



**ČVUT**  
ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

# Spoj měď-ocel pro chladící segment smyčky Hypervapotronu

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Matějka Dušan

**VEDOUCÍ PRÁCE:** Ing. Pavel Rohan, Ph.D.

**ODBORNÝ ASISTENT:** Ing. Jana Ziegelheimová, Ph.D.

**STUDIJNÍ PROGRAM:** B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

**STUDIJNÍ OBOR:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Praha 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Matějka** Jméno: **Dušan** Osobní číslo: **501323**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Spoj měď-ocel pro chladicí segment smyčky Hypervapotronu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Steel-copper joint for Hypervapotron cooling loop segment**

Pokyny pro vypracování:

Provedte literární rešerši na téma spojování heterogenních spojů se zaměřením na navařování plazmatem a pájení. Experimentálně proveďte možnost nanášení vrstvy železa na měděnou podložku, možnost pájení mědi a oceli s ohledem na zajištění vysoké tepelné vodivosti spoje. Na základě provedených experimentů vyberte nejvhodnější postup pro výrobu chladicího segmentu smyčky Hypervapotronu.

Seznam doporučené literatury:

MOMIN, Altaf Hussain G., U. V. SHAH, Bharatlal C. KHATRI, MRUNALKUMAR CHAUDHARI a Janak VALAKI. Parameters for cladding using plasma transfer arc welding – A critical. Materials today [online]. 2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/781111111/Parameters-for-cladding-using-plasma-transfer-arc-welding-A-critical>  
KUMAR, Er. Amrit. Plasma Arc Welding. The Mechanical engineering [online]. 2020, 2020 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://themechanicalengineering.com/plasma-arc-welding/> z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.009>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Rohan, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Pavel Rohan, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Rohana, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat zejména svému vedoucímu práce, Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., a své konzultantce, Ing. Janě Ziegelheimové, Ph.D., za vstřícné a trpělivé vedení mé práce, za věcné rady a lidský přístup.

Děkuji také všem svým blízkým, zejména tedy své rodině, která mi poskytla zázemí a podporu při celém studiu a tvorbě práce.

## Anotace

Bakalářská práce se zabývá spojováním heterogenních materiálů, konkrétně spojením měď-ocel, cestou PTA navařování a pájení. Cílem práce je vytvoření funkčního spoje dvou zkoumaných materiálů na základě předem provedené rešerše. V první části práce byla popsána metoda navařování PTA, pájení a FGM. V druhé části byly nejprve představeny použité stroje, přístroje, materiály a postupy. Následovalo vytvoření reprezentativních vzorků, které byly poté podrobeny zkoumání. Ve třetí části práce jsou zhodnoceny provedené experimenty a je zde vybrána nejlepší cesta k vytvoření funkční součásti do výzkumné chladicí smyčky hypervapotronu.

**Název diplomové práce:** Spoj měď-ocel pro chladicí segment smyčky Hypervapotronu

**Autor práce:** Dušan Matějka

**Vedoucí práce:** Ing. Pavel Rohan, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Jana Ziegelheimová, Ph.D.

**Akademický rok:** 2022/2023

**Vysoká škola:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní

**Ústav:** 12133 – Ústav strojírenské technologie

**Vedoucí ústavu:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

**Rozsah práce:** 77 stránek, 12 tabulek, 47 obrázků

**Klíčová slova:** Navařování, Pájení, měď, ocel, tepelná vodivost

## Annotation

This bachelor thesis deals with joining of heterogeneous materials, in our case copper-steel joints, by PTA welding and soldering. The aim of this thesis is to create a functional joint of these two materials based on prior research and investigation in this field. In the first part of this thesis, the PTA welding, brazing and FGM methods were described. In the second part, the machines, apparatus, materials and procedures used were presented. This was followed by the creation of representative samples, which were then subjected to research. In the third part of this thesis, experiments carried out are evaluated and the best way to create a functional component for the hypervapotron research cooling loop is selected.

**Title of the final thesis:** Steel-copper joint for Hypervapotron cooling loop segment

**Author:** Dušan Matějka

**Supervisor:** Ing. Pavel Rohan, Ph.D.

**Consultant:** Ing. Jana Ziegelheimová, Ph.D.

**Academic year:** 2022/2023

**University:** CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

**Department:** 12133 – Department of Manufacturing Technology

**Head of department:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

**Extent:** 77 pages, 12 tables, 47 pictures

**Keywords:** Welding, soldering, Copper, Steel, thermal conductivity

# Obsah

1	ÚVOD A CÍL PRÁCE .....	12
2	Technologie navařování.....	14
2.1	Charakteristika navařování .....	14
2.1.1	Technologie navařování .....	15
2.1.2	Výhody a nevýhody procesu navařování .....	18
2.2	Technologie PTA navařování.....	19
2.2.1	Princip PTA navařování.....	19
2.2.2	Plazmový plyn.....	20
2.3	PTA hořáky .....	21
2.4	Přídavné materiály.....	22
2.5	Stroje pro PTA.....	23
2.6	Navařování povrchů .....	24
2.6.1	Cladding.....	25
2.7	Navařované materiály .....	26
2.7.1	Kombinace Cu a Fe.....	26
3	Pájení.....	29
3.1	Princip pájení.....	29
3.2	Výhody a nevýhody pájení .....	30
3.3	Pájky .....	31
3.3.1	Měkké pájky.....	31
3.3.2	Tvrdé pájky .....	31
3.3.3	Tavidlo.....	32

4	Funkčně gradované materiály (FGM).....	33
4.1	Princip FGM.....	33
4.2	Využití FGM.....	35
4.2.1	FGM v energetice .....	35
4.3	Výroba FGM .....	35
5	Experimentální část .....	37
5.1	Použité přístroje, stroje a postupy.....	38
5.1.1	PPC 250 R6 .....	38
5.1.2	Pec k vypékání vzorků .....	39
5.1.3	Mikroskop – Zeiss Axio Observer D1m .....	40
5.2	Navařování .....	40
5.2.1	Použité materiály.....	40
5.2.2	Příprava vzorků.....	41
5.2.3	Výsledky navařování.....	43
5.3	Pájení.....	45
5.3.1	Použité materiály.....	45
5.3.2	Použité pájky.....	45
5.3.3	Příprava vzorků před pájením .....	46
5.3.4	Pájení.....	46
5.3.5	Příprava vzorků po pájení .....	46
5.4	Vyhodnocení vzorků.....	47
5.4.1	Kvalita pájeného spoje .....	47
5.4.2	Srovnání propájení.....	53
5.4.3	Tloušťka pájených spojů.....	54



5.4.4	Srovnání tloušťky vrstev .....	62
5.5	Tepelná vodivost .....	63
5.5.1	Návrh a realizace experimentu .....	63
5.5.2	Výsledky měření.....	66
6	ZÁVĚR.....	69
	Použitá literatura .....	71
	Seznam tabulek .....	75
	Seznam obrázků .....	76
	Přílohy .....	78

## Seznam zkratek

<b>zkratka</b>	<b>vysvětlení</b>
ČVUT	České vysoké učení technické
PTA	Plasma Transferred Arc
FGM	Functionally Graded Material
MMA	Manual Metal Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas Welding
MAG	Metal Active Gas Welding
TIG	Tungsten Inert Gas Welding
SAW	Submerged Arc Welding
dB	decibel
mm	milimetr
°C	stupně Celsia
eV	elektronVolt
A	ampér
μm	mikrometr
Fe	lat. Ferrum, Železo
Cu	lat. Cuprum, Měď
Ag	lat. Argentum, Stříbro
s	sekunda

# 1 ÚVOD A CÍL PRÁCE

S rozvojem moderních technologií a vysokovýkonných elektronických systémů stále narůstá technologická náročnost jejich navrhování, výroby, ovládání i udržení v provozních parametrech a zajištění spolehlivého fungování celé technologické jednotky. Jednou z cest k zajištění právě spolehlivé funkce zařízení je chlazení. V posledních letech je ve fázi výzkumu efektivní hypervapotronové vysokorychlostní chlazení využitelné v oblasti fúzních jaderných elektráren. Výzkum segmentu chladicího ústrojí probíhá i v laboratořích Ústavu energetiky ČVUT v Praze. Metoda chlazení využívá zvýšeného energetického přestupu tepla mezi chladícím médiem a chladícím ústrojím při dosažení teploty varu daného média.

Bakalářská práce je zaměřena na vytvoření tepelného přechodu s minimálními ztrátami mezi mědí a ocelí. Měď je klíčová pro efektivní odvod tepla a ocel je použita pro svou dostupnost a velmi dobré indukční vlastnosti. Spojování heterogenních materiálů je problematické a vyžaduje odborné znalosti v oblasti materiálového inženýrství, technologie a energetiky.

Cílem projektu je vytvoření reprezentativního spoje dvou heterogenních materiálů (měď-ocel), jeho následné podrobení makroskopickému zkoumání a zkouškám tepelné vodivosti. Pro zhotovení daných spojů byla vybrána metoda plazmového navařování PTA a pájení za použití tvrdých stříbrných pájek. V ideálním případě je cílem dojít k vytvoření materiálu s gradientním rozložením materiálových vlastností (vzorek by následně spadal do skupiny FGM (Functionally Graded Materials), což znamená, že by daný vzorek obsahoval postupné změny materiálových vlastností v různých oblastech vzorku).

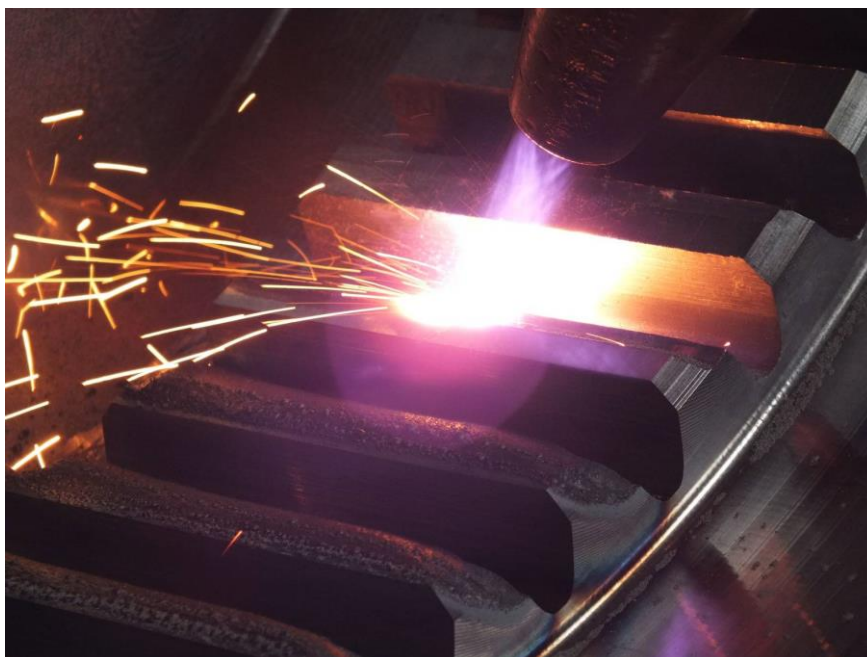
První část práce je věnována rešerši na téma PTA navařování, pájení a FGM. Ve druhé, experimentální části, jsou představeny použité stroje, přístroje a využitá zařízení. Jsou zde popsány postupy, podle kterých bylo postupováno v celé praktické části (studium makroskopie spojů, zkoušky tepelné vodivosti).

Následně jsou zde popsány výsledky zkoumání a možné směry budoucího postupu při řešení technologického problému.

## 2 Technologie navařování

### 2.1 Charakteristika navařování

Navařování je metalurgický proces, který využívá nanášení vrstvy přídavného materiálu na materiál základní. Metoda umožňuje opravy strojních součástí (Obrázek 1), u kterých se z důvodu opotřebení či chybou ve výrobním procesu objeví místa s chybějícím základním materiálem, toto místo je následně vyplněno svarovým kovem. Během oprav součástí musí být přídavný materiál stejný jako materiál základní, po opravě následuje obrobení strojní součásti, nebo přinejmenším oblasti do které návar zasahuje, na požadované funkční rozměry. Další možností využití technologie navařování je aplikace speciálních přídavných materiálů na povrch součástí, za účelem zlepšení povrchových vlastností, mezi které nejčastěji řadíme odolnost proti mechanickému opotřebení (tvrdost, abrazivzdornost), korozivzdornost a odolnost proti tepelnému namáhání. [1] [2]



Obrázek 1: Ukázka opravy ozubeného kola navařováním [2]

### 2.1.1 Technologie navařování

Při procesu navařování dochází obecně k natavení přídavného materiálu a částečnému natavení základního materiálu za vzniku svarové lázně, která po krystalizaci vytváří navařenou vrstvu pevně metalurgicky spojenou se základním materiálem.

Největší vliv na jakost povrchu součásti, která prošla procesem navařování má volba vhodné technologie, volba navařovaného materiálu vzhledem k materiálu základnímu a samotné parametry procesu navařování, které jsou podrobněji rozebrány níže. Nesprávná volba může znamenat výrazné snížení kvality povrchu, či dokonce jeho znehodnocení, prodloužení potřebného času k provedení celého procesu navaření a výrazné zvýšení finančních nákladů. Vždy je nutné si rozmyslet, zda je oprava nebo povrchová úprava pomocí navařování skutečně proveditelná a ekonomicky výhodná.

Pro dosažení co nejvyšší kvality povrchu strojní součásti je kladen důraz na minimalizaci tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu. V této oblasti mohou vznikat vnitřní pnutí a následné deformace vlivem vneseného tepla. Při navařování chemicky odlišných přídavných a základních materiálů je zapotřebí dbát zvýšené opatrnosti na mísení obou materiálů (vedoucí k nechtěnému ovlivnění povrchové vrstvy a snížení její kvality, či dokonce k jejímu úplnému znehodnocení a nutnosti opakování celého procesu). Aby bylo dosaženo co nejvyšší kvality povrchu strojní součásti, snažíme se minimalizovat tepelně ovlivněnou oblast základního materiálu. [1] [3]

Technologií navařování v dnešní době existuje celá řada, nejjednodušší dělení je na navařování manuální a robotizované. Manuální navařování poskytuje možnost provádět navařování i v místech špatně dostupných, nebo v situacích, ve kterých by bylo komplikované daný díl vyjmout a následně transportovat (typickým příkladem je oprava navařováním kolejnic vlaků a tramvajů). Robotizované navařování na druhou stranu poskytuje možnost proces navařování automatizovat, zrychlit, zpřesnit a zefektivnit.

Nejčastější dělení používané u navařování je podle druhu zdroje tepla potřebného k roztavení přídavného materiálu. Pro navařování lze použít klasické svářečské metody využívající elektrický oblouk. Sem patří technologie MMA (Manual Metal Arc Welding), která je výhradně manuální a pracuje na principu hoření oblouku mezi základním materiálem a obalenou elektrodou. Dále technologie MIG/MAG (Metal Inert Gas /Metal Activ Gas), což jsou technologie pracující na principu obloukového navařování odtavující se elektrodou. Technologie MIG používá inertní ochranou atmosféru, která chemicky nereaguje se svarovou lázní, na druhou stranu MAG vytváří ochranou atmosféru reagující se svarovou lázní. Obě tyto technologie jsou již automatizovatelné (Obrázek 2) a vykazují poměrně vysokou produktivitu práce. [4]



Obrázek 2: Ukázka robotizovaného procesu navařování [2]

Další ze skupiny obloukového navařování je technologie TIG (Tungsten Inert Gas), která pracuje na principu hoření elektrického oblouku mezi wolframovou netavitelnou elektrodou a základním materiálem. Poslední z této skupiny je technologie SAW (Submerged Arc Welding) pracující principiálně totožně jako MIG/MAG. Ochranu před okolní atmosférou vytváří vrstva práškového tavidla nanesená na navařované ploše, tavná lázeň je celou dobu svařování zakryta tavidlem. Metoda SAW vykazuje vysokou produktivitu a hodí se zejména na opravy rovinných a rotačních součástí. [1] [4]

Jedna z nejmladších a nejpůvodnějších technologií navařování je technologie navařování laserem (Obrázek 3), což je technologie založena na přenosu velkého množství energie pomocí monochromatického laserového paprsku. Laserový svazek svou energii předává přídavnému a základnímu materiálu. Metodou laserového navařování lze deponovat široké spektrum přídavných materiálů. [6]



*Obrázek 3: Ukázka laserového práškového navařování [31]*

Další populární metoda je navařování pomocí plazmatu. Pro tuto metodu se používá obecně zkratka PTA (Plasma Transferred Arc Welding). Problematika této oblasti navařování bude podrobněji rozebrána níže.

Mezi méně užívané metody navařování lze řadit navařování elektronovým svazkem ve vakuu, navařování s využitím aluminotermické reakce a atomické navařování. [5]



## 2.1.2 Výhody a nevýhody procesu navařování

Metoda navařování v dnešní době patří mezi jednu z předních technologií povrchového inženýrství.

**Mezi jeho hlavní výhody lze zařadit:** [1] [5] [6]

- Pevná metalurgická vazba se základním materiálem
- Možnost různých tlouštěk návarů
- Vysoká přesnost povrchu návaru
  - Minimalizace potřebných přísadků na následné obrábění
  - Zmenšení objemu odpadních materiálů
  - Snížení potřebného strojního času

**Mezi hlavní nevýhody lze považovat:** [6]

- Tepelné ovlivnění oblasti základního materiálu
  - Vznik vnitřních pnutí a deformací
- Difuze částic základního materiálu do nově vzniklé navařené vrstvy
  - Zhoršení přirozených mechanických i korozních vlastností
- Vysoká energetická náročnost
- Ekonomická náročnost celého procesu
  - Potřeba speciálních strojů a velmi kvalifikované obsluhy
- Vysoký hluk (až 100 dB) a vysoká spotřeba ochranných plynů

Navařování lze využít i ke kompletaci celých 3D strojních součástí podobně, jako je tomu u 3D tisku plastů i když metoda zatím zůstává značně časově i finančně náročná, a ačkoliv se tímto směrem výzkum ubírá již řadu let, tak své stálé místo na trhu zatím nenašla. Navařování je obecně velmi efektivní proces s vysokou produktivitou práce, u kterého lze dosáhnout dobré opakovatelnosti, proto je možné jej zařadit do sériové výroby. [1] [5] [6]

## 2.2 Technologie PTA navařování

### 2.2.1 Princip PTA navařování

Mezi jednu z nejpoužívanějších metod navařování v dnešní době patří navařování plazmatem, jinak označováno jako technologie PTA (Plasma Transferred Arc). Technologie PTA využívá vysokou energii plazmového oblouku, vznikajícího mezi wolframovou elektrodou (zapojena jako katoda) a základním materiálem, k natavení přídavného i základního materiálu a jejich metalurgickému spojení. [1] [3]



*Obrázek 4: Povrch armatury s navařeným povrchem metodou PTA [32]*

Princip metody je podobný ostatním technologiím navařování. Technologie navařování plazmatem je založená na procesu svařování, kdy se pomocí elektrického oblouku zahřívá kovový základní materiál a navařovaný materiál nad teplotu tavení. Elektrický oblouk je vytvářen mezi elektrodou a základním materiálem, a to v inertní atmosféře (nejčastěji argonu nebo helia), což minimalizuje přítomnost nežádoucích plynných nebo oxidických příměsí v oblasti svaru. Ideálním stavem je stanovení takových parametrů, kdy dojde k minimálnímu natavení základního materiálu s minimální tepelně ovlivněnou oblastí a minimalizuje se mísení základního a přídavného materiálu. [1] [7]

Mezi typické parametry navařovacího procesu lze považovat teplotu plazmatu vystupujícího z hořáku (teplota se pohybuje v intervalu 8000 až 18000°C), rychlost posuvu hořáku, chemické složení plazmového plynu, druh a čistota základního a přídavného materiálu, konstrukce hořáku a potřebné napětí pro udržení plazmatu. [1] [4] [7]

Metoda je využitelná pro spojení velmi různorodých materiálů v různých formách (prášek, trubička, drát, tyčinka). Vyznačuje se zavedením a udržením vysoké kvality návaru a produktivity práce (Obrázek 4). Dosahuje kvalitní návaru již v první vrstvě, která zajistí promíšení materiálů do maximálně 0,8 mm od rozhraní návaru. V porovnání s navařováním pomocí laserového paprsku má metoda využívající plazmatu širší okno využitelných parametrů nastavení navařovacího procesu. [6] [8]

### 2.2.2 Plazmový plyn

Nejpoužívanějším plazmovým plynem je Argon a jeho směsi. Nejpoužívanější směsí je poté směs argonu a helia, která poskytuje při správném užití zvýšení životnosti hořáku i wolframové elektrody. Lze použít směsi argonu s vodíkem nebo dusíkem. Pro snadnou ionizaci je rozhodující ionizační energie (Tabulka 1) (pro plyny, u kterých je zapotřebí navíc narušení vlastní chemické vazby je nutné k energii ionizační, přičíst energii disociační, například pro dusík se tato energie pohybuje okolo 9,8 eV). [1]

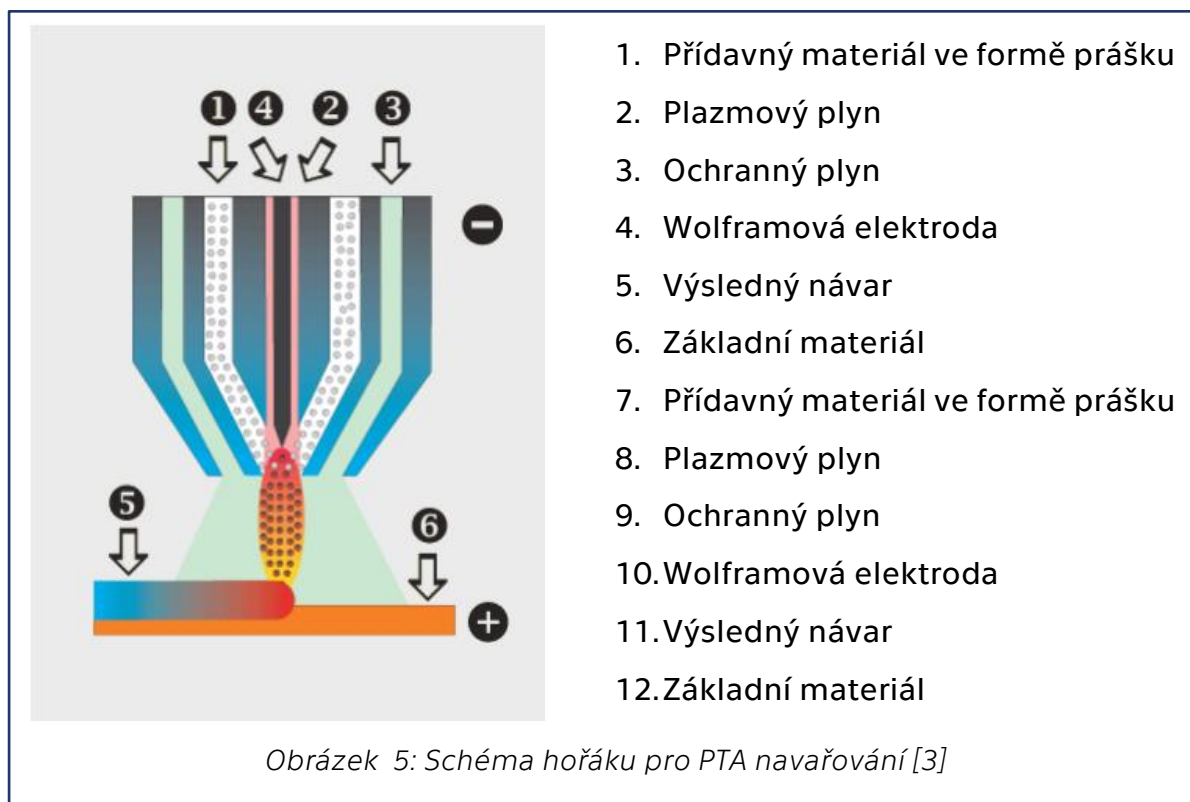
Tabulka 1 - Ionizační energie plynů [1]

Plyn	Teplota varu (°C)	Rel. hustota (vzduch = 1)	Ionizační energie (eV)
Vodík	-252,9	0,06	13,59
Argon	-185,9	1,38	15,76
Helium	-268,9	0,14	24,56
Dusík	-195,8	0,91	14,55

Plazmový plyn má v celém procesu funkci inicializace, stabilizace a podpory hoření plazmatu. Vedle plynu plazmového je ke svarové lázni přiváděn i plyn ochranný, který vytváří ochrannou atmosféru chránící tavnou lázeň před vlivy vnějšího prostředí. [3] [7]

## 2.3 PTA hořáky

Plazmové hořáky, jinak nazývané jako plazmatrony, jsou nedílnou součástí celého procesu navařování (Obrázek 5)



Na vnějším obvodu hořáku je tryska ochranného plynu. Jak bylo zmíněno výše, nejčastějším ochranným plynem bývá argon a jeho směs. Ochranný plyn má v procesu navařování stejnou funkci jako ochranné plyny při svařování, chrání roztavenou tavnou lázeň před chemickou degradací a podporuje stabilitu hoření plazmového oblouku. Postupně směrem k ose hořáku se nachází tryska přídavného materiálu. Touto částí je přiváděn přídavný materiál ve formě prášku.

Během procesu navařování je využíváno vysokých hodnot proudu (150-250 A) a tudíž i velmi vysokých teplot (8000–18000 °C) a proto je nezbytné hořák chladit. [1] [3]

Další část směrem k ose hořáku poskytuje prostor pro proudění plazmového plynu, jehož vlastnosti, složení, funkce a způsob ionizace byl popsán výše. [1] [3]

Osou hořáku prochází netavící se wolframová elektroda, její hrot je nabroušen do špičky pro podporu stability hoření. Elektroda je zapojena jako katoda, základní materiál je zapojen jako anoda a prochází jimi stejnosměrný proud. [6]

## 2.4 Přídavné materiály

Nejčastěji využívaná forma přídavného materiálu je prášek, dále je možné využít přídavný materiál ve formě trubiček, elektrod a drátů. Největší výhodou nejčastěji používané formy přídavného materiálu – prášku, je možnost volby téměř neomezené variability jeho složení. Dále je jeho použití o 20-40% ekonomičtější než ostatní metody. Nevýhodou práškových přídavných materiálů je jejich sypkost a omezení využití na horizontálně orientované povrchy. Obvyklá zrnitost prášků využívaných jako přídavných materiálů je 100-200 μm a bývají atomizované v plynných atmosférách. [1] [6] [7]

Přídavné materiály lze dále dělit do skupin dle převažujícího prvku. Základní prvky (v technické praxi se nejčastěji používají materiály na bázi kobaltu, niklu a železa) se dále míchají například s chromem, vanadem, wolframem, uhlíkem, bórem, křemíkem a dalšími prvky, a tvoří směs přídavného materiálu. Vytvořená směs, na rozdíl od svařování, kde oba materiály (základní i přídavný) musí mít velmi blízké chemické složení) může mít zcela chemicky odlišné složení s materiálem základním. [1]

## 2.5 Stroje pro PTA

Stroje pro plazmové navařování jsou z drtivé většiny automatizované. Ruční navařování se pomocí plazmatu provádí pouze v ojedinělých případech, to je dáno nutností dodržení navařovacích parametrů (zejména délka oblouku, sklon hořáku a rychlost posuvu) pro zaručení kvality povrchu.



*Obrázek 6: Jednoúčelový navařovací automat uzpůsobený pro navařování armatur [8]*

Stroje pro technologii PTA lze dělit na dvě skupiny. Do první spadají stroje jednoúčelové pro velkosériovou výrobu (Obrázek 6), ty mají přesně daný svůj způsob využití pro specifické díly. Do druhé skupiny patří stroje univerzální, ty mají zpravidla větší počet pohyblivých os a jsou uzpůsobené pro kusovou a malosériovou výrobu nebo pro opravy a renovace poškozených strojních součástí. [8]

## 2.6 Navařování povrchů

Pro strojní součásti vyžadující specifické povrchové vlastnosti (koroziuvzdornost, otěruvzdornost, tvrdost, ...) ve většině případů nelze z ekonomických důvodů kompletovat celý díl z materiálu splňujícího dané požadavky. V tomto případě je jedním z možných řešení technologie navařování.

Navařování je používáno také v případech, ve kterých je třeba zajistit rozdílné vlastnosti povrchu součásti a jejího jádra (nejčastěji se jedná o součásti cyklicky namáhané, u kterých je zapotřebí zajistit tvrdý povrch při zachování houževnatého jádra). [9]

Termínem *cladding* se v zahraniční literatuře označuje celý proces navařování za účelem vytvoření výše popsané vrstvy přídavného materiálu. Dále se v literatuře můžeme dočíst o technologiích nazvaných *hardfacing* a *overlay welding*. Mezi technologiemi existuje pouze tenká hranice a nelze často na první pohled určit, o který ze zmíněných procesů se jedná. [9] [10]

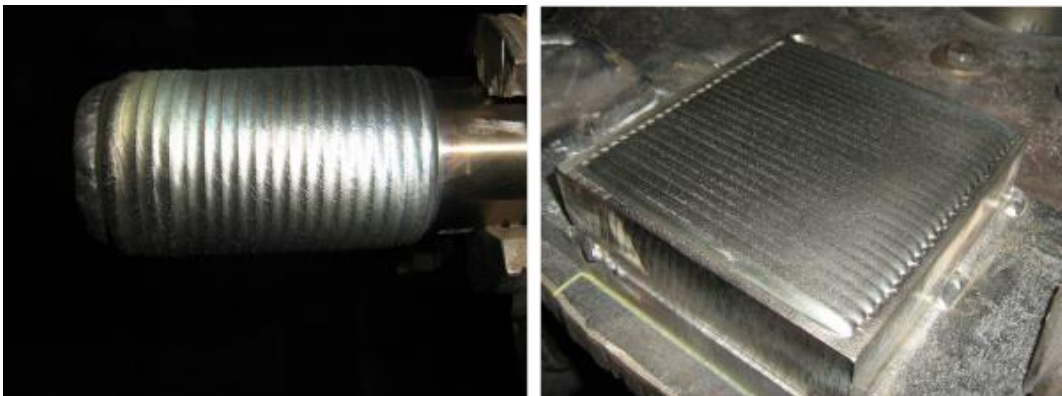


Obrázek 7: Hardfacing – ukázka ošetřeného rypadla [30]

Hardfacing je obecně považován za proces přinášející prodlouženou životnost součásti za použití vysoce otěruvzdorných materiálů pro navařované vrstvy (Obrázek 7). [10]

## 2.6.1 Cladding

V české literatuře se pojmem *cladding* (Obrázek 8) obecně uvažuje navařovací proces s předem naneseným přídatným materiálem ve formě prášku. Největší nevýhoda metody je nemožnost prášek aplikovat na jiné než horizontálně orientované plochy. Proto se začala používat pojiva, která po smíchání s práškem vytváří pastu. Pasta se nanese na základní materiál a v závislosti na druhu prášku a zejména druhu pojiva se nechá buď vypálit (to platí zejména pro pojiva na bázi vodného skla), vytékat (pro pojiva na bázi alkoholů), vyschnout (pro vodná a cementová pojiva) nebo se nátěrová pasta nijak dále nešetří a navařování se provádí v tomto stavu. [9] [11] [12] [13]



Obrázek 8: Ukázky vrstvy po navařování metodou *cladding* [14]

Nejrozšířenější technologie zdroje tepla pro *cladding* je v dnešní době laserový paprsek. Tato metoda má téměř nulový rozptyl prášku při předávání tepelné energie, oproti tomu se druhá nejčastěji používaná technologie využívající metodu PTA vyznačuje značným proudem plazmatu z hubice hořáku a dochází k výraznému rozptylu naneseného prášku, tím vznikají navařené vrstvy o různé výšce a nekonzistentní kvalitě. Metoda PTA využívající plazmatu se využívá zejména v kombinaci s přídatným podavačem prášku přímo do tavné lázně, která tuto nevýhodu dokonale eliminuje. Dalším řešením tohoto problému je aplikace přídatného materiálu ve formě pasty. Stejně jako u dílů orientovaných jinak než horizontálně, i zde je využíváno pojivo, které zajistí minimální rozptyl přídatného materiálu (prášku) i přes výraznější proudění plazmatu. [9] [14]



## 2.7 Navařované materiály

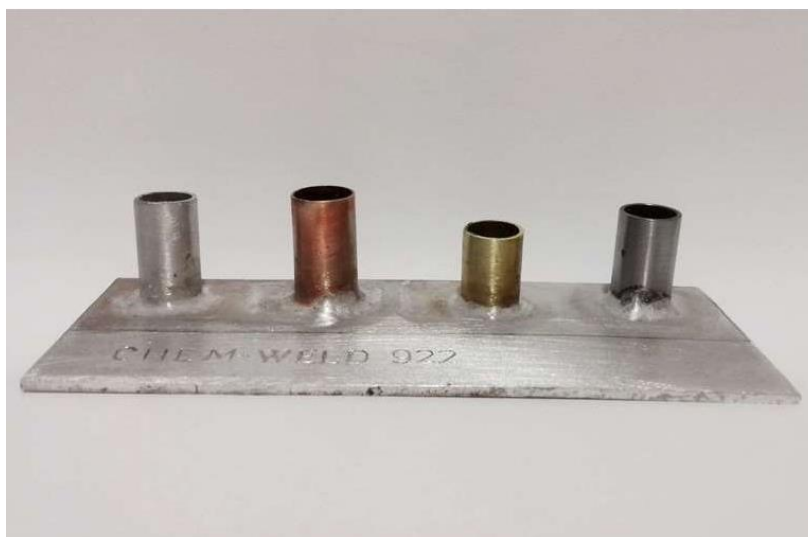
V práci se pracuje s možnostmi spojení železa (Fe) a mědi (Cu). Cílem práce bylo vytvoření teoretického a následně i praktického podkladu pro výrobu součásti uplatněné při výzkumu hypervapotronu. Je nutné vytvořit rozhraní, jehož povrch bude mít výborné indukční vlastnosti, kterými se vyznačuje právě železo (uvnitř zkušební cívky se v ocelovém povrchu bude indukovat velké množství tepla) a měděného jádra, které bude teplo odvádět směrem k chladicímu prostoru.

### 2.7.1 Kombinace Cu a Fe

Měď a železo jsou dva chemicky zcela odlišné kovy. Jejich trvalé, metalurgické či jiné chemické spojení není běžné a pro konstrukční účely se zpravidla nepoužívají. I přes to se lze v praxi setkat s aplikacemi, pro které je spojení dvou součástí z těchto materiálů nezbytné.

Nejjednodušší spojení je mechanický spoj. Nejčastěji se využívá šroubů a matic, šroubů a závitových děr atp. Nicméně při tomto druhu spojení mědi a železa je nutné uvažovat rozdílné elektrochemické potenciály obou kovů. Rozdíl v potenciálech má za následek vznik elektrochemické koroze již v mírně vlhkých prostředích. Proto je doporučováno pro konstrukční řešení spojů používat izolační podložky, či jiný elektricky nevodivý materiál, který elektrochemické korozi zabrání. [15] [16]

Další možnost spojení měděných a ocelových součástí poskytuje využití mezikovového materiálu, spadá sem například pájení a lepení. Pájení (Obrázek 9) se v technické praxi využívá nejčastěji a spočívá ve vytvoření tavné lázně pájky (ta má nižší teplotu tavení než ocel i měď) mezi pájenými materiály. Po zchlazení pájky jsou měděný i ocelový materiál pevně spojeny. Pevnost pájeného spoje závisí zejména na druhu pájky, preciznosti povrchové předúpravy pájených povrchů a správném postupu pájení. Výhodou pájeného spoje je jeho jednoduchost a snadné provedení. Na druhou stranu hlavní nevýhodou je jeho poměrně nízká pevnost a odolnost proti tepelnému namáhání pouze do výše teploty tavení použité pájky. [16]



Obrázek 9: Ukázka pájených spojů trubek [28]

Další možností spojení mědi a oceli je vytvoření elektrochemického spoje za užití galvanického článku. Měď i ocel se ponoří do elektrolytické lázně a v místě jejich kontaktu dochází k elektrochemické reakci. [16]

Mezi méně časté a velmi komplikované řešení spojení materiálů patří i svařování. Svařování dvou různých materiálů je výrazně složitější než svařování dvou součástí z materiálů stejných. To je zapříčiněno zejména odlišnými teplotami tavení obou materiálů. Konkrétně u mědi a oceli je tento rozdíl v řádů stovek stupňů Celsia (cca 400 °C). Tento výrazný rozdíl musí být brán v potaz a svařovací parametry se musí přizpůsobit procesu tak, aby došlo k vytvoření

svarové lázně mezi oběma kovy a vyvarovalo se výraznému tavení a tečení jednoho z kovů. [17]

Při navařování vrstev materiálů (například metodou PTA), na rozdíl od svařování rozdíl mezi teplotami tavení navařovaného a základního materiálu obecně nevadí. Toto platí pouze za předpokladu, že navařovaný materiál má nižší teplotu tavení než materiál základní. Pokud je tomu naopak, tedy teplota tavení základního materiálu je výrazně nižší než teplota tavení materiálu přídavného, vznikají komplikace při vytváření tavné lázně na povrchu součásti. Vytvoření stabilní tavné svarové lázně je základní krok pro získání kvalitní navařené vrstvy, proto je nezbytné správně tento proces odladit. [3] [6] [17]

## 3 Pájení

Pájení je proces, při kterém dochází ke spojení dvou součástí za využití třetího materiálu – pájky. V dnešní době se pájení využívá v elektrotechnice, automobilovém průmyslu, chladírenském průmyslu, medicíně a mnoha dalších oborech. Pájení je využíváno zejména v odvětvích a místech, kde z technologického či ekonomického hlediska nelze použít tavné spoje.

### 3.1 Princip pájení

Fyzikální podstata pájení spočívá v nahřátí pájených součástí na teplotu nižší, než je jejich teplota tavení, a jejich následným smáčením roztavenou pájkou. Atomy na povrchu součástí se dostávají během procesu do velmi blízké vzdálenosti a dochází k vytvoření podmínek pro vznik adhezních (přilnavých) a kohezních (soudržných) sil (z části dochází i k mírnému rozpouštění a difuzi prvků spojovaných materiálů a k reakci pájky s povrchovými oxidy pájených materiálů). [18]

Vedle metalurgických reakcí nesou významnou váhu i fyzikální a chemické vlastnosti pájky. Mezi nejdůležitější vlastnosti ovlivňující kvalitu pájeného spoje patří povrchové napětí pájek, smáčivost, roztékavost a vzlínavost pájek. Při navrhování procesu pájení je nutné všem vlastnostem pájek a materiálů věnovat potřebnou pozornost. [18]

Pájení lze dělit dvěma způsoby. Zprvu na pájení ruční a strojové, které se odlišují stupněm mechanizace procesu. Zadruhé na pájení tvrdé a měkké, u kterých je hranice tvořena vlastnostmi použitých pájek.

Ruční pájení je v dnešní době využíváno již jen pro opravy, vývoj, kusovou výrobu a kutilské potřeby. Je to zapříčiněno nemožností opakovat dokonale daný proces. Z tohoto důvodu se v moderní technické praxi využívají pájecí stroje s číselným ovládáním. Lidský faktor je zde omezen pouze na obsluhu, revizi a kontrolu stroje. Přesně definovaný sled pájecích operací zajišťuje zefektivnění a zjednodušení celého děje. [18]

Tvrdé a měkké pájení se rozlišuje teplotou tavení použité pájky, kde pro teploty tavení nižší než 450 °C mluvíme o pájení měkkém a pro pájky, které potřebují k tavení vyšší teplotu než 450 °C o pájení tvrdém.

## 3.2 Výhody a nevýhody pájení

**Mezi hlavní výhody pájení patří: [18]**

- Nízká tepelná náročnost a vysoká hospodárnost
- Vysoký potenciál k mechanizaci a automatizaci
- Možnost spojení různorodých materiálů, kovových i nekovových
- Tepelně ovlivněná oblast je minimální – nízké vnitřní pnutí a strukturní změny
- Vysoká přesnost

**Mezi hlavní nevýhody pak patří: [18]**

- Malá pevnost a únosnost spojů
- Nevhodnost pro dlouhé spoje tenkých plechů
- Přítomnost pájky a tavidla ve spoji – možnost zhoršení korozních vlastností
- Složitější tvar spojů

### **3.3 Pájky**

Pájka je slitina kovů nebo kovová látka, která je aplikována jako pojící materiál mezi dvě spojované součásti. Pájka se skládá z hlavního kovu (nejčastěji například měď nebo stříbro) a dalších kovů a chemických látek napomáhajících k dosažení potřebných pájecích podmínek. [18] [19]

#### **3.3.1 Měkké pájky**

Jsou pájky s teplotou tavení maximálně do 450°C. Lze jimi pájet oceli, měď, stříbro, nikl, zinek, olovo, cín, keramiku a další. Využití měkkých pájek je zejména u spojů jejichž materiály nesnesou tepelnou námahu a pro spoje u kterých není vyžadována vysoká pevnost. Spoje měkkých pájek můžeme najít téměř všude v elektrotechnice. [18] [19]

Do skupiny měkkých pájek patří pájky cínové. Ty jsou slitinou cínu a olova a jejich pracovní teplota je v rozmezí 190 °C až 350°C. Dále sem spadají speciální pájky (ty mají složení odlišné od slitin cín-olovo), které se používají pro pájení např. skla, hliníku apod. [18] [19]

#### **3.3.2 Tvrdé pájky**

Jsou pájky s teplotou tavení nad 450°C. Pájky tvrdé se využívají pro již více tepelně namáhané spoje, jejich teploty tavení zpravidla překračují 700°C. Pevnost spojů je již výrazně vyšší než za použití pájek měkkých. Nejběžnější tvrdé pájky jsou pájky na bázi mědi. Dále se používají pájky na bázi mědi s přídavkem fosforu, mosazné pájky a stříbrné pájky. [18]

### 3.3.3 Tavidlo

Je látka používající se při měkkém i tvrdém pájení pro podporu smáčení základního materiálu pájkou.

**Tavidla podporují proces pájení následujícími ději [18]**

- Převádí kyslíčnky z povrchu kovu do strusky
- Chrání pájený povrch i pájku před oxidací
- Chrání pájku před nadměrným vypařováním jejích složek

**Tavidla musí splňovat základní požadavky, kterými jsou: [18]**

- Nižší teplota tavení tavidla než teplota tavení pájky (50 až 150 °C)
- Nesmí zvyšovat náchylnost spoje ke korozi
- Vpřípadě potřeby musí být lehce odstranitelná
- Nesmí při svém vypařování vytvářet zdraví škodlivé zplodiny

Tavidla se stejně jako pájení a pájky dělí na tavidla pro měkké pájení a tavidla pro pájení tvrdé.

Tavidla pro měkké pájení mohou být anorganická či organická. Složení anorganických tavidel závisí zejména na následném použití (používají se chlorid zinečnatý, chlorid amonný, salmiak a další). Organická tavidla mají nižší účinnost než anorganická a jejich hlavní složkou je kalafuna.

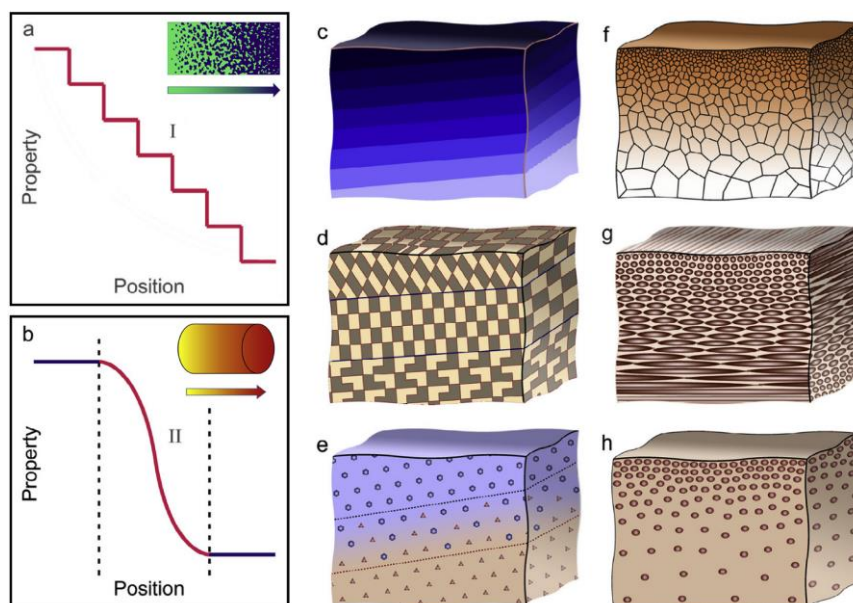
Tavidla pro tvrdé pájení jsou nejčastěji složena z boraxu nebo jeho směsi s kyselinou boritou.

## 4 Funkčně gradované materiály (FGM)

Funkčně gradované materiály (FGM – z anglického Functionally graded material) jsou nehomogenní materiály využívané v situacích vyžadujících dvě odlišné materiálové vlastnosti na jedné součásti. V technické praxi existuje celá řada odvětví, ve kterých jsou potřebné a funkčně gradované materiály se stávají standardem například v letecké, kosmické a biomedicínské praxi. [20] [21]

### 4.1 Princip FGM

FGM materiály jsou nehomogenní materiály využívající postupného přechodu materiálových vlastností na jediné součásti. Koncept FGM vznikl ve 20. století a od té doby došlo k jejich výraznému rozvoji. Obecně lze říci, že FGM se sestávají z minimálně dvou druhů materiálů, které mají jiné strukturní, mechanické i fyzikální vlastnosti (Obrázek 10). Některé starší zdroje považují za FGM i materiály s úmyslně vytvořenými dutinami, v dnešní době se ale toto konstrukční řešení vzdaluje principu FGM, i přes to že se metoda hojně užívá v kombinaci s 3D tiskem a v technické praxi má stále silné zastoupení. [20] [22]



Obrázek 10: Ukázka možných funkčně gradovaných materiálů [23]



Hlavní výhodou materiálů typu FGM je schopnost optimalizace vlastností materiálu v specifickém směru použití. To vede ke snížení hmotnosti, prodloužení životnosti a zvýšení celkové výkonnosti a funkčnosti součásti. Další výhodou FGM je snížení nákladovosti jednotlivých dílů, čehož je možné docílit za využití levnějších materiálů s vylepšenými vlastnostmi namísto materiálů drahých. Aplikace FGM materiálů poskytuje konstruktérům rozšíření možností konstrukčních řešení a variabilitu tvarů, designů a inovací při řešení náročných konstrukčních problémů. [20] [22] [23] [24]

Nevýhody FGM jsou spojeny zejména s jejich náročnou výrobou, která vyžaduje speciální technologii využívající složité procesy. Testování FGM je náročné, nehomogenita materiálu v celé součásti vede k ne vždy spolehlivým výsledkům (výsledné vlastnosti se mohou lišit od testované vrstvy). Nevhodným výsledkům je možné se vyhnout podrobnějším testováním vzorků za využití například rentgenového záření nebo ultrazvuku. Funkčně gradované materiály mají ze svého principu přesně danou oblast svého využití, jsou vytvořené pro konkrétní aplikace a hledání jiných možných využití je náročné a často nevede ke zdárnému konci. V neposlední řadě je nutné zmínit vysokou cenu výroby funkčně gradovaných materiálů a jejich omezenou dostupnost, nicméně tento problém by v budoucnu, s postupným vývojem technologie, mohl vymizet a funkčně gradované materiály by mohly nahradit na trhu například kompozitní materiály. [20] [22] [23] [24]

## 4.2 Využití FGM

Funkčně gradované materiály jsou v dnešní době využívány zejména v odvětví vesmírného výzkumu, jaderné energetiky, biologie a biomedicíny, elektromagnetismu, optiky a energetiky. Využití FGM není omezeno, nicméně v těchto odvětvích našly nejvhodnější uplatnění z hlediska jejich stále vysokých nákladů na výrobu a návrh.

### 4.2.1 FGM v energetice

Funkčně gradované materiály mají pro energetiku významný přínos zejména svou možností vytváření součástí s vrchní vrstvou s vysokou teplotní a korozní odolností. Důležitá vlastnost, které lze dosáhnout je odolnost proti teplotním rázům. Obecně lze konstatovat, že se FGM využívají v energetice pro svou možnost poskytovat vylepšení tepelné vodivosti součásti při zachování korozně odolného povrchu součásti. V jaderných elektrárnách se FGM nacházejí běžně jako konstrukční materiál jaderných reaktorů a vnitřních vrstev stěn jaderných reaktorů. Jejich použití přineslo zvýšení bezpečnosti provozu, zefektivnění a zjednodušení konstrukce jaderných reaktorů. Využití funkčně gradovaných materiálů je podobné jako u jaderných elektráren i u elektráren využívajících jadernou fúzi. [24]

## 4.3 Výroba FGM

Výroba funkčně gradovaných materiálů je založena na trvalém spojení dvou odlišných materiálů a vytvoření kontinuálního přechodu vlastností materiálů na dané součásti. [22] [24]

Cest a metod k výrobě FGM materiálů, nebo funkčně gradovaných vrstev materiálů na součástech je celá řada. Metody lze rozdělit na 3 specifické kategorie podle principu spojení/promísení daných materiálů. [24]

Do první kategorie spadají metody využívající fyzikálního spojení materiálů. Princip je založen na nanášení vrstev přídatných materiálů na materiál

základní a jejich trvalém spojení. Proces je kontrolován způsobem nanášení materiálových vrstev, parametry nanášení, technologií použité k vytvoření trvalého spoje. [24]

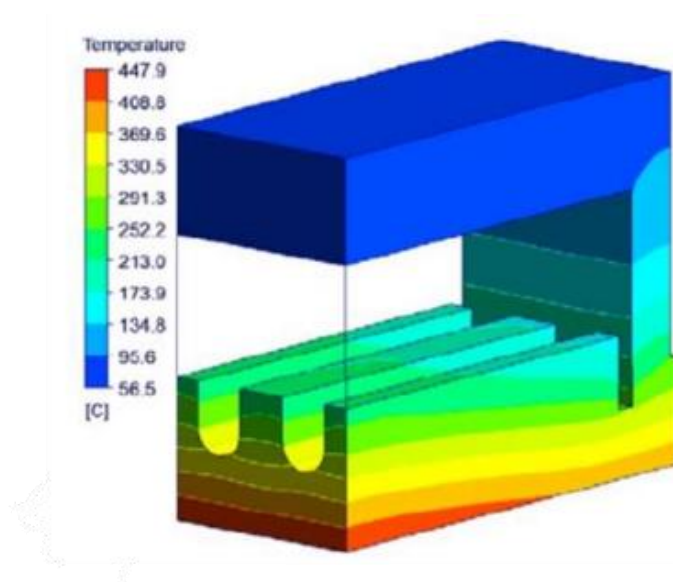
Druhá kategorie je založena na změně chemické struktury na molekulární úrovni materiálu, která vede ke vzniku gradované vrstvy ovlivněné struktury materiálu. [24]

Kombinace metod (fyzikální a chemické) vytváří třetí kategorii, využívající trvalého spojení dvou materiálů a zároveň jejich chemického mísení. [24]

Poslední cesta, jak vytvořit funkčně gradovaný materiál, již byla zmíněna výše. Jedná se o vytváření takové makrostruktury materiálu, která svou kompozicí vytvoří součást, jejíž vlastnosti se budou měnit od jednoho povrchu k druhému. Klasickým příkladem je vytváření součásti, která bude obsahovat dutiny. Dutiny budou gradovat od jedné strany součásti k druhé. To vytvoří rozdílné, například mechanické či tepelně vodivé, vlastnosti celé součásti. [22]

## 5 Experimentální část

Cílem experimentální části práce je vytvoření vzorků s gradientním rozložením materiálových vlastností pomocí metody navařování plazmatem (plasma transferred arc – PTA) nebo případně pomocí pájeného spoje. Protože vzorky mají dále sloužit v projektu v oblasti výzkumu hypervapotronové chladicí smyčky, je nutné vytvořit vzorek (Obrázek 11) s vlastnostmi uzpůsobenými těmto potřebám, tedy výbornou tepelnou vodivostí a vyšší teplotou tavení. Z tohoto důvodu je jako teplovodný materiál volena Měď (Cu), na kterou je nanášena ocelová vrstva (Fe).



Obrázek 11: Ukázka tepelného průběhu a tvaru segmentu smyčky hypervapotronového chlazení [29]

Cílem práce je vytvoření spodní části segmentu ve vymezeném časovém intervalu (dáno navazujícím výzkumem chlazení zahrnující použití námi vytvořeného vzorku). Z konstrukce součásti vychází koncepce postupu – nanášení tenké vrstvy železa na měděný blok, do kterého budou následně frézovány potřebné drážky. Kde vrstva železa bude na spodní straně vzorku (dle schématu oblast s nejvyšší teplotou) a měděná část v oblasti, kde probíhá chladicí cyklus.

První polovina experimentální části se zabývá vytvořením reprezentativních vzorků a realizací spoje Cu a Fe materiálů. Druhá polovina se zabývá zkoušením a interpretací vzniklých výsledků na zkušebních vzorcích. Mezi zkoumané vlastnosti spadá tepelná vodivost spoje, jeho tloušťka a porozita. Výstupem práce by měla být, vedle nových poznatků v oblasti spojování heterogenních (konkrétně Fe a Cu) materiálů, součást připravena k umístění do projektového pracoviště, které se nachází v laboratořích Ústavu energetiky ČVUT.

## **5.1 Použité přístroje, stroje a postupy**

### **5.1.1 PPC 250 R6**

Navařovací automat používaný v práci je od společnosti KSK, s.r.o. Česká Třebová, jedná se o automat PPC 250 R6 (Obrázek 12). Plazmový navařovací automat je určen na navařování rovinných součástí, rotačních součástí z čela nebo na obvodu (sedla, klíny a kuželky armatur, středící kroužky, sedla spalovacích motorů, ...), zároveň poskytuje možnost, za použití vhodného hořáku, navařovat vrstvy přídavného materiálu i na vnitřním průměru (od minimálního průměru 50 mm). [8] [25]

Jedná se o nejvyšší konfiguraci dané třídy s možností hořák polohovat ve čtyřech pohyblivých osách (X, Y, Z, N) a současně může být navařovaná součást polohována ve dvou pohyblivých osách (C, R), to dohromady dává obsluze možnost operovat celkem v šesti pohyblivých osách. [8]

Automat patří k menším, které je možné na trhu najít a řadí se do části univerzálních strojů pro kusovou či malosériovou výrobu. Pracovní stůl o průměru 300 mm má maximální nosnost 70 kg. Proces navařování je možné sledovat skrze okno na přední straně ochranné otevíratelné stěny, které je tvořeno sklem s dostatečnou ochranou proti UV záření vznikajícího během navařovacího procesu. [8]

Mezi pracovní parametry stroje patří již zmíněná maximální hmotnost navařované součásti. Automat může pracovat s frekvencí plazmových pulzů až do 200 Hz. Navařovací proud lze využívat v rozmezí 50 až 250 A. Automat nabízí vedle ručního navařování možnost programovatelného cyklu navařování, přičemž k programování využívá dialog PPC nebo metodu „Teach-in“. Automat může být vybaven přídatným podavačem prášku pro možnost navařování směsi v libovolném poměru, nebo přídatným odsáváním škodlivých plynů vzniklých při navařování. [8] [25]



Obrázek 12 - Plazmový navařovací automat PPC 250 R6 [8]

### 5.1.2 Pec k vypékání vzorků

Byla použita laboratorní Muflová pec LE 15/11 (Tabulka 2), pec se hodí ke krátkodobému ohřevu s řízeným náběhem i poklesem teploty, to zajišťuje regulátor HT 40B. [26] [27]

Tabulka 2 - Muflová pec – parametry [26] [27]

Parametr	Max. Výchřev [°C]	Objem [l]	Příkon [kW]	Váha [kg]	Max. Nosnost dna [kg]	Vnitřní rozměry (Š x V x H) [mm]	Napětí [V]
Hodnota	1100	14.4	3	28	6	250x170x340	230

Pec byla použita k vypékání vzorků s nanesenou pastou, to zajistilo dokonalé vytvrzení pojiva v pastě a odstranění přebytečné vlhkosti, která by v procesu navařování byla nežádoucí.

### 5.1.3 Mikroskop – Zeiss Axio Observer D1m

Pro měření tloušťky vrstvy pájeného spoje byl použit mikroskop v prostorách metalurgických laboratoří ÚST/ČVUT. Mikroskop od společnosti Zeiss v kombinaci s programem od stejné společnosti ZEN core umožnil snímat připravené vzorky a následně rovnou měřit potřebnou tloušťku vrstvy. Mikroskop je schopen maximálního zvětšení až 1000x.

## 5.2 Navařování

### 5.2.1 Použité materiály

#### Fe – prášek

Pro experiment byl použit Fe prášek s 99% čistotou (Tabulka 3). Podobné prášky se používají při metalurgických pracích, při výrobě jader svařovacích elektrod, pro magnetické detekce a jiné. Zrnitost prášku byla 250  $\mu\text{m}$  a jeho sypaná hmotnost 2,5 g /  $\text{cm}^3$ .

Tabulka 3 - Chemické složení Fe prášku

Prvek	Fe	Al	S	Cr	Mn	Cu
Obsah [%]	99.28	0.028	0.22	0.051	0.299	0.086

Materiálový list chemického složení prášku je v Příloze 1. Vedle prvků zobrazených v Tabulce 3 se v prášku, v množství nepřekračujícím 0,2 % obsahu měřeného vzorku, vyskytuje P, Cl, Co, Zn a Rb.

#### Cu – tyč plochá

Pro experiment byla použita tyč plochá měděná o rozměrech 30x20x1000 mm. Tyč byla vyrobena z elektrovodné mědi dle normy ČSN EN 13601.

## Cu – prášek

Použitý Cu prášek v práci byl od společnosti SAFINA, materiálový list chemického složení je v Příloze 2 (Tabulka 4). Zrnitost prášku byla 150  $\mu\text{m}$ ..

Tabulka 4 - Chemické složení Cu prášku

Prvek	Cu	Cr	Zr
Obsah [%]	99	0.9	0.0593

### 5.2.2 Příprava vzorků

Plochá tyč (50x20x1000 mm) byla na požadované rozměry rozdělena na pásové pile. Před nanesením pasty byl povrch vzorku obroušen a odmaštěn čistým lihem. Po odmaštění bylo možné začít nanášet předem namíchanou pastu ocelového prášku a vybraného pojiva. Jako první pojivo bylo použito univerzální polyvinylacetátové disperzní lepidlo. Poměry složení po dosažení optimální hustoty pasty jsou zobrazeny v Tabulka 5.

Tabulka 5 - Složení pasty – Lepidlo

Složka	Hmotnost [g]
Fe prášek	16
Lepidlo	7.5
Voda	7.5

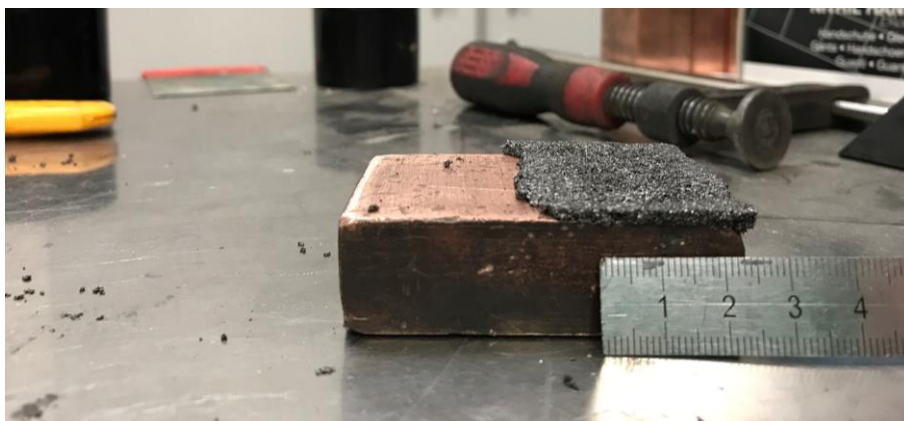
Jako druhé pojivo byla použita epoxidová pryskyřice G20 a její tužidlo, konečné poměry složení pasty jsou zobrazeny v Tabulka 6.

Tabulka 6 - Složení pasty – Pryskyřice

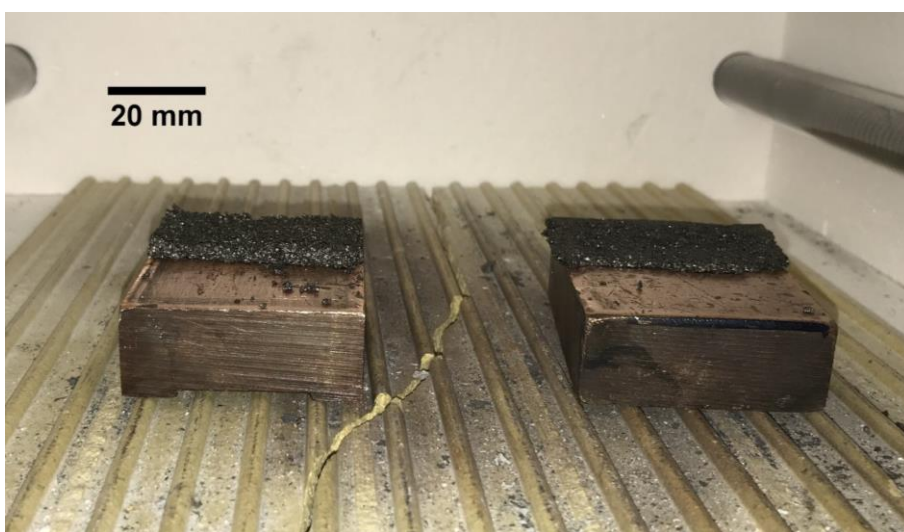
Složka	Hmotnost [g]
Epoxidová Pryskyřice	4
Fe prášek	21



Obě vytvořené pasty byly nanесeny na předem připravené Cu vzorky ve vrstvě 2 mm (Obrázek 13). Takto vytvořené polotovary k navařování se po dobu 60 minut nechaly vypéct v peci (Obrázek 14) při teplotě 110 °C (zajištění odpaření nežádoucí vlhkosti a vytvrzení pasty).



Obrázek 13: Vzorek s nanесenou Fe pasto

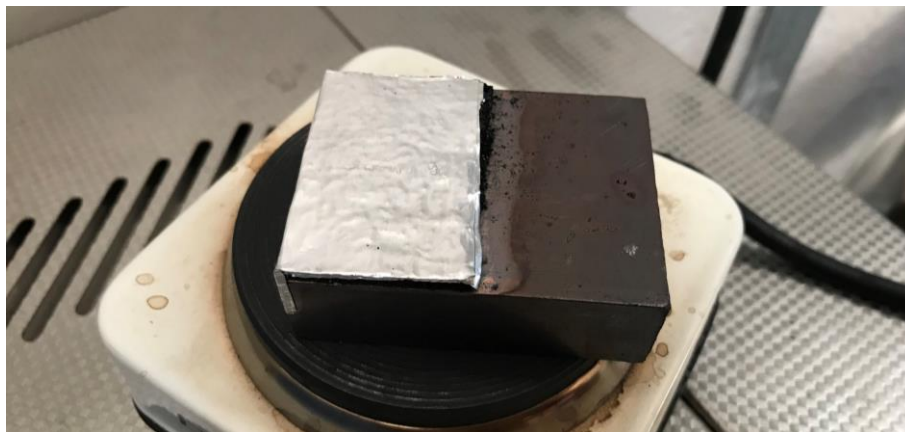


Obrázek 14: Vzorky připravené k vypálení

### 5.2.3 Výsledky navařování

Jedna z hlavních a nejsložitějších operací při procesu navařování je odladění navařovacích parametrů. Při snaze se jako hlavní problém ukázala nízká soudržnost vytvořené vrstvy Fe pasty po jejím roztavení a vytvoření tavné lázně na povrchu Cu vzorku.

Fe pasta se pod proudem plazmatu rozstříkovala a nedokázala setrvat v proudu plazmatu až do dosažení tavní teploty a vytvoření tavné lázně na Cu vzorku. Prvotní řešení tohoto problému spočívalo v uzavření pasty pod tenkou hliníkovou páskou (Obrázek 15), která by rozstříku předem zabránila a během samotného procesu shořela a nevnesla do navařeného povrchu nežádoucí prvky.

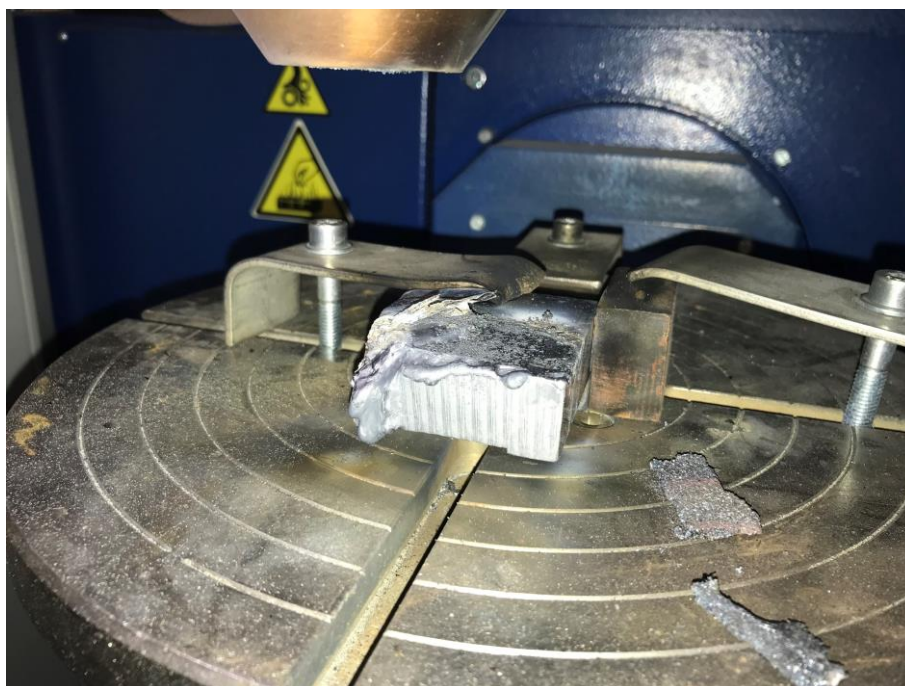


Obrázek 15: Navařovaný vzorek

Druhé řešení bylo odstoupení od metody cladding a přistoupení na automatické podávání Fe prášku přímo do proudu plazmatu za pomoci přídatného podavače.

Další řešení bylo smícháním Fe prášku v přípravě vzorku s Cu práškem a vytvořit lépe tepelně vodivou pastu pro lepší natavení základního Cu vzorku.

Při nastavených parametrech a vstupních podmínkách se nepodařilo úspěšně vyrobit vzorek s Fe vrstvou na měděném bloku. První řešení se ukázalo jako jistý postup vpřed, došlo k navaření malé části povrchu na kraji vzorku, další pokusy však byly neúspěšné. Druhé řešení s automatickým podáváním se ukázalo problematickým z důvodu vysoké tepelné vodivosti měděného bloku. Při vytváření svarové lázně na jeho povrchu docházelo k příliš rychlému odvodu tepla a namísto vzniku svarové lázně se začínal celý vzorek tavit (Obrázek 16).



*Obrázek 16: Cu vzorek po navařování*

Vzhledem ke stávajícím podmínkám bylo od další optimalizace navařovacího procesu upuštěno a problém byl ponechán k navazujícímu budoucímu zkoumání. Druhá část experimentů je zaměřena na vytvoření spoje Fe-Cu za pomoci pájeného spoje.

## 5.3 Pájení

### 5.3.1 Použité materiály

#### Cu - tyč plochá

Byla použita opět měděná tyč plochá o rozměrech 1000x20x5 mm. Měděná tyč byla vyrobena z teplovodné mědi dle normy ČSN EN 13 601.

#### Fe – tyč plochá

V experimentu byla použita ocelová tyč plochá o rozměrech 1000x20x2 mm. Ocelová tyč byla vyrobena válcováním za tepla dle normy EN 10 058.

### 5.3.2 Použité pájky

Všechny použité pájky byly zakoupeny od společnosti AZ Weld.s.r.o.. Byly vybrány pájky o velmi podobném základním složení tak, aby jejich hlavním rozdílem byl obsah stříbra.

#### **Pájka 1 – AG 309 B15**

Obalovaná pájka od firmy AGRECO s produktovým označením 104E o průměru 1,6 mm a délce 500 mm. S obsahem stříbra (Ag) **20 %**.

#### **Pájka 2 – AG 304 B15**

Obalovaná pájka od firmy AGRECO s produktovým označením 108E o průměru 1,6 mm a délce 500 mm. S obsahem stříbra (Ag) **40 %**.

#### **Pájka 3 – AG 104 B20**

Obalovaná pájka od firmy BRAZE s produktovým označením 452E o průměru 2 mm a délce 500 mm. S obsahem stříbra (Ag) **45 %**.

### 5.3.3 Příprava vzorků před pájením

Plochá měděná i železná tyč byla nejprve dělena na pásové pile na rozměry 100x20 mm, následně byly sraženy ostré hrany a jedna plocha určena k pájení byla očištěna a obroušena do podoby uzpůsobené pájení. Před samotným pájením byl povrch pájených ploch odmaštěn a řádně vysušen.

### 5.3.4 Pájení

Proces pájení proběhl v laboratořích ústavu technologie ručně, specializovanými pracovníky.

### 5.3.5 Příprava vzorků po pájení

Z každého druhu použité pájky byly vytvořeny 3 pájené spoje, které byly ihned po pájení označeny příslušným číslem pájky (1 až 3 viz. výše) (Obrázek 17).

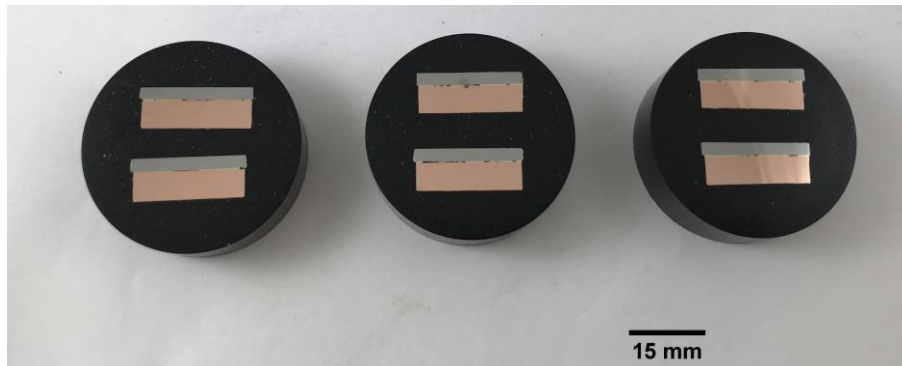


Obrázek 17: Vzorky po pájení

### Příprava vzorků pro metalografii

Vzorky pro metalografická měření byly tři, pro každou použitou pájku jeden. Vzorky byly nejprve rozřezány na kotoučové pile Struers Labotom 3. Vzorky byly děleny na pět částí (tři odpadní a dvě vzorkové). Dvě vzorkové části o šířce 5 mm byly vyříznuty na dvou místech blízko středu pájeného spoje. Vyříznuté vzorky byly ihned po dělení umístěny do stroje Struers Citopress 1 a zapečeny pomocí pryskyřice MultiFast do metalografických vzorků (Obrázek 18). Vzorky byly následně broušeny na stroji Buehler Beta Grinder Polisher s automatickou hlavou Buehler Vector. Na stejném stroji byly poté vzorky i leštěny. Leštění byla finální operace přípravy vzorků (vzorky u kterých je potřeba sledovat strukturu, velikost zrn apod. se ještě po leštění leptají k odstranění Beiblyho vrstvy).

## 5.4 Vyhodnocení vzorků

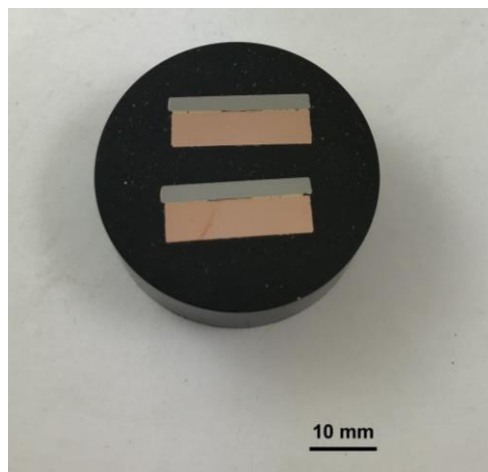


Obrázek 18: Vzorky připravené ke zkoušení (zleva: 1, 2, 3)

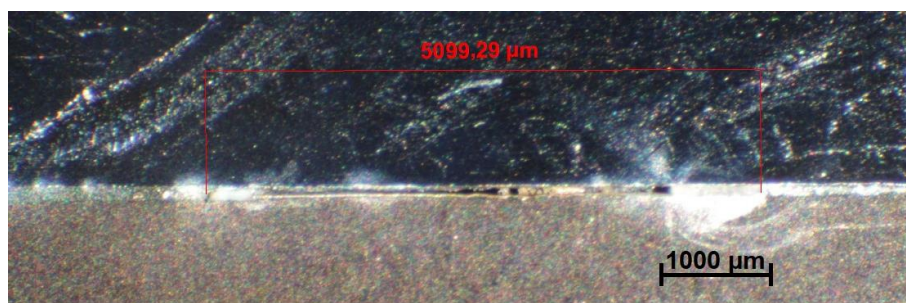
### 5.4.1 Kvalita pájeného spoje

Bylo provedeno makroskopické porovnání jednotlivých pájených spojů dle výskytu bublin, trhlin či nespájených oblastí na metalografickém výbrusu. Pro zkoumání byl použit optický mikroskop Neophot 21 od společnosti Zeiss. Optické zvětšení pro zkoumání makrostruktury bylo voleno 12,5x.

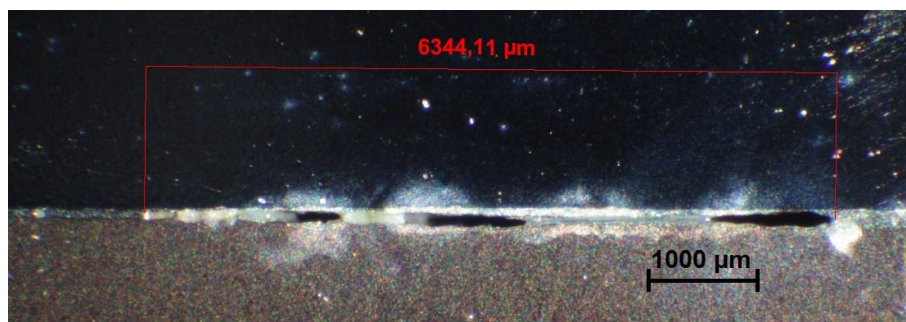
## Vzorek 1



Obrázek 19: Vzorek 1



Obrázek 20: Vzorek 1\_ Výbrus 1



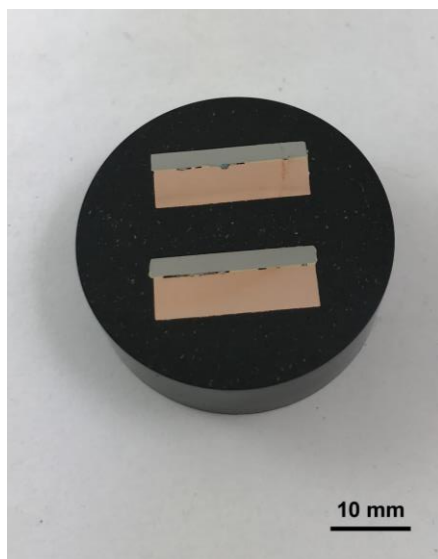
Obrázek 21: Vzorek 1\_ Výbrus 2

Na Obrázek 19 je zřetelné, že v pájeném spoji vznikla špatně spájená místa a bylo by potřebné pájení opakovat.

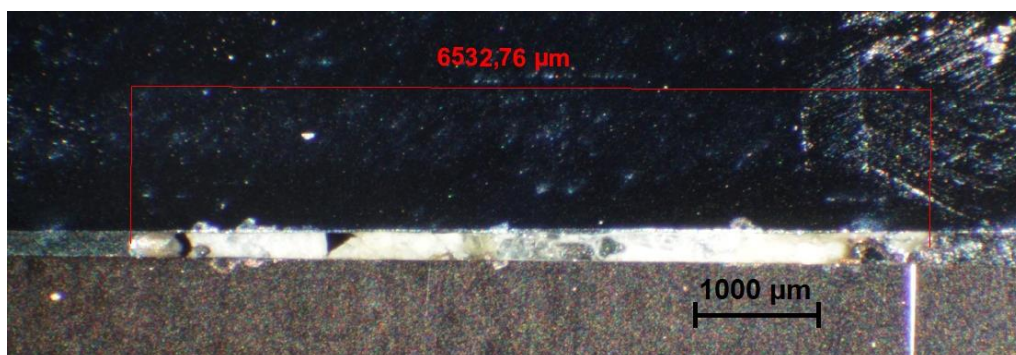
Na Obrázek 20 a Obrázek 21 je změřena délka nepropájených úseků, ta na 1. výbrusu činí (5,099) 5,1 mm a na druhém výbrusu (6,344) 6,3 mm.

Po přepočtu na procenta z celkové délky pájeného spoje, která činí 40 mm (2 x 20 mm) vychází nepropájení o velikosti 29 % celkové délky.

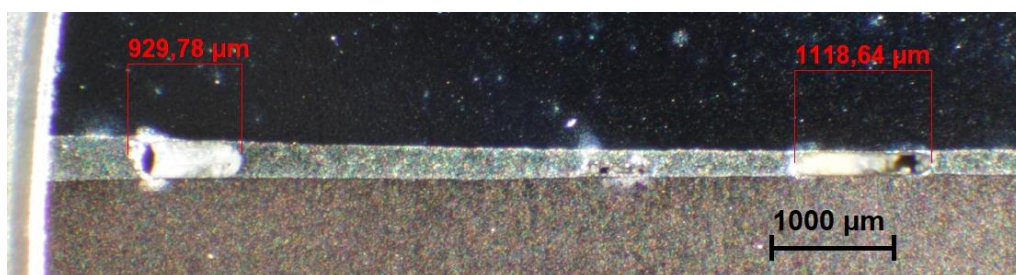
## Vzorek 2



Obrázek 22: Vzorek 2

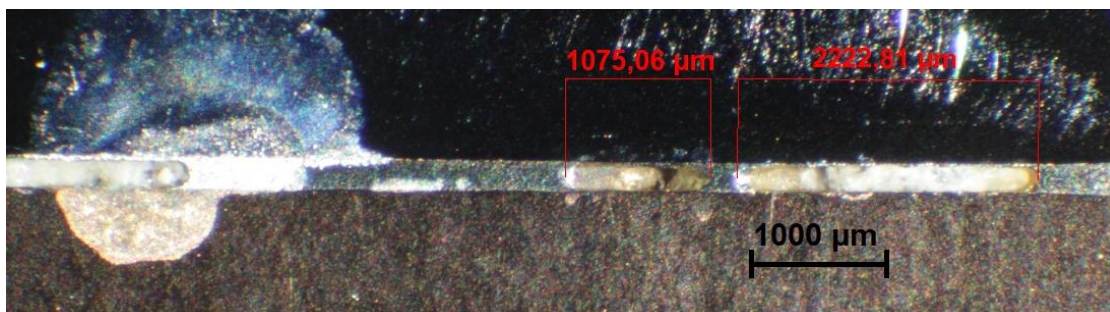


Obrázek 23: Vzorek 2\_Výbrus 1\_1

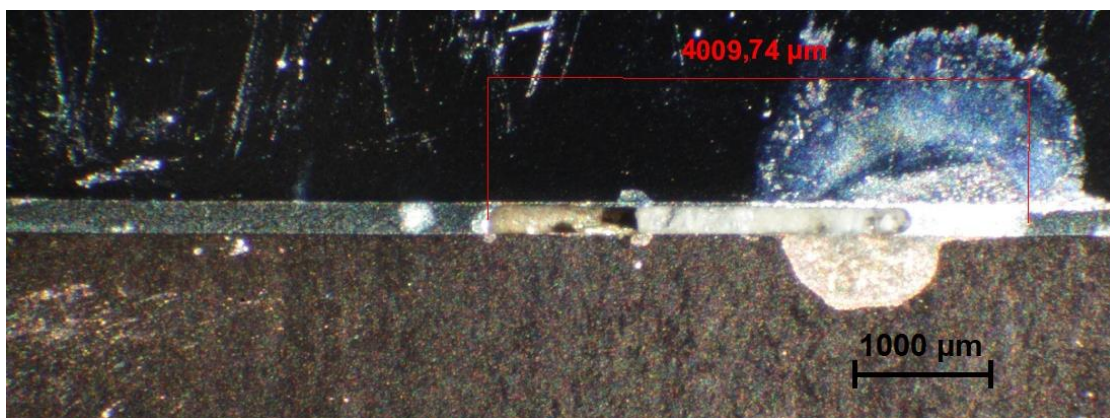


Obrázek 24: Vzorek 2\_Výbrus 1\_2





Obrázek 25: Vzorek 2\_ Výbrus 2\_1



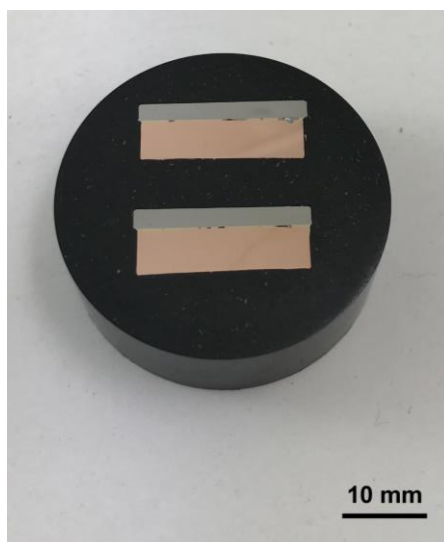
Obrázek 26: Vzorek 2\_ Výbrus 2\_2

Na Obrázek 22 je také zřetelné, že ve spoji vznikla nespájená místa. Na Obrázek 23 a Obrázek 24 je změřena délka nespájeného spoje v 1. výbrusu. Tato délka je  $(6,533 + 0,930 + 1,119 = 8,582)$  8,6 mm.

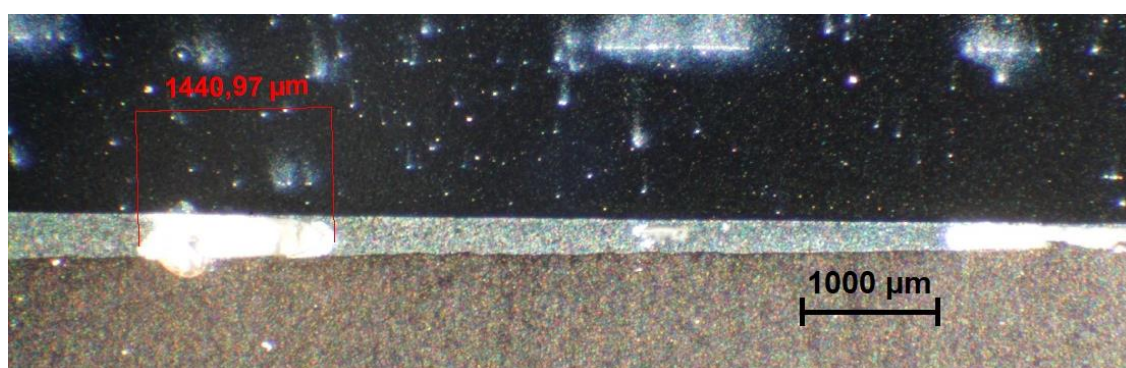
Na Obrázek 25 a Obrázek 26 je změřena délka nespájeného spoje ve 2. Výbrusu. Tato délka je  $(1,075+2223 +4,010 = 7,308)$  7,3 mm.

Po přepočtu na procenta z celkové délky pájeného spoje, která činí 40 mm (2 x 20 mm) vychází nepropájení o velikosti 40 % celkové délky.

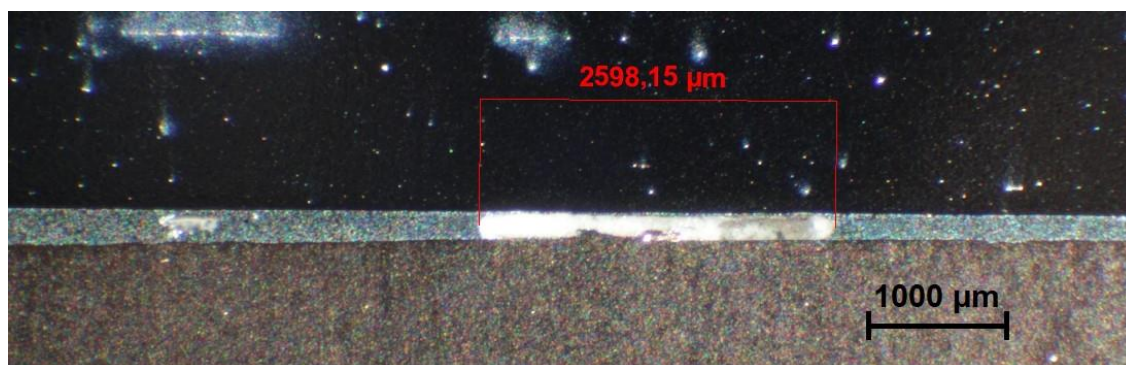
## Vzorek 3



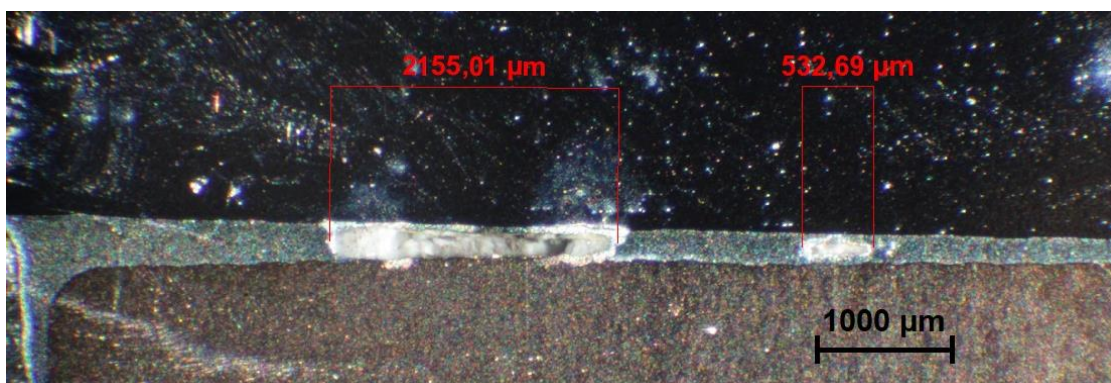
Obrázek 27: Vzorek 3



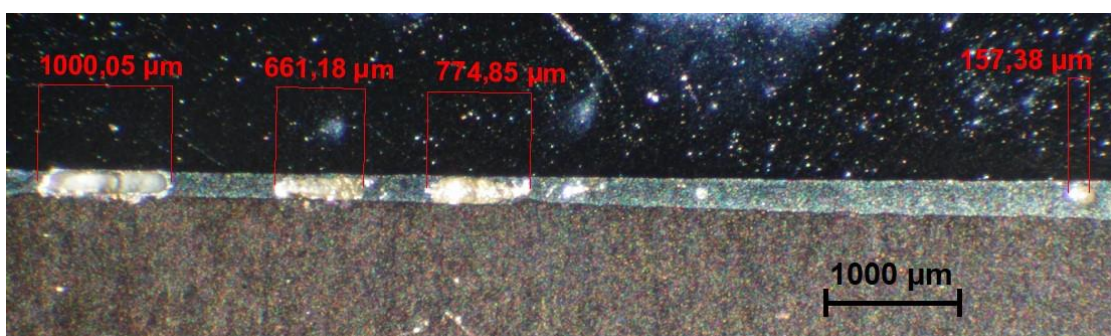
Obrázek 28: Vzorek 3\_Výbrus 1\_1



Obrázek 29: Vzorek 3\_Výbrus 1\_2



Obrázek 30: Vzorek 3\_Výbrus 2\_1



Obrázek 31: Vzorek 3\_Výbrus 2\_2

Na Obrázek 27 je zřetelné, že ve spoji vznikla nespájená místa, nicméně Vzorek 3 má nespájené spoje nejmenší a méně časté.

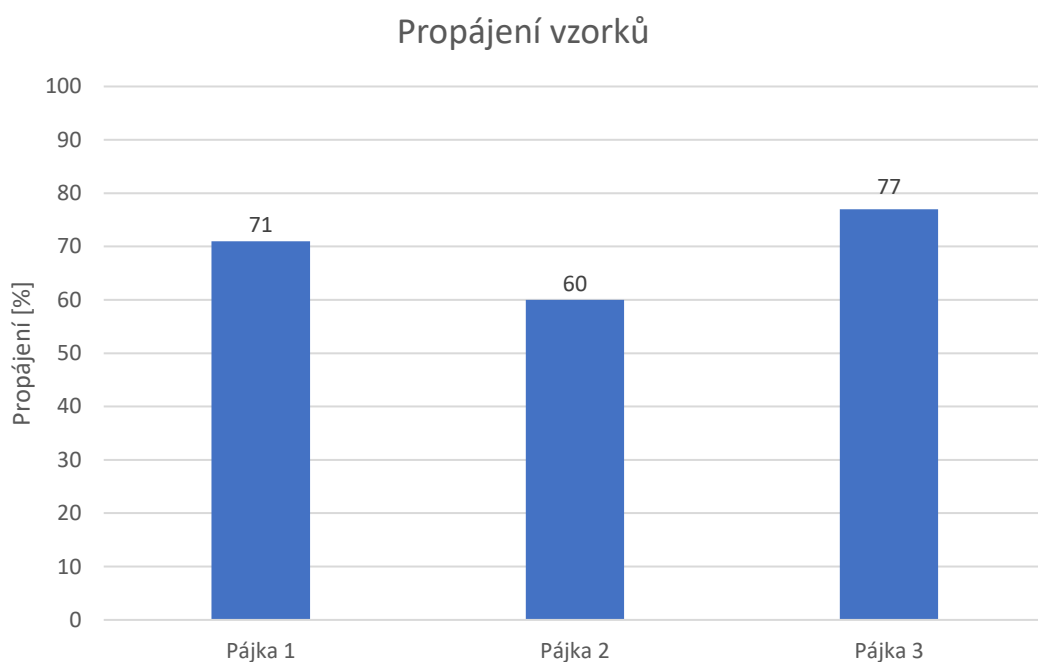
Na Obrázek 28 a Obrázek 29 je změřena délka nespájeného spoje v 1. výbrusu. Tato délka je  $(1,441 + 2,598 = 4,039)$  4 mm.

Na Obrázek 30 a Obrázek 31 je změřena délka nespájeného spoje ve 2. výbrusu. Tato délka je  $(2,155 + 0,533 + 1 + 0,661 + 0,775 + 0,157 = 5,281)$  5,3 mm.

Po přepočtu na procenta z celkové délky pájeného spoje, která činí 40 mm (2 x 20 mm) vychází nepropájení 23 % celkové délky.

## 5.4.2 Srovnání propájení

Nejlepšího propájení dosáhla pájka 3 s nejvyšším obsahem stříbra, a to 77 %. Pájka 1 dosáhla o něco nižšího propájení o hodnotě 71 %. Nejnižší podíl správně propájených ploch byl zjištěn v případě pájky 2 (60 %). Porovnání průměrných hodnot jednotlivých pájek je zobrazeno v Graf 1



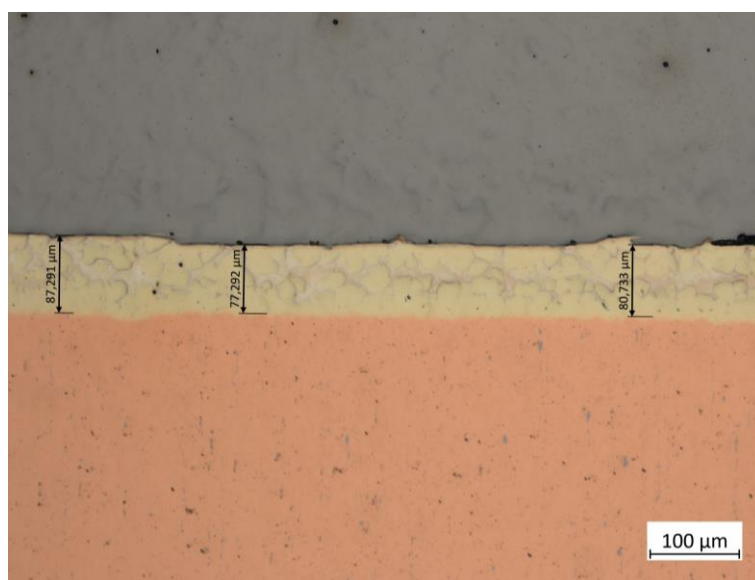
Graf 1: Propájení vzorků

### 5.4.3 Tloušťka pájených spojů

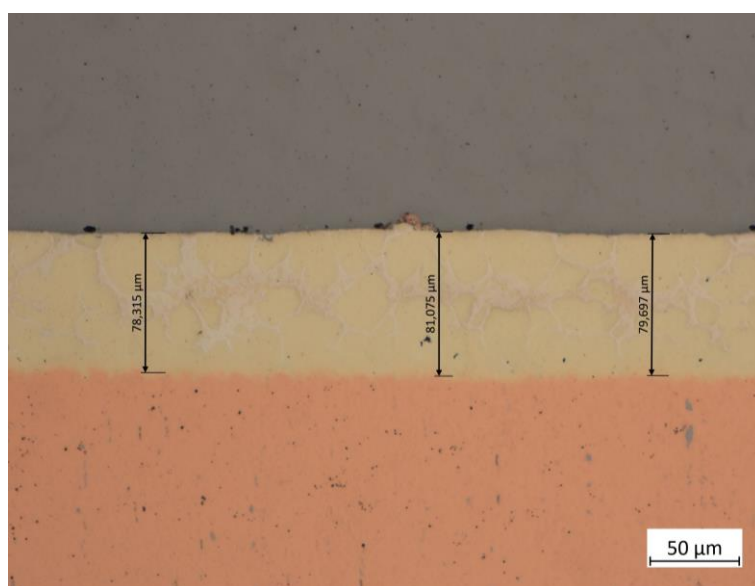
Bylo provedeno porovnání tloušťky jednotlivých pájených spojů v oblastech plného spájení.

#### Vzorek 1

1.Výbrus (100x, 200x)

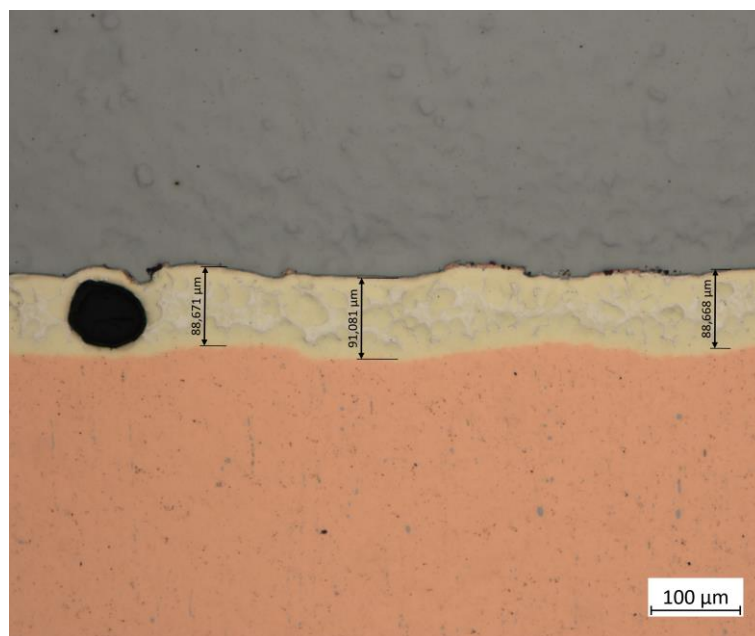


Obrázek 32: Vzorek 1\_Výbrus 1 (tloušťka – 100x)

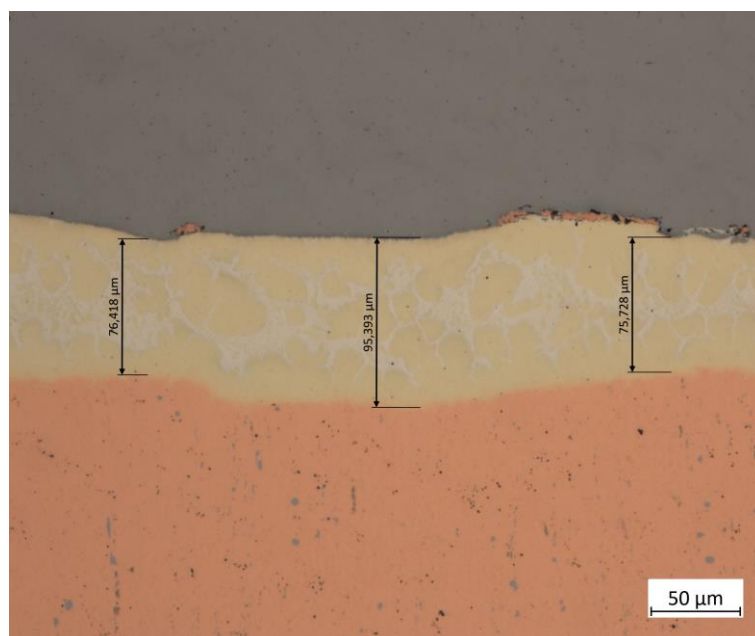


Obrázek 33: Vzorek 1\_Výbrus 1 (tloušťka – 200x)

## 2. Výbrus (100x, 200x)



Obrázek 34: Vzorek 1\_Výbrus 2 (tloušťka – 100x)



Obrázek 35: Vzorek 1\_Výbrus 2 (tloušťka – 200x)

Pro vyhodnocení tloušťky vrstev pájených spojů jsou použity naměřené hodnoty pro zvětšení 100x, oproti měření s 200x zvětšením je zobrazena větší část spoje, tudíž bude hodnota z tohoto měření více vypovídající o celém spoji.

### Zhodnocení - 1. Vzorek

Na výbrusech (Obrázek 32, Obrázek 34) byly naměřeny hodnoty:

*Tabulka 7 - Tloušťka vrstev – Pájka 1*

Měření 1. Výbrus	Tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
1	87.291
2	77.292
3	80.733
<b>Průměr</b>	<b>81.8</b>

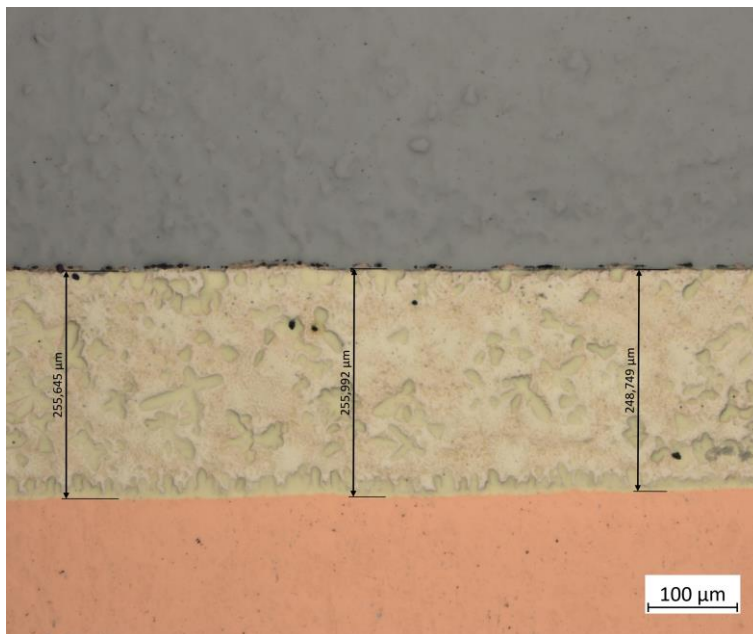
Měření 2. Výbrus	Tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
1	88.671
2	91.081
3	88.668
<b>Průměr</b>	<b>89.5</b>

Průměrná tloušťka vrstvy pájky 1 byla pro první výbrus 81,8  $\mu\text{m}$  a pro druhý výbrus 89,5  $\mu\text{m}$ .

Průměrná hodnota dvou výbrusů pro pájku 1 činí **85,7  $\mu\text{m}$** .

## Vzorek 2

1.Výbrus (100x, 200x)



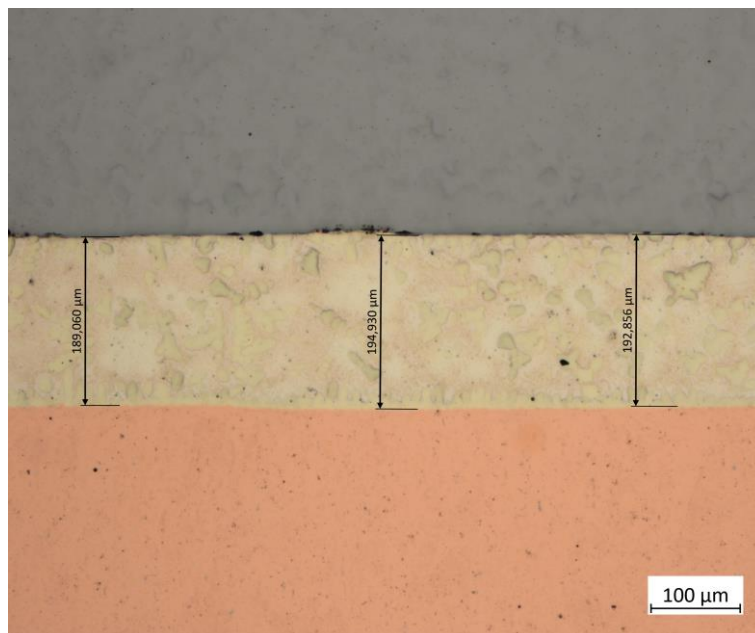
Obrázek 36: Vzorek 2\_ Výbrus 1 (tloušťka – 100x)



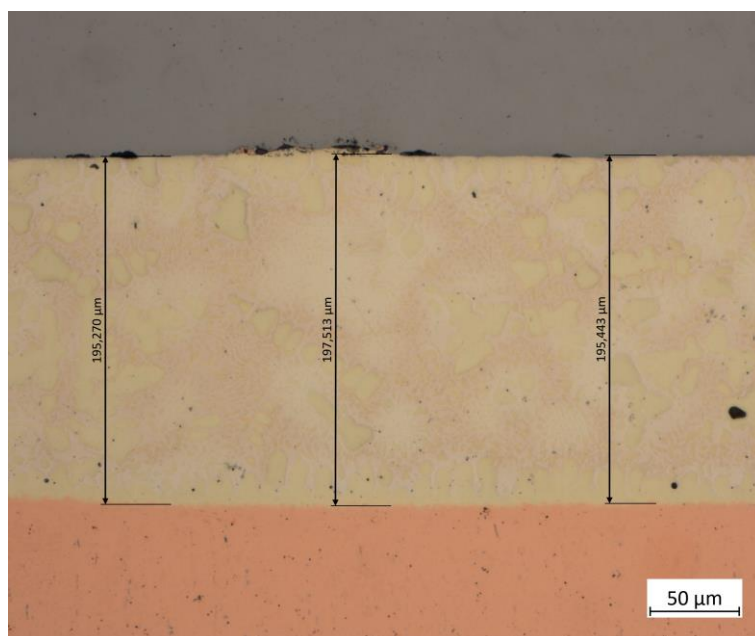
Obrázek 37: Vzorek 2\_ Výbrus 1 (tloušťka – 200x)



## 2.Výbrus (100x, 200x)



Obrázek 39: Vzorek 2\_Výbrus 2 (tloušťka – 100x)



Obrázek 38: Vzorek 2\_Výbrus 2 (tloušťka – 200x)

## Zhodnocení - 2.Vzorek

Na výbrusech (Obrázek 36, Obrázek 39) byly naměřeny hodnoty:

Tabulka 8 - Tloušťka vrstev – Pájka 2

Měření	Tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
1	255.645
2	255.992
3	248.749
Průměr	<b>253.5</b>

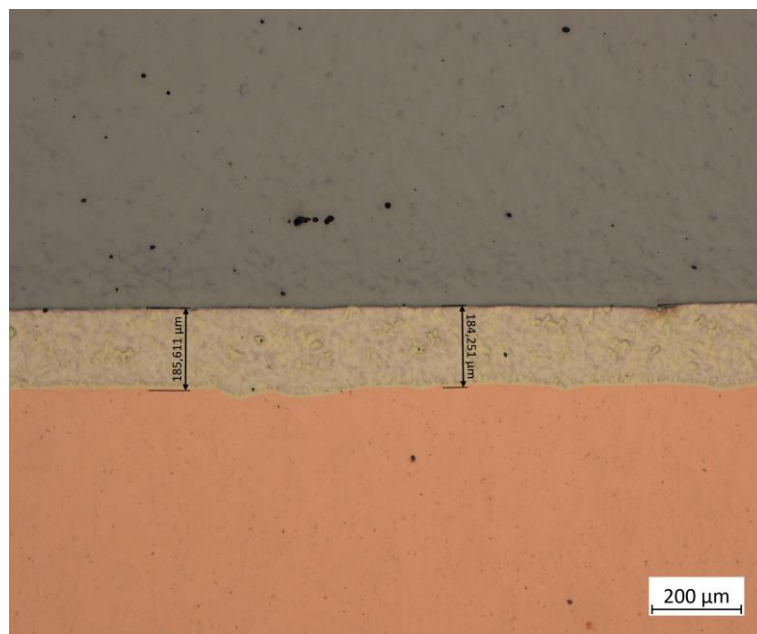
Měření	Tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
1	189.06
2	194.93
3	192.856
Průměr	<b>192.3</b>

Průměrná tloušťka vrstvy pájky 2 byla pro první výbrus 253,5  $\mu\text{m}$  a pro druhý výbrus 192,3  $\mu\text{m}$ .

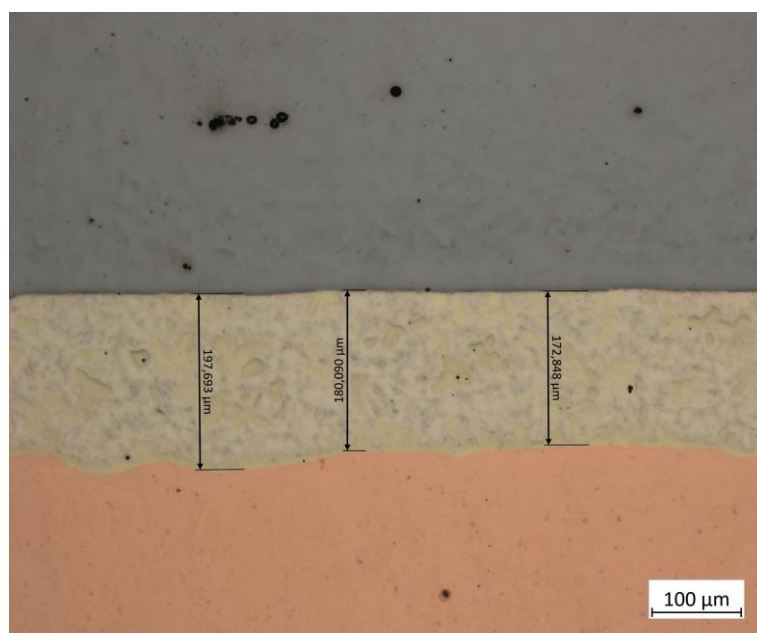
Průměrná hodnota dvou výbrusů pro pájku 2 činí **222,9  $\mu\text{m}$** .

## Vzorek 3

1.Výbrus (50x, 100x)

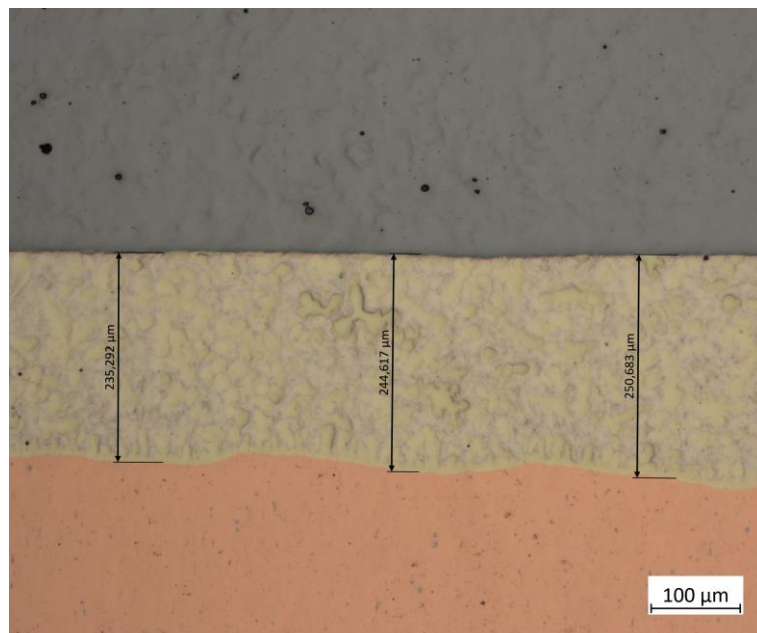


Obrázek 40: Vzorek 3\_Výbrus 1 (tloušťka – 50x)

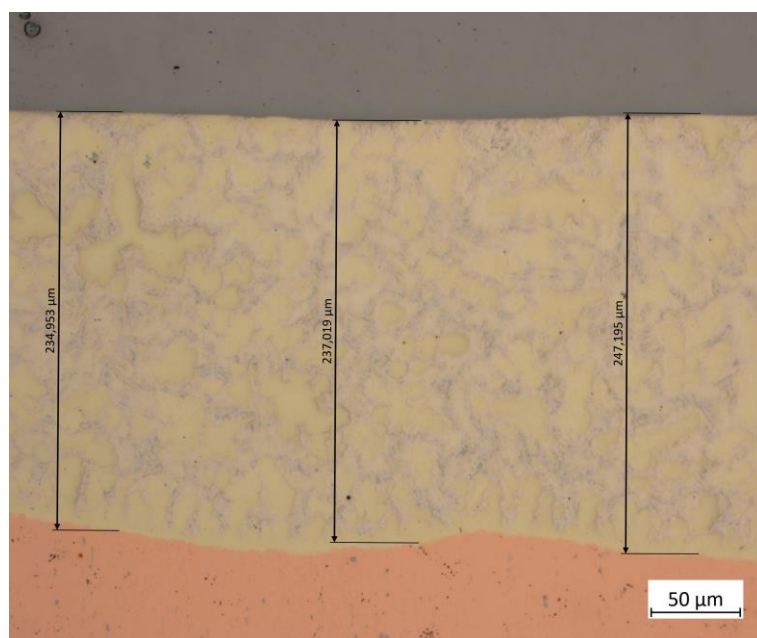


Obrázek 41: Vzorek 3\_Výbrus 1 (tloušťka – 100x)

## 2.Výbrus (100x, 200x)



Obrázek 42: Vzorek 3\_Výbrus 2 (tloušťka – 100x)



Obrázek 43: Vzorek 3\_Výbrus 2 (tloušťka – 200x)

### Zhodnocení - 3.Vzorek

Na výbrusech (Obrázek 41, Obrázek 42) byly naměřeny hodnoty:

Tabulka 9 - Tloušťka vrstev – Pájka 3

Měření	Tloušťka
1	197.693
2	180.09
3	172.848
Průměr	<b>183.5</b>

Měření	Tloušťka
1	235.292
2	244.617
3	250.683
Průměr	<b>243.5</b>

Průměrná tloušťka vrstvy pájky 3 byla pro první výbrus 183,5  $\mu\text{m}$  a pro druhý výbrus 243,5  $\mu\text{m}$ .

Průměrná hodnota dvou výbrusů pro pájku 3 činí **213,5  $\mu\text{m}$** .

#### 5.4.4 Srovnání tloušťky vrstev

Toto měření poskytlo 3 průměrné hodnoty pro jednotlivé použité pájky zobrazeny v Graf 2. Pájka 1 měla průměrnou tloušťku vrstvy nejnižší s hodnotou 85,7  $\mu\text{m}$ . Pájka 2 měla průměrnou hodnotu tloušťky vrstvy nejvyšší, a to 222,9  $\mu\text{m}$ .



Graf 2: Porovnání tloušťky vrstev pájek

## 5.5 Tepelná vodivost

### 5.5.1 Návrh a realizace experimentu

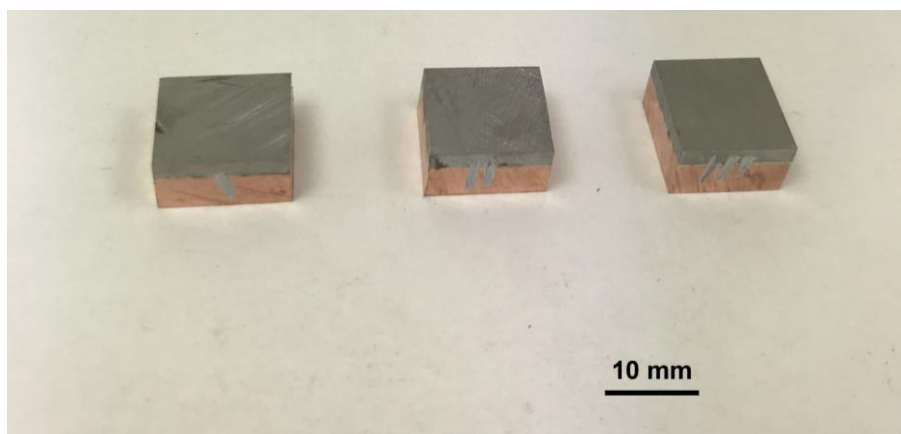
Při návrhu experimentu byla oslovena výzkumná střediska v Praze a Plzni, avšak ani jedno z nich nedokázalo v daném časovém úseku zajistit plnohodnotné měření. Samo měření tepelné vodivosti není nijak definováno normou a praxí ověřené postupy se zabývají pouze vzorky složenými maximálně ze dvou materiálů.

Bylo rozhodnuto změřit tepelnou vodivost v laboratorních podmínkách ÚST FS ČVUT v Praze. Měření budou provedena relativně, tzn. porovnáním jednotlivých pájených spojů.

#### Příprava vzorků

Pro jednotlivé pájené spoje byly vyřezány na již dříve použité kotoučové pile Struers reprezentativní vzorky o rozměrech 14x14 mm. Vzorky byly následně obroušeny na brusce do hladké, lesklé podoby. Při broušení bylo dbáno na zachování rovinnosti vrchní a spodní (kontaktní) plochy. Každý vzorek byl následně zvážen a v případě nutnosti ubroušen tak, aby odpovídal váze 14 g.

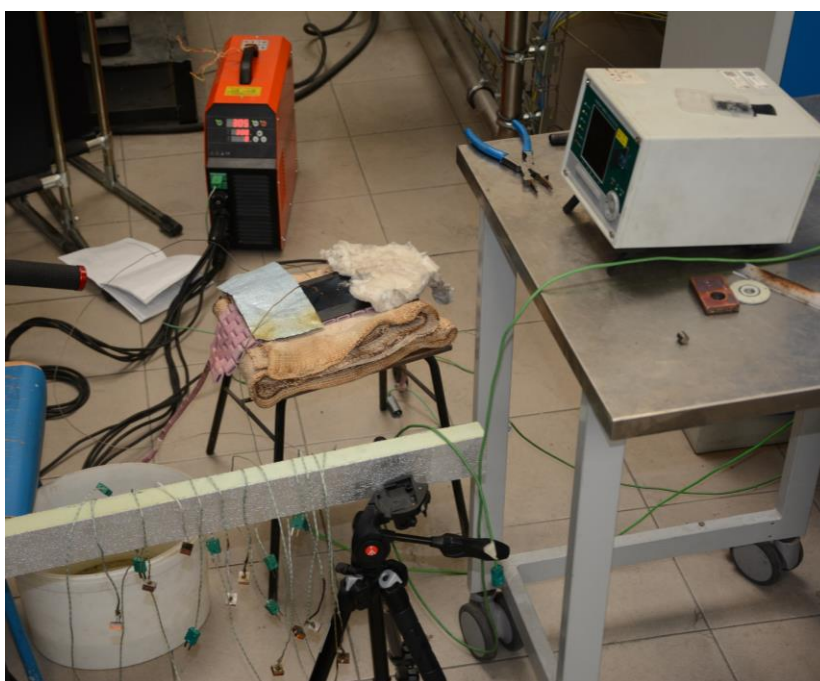
Pro každou pájku byly vytvořeny 4 vzorky (neboli bylo vytvořeno 12 vzorků, které byly následně zkoušeny (Obrázek 44)). Všechny 12 vzorků bylo v laboratořích opatřeno termočláňky typu K na vrchní, ocelové ploše.



Obrázek 44: Vzorky pro zkoušení tepelné vodivosti

### **Příprava pracoviště**

Pro simulaci zdroje tepelného výkonu byl použit odporový ohřev DHC 6510, na jehož dečku byl umístěn předem obroušený ocelový plech o tloušťce 10 mm. Na plech byly umístěny dva termočlánky ve vzdálenosti 25 mm, mezi které byl pokládán zkoušený vzorek, aby byla co nejpřesněji určena teplota zdroje před a v průběhu měření.



*Obrázek 45: Pracoviště zkoušek tepelné vodivosti*

### **Průběh zkoušení**

Po zkompletování příprav a kontrole funkčnosti termočlánků se přistoupilo na samotné měření. Průběh měřených teplot byl zaznamenáván termočlánky typu K připojených k měřící ústředně ALMEMO 5690-2 od společnosti AHLBORN.

Po ustálení požadované teploty zdroje (broušený plech) na teplotě 260 °C byli postupně pokládány vzorky mezi dva termočlánky na zdroji. Teplota byla snímána všemi třemi termočlánky. Termočlánek na vzorku je hlavní a je primárním poskytovatelem informací o vodivosti vzorků, termočlánky na zdroji jsou referenční a slouží k porovnání podmínek jednotlivých měření.

Výstupem měření jsou hodnoty teplot v závislosti na čase, které budou vyneseny do grafu, následně zpracovány a vyhodnoceny.

Počátek měření je umístěn do stejného okamžiku jako bylo položení zkoušeného vzorku na zdroj tepla. Měření bylo přerušeno v okamžiku, kdy měřená teplota hlavního termočlánku překročila 220 °C. Pro následnou práci s daty a vyhodnocení výsledků jsou brány hodnoty teplot od 50 °C do 200 °C pro minimalizaci vlivu vnesení chyby do měření lidským faktorem.



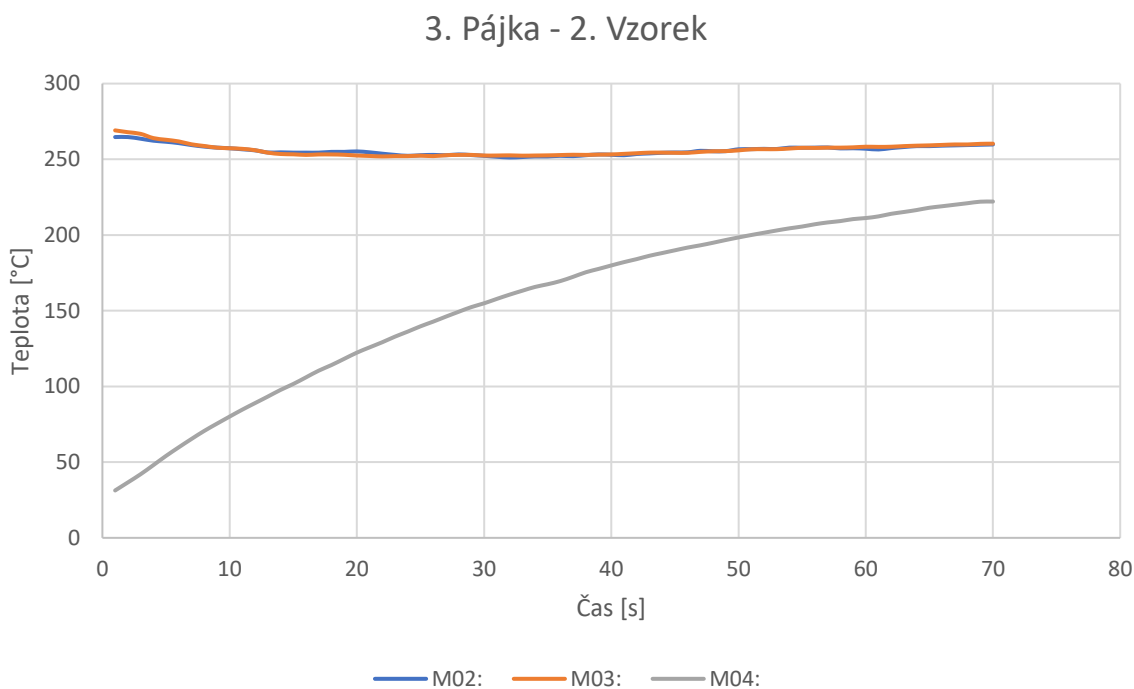
*Obrázek 46: Zkoušení tepelné vodivosti vzorků*



## 5.5.2 Výsledky měření

Výstupem měření jsou data teplot jednotlivých termočlánků v čase. Z dat byly získány časy potřebné k dosažení určité teploty (volena teplota 150 °C a 200 °C) a teplotní průběhy jednotlivých termočlánků.

Teplotní průběhy jsou zobrazeny v grafech, pro každé měření jednotlivého vzorku, na konci práce v Příloze 3. Pro ukázkou je zobrazen graf náběhu teplot pro pájku 3.



Graf 3 - Pájka 3 - Vzorek 2

Termočlánek M04 (v grafem vynesena šedou barvou) je termočlánek hlavní, snímající teplotu na povrchu zkoušeného vzorku. Termočlánky M02 a M03 (v grafem znázorněny modrou a oranžovou barvou) jsou termočlánky referenční snímající teplotu zdroje.

## Zhodnocení měření

V Tabulka 10 (popřípadě Tabulka 11) níže jsou zobrazeny časy, které potřebovaly jednotlivé vzorky pro přechod mezi teplotou 50 a 150 °C (popřípadě 50-200 °C).

Tabulka 10 - Časy náběhu teplot 50-150 °C

	Pájka 1 [s]	Pájka 2 [s]	Pájka 3 [s]
Vzorek 1	55	<b>28</b>	33
Vzorek 2	52	37	<b>25</b>
Vzorek 3	37	34	28
Vzorek 4	<b>35</b>	32	26
<b>Průměr</b>	44.75	32.75	28
<b>Průměr dvou nejnižších časů</b>	<b>36</b>	<b>30</b>	<b>25,5</b>

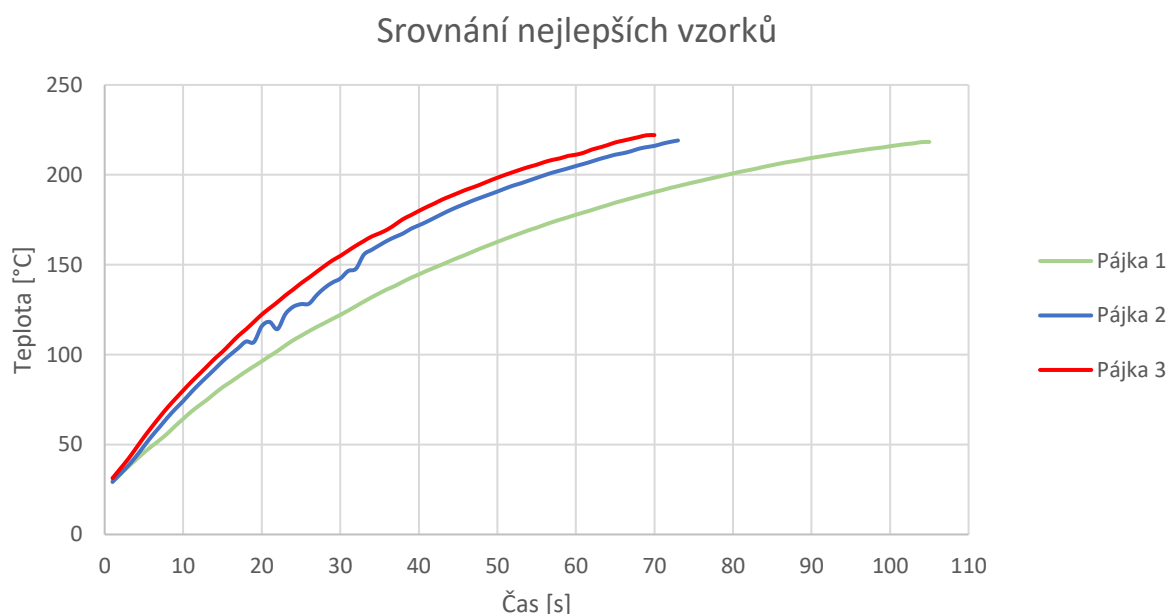
Tabulka 11 - Časy náběhu teplot 50-200 °C

	Pájka 1 [s]	Pájka 2 [s]	Pájka 3 [s]
Vzorek 1	114	<b>52</b>	67
Vzorek 2	138	72	<b>47</b>
Vzorek 3	74	70	57
Vzorek 4	<b>72</b>	74	56
<b>Průměr</b>	99.5	67	56.75
<b>Průměr dvou nejnižších časů</b>	<b>73</b>	<b>61</b>	<b>51,5</b>

Z Tabulka 10 a Tabulka 11 je zřetelné, že průměrná doba náběhu teplot 50-150 °C pro pájku 1 je 36 sekund, pro pájku 2 je to 26,6 a pro pájku 3 již jen 23 sekund, podobně pro 50-200 °C. Nicméně po podrobnějším prozkoumání hodnot v Tabulka 10 a Tabulka 11 je vidět, že pro pájku 2 a 3 se odchylky jednotlivých měření od jejich středního aritmetického průměru liší maximálně o 5 sekund. Naopak pro pájku 1 se měřené hodnoty od středního aritmetického průměru liší výrazně (až 10,25 sekund pro 50-150 °C). Z toho vychází předpoklad, že porovnání aritmetických průměrů není ideální.

Pro lepší výsledky byl spočítán střední aritmetický průměr dvou nejnižších časů měření, může být považován jako více vypovídající. Nejlépe vychází, jak pro měření náběhu teplot 50-150 °C, tak i pro 50-200 °C, pájka 3.

Po porovnání konkrétních nejnižších časů potřebných k danému náběhu teplot (v tabulkách označeny tučně) každé pájky vychází nejnižší čas potřebný pro dosažení, jak 150 °C tak i 200 °C, pro pájku 3. Na druhou stranu nejvyšší čas potřebovala pájka 1. Vizualizována v Graf 4. Kde je patrné, že nejstrmější nárůst teplot byl u pájky 3.



Graf 4 - Srovnání nejlepších vzorků

Měření potvrdilo předpoklad, že nejlépe propájené vzorky budou mít také nejlepší teplovodné vlastnosti. Z měření vychází, že propájení je přímo úměrné obsahu stříbra v použitých pájkách, Podobně je tomu u tepelné vodivosti, která se zlepšovala s rostoucím obsahem stříbra.

Z výsledků všech měření je zřetelné, že nejlepšího propájení a nejlepší tepelné vodivosti i přes nejvyšší tloušťku vrstvy dosáhla pájka 3, která bude použita pro výrobu součásti do experimentálního oběhu chladící smyčky hypervapotronu.

## 6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvoření reprezentativních vzorků spojů měď-ocel pro chladící segment smyčky hypervapotronu, jejich následné zkoušení na tepelnou vodivost a navržení dalších kroků v tomto výzkumu. Prvotní myšlenkou bylo vytvoření metalurgického spojení dvou heterogenních materiálů za pomoci PTA navařování. V ideálním případě bylo cílem dosažení takové struktury vytvořených vzorků, která by se blížila principu FGM (Functionally Graded Material). To by znamenalo vytvořit vzorek s postupným přechodem materiálových vlastností.

Pro úspěšné splnění cíle byla provedena rešerše na témata plazmového navařování (PTA) a k této technologii pojící se stroje, přípravky, postupy a používané materiály. Byla zde nastíněna i problematika funkčně gradovaných materiálů (FGM), jejich využití a výroby.

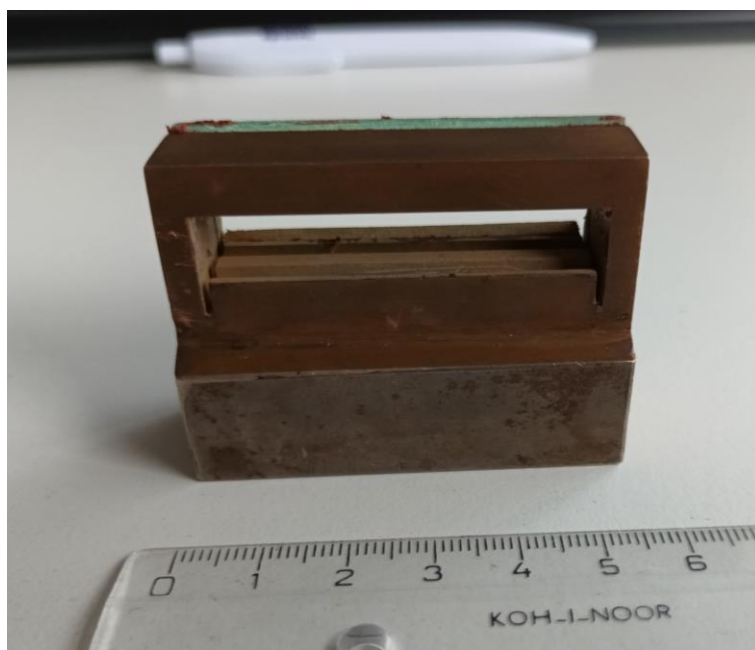
V experimentální jsou popsány konkrétní použité stroje, postupy a použité materiály. První výsledek cestou PTA navařování nebyl uspokojivý. V daném časovém rozmezí se nepodařilo vyladit a navrhnout podmínky navařovacího procesu, který by úspěšně splnil původní cíle práce. Proto bylo od metody PTA navařování upuštěno a výroba vzorku byla realizována metodou pájení.

Pro pájení byla provedena rešerše na danou problematiku podobně jako u PTA navařování. V experimentální části byly popsány použité pájky, vytvořené vzorky a popsané postupy dílčích zkoušek.

U vzorků byla nejprve provedena kontrola propájení. Při kontrole bylo objeveno množství chyb. Pro dané vzorky bylo vyhodnoceno procentuální množství špatně spájených oblastí vždy ve dvou řezech. Pro srovnání vychází nejlépe vzorky pro pájku 3 s procentuálním nepropájením o hodnotě 23 %. Vzorky pro pájku 1 ukázaly hodnotu 29 % a vzorky pro pájku 2 hodnoty 40 %. Zde je možné pozorovat, že míra propájení roste spolu s obsahem stříbra v jednotlivých pájkách.

Dále byla měřena tloušťka jednotlivých pájených vrstev. Průměrné tloušťky vrstev pro pájku 1 byly 85,7 $\mu\text{m}$ , pro pájku 2 byly 222,9  $\mu\text{m}$  a pro pájku 3 byly 213,5  $\mu\text{m}$ .

Finální zkouškou práce bylo zkoušení připravených reprezentativních pájených spojů na tepelnou vodivost. Proces zkoušení byl popsán v experimentální části. Z výsledků lze konstatovat, že nejlepší pájený spoj s ohledem na tepelnou vodivost byl vytvořen pomocí pájky 3. Spoj vykazoval nejnižší procento nedokonalostí v pájeném spoji a následně i v měření tepelné vodivosti vycházel spoj nejlépe (lze pouze polemizovat o tom, na kolik byly zkoušky tepelné vodivosti ovlivněny právě množstvím chyb v pájeném spoji). Právě pájka 3 byla použita pro vytvoření funkční součásti do experimentálního oběhu chladící smyčky hypervapotronu.



Obrázek 47: Součást připravena k pájení

Finálním výstupem práce jsou poznatky a zkušenosti v oblasti heterogenních spojů (metody PTA a pájení). Bylo potvrzeno, že tepelná vodivost roste společně s obsahem stříbra v pájce. Výstup byl aplikován při vytvoření funkční součásti, která je již využívána ve výzkumu chladícího segmentu smyčky hypervapotronu. Součást před pájením je zobrazena na Obrázek 47.

## Použitá literatura

- [1] ROHAN, Ph.D., Ph.D., KOLAŘÍK, Ph.D., KRAMÁR a Ing. KRŠKA. Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. *Průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochrannepovlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu>
- [2] Laserové navařování. In: *Laser Therm s.r.o.* [online]. 2019 [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-navarovani-kovu>
- [3] HLAVATÝ, Ivo. *Plazmové svařování (navarování) - 15* [online]. 2009, 1-10 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <http://staryweb.ivohlavaty.cz/2009Svarovani/2-01-15.pdf>
- [4] STULHOFER, Jan. *Navařování abrazivzdorných povlaků metodou pulzního PTA*. Praha, 2022. Diplomová. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Pavel Rohan, Ph. D.
- [5] KREJČÍ, Vojtěch. *NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE NAVAŘOVÁNÍ KOVŮ*. Brno, 2013. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ladislav Čelko, Ph.D.
- [6] KUMAR, Er. Amrit. Plasma Arc Welding. *The Mechanical engineering* [online]. 2020, 2020 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://themechanicalengineering.com/plasma-arc-welding/>
- [7] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. Vyd. 1. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80-904582-2-2.
- [8] KSK Česká Třebová. In: *KSK* [online]. Česká Třebová, 1991 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://kskct.cz/cs/>
- [9] GEDDA, Hans. *Laser Cladding: An Experimental and Theoretical Investigation*. Lulea, 2004. Doktorská. Lulea University of Technology.

- [10] *A&A Coatings* [online]. USA: A&A Coatings, 2021 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.thermalspray.com/understanding-the-difference-between-cladding-and-hardfacing-processes/>
- [11] SCHNEIDER, Marcel. Laser cladding with power: effect of some machining parameters on clad properties. *Utwente* [online]. 1998, 77-85 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/6075114/t0000007.pdf>
- [12] *LIA TODAY*. 2019, .
- [13] TSENG, Wen a Jong-Ning AOH. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source. *Optics & Laser Technology* [online]. 2013, (48), 147-148 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2012.09.014
- [14] *Cladding with Plasma Arc Welding* [online]. Ohio: EWI, 2012 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://ewi.org/cladding-with-plasma-arc-welding-paw/>
- [15] Galvanic Reaction: Incompatible Metals Responsible For Corrosion. *Monarch metal Inc.* [online]. 2020 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.monarchmetal.com/blog/galvanic-corrosion-common-questions-answered/>
- [16] *Koroze kovů* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected>
- [17] Copper to Stainless Steel Welding. In: *EBIndustries* [online]. New York, 2023 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://ebindustries.com/copper-to-stainless-steel-welding/>
- [18] *Technologie 1*. České vysoké učení technické v Praze: ČVUT, 2006.

- [19] MACH, Ladislav. *VLIV MNOŽSTVÍ PÁJKY A IZOTERMÁLNÍHO STÁRNUTÍ NA VODIVOST PÁJENÉHO SPOJE*. Brno, 2012. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph. D.
- [20] An Overview of Functionally Graded Materials «FGM». *Proceedings of the Third International Symposium on Materials and Sustainable Development* [online]. 2018 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-89707-3\_30
- [21] Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. *Applied materialstoday* [online]. 2016, (5), 223-245 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001
- [22] VALMIK, Bhavar. A Review on Functionally Gradient Materials (FGMs) and Their Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, (229), 1-10 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: doi:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818118806
- [23] Additive manufacturing of functionally graded materials: A review. *Materials Science and Engineering* [online]. Elsevir, 2019, (764) [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209
- [24] Research and Application of Functionally Gradient Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 022065(394), 1-7 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/394/2/022065/pdf
- [25] ROHAN, P., F. LUKÁČ a M. KOLAŘÍKOVÁ. Pulsed Plasma Surfacing of Titanium Matrix Cermet Based on B4C. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2022, (31), 1975-1985 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s11666-022-01421-0
- [26] Laboratorní Pec LAC LE15/11. In: *Helago* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://www.helago-cz.cz/eshop-le1511-137475.html



- [27] Laboratorní pece LE 15/11, regulátor HT 60B. In: *Unimed* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.unimed.cz/laboratorni-pece-le-15-11-regulator-ht-60b>
- [28] *Eshop.chemweld* [online]. 2023 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://eshop.chemweld.cz/pajka-pro-pajeni-hlinik--med--mosaz--ocel-chem-weld-922/>
- [29] GLEITZ, Miroslav a kol. *DESIGN OF EXPERIMENTAL DEVICE FOR TESTING OF SUBCOOLED FLOW BOILLING* [online]. 2020, (26) [cit. 2023-06-29].
- [30] *Construction equipment* [online]. 2017 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.constructionequipment.com/equipment-attachments/wheel-loader-buckets/article/10754181/how-to-make-hard-facing-decisions>
- [31] *TRUMPF* [online]. 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/reseni/aplikace/aditivni-vyroba/laserove-praskove-navarovani-laser-metal-deposition/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/aplikace/aditivni-vyroba/laserove-praskove-navarovani-laser-metal-deposition/)
- [32] *Servis Armatur: Plazmové Navařování* [online]. 2020 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=plasma-powder-surfacing>

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Ionizační energie plynů [1] .....	20
Tabulka 3 - Muflová pec – parametry [26] [27] .....	39
Tabulka 4 - Chemické složení Fe prášku .....	40
Tabulka 5 - Chemické složení Cu prášku .....	41
Tabulka 6 - Složení pasty - Lepidlo .....	41
Tabulka 7 - Složení pasty - Pryskyřice .....	41
Tabulka 8 - Tloušťka vrstev – Pájka 1 .....	56
Tabulka 9 - Tloušťka vrstev – Pájka 2 .....	59
Tabulka 10 - Tloušťka vrstev – Pájka 3 .....	62
Tabulka 11 - Časy náběhu teplot 50-150 °C .....	67
Tabulka 12 - Časy náběhu teplot 50-200 °C .....	67

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Ukázka opravy ozubeného kola navařováním [2].....	14
Obrázek 2: Ukázka robotizovaného procesu navařování [2] .....	16
Obrázek 3: Ukázka laserového práškového navařování [31] .....	17
Obrázek 4: Povrch armatury s navařeným povrchem metodou PTA [32] .....	19
Obrázek 5: Schéma hořáku pro PTA navařování [3] .....	21
Obrázek 6: Jednoučelový navařovací automat uzpůsobený pro navařování armatur [8] .....	23
Obrázek 7: Hardfacing – ukázka ošetřeného rypadla [30].....	24
Obrázek 8: Ukázky vrstvy po navařování metodou cladding [14].....	25
Obrázek 9: Ukázka pájených spojů trubek [28].....	27
Obrázek 10: Ukázka možných funkčně gradovaných materiálů [23] .....	33
Obrázek 11: Ukázka tepelného průběhu a tvaru segmentu smyčky hypervapotronového chlazení [29].....	37
Obrázek 12 - Plazmový navařovací automat PPC 250 R6 [8].....	39
Obrázek 13: Vzorek s nanesenou Fe pasto.....	42
Obrázek 14: Vzorky připravené k vypálení .....	42
Obrázek 15: Navařovaný vzorek .....	43
Obrázek 16: Cu vzorek po navařování.....	44
Obrázek 17: Vzorky po pájení.....	46
Obrázek 18: Vzorky připravené ke zkoušení (zleva: 1, 2, 3).....	47
Obrázek 19: Vzorek 1 .....	48
Obrázek 20: Vzorek 1 _ Výbrus 1 .....	48
Obrázek 21: Vzorek 1 _ Výbrus 2 .....	48
Obrázek 22: Vzorek 2.....	49
Obrázek 23: Vzorek 2 _ Výbrus 1 _ 1 .....	49
Obrázek 24: Vzorek 2 _ Výbrus 1 _ 2 .....	49
Obrázek 25: Vzorek 2 _ Výbrus 2 _ 1 .....	50
Obrázek 26: Vzorek 2 _ Výbrus 2 _ 2 .....	50

Obrázek 27: Vzorek 3.....	51
Obrázek 28: Vzorek 3_Výbrus 1_1.....	51
Obrázek 29: Vzorek 3_Výbrus 1_2.....	51
Obrázek 30: Vzorek 3_Výbrus 2_1.....	52
Obrázek 31: Vzorek 3_Výbrus 2_2.....	52
Obrázek 32: Vzorek 1_Výbrus 1 (tloušťka – 100x).....	54
Obrázek 33: Vzorek 1_Výbrus 1 (tloušťka – 200x).....	54
Obrázek 34: Vzorek 1_Výbrus 2 (tloušťka – 100x).....	55
Obrázek 35: Vzorek 1_Výbrus 2 (tloušťka – 200x).....	55
Obrázek 36: Vzorek 2_Výbrus 1 (tloušťka – 100x).....	57
Obrázek 37: Vzorek 2_Výbrus 1 (tloušťka – 200x).....	57
Obrázek 38: Vzorek 2_Výbrus 2 (tloušťka – 200x).....	58
Obrázek 39: Vzorek 2_Výbrus 2 (tloušťka – 100x).....	58
Obrázek 40: Vzorek 3_Výbrus 1 (tloušťka – 50x).....	60
Obrázek 41: Vzorek 3_Výbrus 1 (tloušťka – 100x).....	60
Obrázek 42: Vzorek 3_Výbrus 2 (tloušťka – 100x).....	61
Obrázek 43: Vzorek 3_Výbrus 2 (tloušťka – 200x).....	61
Obrázek 44: Vzorky pro zkoušení tepelné vodivosti.....	63
Obrázek 45: Pracoviště zkoušek tepelné vodivosti.....	64
Obrázek 46: Zkoušení tepelné vodivosti vzorků.....	65
Obrázek 47: Součást připravena k pájení.....	70

# Přílohy

## Příloha 1 – Materiálový list chemického složení Cu prášku



SAFINA, a.s., Vídeňská 104, 252 50 Vestec, Česká republika  
tel.: +420 241024 111, fax: +420 241 024 292  
e-mail: info@safina.cz, www.safina.cz

Inspekční certifikát, 3.1  
ČSN EN ISO 10204:2005

### Adresa objednatele

České vysoké učení v Praze

Fakulta strojní  
Technická 4  
Praha 6  
160 00  
Česká republika

### Informace o výrobku a dodávce

VYN.PR1600.0880.0007	prášek CuCr1Zr at. (-150+50 um)		
Šarže:	22ATO00286	Specifikace materiálu:	
Kupní smlouva:	PRO2301395	Materiál kód zákazníka:	
Dodané množství:	10 000 g	Číslo zakázky zákazníka:	
Datum odeslání:		Č. objednávky zákazníka:	
Datum výroby:	01.02.2023	Objednané množství:	10 000,00
Datum expirace:	01.08.2023	Číslo certifikátu:	638/2023

### Výsledky testu podle specifikace

Parametr	Limity	Hodnota	Jednotka	Metoda
Cu	98,45 - 99,27	99	% hm.	Dopočet
Cr	0,7 - 1,2	0,9	% hm.	ED-XRF
Zr	0,03 - 0,3	0,0593	% hm.	ICP-OES
d10		63,3	µm	ISO 13322-2 (camsizer-X2)
d50		90,5	µm	ISO 13322-2 (camsizer-X2)
d90		140,9	µm	ISO 13322-2 (camsizer-X2)
Uppercut +50µm		0,1	%	ISO 2591-1
Apparent density		4,5	g/cm3	ISO 3923-1
TOTAL	0 - 500	110,5	ppm	Výpočet
Ag	0 - 50	22	ppm	ICP-OES
Al	0 - 20	<5	ppm	ICP-OES
Be	0 - 20	<1	ppm	ICP-OES
Bi	0 - 20	<20	ppm	ICP-OES
Cd	0 - 20	<1	ppm	ICP-OES
Fe	0 - 20	<5	ppm	ICP-OES
Ni	0 - 20	<5	ppm	ICP-OES
P	0 - 20	<20	ppm	ICP-OES
Pb	0 - 20	<20	ppm	ICP-OES
S	0 - 20	<10	ppm	ICP-OES
Sb	0 - 20	<20	ppm	ICP-OES
Se	0 - 20	<20	ppm	ICP-OES
Si	0 - 150	<20	ppm	ICP-OES
Sn	0 - 20	<5	ppm	ICP-OES

## Příloha 2 – Materiálový list chemického složení Fe prášku

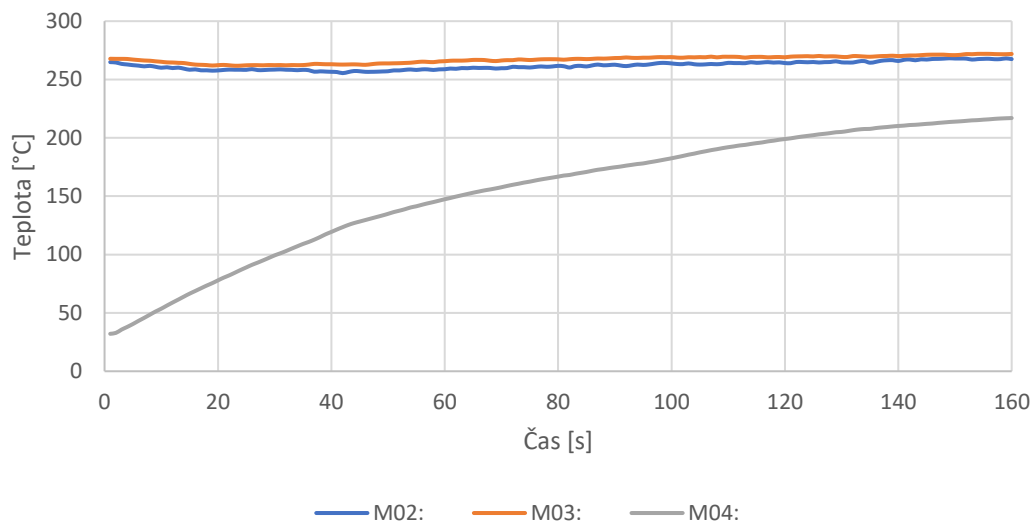
8/22/2019 2:09:15 PM  
 PANalytical  
 Quantification of sample BROZEK H v bedničce u Bichnera

R.M.S.: 0.001  
 Result status:  
 Sum before normalization: 80.4 %  
 Normalised to: 100.0 %  
 Sample type: Pressed powder  
 Correction applied for medium: No  
 Correction applied for film: Yes  
 Results database: omnian\_2kw30mm  
 Results database in: c:\panalytical\superq\userdata

Compound Absolute	Conc. (%)	Absolute Error (%)	Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)	Compound Name	Conc. (%)
1			Ge			Gd	
2			As			Tb	
3			Se			Dy	
4			Br			Ho	
5			Kr			Er	
6			Rb	0.004	0.002	Tm	
7			Sr			Yb	
8			Y			Lu	
9			Zr			Hf	
10			Nb			Ta	
11			Mo			W	
12			Tc			Re	
13			Ru			Os	
14	0.028	0.005	Rh			Ir	
15	0.018	0.004	Pd			Pt	
16	0.011	0.003	Ag			Au	
17	0.022	0.004	Cd			Hg	
18	0.010	0.003	In			Tl	
19			Sn			Pb	
20			Sb			Bi	
21	0.015	0.004	Te			Po	
22			I			At	
23			Xe			Rn	
24			Cs			Fr	
25	0.051	0.007	Ba			Ra	
26	0.299	0.02	La			Ac	
27	99.280	0.2	Ce			Th	
28	0.168	0.01	Pr			Pa	
29			Nd			U	
30	0.086	0.009	Pm			Np	
31	0.010	0.003	Sm			Pu	
32			Eu			Am	

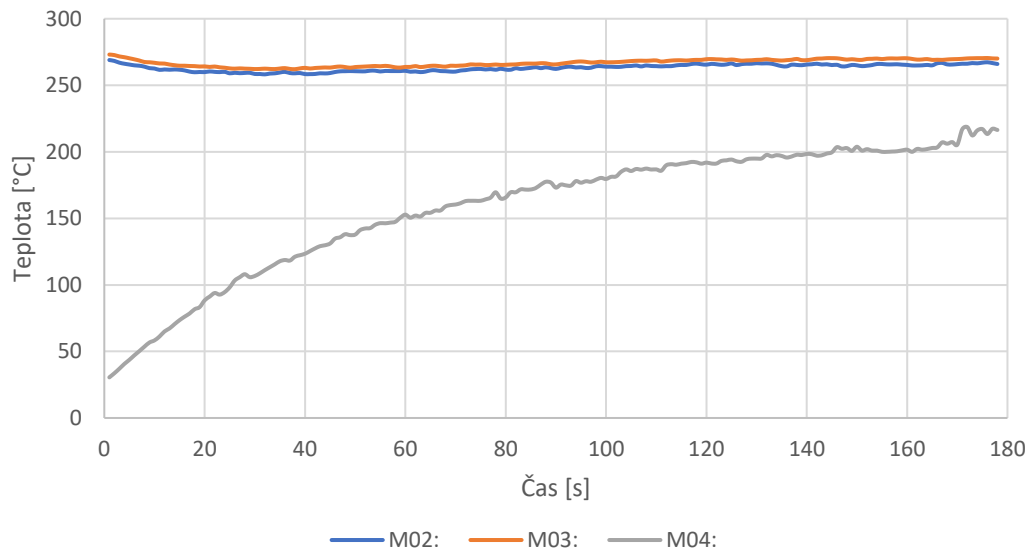
### Příloha 3 - Teplotní průběhy zkoušení

#### 1.Pájka - 1.Vzorek



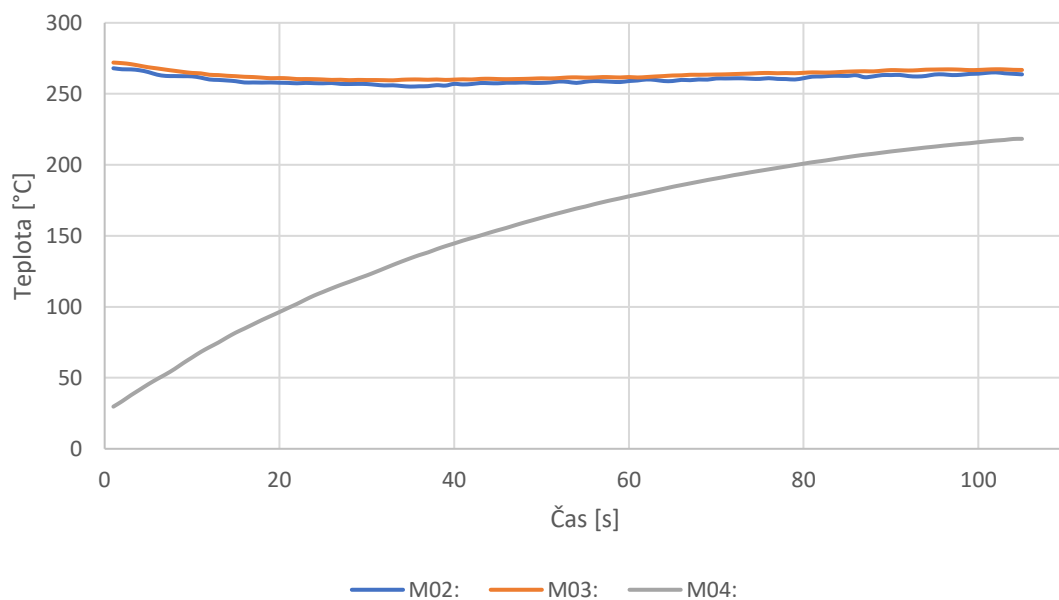
Graf 5 - Pájka 1\_Vzorek 1

#### 1.Pájka - 2.Vzorek



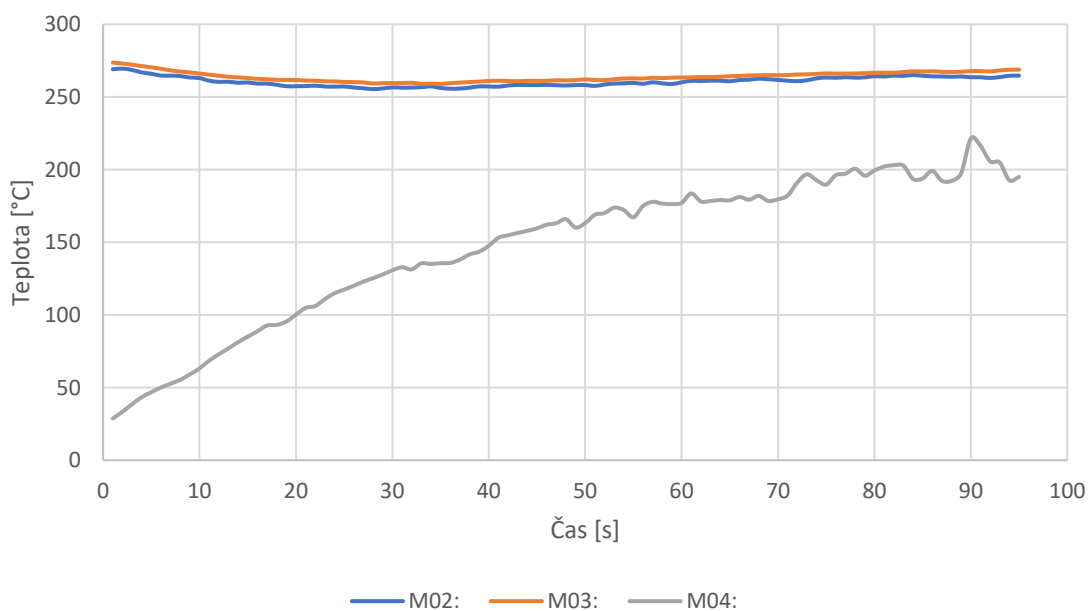
Graf 6 - Pájka 1\_Vzorek 2

### 1.Pájka - 3.Vzorek



Graf 7 - Pájka 1\_Vzorek 3

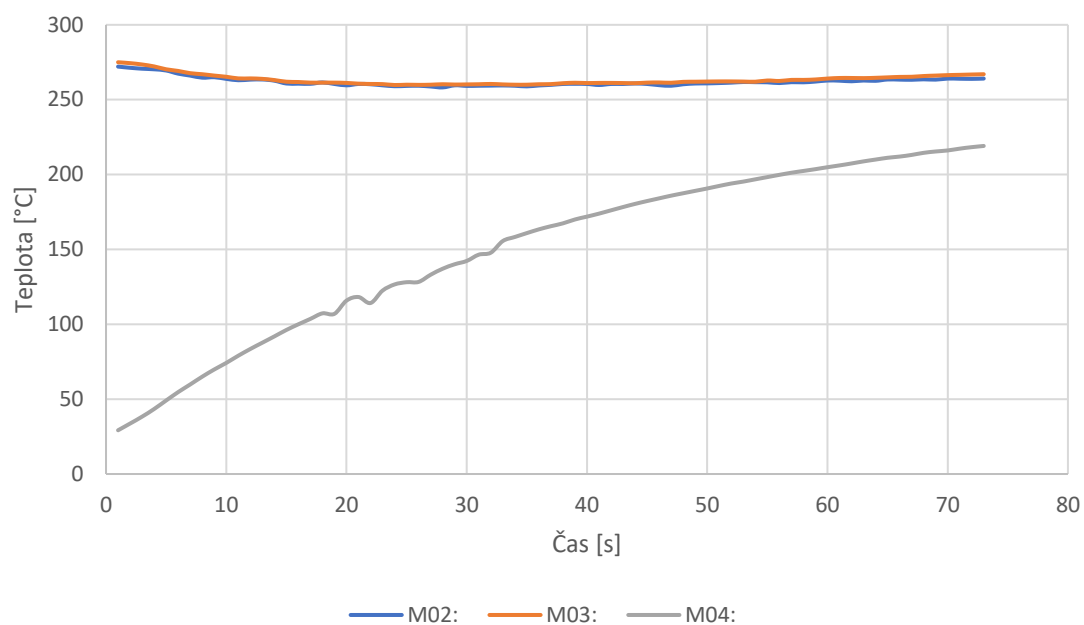
### 1.Pájka - 4.Vzorek



Graf 8 - Pájka 1\_Vzorek 4

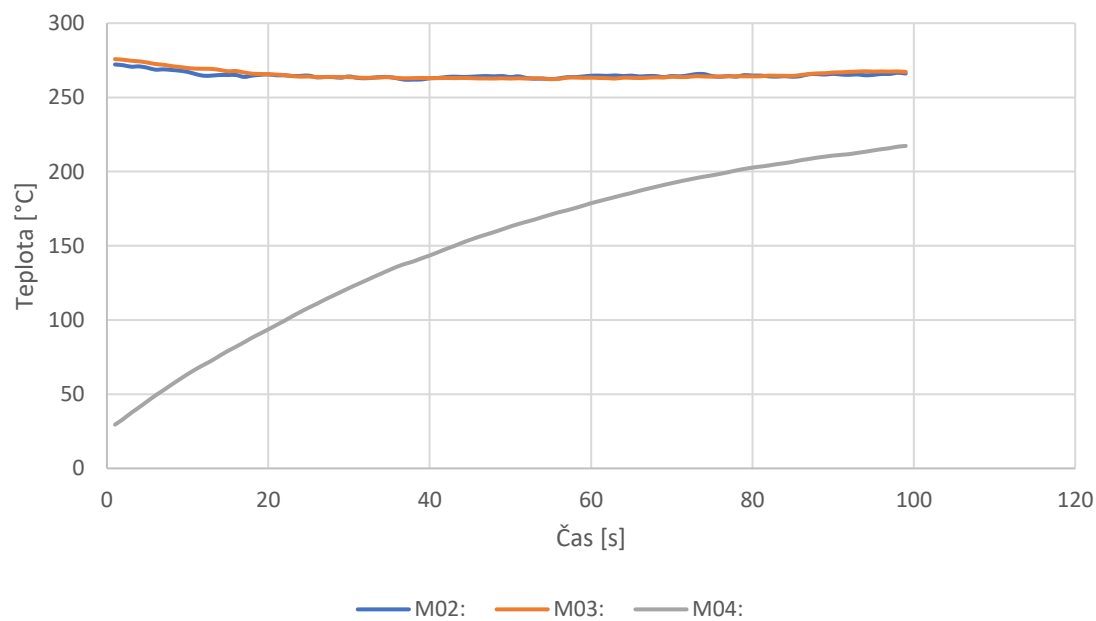


## 2. Pájka - 1. Vzorek



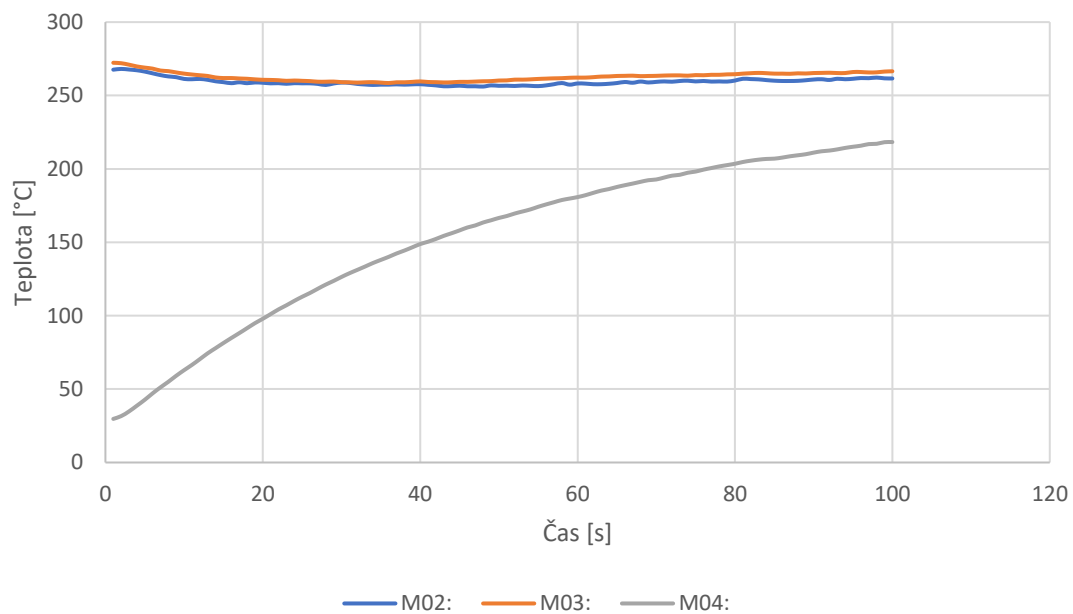
Graf 9 - Pájka 2\_ Vzorek 1

## 2. Pájka - 2. Vzorek



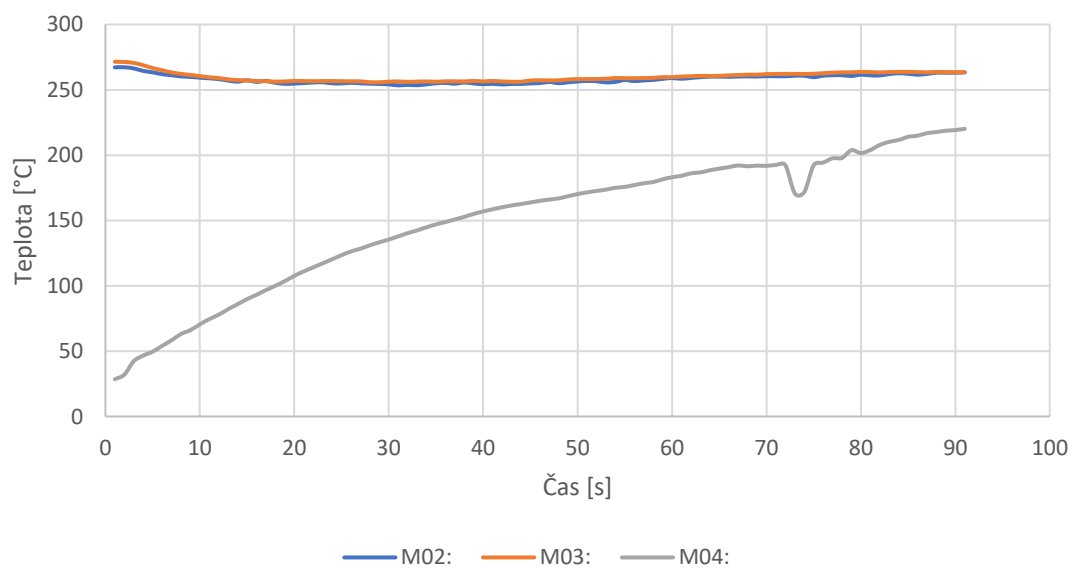
Graf 10 - Pájka 2\_ Vzorek 2

## 2. Pájka - 3. Vzorek



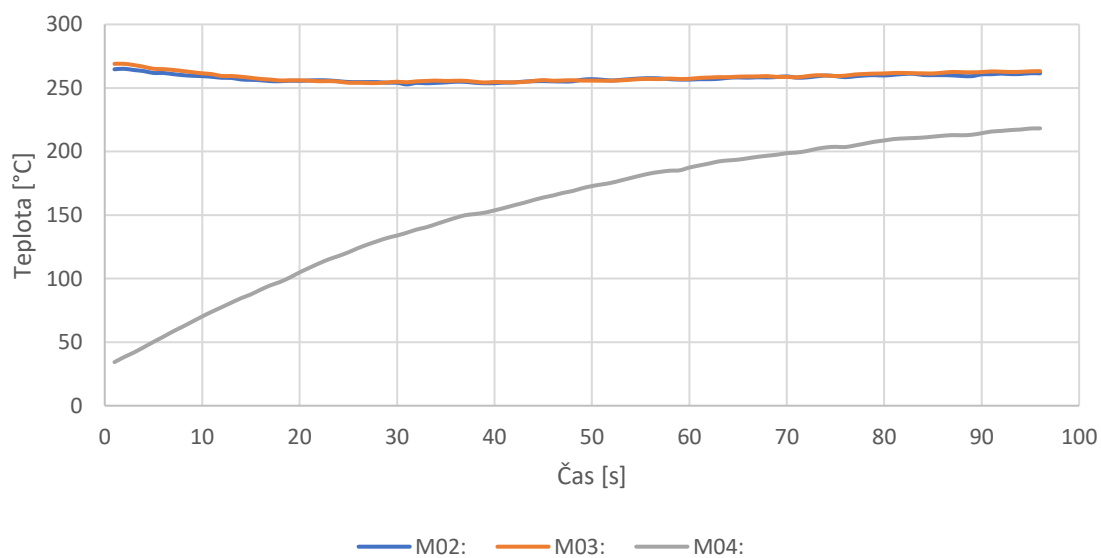
Graf 11 - Pájka 2\_Vzorek 3

## 2. Pájka - 4. Vzorek



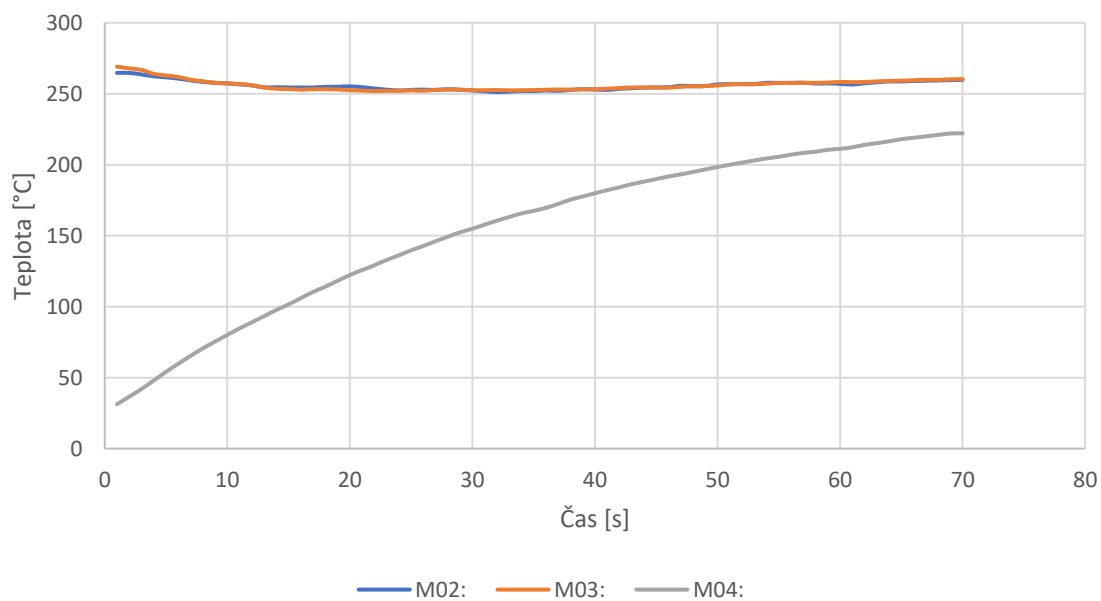
Graf 12 - Pájka 2\_Vzorek 4

### 3. Pájka - 1. Vzorek



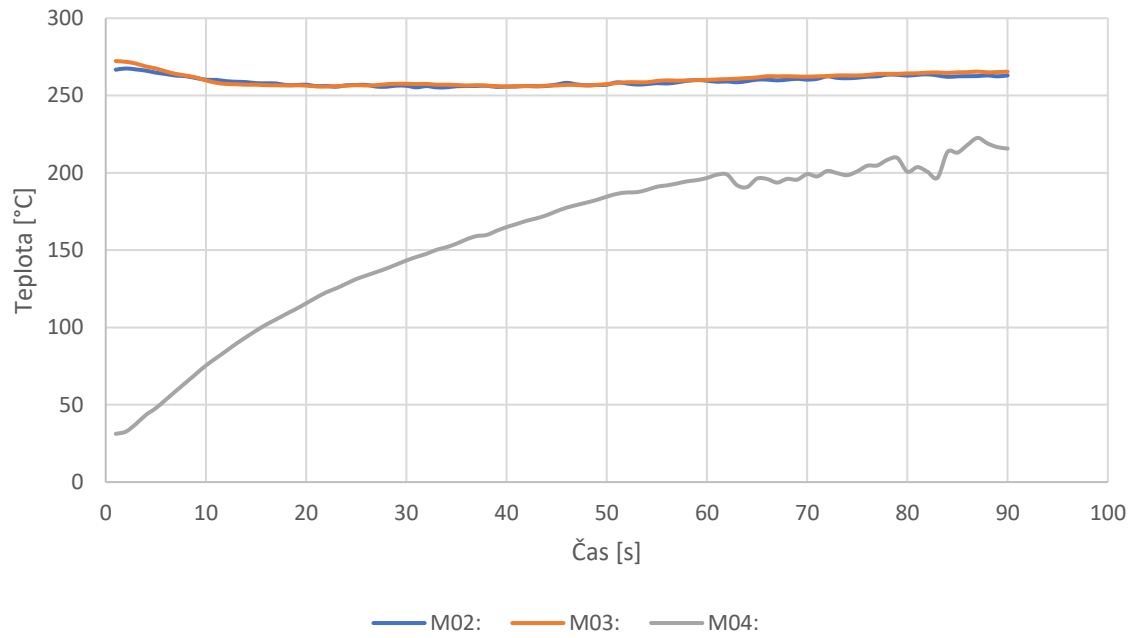
Graf 13 - Pájka 3\_Vzorek 1

### 3. Pájka - 2. Vzorek



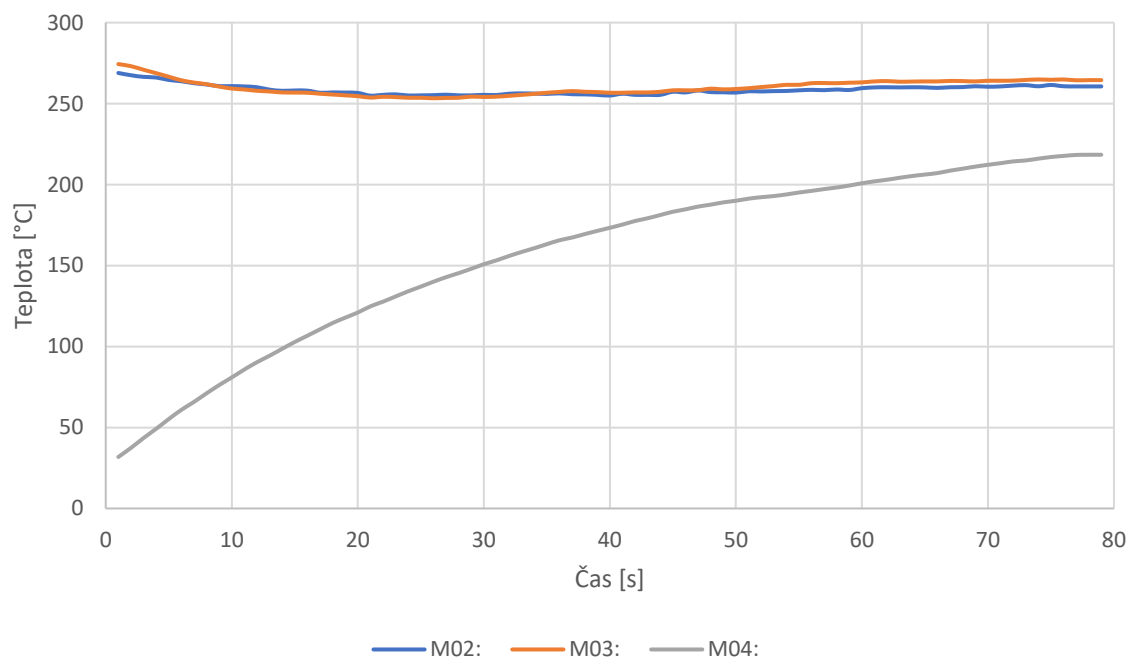
Graf 14 - Pájka 3\_Vzorek 2

### 3. Pájka - 3. Vzorek



Graf 15 - Pájka 3\_ Vzorek 3

### 3. Pájka - 4. Vzorek



Graf 16 - Pájka 3\_ Vzorek 4