlačová hlava ho postupne nanáša vrstvu po vrstve na rozohriatu podložku. Nevýhodou tejto technológie je dĺžka tlače, ako aj nižšia kvalita výsledného výtlačku. Ďalšou nevýhodou tejto technológie je nutnosť využitia podporných vrstiev pri náročnejších modeloch s prevismi.[15]

Pri FDM technológií sa využívajú termoplasty rôznych druhov a farieb. Medzi základné materiály môžeme zaradiť PLA, ABS, PET/PETG. PLA je najčastejšie používaným z nich, je pomerne tvrdý a má nízku teplotnú rozťažnosť, čo je dobré pre tlač veľkých aj malých výrobkov. Taktiež je biologicky odbúrateľný. ABS je pevný a odolný materiál, kvôli svojej odolnosti voči okolitým podmienkam najmä UV žiareniu je najčastejšie využívaný pre exteriérove objekty. PETG sa využíva najmä pri tlači väčších mechanických častí, je húževnaty a pružný preto sa pri namáhaní len ohne a nepraskne. [16]

### **1.4.2 SLA technológia**

SLA technológia sa využíva zväčša na malé objekty, kde je potrebná vysoká presnosť výsledného výrobku. Ide o technológiu, pri ktorej sa nevyužíva termoplast ako pri FDM tlači ale tekutá polymérna živica. Zameraním lasera na určité miesto, sa miesto vytvrdí a vznikne vytvrdená vrstva. Technológia síce poskytuje vysokú kvalitu ale nevýhodou je pomalá rýchlosť tlače a problematická tlač vertikálnych štruktúr.[15]

### **1.4.3 SLS technológia**

Je nákladná technológia používaná vo veľkých firmách, kde sa vyžaduje najvyššia kvalita výrobku. Výsledné materiály pri tejto technológií nemusia byť len z plastu ale napríklad aj z kovu či keramiky. Využíva sa technológia, pri ktorej laser vytvrdzuje požadovaný tvar do materiálu vo forme prachu. Výtlačky sú veľmi presné a odolné vzhľadom na veľké množstvo rôznych použiteľných materiálov. [15]



## 1.3 Úprava povrchu

Najdôležitejšou požiadavkou pri galvanickom pokovovaní je čistota povrchu, na ktorý sa vrstvy nanášajú. Okrem výnimiek sa nemôžu pokovovať diely bez toho, aby boli bez predbežnej úpravy vložené do roztoku. Kontaminácia často zabraňuje usadzovaniu a nedostatku priľnavosti. Medzi dva typy metód úpravy povrchu patrí fyzikálne čistenie a chemické čistenie. Chemické čistenie pozostáva z použitia rozpúšťadiel, ktoré sú buď povrchovo aktívne chemikálie alebo chemikálie reagujúce s kovom/povrchom. Pri fyzikálnom čistení sa používa mechanická energia, pomocou ktorej sa odstraňujú nečistoty. Fyzikálne čistenie zahŕňa napríklad obrusovanie alebo omielanie.[12]

### 1.3.1 Mechanické úpravy povrchu

Pri mechanických úpravách sa nejedná o geometrickú zmenu rozmerov predmetu ale o dosiahnutie požadovanej akosti povrchu. Pričom hlavnými bodmi úpravy je očistenie povrchu substrátu od nečistôt, docielenie správnej zrnitosti povrchu a dosiahnutie požadovaných vzhľadových a mechanických vlastností povrchu. Pričom sa používa omielanie, kartáčovanie, brúsenie, tryskanie a leštenie. [14]

#### a) Omielanie

Pri omielaní sa povrchy malých predmetov opracovávajú vzájomným omielaním alebo pomocou brúsnych uhladzovacích telies. Jednotlivé objekty sa prevaľujú a preťahujú v bubnoch čím sa obrusujú, pričom najväčší úbytok je na hranách a rohoch, a najmenší na rovných plochách. Existujú 3 typy omielania, a to rotačné, vibračné a odstredivé. [12]

#### b) Kartáčovanie

Technológia kartáčovania je technologický proces, pri ktorom sa odstraňujú hrubé nečistoty a zároveň sa zjemňuje povrch. Používajú sa k tomu väčšinou rotačné kartáče z ocelových drôtov, prípadne sa k jemnejšej úprave používajú kartáče z prírodných a umelých vlákien, pričom rozlišujeme kartáčovanie strojné a ručné. [12] [14]

#### c) Brúsenie

Je to odoberanie povrchu objektu pritlačovaním brúsiaceho nástroja k základnému materiálu. Rozlišujeme ručné a strojné brúsenie. Pri ručnom brúsení sa využívajú brúsne papiere, ktoré sa rozdeľujú podľa veľkosti zrn, čím väčšie zrná tým ide o hrubšie obrábanie, kde sa odoberá viac povrchového materiálu. Podobné je aj strojné brúsenie, kde sa namiesto papierov používajú brúsne kotúče. Zrno musí byť z tvrdšieho materiálu ako je obrusovaný povrch objektu. [14]

#### d) Tryskanie

Tryskanie je metóda predúpravy povrchov, pri ktorej sa nečistoty povrchov strhávajú pomocou tryskacích materiálov, ktoré sú aplikované pomocou silného prúdu na objekt. Ich účinok závisí od ich tvaru, materiálu, zloženia obrobku a sily zrn. Používajú sa kovové aj syntetické abrazíva, drvené sklo, kremičitý piesok aj diamantový prášok. Rozdeľujeme viacero druhov tryskania no medzi základné patrí mechanické (metacími kolesami), pneumatické (vzduchovou tryskou) a hydraulické (vodnou tryskou). [12]

#### e) Leštenie

Pri leštení ide len o veľmi malý odber materiálu, a väčšinou ide o poslednú úpravu. V princípe ide o princíp podobný technológií brúsenia pričom sa využíva leštiacich pást, ktorej súčasťou sú abrazívne látky. [14]

### 1.3.2 Chemické úpravy povrchu

Pri chemických úpravách sa snažíme hlavne odstrániť nečistoty na povrchu kovu. Ide napríklad o mastné látky, kovové nečistoty atď.. Fungujú na základe interakcie medzi chemickým činidlom a znečisteným povrchom. Po takejto úprave, je povrch náchylný na vznik korózií preto sa väčšinou tento povrch neutralizuje. Medzi najpoužívanejšie úpravy patrí odmasťovanie a chemické leštenie. [12]

#### a) Odmasťovanie

Proces, pri ktorom z povrchu odstraňujeme pomocou odmasťovacích prípravkov mastnoty a nečistoty. Používame organické rozpúšťadlá a vodné alkalické roztoky. Pri alkalických rozpúšťadlách sa objekt ponorí do rozpúšťadla. Mastnota sa mení

po chemickej stránke, organická mastnota zmydelňuje a anorganická emulguje. Organické rozpúšťadlá napr. technický benzín a petrolej, sa využívajú k ručnému odmasteniu, pričom je potreba dodržiavať prísne bezpečnostné opatrenia. Tento typ nie je možné využiť na vlhké plochy. Jednotlivé odmasťovacie prípravky môžeme nanášať ponorom, postrekom, prípadne poznáme odmasťovanie ultrazvukové a elektrolytické. Technológiu ponorom a postrekom považujeme za základné typy, pričom ponorenie objektu do roztoku je najlacnejší spôsob a využíva sa pri miernom znečistení, zatiaľ čo technológia postrekom sa využíva pri silnejšom. Elektrolytické odmasťovanie a odmasťovanie ultrazvukom patrí medzi menej využívané princípy. Elektrolytické odmasťovanie sa používa tam, kde je požadovaná vysoká čistota povrchu a pracuje na princípe elektrolýzy. [14]

#### b) Chemické leštenie

Na leštenie sa používajú chemické roztoky rozličného chemického zloženia. Každá skupina materiálov si vyžaduje roztok odlišného zloženia, väčšina roztokov sa tvorí na báze silných kyselín, menšia časť na báze zásaditých roztokov. Po ponorení do roztokov začnú prebiehať chemické a miestne elektrochemické procesy, materiál sa začne rozpúšťať a kvalita povrchu sa zlepšuje. Súčasťou získava aj vysoký lesk. [12]

### 1.3.3 Špeciálne úpravy povrchu

Medzi špeciálne povrchové úpravy môžeme zaradiť ultrazvukové čistenie a úpravu povrchu plazmou.

Pri ultrazvukovom čistení môžeme hovoriť o fyzikálno-chemickom procese. Funguje na princípe kavitácie, pri ktorej sa v čistiacej kvapaline vytvárajú mikroskopické bubliny, ktoré následne implodujú a uvoľnená energia strháva nečistoty z povrchu objektu. Druh kvapaliny sa vyberá na základe druhu nečistoty a materiálu čisteného objektu. Kombinácia chemického prostriedku a ultrazvuku skraca výrazne dĺžku čistiaceho procesu.

Plazmová technológia zbavuje povrch od nečistôt pomocou bombardovania povrchu aktívnymi iontami a následne sa odčerpajú nečistoty pomocou vývevy. Na urýchlenie elektrónov sa využíva magnetické pole, čo má za následok oveľa nižšie zahrievanie

a takmer žiadnu kontamináciu povrchu, môžeme teda hovoriť o magnetronovom čistení plazmou.

## **1.4 Galvanické pokovenie**

Elektrické pokovenie zahŕňa prechod elektrického prúdu cez roztok nazývaný elektrolyt. Pokovenie dosiahneme ponorením dvoch elektród do elektrolytu a následným pripojením jednosmerného zdroja. Elektróda, na ktorú nanášame tenkú vrstvu, je vo všeobecnosti vyrobená z lacnejšieho kovu alebo nekovu potiahnutého vodivým materiálom, ako je napríklad grafit, vtedy hovoríme o galvanoplastike, v každom prípade musí byť vodivý, inak nebude prechádzať elektrický prúd a nedôjde k pokovovaniu. Cieľom tejto technológie väčšinou býva nanosenie tenkej vrstvy kovu na materiál za účelom zlepšenia mechanických vlastností či prípadne estetických vlastností. Vlastnosti závisia od hrúbky vrstvy, typická hrúbka galvanického pokovenia sa pohybuje od pár mikrónov až po niekoľko desiatok.

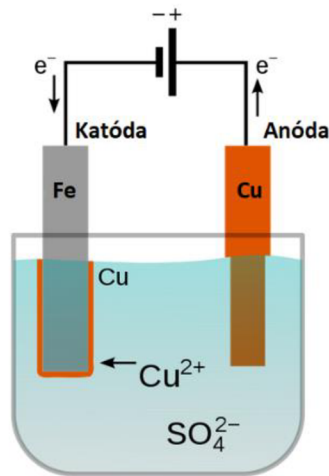
### **1.4.1 História galvanického pokovenia**

Galvanické pokovenie bolo prvýkrát objavené Luigi Brignatellim v roku 1805, pri použití tejto technológie na pokovenie zlatom. Tento objav však nebol zaznamenaný, kvôli francúzskej akadémii vied. 35 rokov po úspechu Brignatelliho, objavil John Wright možnosť použitia kyanidu draselného ako elektrolytu pre pokovenie zlatom a striebrom. Pričom zistil že tento elektrolyt je pomerne efektívny. Na jeho prácu nadviazali bratrancei Elkingtonovci, ktorý od Wrighta odkúpili patent a podarilo sa im z Anglicka túto metódu rozšíriť do celého sveta. Metóda galvanického pokovovania sa postupne stala efektívnejšou a pokročilejšou vďaka používaniu ekologickejších receptúr a používaním jednosmerných zdrojov napájania. [2][3]

### **1.4.2 Princíp elektrodepozície**

Na elektrodepozíciu potrebujeme dve elektródy vyrobené z rôznych vodivých materiálov, elektrolyt a zdroj jednosmerného prúdu. Jedna z elektród je vyrobená z kovu, ktorého tenkú vrstvu sa snažíme naniesť na druhú z elektród, a elektrolytom je roztok soli toho istého kovu. Takže napríklad, ak pomeďujeme mosadz, potrebujeme

medenú elektródu, mosadznú elektródu a roztok zlúčeniny na báze medi, ako je napríklad roztok síranu meďnatého.



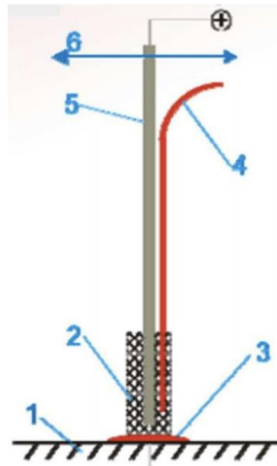
Obrázok 2 Principiálna schéma pokovenia[6]

Dve elektródy ponoríme do roztoku a zapojíme ich do obvodu tak, aby sa meď stala kladnou elektródou, teda anódou a mosadz sa stala zápornou elektródou, teda katódou. Keď zapneme zdroj napätia, roztok síranu meďnatého sa rozdelí na ióny. Ióny medi, ktoré sú kladne nabité sú priťahované k záporne nabitej mosadznej elektróde a pomaly sa na nej usadzujú, čím vytvárajú tenkú vrstvu mede na povrchu. Medzitým sa síranové ióny (ktoré sú negatívne nabité) dostanú na kladne nabitú medenú anódu a uvoľnia ďalšie ióny, ktoré sa pohybujú cez zdroj smerom k negatívnej mosadznej elektróde. Čas, za ktorý sa galvanizované atómy nahromadia na povrchu zápornej elektródy, závisí od veľkosti elektrického prúdu a koncentrácie elektrolytu. Zvýšením jedného z nich dosiahneme zvýšenie rýchlosti pohybu elektrónov a iónov obvodom a tým aj zvýšenie rýchlosti pokovenia. [4][5][6]

### 1.4.3 Lokálne galvanické pokovenie (tamponovanie)

Technológia lokálneho galvanického pokovenia alebo tzv. Tampónovanie je špeciálny druh technológie, pri ktorom sa pokovuje len určitá časť povrchu objektu. Najčastejšie sa táto technológia využíva na ťažko dostupné miesta na povrchu, prípadne na opravu povrchu. Medzi hlavné výhody patrí menšia spotreba elektrickej energie, elektrolytu, a rýchlejší proces pokovenia pre malé plochy. Princíp je podobný technológií klasického pokovenia. Pokovovaný objekt je pripojený ako katóda, pričom anóda je umiestnená do držiaku a obalená savým materiálom, tento materiál sa napustí

elektrolytom. Po priložení anódy k pokovovanému objektu sa uzavrie obvod a ióny kovu sa začnú zachytávať na povrchu objektu. Elektrolyt môžeme dodávať ručne alebo automaticky. [10][11][7]



Obrázok 3 Principiálna schéma lokálneho galvanického pokovenia[11]

Časti zariadenia pre lokálne galvanické pokovenie:

- 1) Pokovovaná súčasť (katóda)
- 2) Tampón
- 3) Elektrolyt
- 4) Prívod elektrolytu do tampónu (len pri automatickom)
- 5) Anóda
- 6) Pohyb anódy na zabezpečenie rovnomerného rozloženia povlaku

#### 1.4.4 Faradayov 1. a 2. zákon elektrolýzy

Elektrochemický výskum Michaela Faradaya v roku 1833 viedol k vývoju Faradayových zákonov elektrolýzy, ktoré ukazujú kvantitatívny vzťah medzi množstvom preneseného elektrického náboja alebo energie a látkou uloženou medzi elektródami. Elektrolýza je premena elektrickej energie na chemickú energiu.

Podľa prvého Faradayovho zákona o elektrolyze je hmotnosť akejkoľvek látky uloženej alebo uvoľnenej na elektróde priamo úmerná množstvu elektrickej energie prenesenej cez elektrolyt.

$$m \propto Q \quad (1.1)$$

$$Z = \frac{mz}{q} \text{ [g/C]} \quad (1.2)$$

Kde  $m$  je hmotnosť,  $Q$  je náboj a  $Z$  je proporčná konštanta určujúca hmotnosť nanesej látky na jednotku náboja

Faradayov druhý zákon elektrolyzy hovorí, že množstvo rôznych látok uvoľnených z rovnakého množstva elektrického prúdu cez elektrolytický roztok je priamo úmerné ich ekvivalentným hmotnostiam.

$$m \propto \frac{\text{molárna hmotnosť}}{\text{valencia}} \quad (1.3)$$

Kde  $m$  je hmotnosť[9][10]

## 1.5 Parametre ovplyvňujúce pokovenie

Na proces elektrodepozície má vplyv viacero parametrov. Kvalita pokovovania závisí na správnej kombinácii týchto parametrov. Tieto parametre vychádzajú z Faradayových zákonov elektrolyzy. Jednotlivé parametre sú na sebe závislé a preto je pomerne ťažké určiť optimálne podmienky. Parametre sa dajú rozdeliť do troch kategórií. Prvou kategóriu sú chemické parametre, ďalšou kategóriou sú elektrické a poslednou fyzikálne parametre.

### 1.5.1 Chemické parametre

Medzi chemické parametre patrí samotná koncentrácia elektrolytu. Elektrolyt je základnou časťou pokovovacieho procesu a výrazne ovplyvňuje výslednú kvalitu pokoveného produktu, ako aj celkový proces pokovenia. Koncentrácia kovových solí v elektrolyte je veľmi dôležitým faktorom v procese pokovenia. Obecné platí, že vyššia koncentrácia zvyšuje rýchlosť depozície materiálu na pokovovaný prvok a ovplyvňuje

prúdovú efektivitu. Všeobecnú optimálnu koncentráciu elektrolytu nie je možné dosiahnuť, keďže závisí od materiálu akým pokovujeme a na aký pokovujeme.

Ďalším dôležitým parametrom je použitie aditív v elektrolyte. Ich hlavnou úlohou je zlepšenie kvality pokovenia, zvyšujú pevnosť a tvrdosť deponovanej vrstvy a tak zlepšujú aj celkový vzhľad pokovenia.

Faktor ovplyvňujúci absorpciu aditív je výška pH. Najlepšie výsledky pokovenia sa pohybujú v rozmedzí 5-6 na stupnici pH. Zvýšením hladiny pH prichádza k zvýšeniu hrúbky nanesej vrstvy. Vyššie pH má ale za následok vnútorné pnutie v deponovanom materiále.

Posledným chemickým parametrom je takzvaná sila hodu, je to vlastnosť elektrolytu nanášať vrstvu rovnomerne na pokovovaný predmet. Závisí na prúdovej hustote, vodivosti elektrolytu a od miešania elektrolytu. [18][19]

### **1.5.2 Elektrické parametre**

Ďalšou kategóriou sú elektrické parametre, najdôležitejším z nich je elektrický prúd. Veľkosť použitého elektrického prúdu závisí hlavne od veľkosti povrchu pokovovaného objektu. Správny výber prúdu má za následok jemnozrnnú štruktúru čo pozitívne vplýva na zlepšenie mechanických vlastností. Z teoretického hľadiska by pri pokovovacom procese mohol byť najvýhodnejší pulzný prúd hlavne pri vyššej frekvencii zlepšuje rovnomernosť, tak aby bola rovnaká hrúbka na okrajoch a zároveň na rovných plochách objektu. Znižuje pórovitosť a znižuje veľkosť zrn. No použitie pulzného zdroja má za následok väčšiu spotrebu energie a môže spôsobiť prehriatie elektrolytu.

Ďalším faktorom je prúdová hustota. Pri elektrodepozícii sa zvyčajne označuje v miliampéroch na centimeter štvorcový elektródy a je nepriamo úmerná času depozície. Najlepšie výsledky sú pri približne 50 mA/cm<sup>2</sup>, pri zvýšení dochádza k zväčšeniu zrna v štruktúre a tak zníženiu kvality textúry.

Faktory, ktoré neovplyvňujú pokovovací proces, no skôr hovoria o kvalite procesu sú prúdová efektivita, ktorá bola spomenutá vyššie, a prúdová distribúcia.



Prúdová efektívnosť je definovaná ako percento elektrického prúdu v elektrolyte dosahujúci požadovanú finálnu vrstvu. Matematicky ju môžeme vyjadriť ako:

$$PE = 100 \cdot \frac{m_{akt}}{m_{teo}} \quad (1.4)$$

kde  $m_{akt}$  je váha nanoseného materiálu a  $m_{teo}$  je vypočítaná hodnota vychádzajúca z faradayovho zákona. Najväčšej efektívnosti sa dosiahne pri prúdovej hustote 25-45 mA/cm<sup>2</sup>. Prúdová distribúcia zase hovorí o probléme rozdielnej koncentrácie prúdu na rohoch a v menšom množstve v strede. Zlepšenie tohto parametru sa dá dosiahnuť otáčaním pokovovaného prvku, premiešavaním elektrolytu, prípadne úpravou koncentrácie a vodivosti elektrolytu.

Vodivosť elektrolytu je posledným z elektrických parametrov, je závislá na chemickej kompozícii elektrolytu, viskozite a teplote. So zvyšujúcou sa vodivosťou sa zväčšuje hrúbka nanosenej vrstvy. [18][19]

### 1.5.3 Fyzikálne parametre

Poslednou kategóriou sú fyzikálne parametre, medzi tieto parametre môžeme zaradiť teplotu elektrolytu. Pri zvýšení teploty sa zlepšuje vodivosť elektrolytu a tým sa zlepšuje jednotnosť pokovovanej vrstvy. Ideálna teplota teda závisí aj od zvoleného elektrolytu a jeho vlastností.

Ďalším parametrom je čas depozície, ktorý priamo definuje hrúbku vrstvy. Je nepriamo úmerný prúdovej hustote a teda zvýšením času depozície sa zväčšuje nanosená vrstva.

Pre rovnomerné rozloženie je treba premiešavať elektrolyt a zároveň otáčať pokovovaný prvok. Premiešavanie elektrolytu pomáha pohybu iónov v elektrolyte, minimalizuje plynové bublinky a tým celkovo zlepšuje proces pokovenia. Otáčanie pokovovaného predmetu je taktiež dôležité pre rovnomerné rozloženie tenkej vrstvy po celom povrchu. [18][19]

Posledným parametrom je predúprava povrchu buď mechanickým alebo chemickým spôsobom čo je bližšie vysvetlené v kapitole 1.2.

### 1.5.4 Elektrolyt a depozitované materiály

Voľba elektrolytu je jeden z najdôležitejších faktorov pri pokovaní. Elektrolyt je roztok na vodnej báze, ktorý obsahuje rozpustené soli kovov. Rôzne typy elektrolytov

sa vyrábajú na základe rôznych depozitovaných materiálov pre rôzne účely použitia. Pri ochrane proti korózií sa zväčša používajú povlaky zinku, kadmia, niklu, prípadne striebra, zlata a platiny. Pri dekoratívnom sa používa zlato, striebro, chróm a ďalšie. Pri špeciálnych potrebách, napríklad pri ochrane proti opotrebovaniu sa používa tvrdý chróm alebo pri potrebe získania magnetických vlastností sa môže nanášať čisté železo. Okrem solí sa do roztoku primiešavajú zjasňovače, organické prímеси, a iné vodivé soli, ktoré sa kodedepozitujú a tak zlepšujú vlastnosti depozitovanej vrstvy. [17]

#### A) Depozícia mede

Meď sa najčastejšie využíva pri aplikáciách spojených s elektronikou. Najčastejšie sa využíva elektrolyt na báze síranu meďnatého, ktorý sa rozpúšťa v kyseline sírovej s nízkou koncentráciou, tá slúži nielen na zlepšenie vodivosti, ale aj dopomáha k rovnomernosti vrstiev. Síran meďnatý sa v roztoku disociuje v iónoch  $\text{Cu}^{2+}$  a  $(\text{SO}_4)^{2-}$ . Ióny  $\text{Cu}^{2+}$  sa na katóde redukujú na meď a tam sa ukladá ako povlak. Síranové ióny sa presúvajú k medenej anóde kde sa vytvorí nový síran meďnatý rozpustením anódy v roztoku. Pri medi môžeme využiť aj roztok na báze kyanidu, ktorý má veľmi dobré adhézne vlastnosti no nie je v praxi tak využívaný vzhľadom na jeho toxicitu. [17] [6]

#### B) Depozícia niklu

Pri depozícií niklu sa využíva niekoľko typov elektrolytu, prvým typom je elektrolyt na báze síranu nikelnatého, ktorý sa v roztoku disociuje v iónoch  $\text{Ni}^{2+}$  a  $(\text{SO}_4)^{2-}$ . Ióny  $\text{Ni}^{2+}$  sa na katóde redukujú na nikel a ten sa tam ukladá ako povlak. Síranové ióny sa presúvajú k niklovej anóde kde sa vytvorí nový síran nikelnatý rozpustením anódy v roztoku. V roztoku sa zároveň využíva kyselina bóritá na udržanie hodnoty pH. Rovnaký princíp funguje aj pri použití sulfamátu nikelnatého ktorý má veľmi vysokú rozpustnosť vo vode, čím je možné dosiahnuť veľmi dobré mechanické vlastnosti. Pri nikli je možné použiť aj elektrolyt bez síranu, použitím chloridu nikelnatého. Depozícia vyžaduje v tomto prípade menej elektrickej energie, no riešenie je celkovo drahšie. [17]

### C) Depozícia zlata

Zlato sa podobne ako meď využíva v elektropriemysle vzhľadom na jeho dobré elektrické vlastnosti a vysokú odolnosť voči korózií. Pri zlate sa často využívajú elektrolyty na báze kyanidu. Využívajú sa ako aj alkalické, tak aj kyslé roztoky. Využívajú sa vysoko toxické zlúčeniny draslíku ako tetrakynoaurát draselný alebo dikynoaurát draselný a ako anódy sú použité nerozpustné titánové elektródy pokovované platinou. Pri zlate je možné sa vyhnúť vysoko toxickým kyanidovým roztokom a to využitím disulfitoaurátu amónneho alebo disulfitoaurátu sodného. Na to, aby sme dosiahli rovnomerný povrch a zabránili tak rastu kryštálikov, môžeme do elektrolytu pridať arzén, tálium alebo selén. [17]

### C) Depozícia striebra

Depozícia striebra sa spolu so zlatom a meďou využíva hlavne pre elektrotechnický priemysel. Využívajú sa ako aj kyanidové tak aj nekyanidové elektrolyty na báze jodidu, siričitanu, etyléndiamínu alebo tiomočoviny. [17] [6]

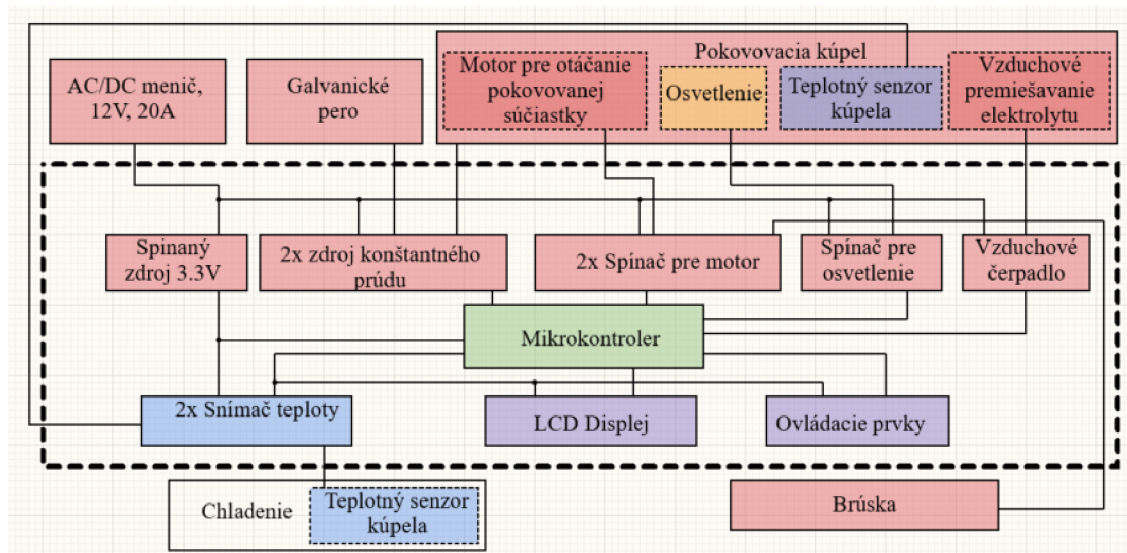
## 2. CIELE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Táto kapitola má za účel špecifikovať kroky praktickej a experimentálnej časti bakalárskej práce. Cieľom je navrhnuť a zostrojiť komplexné zariadenie pre galvanické pokovenie 3D tlačných objektov s príslušnou predúpravou. Môžeme to teda zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Realizácia zariadenia
  - Návrh schématického zapojenia
  - Návrh dosky plošných spojov
  - Osadenie dosky plošných spojov
  - Oživenie dosky
  - Programovanie mikrokontroléru
    - funkčnosť zariadenia
    - užívateľské rozhranie
  - Otestovanie funkcionality všetkých blokov
  - Návrh mechanickej časti
    - Brúska
    - Zariadenie pre pokovovanie
    - Rameno nad pokovovacou nádobou
  - Výroba mechanickej časti
  - Kompletizácia zariadenia do funkčného celku
  - Vytvorenie pracoviska pre pokovenie
- Experimentálna časť
  - Testovanie závislosti hrúbky vrstvy od doby depozície a veľkosti prúdu
  - Vyhodnotenie výsledkov pomocou optického mikroskopu

### 3. ZARIADENIE PRE GALVANICKÉ POKOVENIE

Zariadenia na galvanické pokovenie sa skladá z niekoľkých blokov, tak aby bol pokovovací proces čo najoptimálnejší. Tie sa nachádzajú na blokovej schéme na obrázku nižšie.



Obrázok 4 Blokovaná schéma zariadenia [19]

Návrh zariadenia obsahuje jednosmerný zdroj 12V 20A, ktorý slúži na napájanie ostatných súčastí a zároveň ako zdroj pre samotné galvanické pokovenie. Pre správne galvanické pokovenie je potrebné regulovať hodnotu prúdu, tak aby sme dosiahli optimálny výsledok, to zabezpečuje regulačný obvod, ktorý je v blokovej schéme označený ako zdroj konštantného prúdu, druhý zdroj konštantného prúdu je určený pre galvanické pero, využívajúce princíp lokálneho pokovenia, ktoré má slúžiť na posledné úpravy a opravu pokovených súčastok. Ďalej návrh obsahuje spínaný zdroj napájajúci ostatné časti zariadenie ako je užívateľské rozhranie a mikrokontrolér.

Mikrokontrolérom budeme riadiť jednotlivé bloky v obvode, zároveň bude slúžiť na potrebné výpočty pre pokovenie ako napríklad výpočet času a hodnoty prúdu na základe vlastností elektrolytu a pokovovaného objektu. Ako mikrokontrolér použijeme ESP32-PICO-D4, ktorý by mal mať dostatok vstupno-výstupných portov a potrebných funkcií ako PWM, digitálno-analógový a analógovo-digitálny prevodník. Taktiež do budúcnosti disponuje funkciou pripojenia na internet, čo umožňuje nastavenie zariadenia na diaľku a zobrazenie stavu pokovenia užívateľovi.

Užívateľské rozhranie sa skladá zo 4 riadkového 20 charakterového LCD displeju ovládaného pomocou I2C zbernice. LCD displej poskytuje informácie o pokovovacom procese ako je teplota elektrolytu, čas trvania depozície, prúd a napätie. Enkodér s tlačidlom slúži na nastavenie hodnoty prúdu pre pokovenie a ďalších funkcií ako otáčanie motora, zapnutie svetla a ostatných prvkov používaných pri pokovovacom procese.

Návrh taktiež obsahuje pieskovú brúsku ktorá bude slúžiť na úpravu povrchu, tak aby bolo zaručený čo najlepší povrch pred vložením do elektrolytu a kov sa mohol kvalitne usádzať na povrchu.

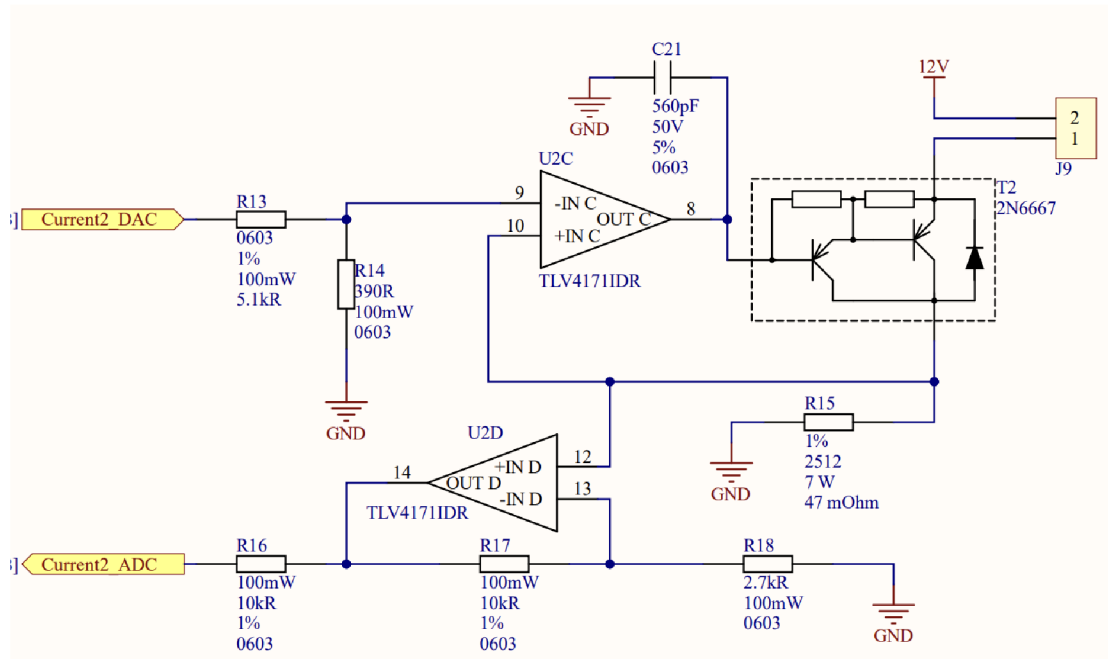
Nad nádobou na pokovovanie sa nachádza motor pre otáčanie pokovovaného komponentu, tak aby bolo dosiahnuté rovnomerné pokovenie. V zariadení sa taktiež nachádza vzduchové čerpadlo, využívané na premiešavanie elektrolytu.

Teplotu elektrolytu budeme kontrolovať kvôli teoretickej zmene správania sa pokovovacieho procesu so zmenou teploty. Zároveň sa tu nachádza osvetlenie, tak aby bol produkt pod elektrolytom dobre viditeľný a užívateľ mohol postupne kontrolovať stav pokovovaného výrobku.

Samotné zariadenie bude musieť byť chladené vzhľadom na prúdové zaťaženie, to sa budeme snažiť dosiahnuť kombináciou chladenia pomocou chladičov a chladenia ventilátormi. Teplotu zariadenia kontroluje ďalší teplotný senzor umiestnený na chladiči, na základe ktorého sa mení rýchlosť ventilátoru a pri dosiahnutí kritickej hodnoty teploty sa vypnú prúdové výstupy.

### 3.1 Zdroj konštantného prúdu

Najdôležitejšou časťou zariadenia je zdroj konštantného prúdu. Jeho funkcia sa rozoberie bližšie v tejto podkapitole. Schematické zapojenie je ukázané na obrázku číslo 5.



Obrázok 5 Schéma regulácie prúdu [19]

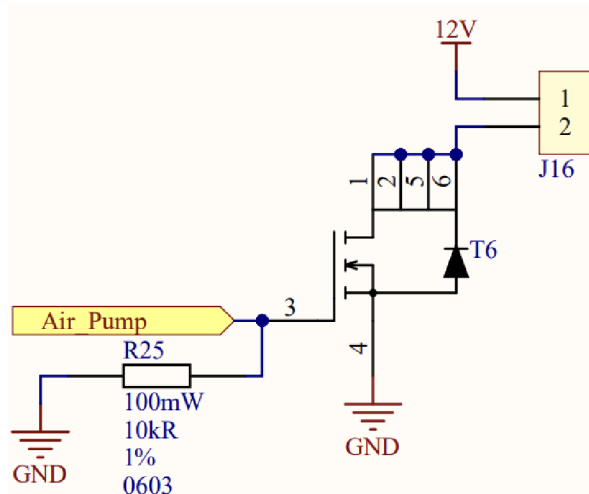
Pomocou DAC prevodníku mikrokontrolér odošle požadovanú hodnotu prúdu vo forme napätia. Hodnotu tohoto napätia upravíme pomocou napäťového deliču a privedieme na invertujúci vstup operačného zosilňovaču. Výstupom zosilňovaču je ovládaný bipolárny výkonový PNP tranzistor v darlingtonovom zapojení. Pomocou tranzistoru je regulovaný prúd vo výstupnej vetve. V tejto vetve sa taktiež nachádza rezistor vo funkcii bočníku. Napäťovým úbytkom na tomto rezistore je realizovaná spätná väzba. Pri zvýšení výstupného prúdu sa zvýši napäťový úbytok na bočníku, na vstupe vznikne napäťová nesymetria a napätie na výstupe operačného zosilňovaču stúpne, čo má za následok privretie PNP tranzistoru a teda zníženie výstupného prúdu. V prípade zníženia je princíp regulácie analogický.

Druhý zosilňovač v tomto zapojení má funkciu merania úbytku napätia na bočníku a to je úmerné skutočnému prúdu dodávaného do záťaže. Operačný zosilňovač je v tomto prípade zapojený ako neinvertujúci zosilňovač.

### 3.2 Ovládanie výstupných periférií

Jednotlivé periférie sú ovládané pomocou mikrokontroléru, ktorý vydáva rozkaz na ich zapnutie a vypnutie. Samotné spínanie majú za úlohu MOSFET tranzistory s kanálom typu N v režime zosilnenia, kde pracujú pri kladnom vstupnom napätí a majú tu veľmi vysoký odpor, čo umožňuje jeho použitie ako spínaču. Keď napätie na hradle prekročí prahovú hodnotu, vytvorí sa medzi elektródami drain a source vodivý kanál, čo znamená zapnutý stav.

V prípade že je potreba prejsť do vypnutého režimu na hradlo sa privedie nulové napätie, to má za následok zníženie napätia pod prahovú hodnotu a teda medzi elektródami drain a source nevznikne vodivý kanál a tak nemôže pretekať prúd. Týmto spôsobom sa ovláda svetlo, ventilátory, brúska a vzduchové čerpadlo.



Obrázok 6 MOSFET pre ovládanie vzduchového čerpadla [19]

Motor na otáčanie pokovenej súčiastky je na rozdiel od ostatných periférií ovládaný pomocou integrovaného obvodu pre ovládanie motorov od firmy Toshiba. Motor je nastavený tak aby sa najskôr otáčal v jednom smere a po otáčke zmenil smer tak aby sa okolo ramena nezamotali elektródy.

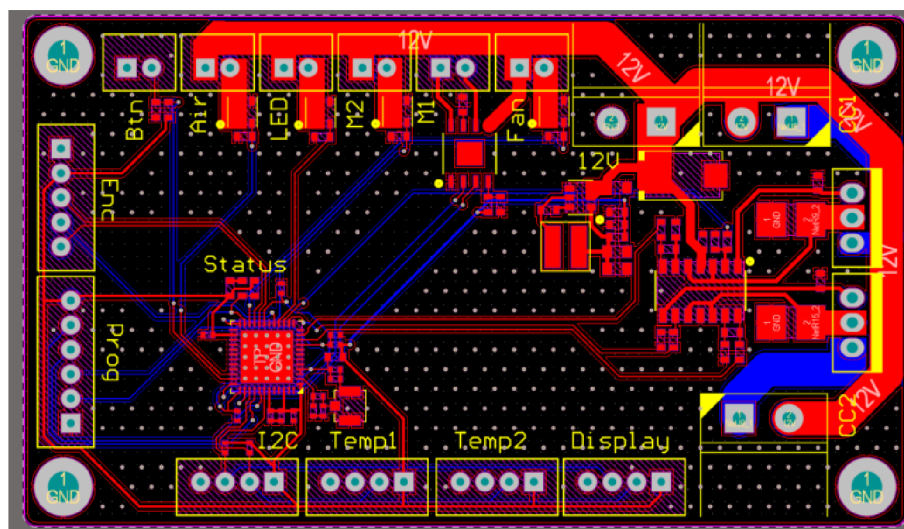


## 4. REALIZÁCIA ZARIADENIA

Realizácia zariadenia pre galvanické pokovenie sa môže rozdeliť do 3 krokov. Prvým bol návrh, osadenie a oživenie dosky plošných spojov. Druhým krokom bol návrh a zostrojenie mechanickej časti a kompletizácia celého zariadenia. Tretím krokom je zostavenie pracoviska a návrh postupu pre pokovenie.

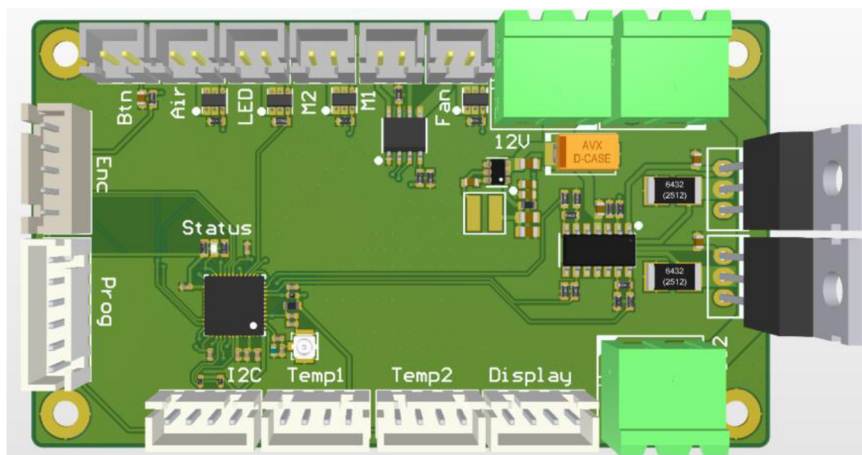
### 4.1 Doska plošných spojov

Doska plošných spojov je navrhnutá v programe Altium designer 23. Ide o dvojvrstvovú DPS, s primárne SMD súčiastkami. Na obrázku nižšie je DPS s viditeľnými všetkými cestami a prepojmami.



Obrázok 7 Doska plošných spojov v 2D zobrazení [19]

Dvojvrstvová doska bola zvolená kvôli jednoduchosti pri výrobe a cene. SMD súčiastky sú použité najmä kvôli ich malej veľkosti. Zároveň kvôli jednoduchosti umiestnenia dosky plošných spojov k mechanickej konštrukcii sú súčiastky umiestnené len z jednej strany dosky. Pri rozložení súčiastok bolo potrebné myslieť na osadzovací proces a na montáž do krytu. Po okrajoch sa nachádzajú konektory na jednotlivé použité prvky. Z pravej strany dosky sú umiestnené dva tranzistory v darlingtonovom zapojení, ktoré sú následne prichytené ku chladiču kvôli ich vysokým tepelným stratám. Na doske sa tiež nachádzajú štyri diery v rohoch pre jednoduchú montáž ku krytu. Na obrázku nižšie je vidieť rozloženie jednotlivých súčiastok a dier pre montáž.



Obrázok 8 Doska plošných spojov v 3D zobrazení [19]

Vzhľadom na vysokú prúdovú zaťažiteľnosť bolo potreba dostatočne nadimenzovať jednotlivé hrúbky ciest tak aby neprišlo k ich preťaženiu a poškodeniu.

Osadenie všetkých súčiastok bolo vykonané kombináciou mikrospájky a teplovzdušnej spájky. Najskôr boli osadené malé pasívne súčiastky a až potom integrované obvody, keďže tie sú citlivé na elektrostatické výboje a teplo. Ako posledné sme spájkovali veľké súčiastky a konektory, tak aby nám pri predošlom postupe neprekážali.

## 4.2 Mechanická časť

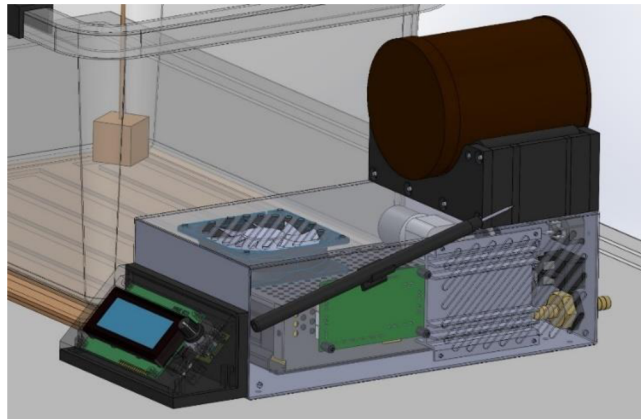
Mechanická časť bola navrhnutá popri návrhu elektroniky, tak aby mohli byť jednotlivé časti spojené do funkčného celku. Na návrh bol použitý program Solidworks 20. Mechanika sa skladá z 2 častí. Prvou časťou je samotné zariadenie, tou druhou je rameno umiestnené nad pokovovacím kúpeľom.

Samotné zariadenie je kombináciou hlavného kovového krytu a ostatných 3D tlačených súčastí primontovaných ku krytu. Kovový kryt je použitý hlavne kvôli lepším EMC a teplotným vlastnostiam. Na zadnej strane panelu sa nachádzajú konektory pre pripojenie jednotlivých prvkov ako osvetlenie, motor, teplotný senzor, hadičku na vzduchové premiešavanie a samotné elektródy pre pokovenie. Taktiež sa tu nachádza konektor pre napájanie a spínač na zapnutie zariadenia.



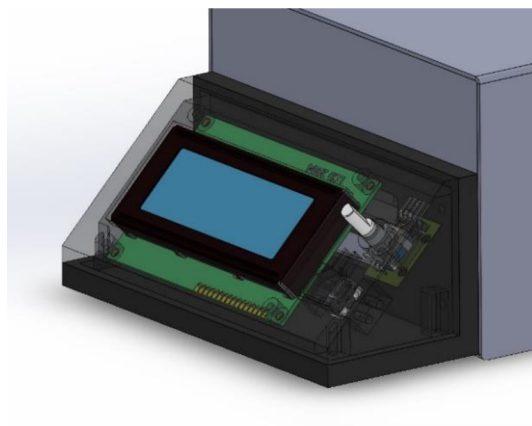
Obrázok 9 Detail na zadný panel [20]

Na kryte sú vyrezané otvory pre zlepšenie chladenia zariadenia, k tomu dopomáha aj ventilátor umiestnený na vrchnej strane zariadenia. Na pravej strane sa nachádza galvanické pero pre lokálne galvanické pokovenie.



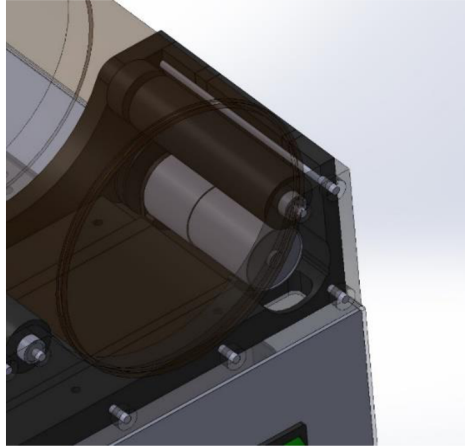
Obrázok 10 Zariadenie na pokovenie [20]

Predný panel je vytlačený pomocou FDM tlačiarne. Je naklonený v  $45^\circ$  uhle, tak aby sa užívateľovi dobre pracovalo pri nastavovaní a sledovaní stavu pokovovania.



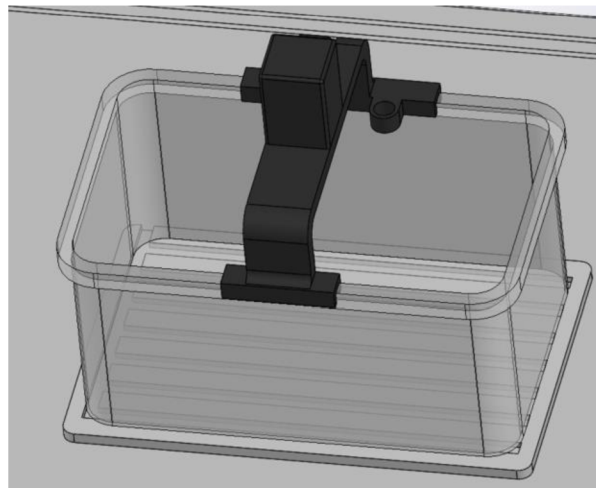
Obrázok 11 Detail na predný panel [20]

Na vrchu zariadenia sa nachádza brúska s odnímateľnou plechovkou. Tú poháňa motor, ktorý roztáča valec a ten následne plechovku. Bližšie znázornený mechanizmus je na obrázku č.12.



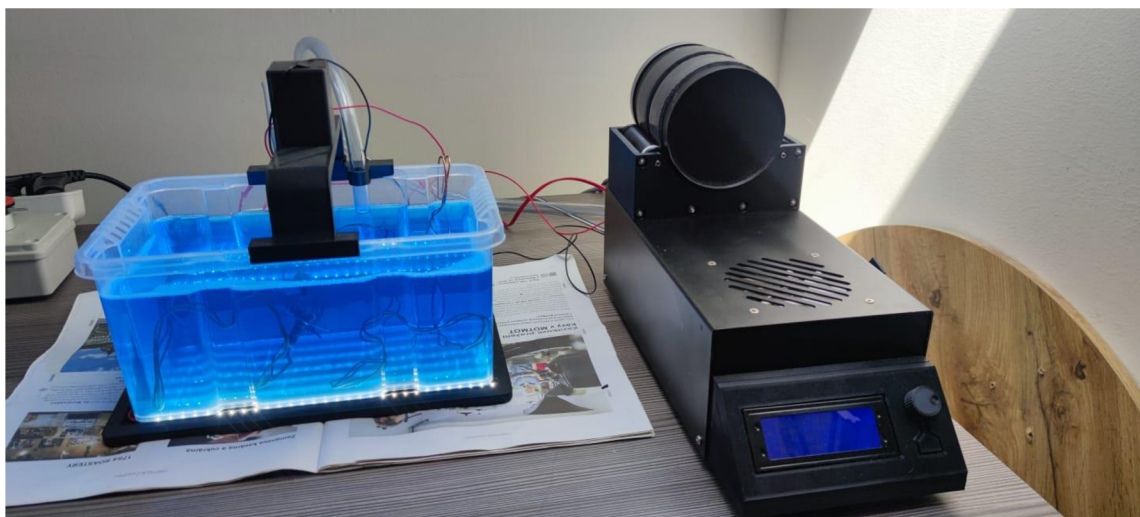
Obrázok 12 Detail na mechanizmus brúsky [20]

Druhou časťou je rameno na uchytenie samotného pokovovaného objektu do nádoby s elektrolytom, v ramene sa nachádza aj motor pre otáčanie súčiastky a oko na uchytenie hadice na vzduchové premiešavanie. Na spodnej časti pokovovacej kúpele sa nachádza doska s osvetlením.



Obrázok 13 Detail na pokovovacu kúpeľ [20]

Pracovisko pre galvanické pokovenie sa teda skladá z kúpele pre pokovenie a samotného zariadenia pre galvanické pokovenie. Kompletne usporiadanie zrealizovaného pracoviska pre galvanické pokovenie produktu je zobrazené na obrázku č.13.



Obrázok 14 Zrealizované pracovisko na galvanické pokovenie

### 4.3 Používateľské rozhranie

Pri návrhu používateľského rozhrania záležalo na čo najintuitívnejšom výbere jednotlivých možností užívateľom. Po zapnutí zariadenia sa užívateľovi zobrazí hlavné menu, kde má na výber 4 možnosti. Jednotlivé možnosti sú bližšie zobrazené na obrázku 15. Na vrchu sa zobrazujú aktívne úlohy, v prípade prebiehajúcej úlohy si užívateľ môže zobraziť danú úlohu a skontrolovať jej stav, prípadne pozmeniť nastavenia.

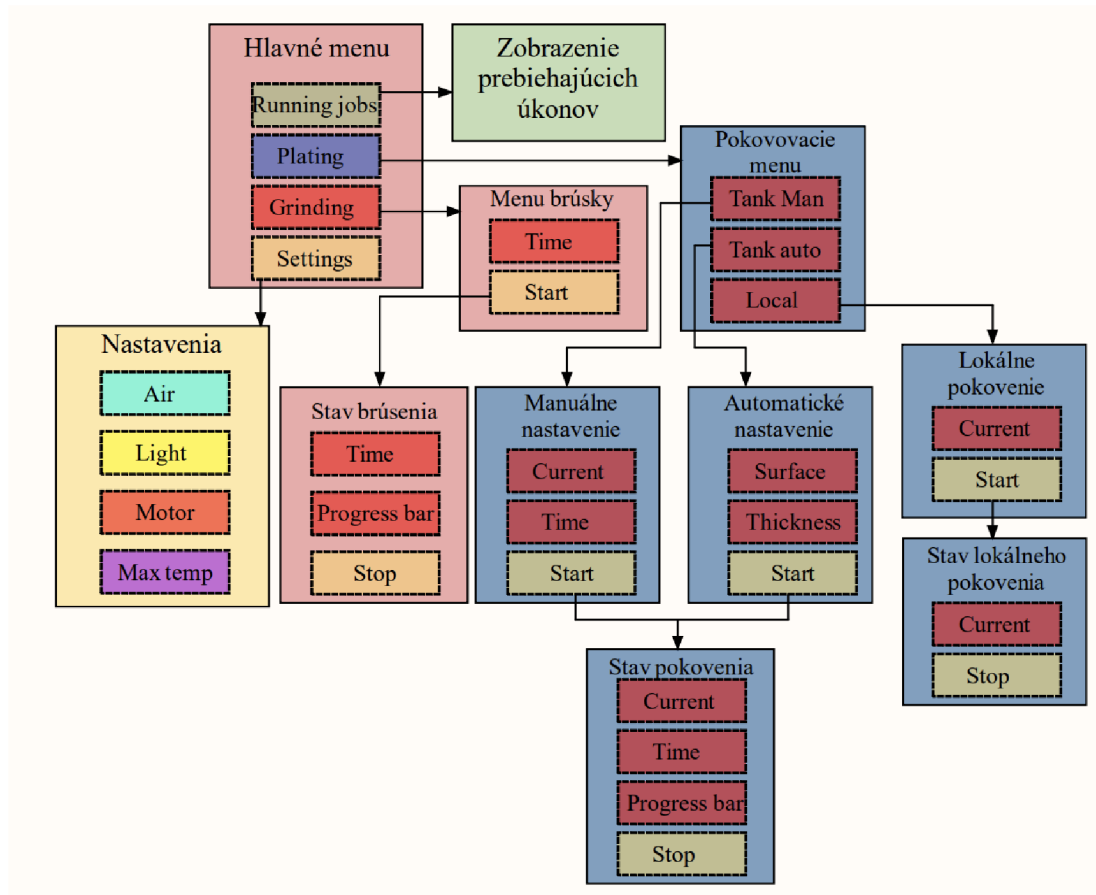
Pod informáciou o bežiacей úlohe sa nachádza voľba na presun do samotného pokovovacieho menu. V tomto menu si užívateľ môže vybrať medzi 3 rôznymi nastaveniami pokovenia. Prvým je manuálne nastavenie klasického pokovenia, v tomto menu sa nastaví prúd a čas pri pokovení a po stlačení štartu sa zapne pokovovací proces. Podobný princíp je aj pri automatickom nastavení pokovenia, kde sa namiesto prúdu a času nastavuje plocha a hrúbka vrstvy. Tieto parametre sa následne na základe experimentálne zistenej konštanty prepočítajú na hodnotu prúdu a času pokovenia. Menu so stavom pokovenia vyzerá pri oboch režimoch rovnako, na vrchu píše nastavený prúd a aktuálny odmeraný prúd, pod ním je zobrazený aktuálny čas a celkový nastavený čas. Oba parametre sa dajú v priebehu pokovenia zmeniť. Taktiež sa tu nachádza ukazovateľ postupu, ktorý slúži na rýchle odčítanie stavu pokovenia. V prípade potreby skoršieho ukončenia pokovovacieho procesu je dole možnosť stop pre zastavenie procesu. Lokálne pokovenie má rozdielne menu, keďže pri tomto výbere sa nevyužíva časovač. V tomto prípade sa nastavuje len použitý prúd, po jeho nastavení



a výbere štartu sa užívateľovi zobrazí menu so zobrazeným nastaveným prúdom a zastavením procesu.

V hlavnom menu si užívateľ môže zvoliť možnosť brúsenia, po zvolení sa užívateľ dostane do menu brúsky, kde si zvolí čas brúsenia a zapne brúsenie. Menu stavu brúsenia zobrazuje čas a ukazovateľ postupu brúsenia. Nachádza sa tu aj možnosť zastavenia procesu brúsenia.

Poslednou voľbou v hlavnom menu je nastavenie periférií použitých pri pokovení. V menu nastavení sa dá zvoliť zapnutie alebo vypnutie vzduchového premiešavania, osvetlenia a otáčania motorom. V továrenskome nastavení je všetko nastavené na auto čo znamená, že sa zapne pri zapnutí klasického pokovovacieho procesu. Posledným nastavením je nastavenie maximálnej teploty elektrolytu pri ktorom sa pokovovanie vypne.



Obrázok 15 Bloková schéma užívateľského rozhrania [19]

## 5. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Táto kapitola opisuje doporučený postup pokovenia s navrhnutým zariadením, priebeh experimentov a ich následné vyhodnotenie pre optimalizáciu parametrov pokovenia a postupu pri pokovení 3D výtlačkov.

### 5.1 Postup pri pokovaní

Prvým krokom je samotná tlač, pri ktorej celkovo nezáleží na zvolenom type tlače alebo použitom materiále. Po vytlačení je dôležité produkt opracovať, na to slúži brúska umiestnená na vrchu zariadenia.



Obrázok 16 Opracovaný 3D výtlačok

Po opracovaní treba pretrieť výtlačok od prachu, a následne sa môže nastriekať, prípadne natrieť vodivou farbou, v tomto prípade ide o grafitový sprej. Potom treba výtlačok vysušiť a nastriekať druhou vrstvou laku tak aby bola vrstva jednoliata po celom povrchu. V prípade väčších nedokonalostí sa môžu pridať ďalšie vrstvy vodivého nástreku.



Obrázok 17 3D výtlačok nastriekaný grafitovým sprejom

Zatiaľ čo sa objekt suší je potrebné pripraviť pracovisko. Pripravené pracovisko s pripojenými perifériami je na obrázku č. 14. Na okraj nádoby na pokovenie sa umiestni anóda, čiže materiál používaný na pokovenie a do nádoby sa následne naleje vhodný elektrolyt. Okolo vysušeného výtlačku sa obmotá tenký drôt, tak aby bol dotyk vo viacerých bodoch a tak lepšie rozložený prúd. Vložíme katódu do elektrolytu a pripojíme ju ku zdroju konštantného prúdu spolu s anódou.

Po príprave môžeme zapnúť pokovovací proces a priebežne kontrolovať pokovenie. Pri pokovovaní procese by mal byť zapnutý motor na otáčanie a taktiež vzduchové premiešavanie elektrolytu. Počas celého pokovovacieho procesu sa odporúča dostatočne vetranný priestor. Po skončení odpojíme katódu a anódu od zdroju konštantného prúdu.



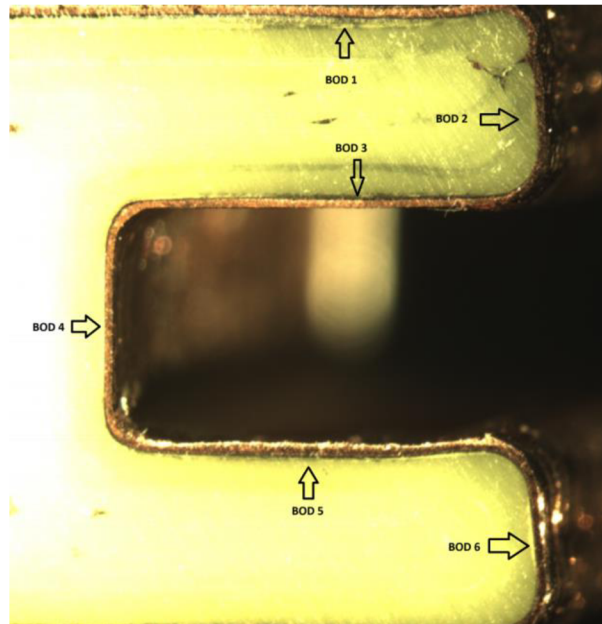
Obrázok 18 Pokovený 3D výtlačok

Následne ho vložíme do roztoku so zásadou, napríklad s hydrogenuhličitanom sodným hovorovo sódou bikarbónou, tak aby sme zneutralizovali objekt. Na záver odmotáme drôt z objektu a dopravujeme objekt napríklad leštením, prípadne opravíme nedostatky pomocou lokálneho pokovenia. Elektrolyt sa preleje do uzatvárateľnej nádoby, tak aby sa samovoľne nevyparoval. Počas celého procesu je potrebné dodržiavať bezpečnostné pokyny pri práci s nebezpečnými látkami. Ako napríklad ochranné pomôcky, dostatočne vetranný priestor, je potreba ovládať prvú pomoc pri zásahu nebezpečnou chemickou látkou a podobné.



## 5.2 Meranie hrúbky vrstvy na základe zmeny prúdu

Experiment bol rozdelený na dve časti, prvou bolo samotné pokovenie, pri ktorom sme na troch rovnakých 3D výtlačkoch, pri rovnakom čase jednej hodiny naniesli vrstvu mede pri 3 rôznych prúdoch. Boli použité prúdy 0,25 A; 0,5 A; 1 A. Pri pokovení bolo zapnuté otáčanie výtlačkom ako aj vzduchové premiešavanie elektrolytu. Teplota elektrolytu bola približne 24°C. Následne sme v druhej časti pomocou mikrovýbrusu vybrúsili jednu pokovenú plochu tak, aby bola viditeľná hrúbka nanesej vrstvy po okrajoch. Vybrúsená plocha bola umiestnená pod mikroskop a na základe známeho zväčšenia boli odčítané približné hrúbky na 6 bodoch. Jednotlivé meracie body sú zobrazené na obrázku číslo 19.

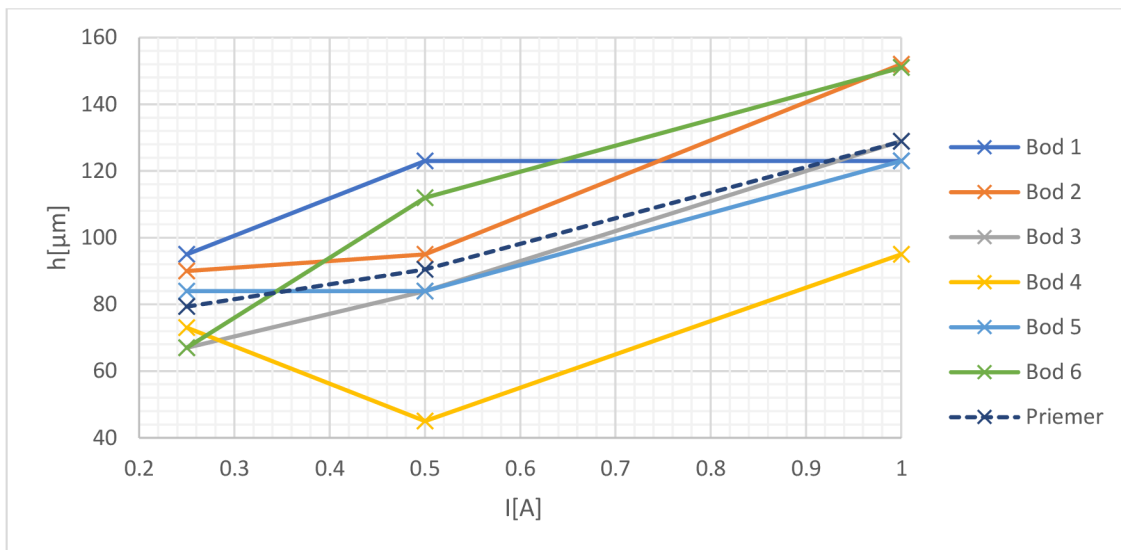


Obrázok 19 Vyznačené body merania na pokovenom výtlačku

Jednotlivé hodnoty sú zobrazené v tabuľke 5.1 a následne vynesené na grafe z obrázku č. 20.

Tabuľka 5.1 Tabuľka závislosti hrúbky vrstvy od prúdu

Parametre pokovenia			Hrúbka v bode [ $\mu\text{m}$ ]						
I[A]	t[h]	J[A/cm <sup>2</sup> ]	1	2	3	4	5	6	Priemerná hrúbka [ $\mu\text{m}$ ]
0.25	1	0.03	95	90	67	73	84	67	79.33
0.5	1	0.06	123	95	84	45	84	112	90.50
1	1	0.122	123	152	129	95	123	151	128.83



Obrázok 20 Závislosť hrúbky vrstvy od prúdu v rôznych bodoch

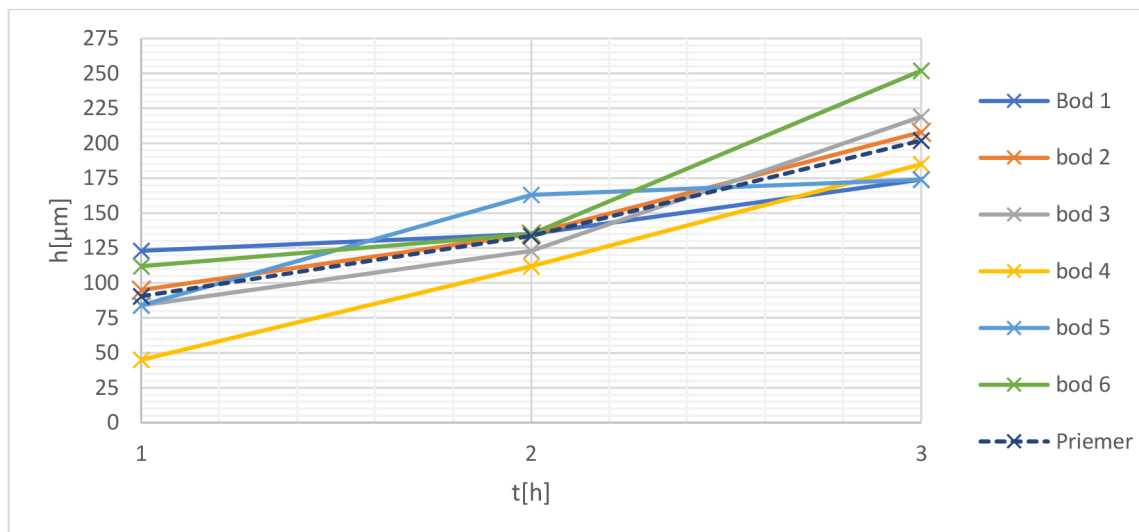
Z grafu je jasne viditeľný nárast vrstvy depozitovaného materiálu so zvyšujúcim sa prúdom. Jediný pokles môžeme sledovať pri depozícii s hodnotou prúdu 0,5 A. Hodnota v bode 4 sa výrazne vychýľuje od očakávania. Hrúbka vrstvy mohla byť zle určená zo snímky. Nerovnomerný nárast hrúbky vrstvy pri zväčšení prúdu mohol byť taktiež spôsobený dotykom drôtu na rôznych miestach výtlačku pri pokovovaní, vtedy dôjde k nerovnomernému rozloženiu prúdu a teda zvýšeniu hrúbky v mieste dotyku, práve zmena prúdu má v tomto prípade veľký vplyv. Preto sa na vnútornej strane usadila menšia veľkosť medeného povlaku, keďže na tomto mieste nebol natiahnutý tenký drôt.

### 5.3 Meranie hrúbky vrstvy na základe zmeny času

Pri tomto experimente bol postup obdobný s postupom pri zmene prúdu. V tomto experimente sa na rozdiel od predchádzajúceho menila doba pokovenia pri prúde 0,5 A. Jednotlivé pokovenia rovnakého objektu boli v dĺžke 1 h; 2 h; 3 h. Pri pokovení bolo zapnuté otáčanie výtlačkom, ako aj vzduchové premiešavanie elektrolytu. Teplota elektrolytu bola približne 24°C. Pri tomto meraní bolo taktiež ťažké presne odčítať hrúbku nanesej vrstvy. Jednotlivé hodnoty sú zobrazené v tabuľke 5.2 a následne vynesené na grafe z obrázku č.21.

Tabuľka 5.2 Tabuľka závislosti hrúbky vrstvy od doby pokovenia

Parametre pokovenia			Hrúbka v bode[ $\mu\text{m}$ ]						
t[h]	I[A]	J[A/cm <sup>2</sup> ]	1	2	3	4	5	6	Priemerná hrúbka[ $\mu\text{m}$ ]
1	0.5	0.06	123	95	84	45	84	112	90.50
2	0.5	0.06	135	135	123	112	163	135	133.83
3	0.5	0.06	174	208	219	185	174	252	202.00

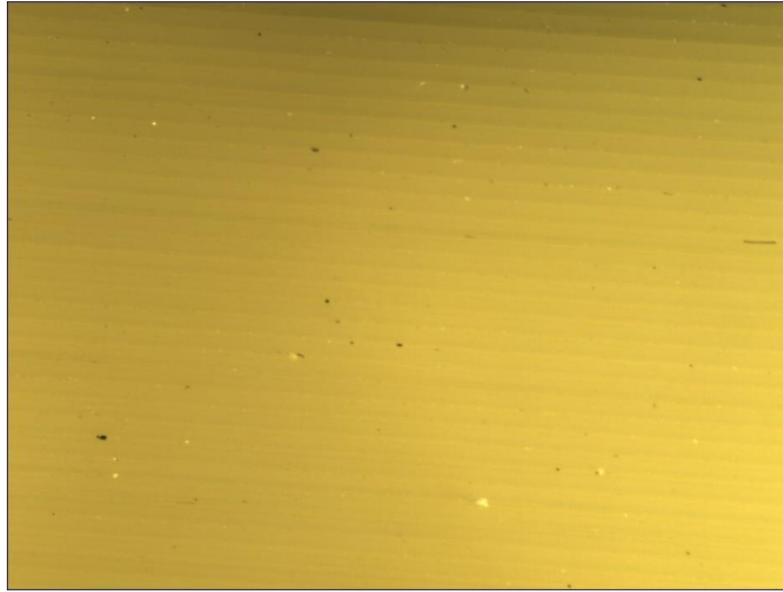


Obrázok 21 Závislosť hrúbky vrstvy od dobe pokovenia v rôznych bodoch

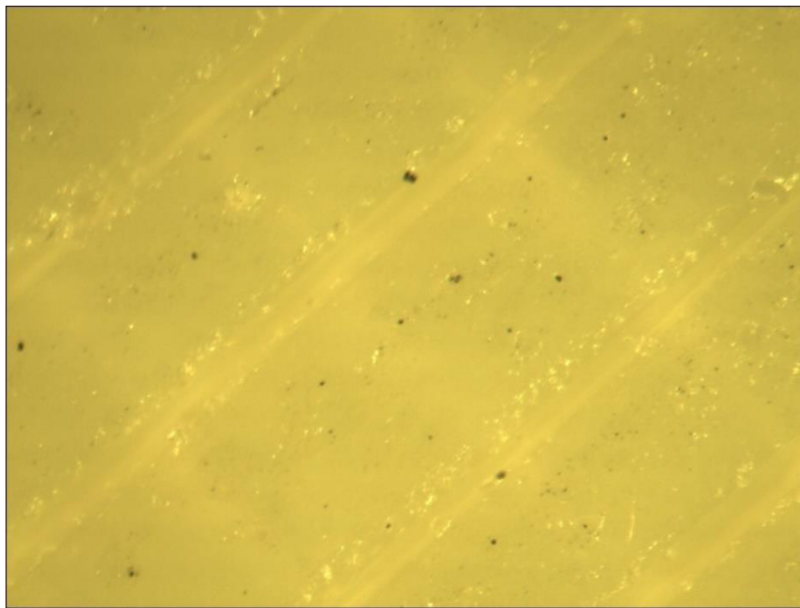
Na grafe je vidieť lineárna závislosť hrúbky pokovenej vrstvy od doby depozície. S nárastom času depozície lineárne rastie aj priemerná hrúbka povlaku, čo potvrdilo predpoklady. Jednotlivé odchýlky od lineárneho priebehu boli pravdepodobne spôsobené nepresným určením hrúbky vrstvy. Podobne ako pri závislosti hrúbky vrstvy od prúdu aj pri tejto závislosti sa preukázalo nerovnomerné rozloženie prúdu, no v tomto prípade nie tak výrazne vzhľadom na rovnaký použitý prúd.

## 5.4 Vyhodnotenie opracovania výtláčku

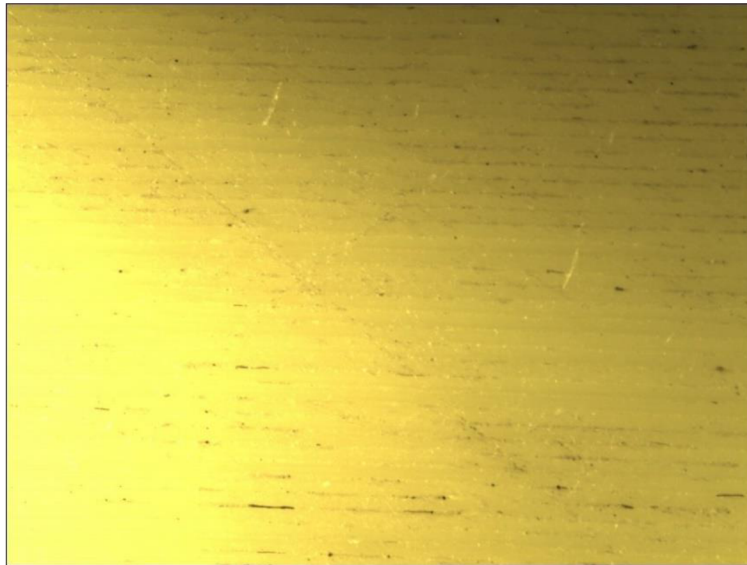
Táto kapitola hodnotí mieru opracovania 3D tlačenej výrobku pieskovou brúskou. 3D výtláčok bol vložený do brúsky spolu s kremičitým pieskom. V brúske bol výtláčok ponechaný po dobu štyroch hodín. Následne bol výtláčok očistený od prachu a vložený pod mikroskop.



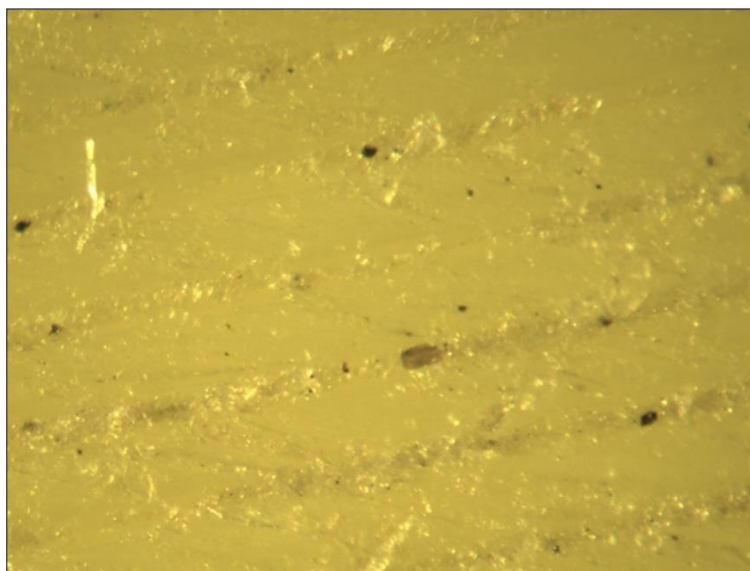
Obrázok 22 Materiál pred opracovaním oddialený pohľad



Obrázok 23 Materiál pred opracovaním priblížený pohľad



Obrázok 24 Materiál po opracovaní oddialený pohľad



Obrázok 25 Materiál po opracovaní priblížený pohľad

Materiál je po opracovaní vykazuje lepšiu adhéziu grafitového spreju. Ako je vidieť na obrázku 24 a obrázku 25 jednotlivé vrstvy vytvorené pri tlači sú zbrúsené. Pre dosiahnutie lepšieho povrchu by sa dalo predĺžiť dobu trvania brúsenia, prípadne zmeniť typ piesku alebo použiť iný brúsiaci materiál. Do brúsky sa taktiež môže dať 3D výtlačok nastriekaný niekoľkými vrstvami farby pre zvýšenie vodivosti. Brúska sa môže spolu s leštením využiť aj na zlepšenie výsledného vzhľadu pokoveného výrobku.

## ZÁVER

Teoretická časť práce sa venovala postupu práce pri galvanickom pokovení 3D tlačných súčiastok, tak aby sa na základe nadobudnutých poznatkov mohlo zostrojiť komplexné zariadenie na galvanické pokovenie. V práci sa ďalej rozoberali základné typy 3D tlače a použitých materiálov pri tlačených súčiastkach. Následne sa zamerala na dôležitosť úprav povrchu pred galvanickým pokovením, pričom sa venovala jednotlivým možným typom úprav. Nakoniec teoretickej časti vysvetľuje samotný princíp galvanického pokovenia, parametre ovplyvňujúci proces pokovenia ako aj výslednú nanosenú vrstvu. Zároveň tu boli opísané jednotlivé možnosti pokovenia najpoužívanejšími materiálmi a zhrnuté možnosti použitia rôznych typov elektrolytu.

V praktickej časti sa zamerala na koncept komplexného zariadenia, rozobrali sa jednotlivé bloky potrebné pre takéto zariadenie. Riešila problematiku návrhu a realizácie takéhoto zariadenia. Taktiež v tejto časti opísala navrhnuté používateľské rozhranie.

Posledná časť práce bola zameraná na experimenty pre zistenie optimálneho pracovného postupu a nastavenia parametrov. Skúmala sa závislosť hrúbky vrstvy od prúdu a doby depozície. Obe charakteristiky boli lineárne no s relatívne veľkými odchýlkami vzhľadom na veľa ovplyvňujúcich parametrov a zložitosti presne určiť hrúbku vrstvy. Zároveň bolo vykonaných niekoľko pokusov na vzorkoch a do budúcnosti bude treba vyhodnotiť viac vzorkov, pre presné určenie ideálnych parametrov galvanického pokovenia.

Zariadenie by mohlo byť vzhľadom na použitý mikrokontrolér ESP32-PICO-D4 pripojené na internet tak aby mohol užívateľ pomocou internetovej alebo mobilnej aplikácie jednoduchšie voliť jednotlivé parametre, prípadne sledovať stav a po skončení procesu pokovenia dostať upozornenie o ukončení. Taktiež by v budúcnosti bolo vhodné pridať zahrievanie elektrolytu tak aby sa dosiahli čo najideálnejšie podmienky.

## LITERATÚRA

- [1] KIŠKA, Roman. Depozice a charakterizace tenkých vrstev a jejich analýza za pomoci skenovací elektronové mikroskopie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=173219](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173219) [cit. 2023-11-13].
- [2] NEBIOLO, Bill. The History of Electroplating and a Historical Review of the Evolution of NASF. Online. [2021]. Dostupné z: <https://finishingandcoating.com/index.php/plating/600-the-history-of-electroplating-and-a-historical-review-of-the-evolution-of-nasf> [cit. 2023-11-13].
- [3] PF. The History of Electroplating and A Historical Review of the Evolution of NASF. Online. [2022]. <https://www.pfonline.com/articles/the-history-of-electroplating-and-a-historical-review-of-the-evolution-of-nasf> [cit. 2023-11-13].
- [4] WOODFORD, Chris. Electroplating. Online. [2021]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/electroplating.html> [cit. 2023-11-13].
- [5] Chem.libretexts. Electroplating. [online]. Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical\\_Chemistry/Supplemental\\_Modules\\_\(Analytical\\_Chemistry\)/Electrochemistry/Electrolytic\\_Cells/Electroplating](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_(Analytical_Chemistry)/Electrochemistry/Electrolytic_Cells/Electroplating) [cit. 2023-11-13].
- [6] Elektrolab. Galvanizácia a galvanické pokovenie. Online. [2022]. Dostupné z: <https://www.elektrolab.eu/blog/galvanizacia-a-galvanicke-pokovenie> [cit. 2023-11-13].
- [7] KRŇÁVEK, Ondrej. Renovace povlaků technologií tampónování Online, bakalárska práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2020. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89665/F2-BP-2020-Krnavek-Ondrej-BP-finalni-verze.pdf?sequence=-1&isAllowed=y> [cit. 2023-11-13].
- [8] Unacademy. Faraday's Laws of Electrolysis. Online. [2021]. Dostupné z: <https://unacademy.com/content/nda/study-material/chemistry/faradays-laws-of-electrolysis/>. [cit. 2023-11-13].
- [9] Testbook. Faraday's Law of Electrolysis : Learn the First and Second Laws with their Applications. Online. [2023]. Dostupné z: <https://testbook.com/chemistry/faradays-laws-of-electrolysis> [cit. 2023-11-13].
- [10] URBANEC, Filip. Online, Návrh zkušebního zařízení pro automatické galvanické tamponování. Diplomová práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2011. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/7e44b98a-b894-46c9-8e4b-0df846de0135/content> [cit. 2023-11-13].

- [11] ŽÁK, V., KUDLÁČEK J.: Technologie lokálního galvanického pokovování (tampónování). Povrcháři online. Praha, 2008 vol.3, s.1-4 Dostupné z: [http://povrchari.cz/kestazeni/200803\\_povrchari.pdf](http://povrchari.cz/kestazeni/200803_povrchari.pdf) [cit. 2023-11-13].
- [12] Univerzita Pardubice. Predúprava povrchu. Online. Pardubice [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://fcht.upce.cz/sites/default/files/public/luva3059/mater-vstrojar-vyrobe.pdf>
- [13] LAMAČ, Martin. Lokální galvanické pokovení v extrémním prostředí Online, bakalárska práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2020. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/86255/F2-BP-2020-Lamac-Martin-BP%20-%20Martin%20Lamac1.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [cit. 2023-11-13].
- [14] Jakubčíková, Lucie. Povrchové úpravy materiálů na bázi železa. Brno: Vysoké učení technické v Brne, Fakulta strojního inženýrství, 2017. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=149576](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149576) [cit. 2023-11-13].
- [15] 3D solutions. Čo je to 3D tlač a ako funguje. Online. [2021]. Dostupné z: <https://3dsolutions.sk/co-je-to-3d-tlac-a-ako-funguje/>. [cit. 2023-11-13].
- [16] 3D solutions. Materiály Pre 3D Tlač. Online. [2021]. Dostupné z: <https://3dsolutions.sk/materialy-pre-3d-tlac/>. [cit. 2023-11-13].
- [17] Microchemicals. Electro-plating of certain metals. Online.. Dostupné z: [https://www.microchemicals.com/products/electroplating/electroplating\\_metals.html](https://www.microchemicals.com/products/electroplating/electroplating_metals.html). [cit. 2023-11-18].
- [18] Matthew, Oluwole, Arowolo., Adefemi, A., Adekunle., A., O., Olusegun. Parameters affecting qualitative and efficient electrodeposition of metals in an electrolytic cell: a review. Online [2020] Dostupné z: <https://typeset.io/papers/parameters-affecting-qualitative-and-efficient-24uxskyfam> [cit. 2023-04-18]
- [19] Altium Designer 23.4.1 [software]. 12.02.2024 [prístup 04.03 2020]. Dostupný z: <https://www.altium.com/products/downloads>
- [20] Solidworks 20 [software]. 15.12.2024 [prístup 25.09 2023] Dostupný z: <https://www.solidworks.com/product/3dexperience-solidworks>
- [21] PAUNOVIC M. a SCHLESINGER M., Modern electroplating. 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley. 2010, xv [cit. 2024-04-20]



## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

### Skratky:

3D	Trojdimenzionálny
FDM	Fused deposition modeling
PLA	Polyaktidové vlákno
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PET	Polyethyltereftalat
PETG	Polyethyltereftalat s modifikovaným glykolom
SLA	Stereolitography
SLS	Selective laser sintering
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
DAC	Digitálno analógový prevodník
DPS	Doska plošných spojov
PWM	Pulzne šíková modulácia
SMD	Povrchovo montovaná súčiastka

### Symboly:

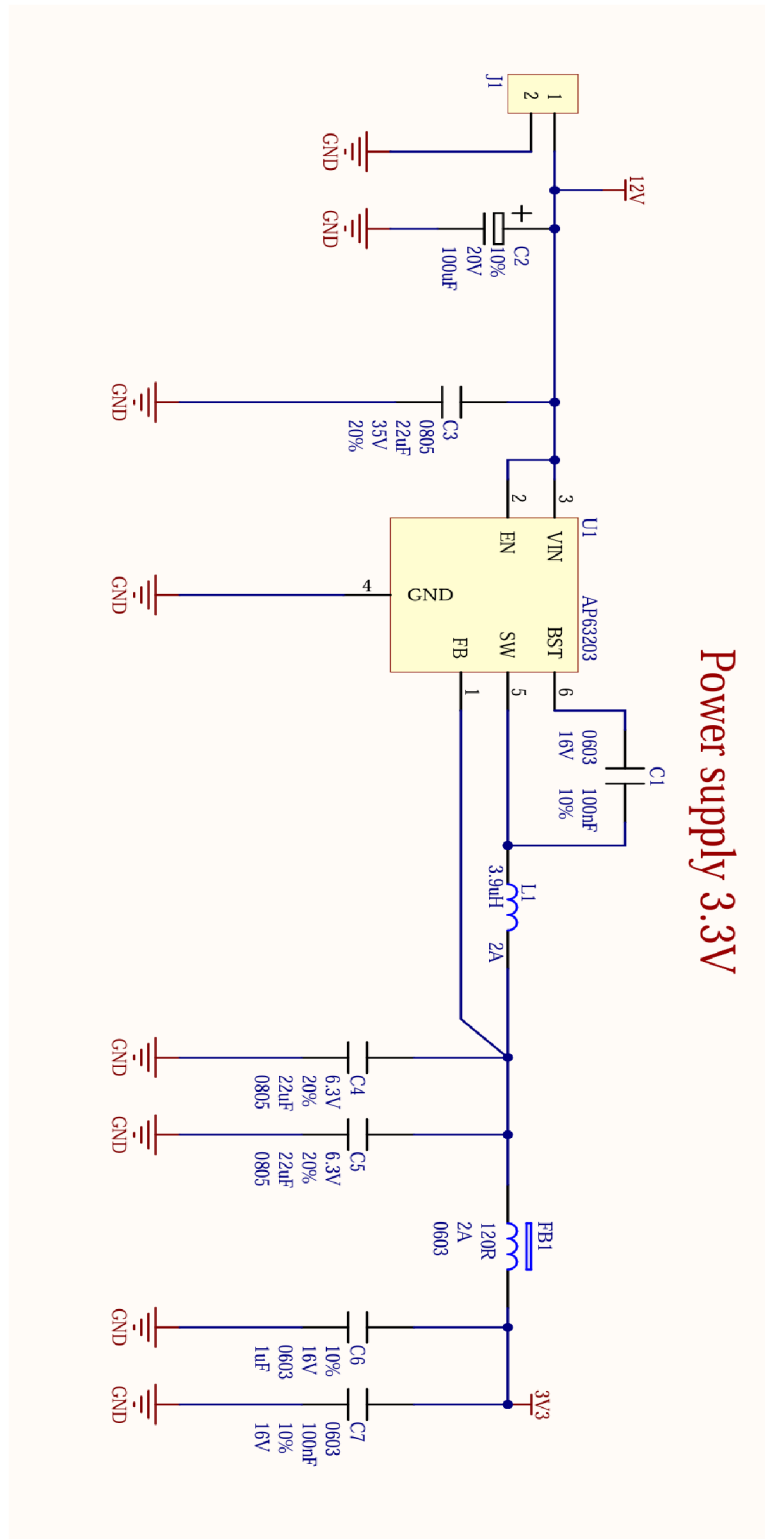
$U$	napätie	(V)
$Z$	proporčná konštanta	(g/C)
$h$	hrúbka vrstvy	( $\mu\text{m}$ )
$m$	hmotnosť	(kg)
$Q$	náboj	(C)
$J$	prúdová hustota	(A/cm <sup>2</sup> )

# ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A - SCHÉMATICKÉ ZAPOJENIA.....	47
PRÍLOHA B – VÝBRUSY POD MIKROSKOPOM.....	52

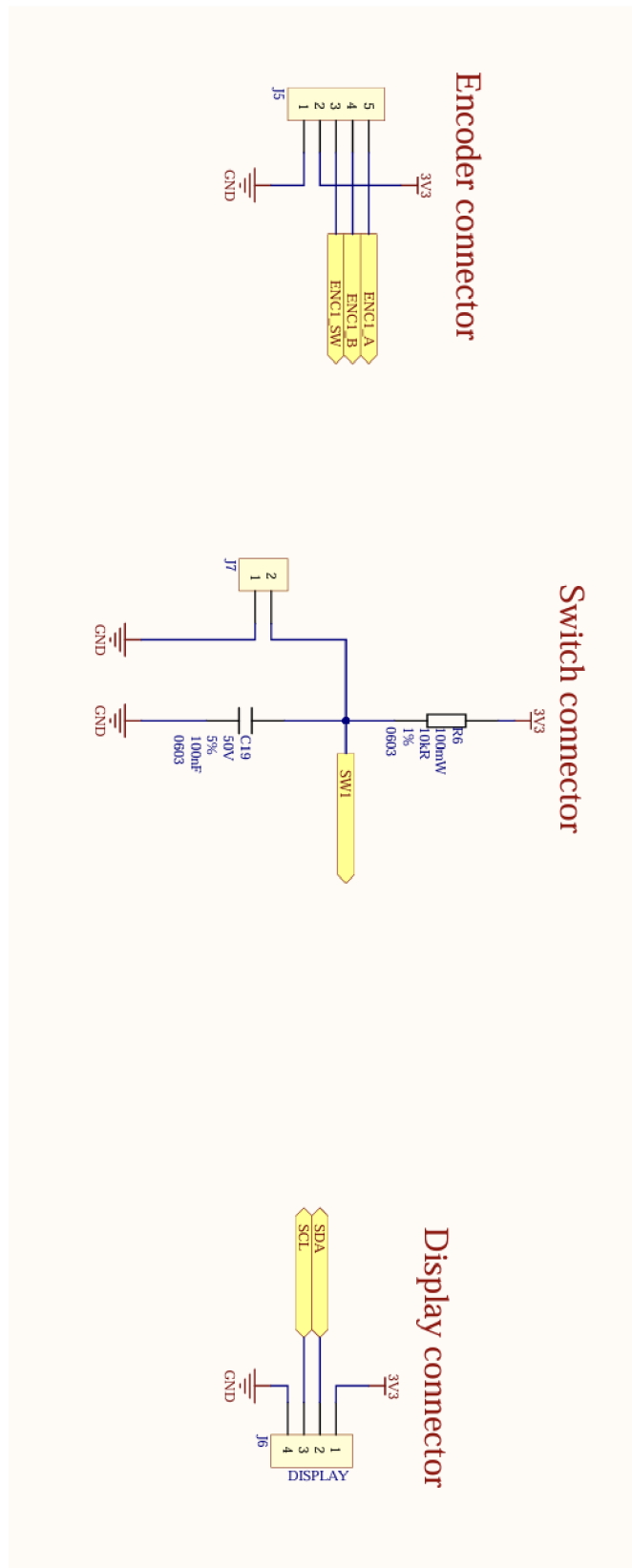
# Príloha A - Schématické zapojenia

## A.1 Schématické zapojenie napät'ového zdroja

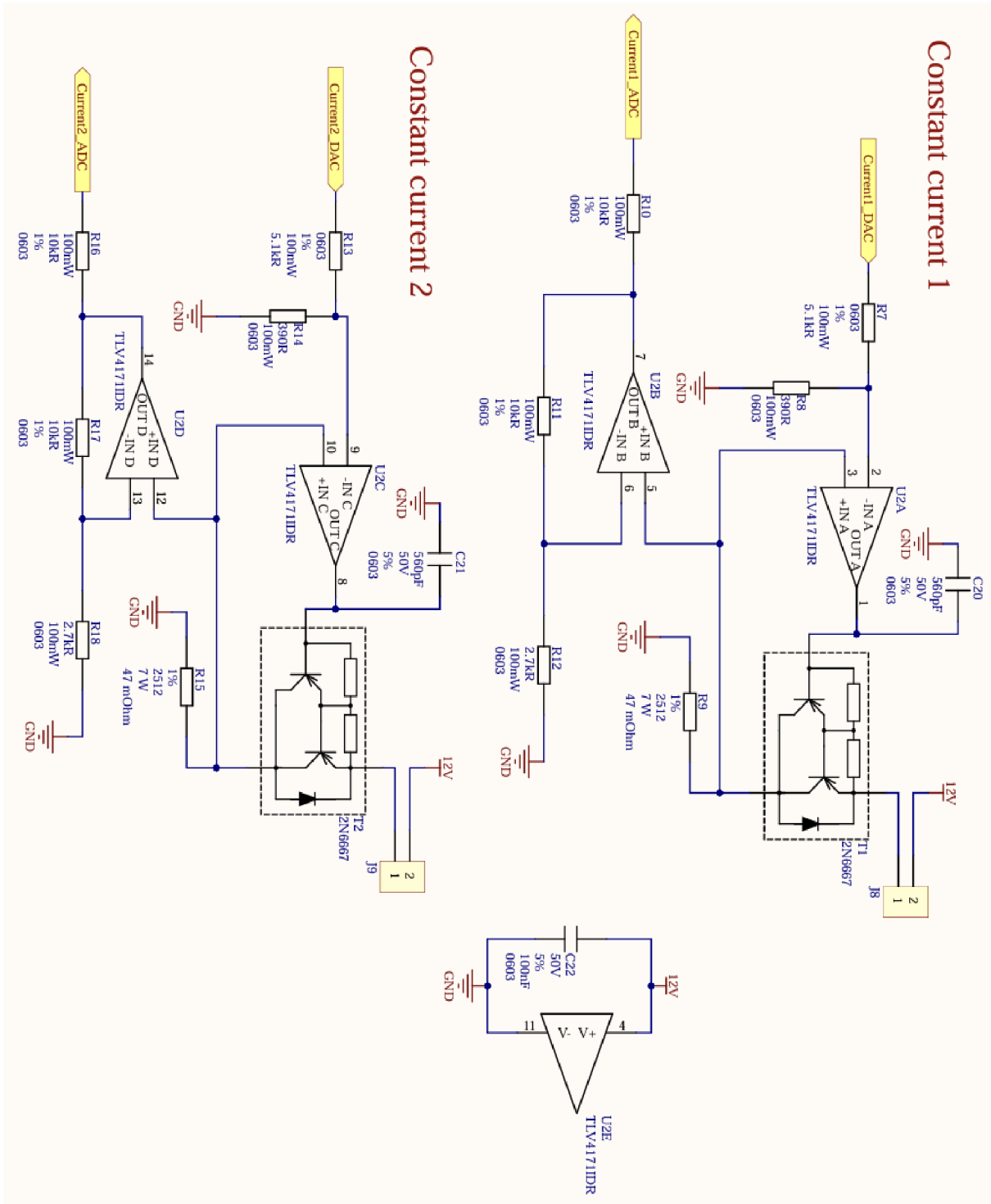




## A.3 Schématické zapojenie užívateľského rozhrania

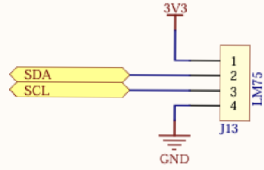


# A.4 Schématické zapojenie zdroja konštantného prúdu

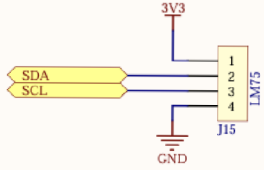


# A.5 Schématické zapojenie vstupno výstupných jednotiek

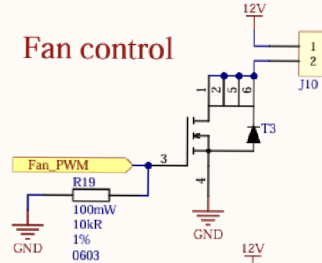
Temperature sensor 1 connector



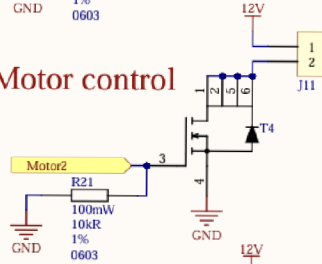
Temperature sensor 2 connector



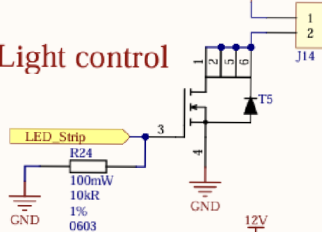
Fan control



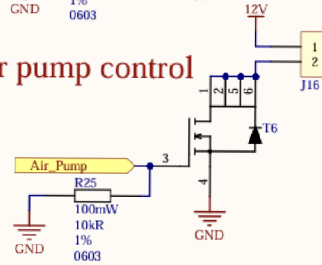
Motor control



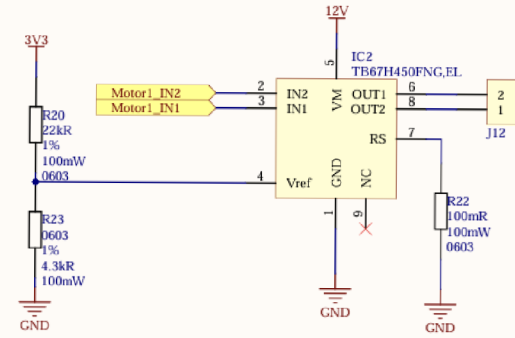
Light control



Air pump control

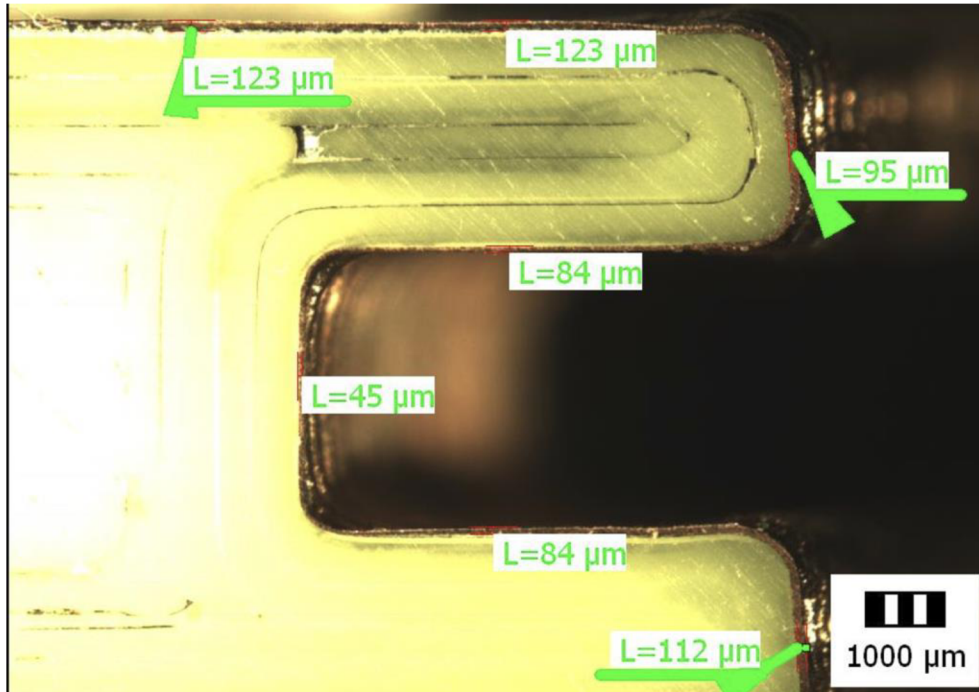


Motor driver

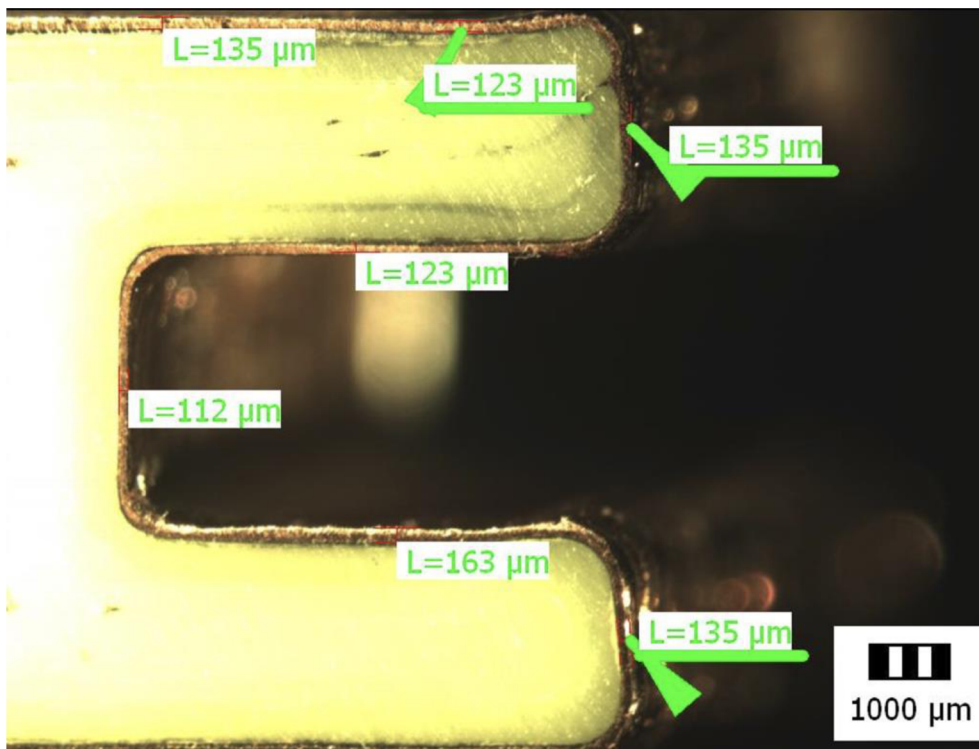


## Príloha B - Výbrusy pod mikroskopom

### B.1 Prúd 0,5A Čas 1h

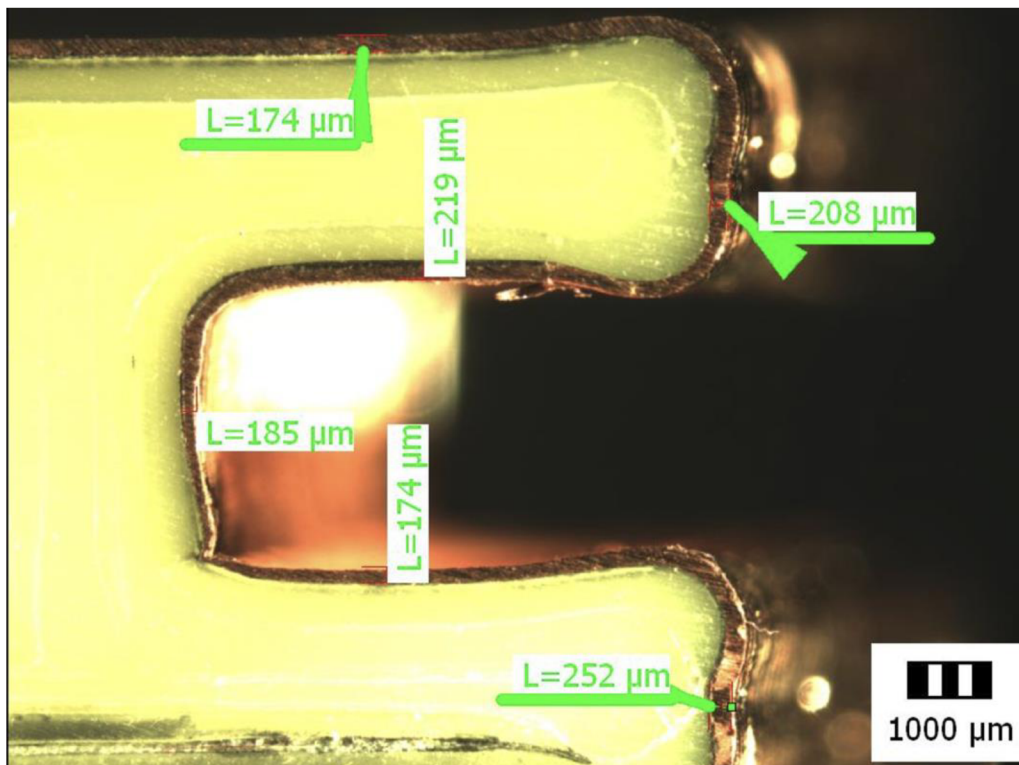


### B.2 Prúd 0,5A Čas 2h

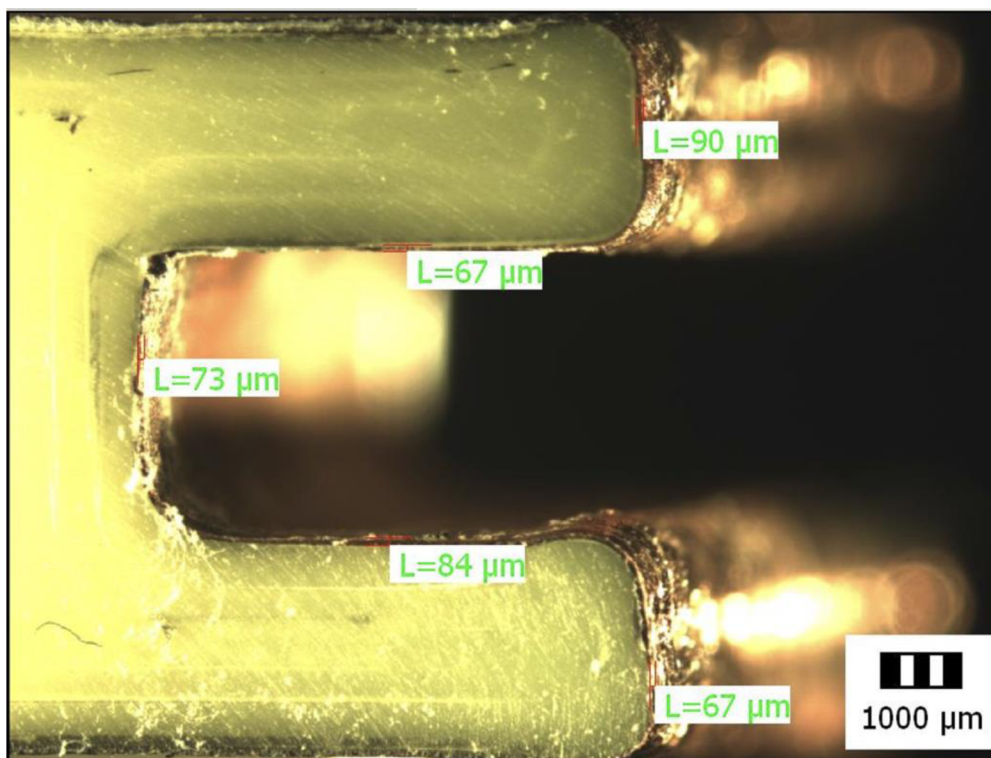




### B.3 Prúd 0,5A Čas 3h



### B.4 Prúd 0,25A Čas 1h



## B.5 Prúd 1A Čas 1h

